



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

全球气候变化影响下
建筑能耗模拟用天气参数预测研究

姓名：朱明亚

学号：1020030138

所在院系：机械与能源工程

学科门类：土木工程

学科专业：供热、供燃气、通风及空调工程

指导教师：潘毅群

二〇一三年六月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to
Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Doctor of Philosophy

**Prediction of Future Weather Data Used in
Building Energy Simulation under
Global Climate Change**

Candidate: Mingya Zhu
Student Number: 1020030138
School/Department: College of Mechanical Engineering
Discipline: Civil Engineering
Major: Heating, Gas Supplying, Ventilation
and Air Conditioning Engineering
Supervisor: Prof. Yiqun Pan

June, 2013

全球气候变化影响下建筑能耗模拟用天气参数预测研究

朱明亚

同济大学

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘要

20 世纪的气候变暖引发了人们对于气候变化问题的关注,从 1979 年世界气候大会召开至今的 20 余年里,随着气候变化问题的研究不断深入,涉及到的学科领域越来越广泛,气候变化研究中出现了诸多争议,全球气候变化的归因至今无法得到令人信服的科学论断。在全球共同应对气候变化的历程中,与能源、经济之间的紧密联系使得气候变化问题从一个科学问题上升到了世界和平与国家安全问题。在充满了国际政治较量和利益博弈的气候外交中,发达国家和发展中国家对温室气体排放空间和发展权益的争夺战愈演愈烈。中国作为温室气体排放大国,正承受着气候外交、经济发展需求、资源紧缺和环境恶化的多重重压,对气候变化影响下自身能源需求和碳排放空间需求的正确预估则是我国成功应对巨大国际减排压力的重要基础。在众多能源消费行业中,建筑业在社会能源节约和节能减排中占据重要地位,气候变化条件下的建筑能源需求预测对于城市能源规划、能源政策的制定、城市发展战略以及建筑节能都有着重要的参考价值。

随着建筑模拟技术的发展趋于成熟,建筑能耗模拟软件成为了建筑能源需求预测的重要工具。然而目前应用于能耗模拟的逐时天气输入参数是在历史观测气候条件下生成的典型气象年(TMY)。因此,建立未来气候变化条件下的能耗模拟用天气参数则成为了利用建筑模拟工具进行建筑能源需求预测的首要条件。

鉴于已有气候变化预测方法在能耗模拟用未来天气参数的预测上存在空间尺度和时间尺度上的局限性,基于进入全新世以来中国区域长期历史气候变化的规律性研究和时间序列方法在气象学中的应用,本文提出了基于气候变化周期性分析的时间序列预测方法。在上海 1961~2010 年月平均温度观测数据的基础上,根据中国东部近百年和近千年气候变化的周期性分析,同时考虑未来月际气候不确定性的三种变化情景,建立时间序列预测模型,进行上海地区未来 100 年月平均温度变化预测。为了使气候变化预测结果能够用于建筑能耗模拟工具进行建筑能源需求预测,本文采用时间序列调整方法 - Morphing 对未来月平均温度进行降尺度处理。将预测的气候变化与上海地区现有典型气象年(TMY)相结合,考虑未来日间波动的三种变化情景分别与月际气候不确定性的情景叠加,生成不同情景下未来 100 年里 2000-2017、2018-2035、2036-2053、2054-2071 和 2072-2089 年这 5 个时段的典型气象年(TMY)逐时天气参数,并将未来典型气象年(TMY)用于上海地区办公、酒店和商场这 3 种建筑类型的典型模型(Prototypical Building Models),预测未来 100 年气候变化影响下的上海地区建筑能源需求变化。旨在为当地长期城市规划、能源的开发和利用、建筑节能技术的应用、建筑节能标准的

制定以及气候变化的应对等提供科学依据和技术支持。

关键词：气候变化，气候周期性，时间序列分析，典型气象年，能耗模拟

ABSTRACT

Global warming in 20th century has arised world concerns to climate change issues. Since the 1st United Nations World Climate Conference in 1979, research on climate change constantly goes deeper and has ranged a variety of domains but brought about a lot of controversy. So far no convincing scientific judgment can explain the causes of global climate change. The close connection of climate change to energy and economy makes it become a matter of world peace and national security in the course of global response to climate change. The struggle for the space of greenhouse gas emissions and the right of development between the developed and developing nations is becoming increasingly fierce in climate diplomacy, which is full of political contest and profit games. As one of the top greenhouse gas emitters, China is confronted with the pressure of climate diplomacy, economy development needs, resource shortage and environmental deterioration. In this case, correct estimate of own energy demand and carbon emission under climate change is an important foundation of successful response to huge international stress for China. Among numerous energy-consuming industries, building industry plays an important role in social energy conservation and carbon emission reduction. Prediction of building energy demand under climate change is greatly significant to the urban energy planning, energy policy formulation, unban development strategy and building energy saving.

With the development of building simulation technology, building energy simulation program has become an important tool for building energy demand prediction, which normally uses Typical Meteorological Year (TMY) weather data generated from historical observed weather condition as hourly weather input data. Future hourly weather data is the prerequisite for building energy demand prediction under climate change taking advantage of building simulation technology.

For prediction of future weather data used in building simulation, present forecasting methods of climate change significantly have spatial and temporal limitation. Based on research of climate change regularity in China region from the beginning of Holocene and the application of Time Series Method (TSM) in meteorology, this thesis puts forward a new forecasting method, which combines the periodicity presented in historically long-term climate change with TSM. With

observed monthly mean temperature from 1961 to 2010 in Shanghai, time series predicting models are developed by periodicity analysis of long-term climate change and various future monthly temperature uncertainty scenarios, and are used to predict monthly temperature in by 2089 in Shanghai. In order to apply the monthly predicted temperature to building simulation, the thesis utilizes a time series adjustment method named Morphing to downscale the monthly prediction to hourly weather data based on present local hourly TMY so as to generate future TMYs. The thesis sets up various scenarios in the process of future TMYs' generation, considering both daily temperature range and monthly temperature uncertainty. For each scenario, five future TMYs separately in the period of 2000~2017, 2018~2035, 2036~2053, 2054~2071 and 2072~2089 are generated. These future TMYs are taken as future weather input data of prototypical building models in Shanghai for regional building energy demand prediction under climate change in 21th century. The prototypical building models include three building types – office building, hotel and shopping mall. The prediction of climate change effect on building energy demand is intend to provide the scientific basis and technical support for urban planning, energy development and utilization, application of building energy efficiency technology, formulation of building energy saving standards and strategies to cope with climate change.

Key Words: climate change, climate periodicity, time series analysis, Typical Meteorological Year, energy simulation

目录

摘要	I
ABSTRACT	III
第一章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 全球气候变化	1
1.2.1 气候变化问题的研究历程	1
1.2.2 气候变化之争	2
1.2.3 气候变化问题的国际政治因素	8
1.3 气候变化对建筑能源需求的影响	9
1.3.1 建筑能源需求变化研究现状	10
1.3.2 建筑能源需求预测方法	10
第二章 建筑能耗模拟用未来天气参数预测方法研究	19
2.1 气候变化预测研究现状	19
2.1.1 基于排放情景的气候变化模拟预估	19
2.1.2 基于地球系统科学和气象学的气候变化统计学预估	29
2.2 中国区域百年至千年以上尺度气候变化分析	30
2.2.1 近百年气候变化分析	30
2.2.2 千年及以上尺度气候变化的气象学分析	33
2.3 时间序列分析方法	38
2.3.1 随机变量与时间序列	38
2.3.2 从气象学的角度理解时间序列分析方法	39
2.4 基于气候变化周期性分析的时间序列预测方法	42
2.4.1 已有预测方法的局限性	42
2.4.2 本文提出的预测方法和技术路线	43
2.5 月际天气参数的降尺度方法	48
2.5.1 降尺度方法	48
2.5.2 月平均温度和露点温度的降尺度处理方法	50
第三章 上海未来天气参数预测	53
3.1 上海未来月平均温度预测	53
3.1.1 月平均温度时间序列分析	54
3.1.2 月平均温度时间序列预测模型的情景设定	63
3.1.3 不同情景下月平均温度预测	64
3.2 上海未来典型气象年 (TMY) 生成	65

3.2.1 未来 TMY 生成时间段划分.....	65
3.2.2 未来 TMY 生成的情景设定.....	66
3.2.3 未来 TMY 变化分析.....	68
第四章 采用未来典型气象年的建筑能源需求预测	73
4.1 上海地区典型建筑模型.....	73
4.2 上海未来 TMY 用于典型建筑能耗模拟结果分析.....	74
第五章 总结与展望	79
5.1 总结与结论.....	79
5.2 不足之处和展望.....	80
致谢	82
参考文献	83
附录 A 上海月平均温度观测数据.....	90
附录 B 上海月平均温度预测结果.....	93
附录 C 上海典型气象年时段温度和度日数变化.....	95
附录 D 上海典型建筑能源需求变化	96
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果	98

第一章 绪论

1.1 概述

20 世纪以来的全球变暖毋庸置疑，这一观点得到了大多数科学家的认可。目前来看，20 世纪的变暖在 1920 年代率先出现在北大西洋及其邻近地区（主要限于高纬地区），1940 年代扩展到北半球，而南半球并没有普遍变暖的迹象，此次变暖大约延续到 1950 年代结束，随后 1950 年代到 1970 年代全球温度明显回落，大约从 1970 年代末开始，全球温度持续上升。气候变化已在世界范围内备受瞩目，20 世纪的变暖已经对于人们赖以生存的地球环境产生了可怕的影响，如海平面上升，极端天气频发，生态失衡，粮食生产力下降，水资源紧缺和疾病增加等，人们开始重新审视自然，审视历史，审视人类活动，希望通过深入的了解和认识气候变化，积极应对气候变化对环境、社会和经济带来的影响。

从 1979 年世界气候大会召开至今，人类对气候变化问题的研究已经经历了 20 多年，随着研究的深入，气候变化所涉及的学科领域和争议也越来越多，气候变化与能源、社会经济的紧密联系使得全球共同应对气候变化的气候谈判中充斥着国际政治较量和经济竞争，气候变化从一个自然现象和环境问题上上升到了事关世界和平与安全的高度。

面对纷繁复杂的国际气候政治格局，作为温室气体排放大国，中国承受着气候外交、发展需求、资源紧缺和环境恶化的多重重压，必须在积极配合国际气候应对的同时，最大限度的争取发展权和排放空间。成功谈判的前提是认清自身，对气候变化影响下本国经济发展进程中能源需求和碳排放空间需求的正确预估则是我国应对巨大国际减排压力的重要基础。

1.2 全球气候变化

1.2.1 气候变化问题的研究历程

人类对于气候变化问题的深入研究始于对可持续生存环境的认识。1988 年底，第 43 届联合国大会通过了为人类当代和后代保护全球气候的决议^[1]。此前于 1979 年世界气候大会召开后，人们逐渐认识到气候变化及其应对是一个全球性的问题，在联合国大会召开前夕由世界气象组织（WMO）与联合国环境规划

署 (UNEP) 共同组建了政府间气候变化专门委员会 (IPCC), 旨在研究全球气候变化及其对环境与社会经济可能产生的影响。1990 年至今, IPCC 先后 4 次发布了气候变化综合评估报告, 报告的目的是评估当前温室气体的排放和气候变化, 同时预测未来温室气体的浓度和气候变化, 针对可能造成的影响提出适应和减缓方案。在这期间, 多次国际会议的举办促成了气候变化的国际应对机制。1990 年签署的《京都议定书》中规定了全球主要工业国家相对于 1990 年温室气体排放水平的承诺减排量, 《议定书》于 2005 年正式生效, 这是人类历史上第一次以法律形式限制温室气体排放, 但履约形势十分严峻。2009 年召开的哥本哈根会议才挽回了濒临破裂的谈判, 确定了将全球温升控制在 2°C 以内的减排目标^[1]。然而, 各国在气候变化的高压之下, 减排效果不容乐观。在 2012 年多哈大会召开前夕, WMO 和 UNEP 指出, 2011 年全球温室气体排放量已经比限制在 2°C 阈值的要求下预估的 2020 年水平高 14%, 无疑对多哈大会造成了巨大的压力, 最终大会重申了《议定书》的第二承诺期为 2013~2020 年, 并要求各国最迟到 2014 年重新确定第二承诺期的减排量, 以及 2°C 阈值的目标^[1]。

1.2.2 气候变化之争

随着气候变化的影响逐渐深入社会、经济、生态与环境等多个领域, 《联合国气候变化框架公约》缔约方大会的召开和政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的研究也受到了越来越广泛的关注。

为了减缓气候变暖, 逐步削减温室气体的排放已经成为大多数科学家及政府机构的共识^[2]。然而, 由于气候变化这一全球性问题涉及到多学科领域的多方面研究, 目前科学界存在诸多争议, 出现了许多不同的科学论点, 其中相当一部分是建立在对 IPCC 研究成果的质疑和讨论之上的, 对主流的科学论断提出了挑战。在 2007 年 4 月, 美国非政府间国际气候变化专门委员会 (NIPCC) 正式成立, 此前该组织被称为 “Team B”, 由来自世界各国与 IPCC 持有不同观点的科学家组成, 旨在独立于 IPCC 进行气候变化的研究工作。2008 年 4 月, NIPCC 发布了名为《Nature, Not Human Activity, Rules the Climate》的决策者摘要, 美国国家海洋大气顾问委员会 (NACOA) 前副主席 S. Fred Singer 担任摘要主编。2009 年 6 月, NIPCC 发布了第一份完整的研究报告, 名为《Climate Change Reconsidered》, 认为 “目前没有令人信服的科学证据显示人类活动产生的 CO_2 、 CH_4 和其他温室气体导致了或在可预见的未来会造成大气层和全球气候的灾难性变暖”。

1. 针对气候变化原因的争论 – 人类活动? 自然变率?

目前来看, IPCC 和 NIPCC 的主要分歧在于气候变化的主要影响因素是由自

然气候变率还是人类活动。

IPCC 早在第一次评估报告 (FAR) [3] 中指出观测的气候变化与温室效应的模拟结果大体一致, 在随后 3 次发布的评估报告 (SAR^[4]、TAR^[5]和 AR4^[6]) 中对于“气候变暖主要是由人类活动产生温室气体增加造成的”这一观点的确定性逐渐提高。NIPCC 则认为太阳活动能够解释 20 世纪之前的气候变化和千年尺度气候振荡, 自然变率才是气候变化的主导因素。

IPCC 认为气候系统的能量平衡受大气中温室气体和气溶胶浓度、地表覆盖率以及太阳辐射的变化所影响, 这四个方面的变化会影响大气和地表对辐射的吸收、散射和漫射, 使能量平衡产生正或负的变化, 从而成为驱动因子对气候产生变暖或变冷的影响, 采用辐射强迫 (Radiation Forcing) 来衡量驱动因子对气候变化的影响程度。对于近百年的气候变暖, IPCC 认为人类活动是主要原因之一。观测表明, 在 20 世纪, 气候变暖与温室气体大幅增加都有明显的迹象。在气候变化的归因分析中, IPCC 将气候系统可能受到的外部强迫分为自然强迫和人为强迫, 其中自然强迫包括太阳变化和火山喷发, 人为强迫则包括人为改变大气成分 (如温室气体和气溶胶) 和土地利用变化。太阳辐射强迫的估计值为 $+0.12\text{W/m}^2$ 。火山爆发会显著增加平流层硫酸盐气溶胶的浓度, 对气候产生冷却效应。在人为驱动因子中, 温室气体 (GHG) 造成的辐射强迫最大, 其中主要的辐射强迫项是长生命周期温室气体 (LLGHGs)。气溶胶的直接和间接影响的辐射强迫均是负的, 较小。相对而言, 地表反射率变化产生的辐射强迫量最小。如图 1.1 是 AR4 中, 相对于 1750 年, 2005 年的 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 和其他重要成分和机制的全球平均辐射强迫 (最佳估计和区间)、各强迫的典型地理范围和经评估的科学认知水平 (LOSU)。同时, 采用大气环流模式 (GCM) 模拟结果与观测全球平均地面温度变化对比, 如图 1.2, a) 和 b) 均表示相对 1901~1950 年的全球平均温度距平, 黑色实线是观测值, a) 图是使用人为强迫和自然强迫进行 GCM 模拟结果, 红色粗曲线表示多模式集合平均, 黄色细曲线是单独的模式模拟结果, b) 图是仅考虑自然强迫的 GCM 模拟结果, 蓝色粗曲线表示多模式集合平均, 浅蓝色细曲线为单独模式的模拟结果。从而得出结论: 对于已观测到的大气和海洋大范围变暖, 在此期间, 太阳和火山强迫之和可能产生了变冷而非变暖, 如果不考虑人为强迫, 解释过去 50 年的全球气候变化是极不可能的。

目前无论科学界、政府间以及公众媒体, 主流是支持 IPCC 的观点。但 IPCC 在许多研究环节存在关键的不确定性。NIPCC 则认为 IPCC 对于气候变化及其归因具有一定的倾向性, 证据不够充分, 同时回避和忽略了一些持有不同观点的科学研究。客观来说, NIPCC 的研究报告言辞上有一定的攻击性, 但不能因此否认其科学性, 在 NIPCC 的报告中针对 IPCC 多个研究环节引用不同立场的科学

研究成果，提出了质疑。同时，气候变化研究中的关键问题在气象学、地球物理等领域同样存在争议，这些关键问题对于气候变化研究往往会造成颠覆性的重大影响，作者对气候变化的认识和归因相关的讨论加以整理，从而作为进一步探讨的研究基础。

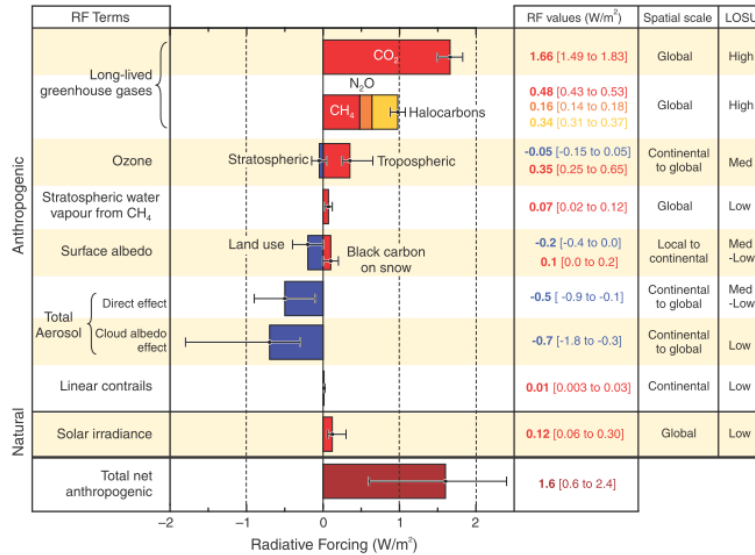


图 1.1 辐射强迫的构成分析^[6]

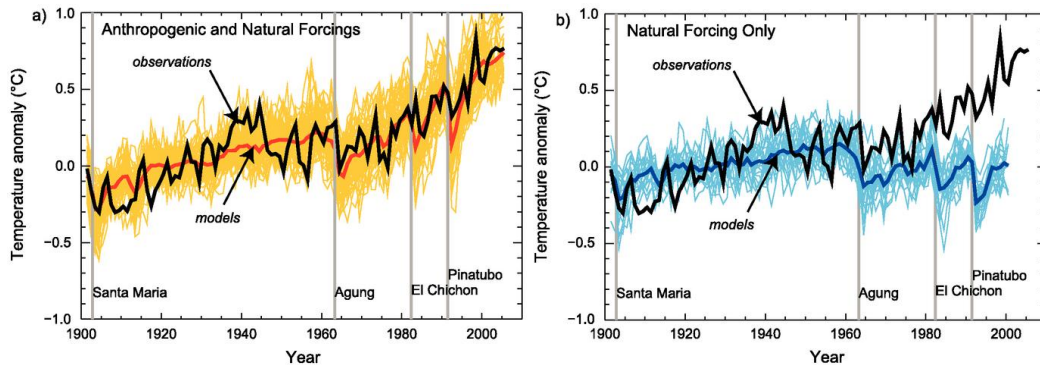


图 1.2 气候变化归因的 GCM 模拟分析^[6]

1) 20 世纪变暖幅度是否为近千年最大的

IPCC 在 TAR 中指出：“在过去 1000 年中，20 世纪北半球表面温度增暖可能比其他任何一个世纪都快，90 年代可能是过去 1000 年以来最热的十年。”这一观点的主要依据是 Mann 等^[7]建立的近千年北半球平均温度曲线，从中反映出很有可能近千年来最大幅度的变暖发生在 20 世纪。该曲线中未体现出中世纪暖期 (Medieval Warm Period, MWP) 和小冰期 (Little Ice Age, LIA) 的存在。MWP 最早由英国学者 Lamb 提出，是指在 900~1300 年发生在欧洲及北大西洋临近地区不低于 20 世纪中期变暖程度的气候阶段。MWP 存在与否的争论会直接影响人们对 20 世纪气候变暖是源于气候自然波动还是人类活动温室气体排放的评估。大约 15 世纪初开始全球气候进入一个寒冷时期，称为 LIA，Lamb 最早指

出 LIA 发生在 1550~1850 年^[8]。一些学者^[9]否决 MWP 和 LIA 的理由是 MWP 和 LIA 的存在与否在不同地区差异很大, 不适于全球尺度上的气候研究。2009 年, Mann 等^[10]对其研究进行了修改, 在其发表的新北半球平均温度曲线中认可了 MWP 和 LIA 的存在, 并承认某些区域 MWP 的温暖程度可能超过了 20 世纪末。王绍武等^[11]指出此番争议起初是从对 20 世纪变暖的评估开始的, 但是, 争论结果却在一定程度上承认了自然变率在年代际或百年尺度上的重要性, 而并没有对 20 世纪变暖的成因做出判断。

2) 温室效应机制是否无懈可击

目前人们对温室效应的理解是: 太阳短波辐射可以透过大气射入地面, 而地面增暖后放出的长波辐射被大气中的温室气体吸收, 这些温室气体在大气吸收地面长波辐射的同时, 向地球表面的辐射, 从而使地球表面的温度能保持在 15℃, 如果大气层不存在, 则地表平均温度为-18℃, 这就是温室气体对地面温度的调节作用, 即“自然温室效应”; 工业革命以来, 人类活动排放的温室气体浓度增加, 导致大气吸收更多的长波辐射, 从而使地面对流层系统温度升高, 这就是“增强的温室效应”^[9]。然而, 一些学者在古气候研究中发现了与温室效应理论不相吻合的现象。龚道溢^[12]在研究了以往多个冰期的 CO₂ 观测与全球温度变化^{[13]~[16]}后指出, 在最后盛冰期向全新世过渡期期间, 温度和 CO₂ 浓度都有显著升高, 但 CO₂ 的变化要落后于温度的变化约 800 年, 可能意味着 CO₂ 不一定是气候变化的绝对驱动因子。Fisher 等对于最近 3 次大冰期结束后的研究发现了类似的情况, 即在大冰期结束后, 全球温度的上升超前于 CO₂ 的增加, 同时冰期开始时 CO₂ 的减少落后于温度的下降数千年。从近百年观测数据来看, 也存在大气温室气体浓度与气温变化趋势不一致的情况。葛全胜^[9]通过对比 1880~2008 年全球平均温度和全球温室气体排放量变化发现 20 世纪温室气体排放量的变化与全球温度变化并不完全一致, 甚至在某些时段呈现显著不一致, 这些不能支持温室气体增加导致全球气温升高的认识。

3) 气候模式是否权威

IPCC 采用的气候模式 (Climate Model) 本身和模拟结果的准确性存在很大争议。气候模式是建立在气候系统各部分的物理、化学和生物学特性及其相互作用和反馈过程的基础上, 解释其全部或部分特性的数值描述^[6]。

葛全胜^[9]认为目前人类对于气候系统中各种物理、化学和生物过程的参数化的认识存在较大不确定性, 气候模式对地球的辐射能量平衡、云和降水的模拟存在很大缺陷。王绍武等^[11]指出, 气候模式模拟结果在 1960 年之前的模拟有较大缺陷, 如 1910 年前后的温度谷值、1940s 的峰值以及 1950s 的 2 次明显谷值在模拟结果中都未能体现。

大气中水汽 (Water Vapor) 产生的气候反馈是正是负, 还不明确。IPCC 认为“人类活动产生水汽的直接排放对辐射强迫的贡献微不足道。但是, 由于全球平均温度升高, 对流层中水汽含量增加, 这是一个关键的正反馈。” NIPCC 指出气候模式未准确描述水汽的分布情况, 认为分布于对流层顶的水汽对地表温度具有重要的影响, 而且产生负反馈, 即水汽含量增加会产生冷却效应。但 Santer 等^[17]在 2007 年根据大气湿度的观测资料指出 1988 年以来大气中水汽含量呈上升趋势, 说明水汽呈现正反馈。Wild^[18]认为气候模式高估了地面接收的太阳辐射, 平均比观测值高 9W/m^2 , 是模式预测的温室气体产生辐射强迫的若干倍, 一定程度上说明气候模式对于太阳辐射在地面和空间的分布计算上存在不确定性。

IPCC 认为“温度变化随高度及地理位置的分布与 CO_2 加倍的模式模拟结果一致, 说明气候变暖是人类活动造成的”, NIPCC 则认为模式模拟的分布与观测结果并不一致, “所有的模式均表明大气中 CO_2 浓度加倍时升温最高的层次在 10km, 应该是地面升温值的两倍。但是根据美国气候变化科学计划 (CCSP) 的资料, 对流层温度上升不如地面温度上升激烈^[18]。” Allen 和 Thorne 等^{[19]~[20]}认为是由于热带地区观测质量较差所致, 对数据进行了修订并对观测的温度梯度进行校正, 结果显示模拟结果与观测结果的差别缩小了, 但仍不一致。

NIPCC 认为 GCM 中未考虑实际各辐射强迫的地理分布不均匀性和平流层水汽增加以及臭氧消耗带来的影响, 在地球两极的模型预测结果不准确。龚道溢等^[12]指出, 如果温室气体增加造成全球温度变暖, 在高纬度地区将最为突出, 尤其是北极地区。但多个观测资料^{[21]~[23]}显示, 北半球高纬度地区 $55\sim 85\text{N}$ 的温度上升趋势在 20 世纪 20~40s 期间比 70s 以来更强烈, 20 世纪末只是与 30s 温度水平相当, $70\sim 85\text{N}$ 观测台资料显示, 从 40 年代开始北极温度一直在下降, 在 80~90s 初, 温度也没有很明显的变暖趋势。如果包括更低纬度的地区 (55N), 在 20 世纪末的 30 年出现约 1.5C 的变暖。温度的上升更主要的是中纬度地区而不是北极。而中纬度 (尤其亚欧大陆地区) 的地面温度与大气环流有非常密切的关系^{[24]~[26]}, 其温度的明显改变不一定完全反映温室效应的结果。

4) 太阳活动对气候变化的影响是否不显著

IPCC 对自然变率的分析基于对太阳总辐射照度 (TSI) 的变化研究, 太阳活动周期的变化中太阳辐射照度存在 0.08% 的变化, 长期趋势不显著。2007 年, WGI 指出“尽管受太阳活动的宇宙辐射与全球平均的低层云盖之间的经验关系已经被揭示, 但是系统的、间接的太阳影响的证据仍是不明确的。” NIPCC 则认为太阳活动对气候的影响较大, 同时提出了“现代变暖主要是自然原因造成的”这一观点。NIPCC 引用了 Neff 等采用热带辐合带表征银河宇宙线 (GCR) 的 C^{14} 变化与表征气候参数的 O^{18} 变化对比结果, GCR 的密度能够反映太阳风及其磁场强

度, 认为太阳活动与气候变化的一致相关性非常明显。2007 年, Kikby 等^[27]发现中世纪暖期 (MWP) 时 GCR 弱, 太阳活动增强, 而小冰期 (LIA) 时 GCR 强, 太阳活动减弱, 反映了地球气候与 GCR 代表的太阳活动有密切关系。2001 年, Bond 等^[28]发现全新世 9 次冷事件均与太阳活动的谷值 (GCR 峰值) 对应, 表明太阳活动减弱可能是冷事件形成的原因。NIPCC 认为太阳活动变化可以解释 1940 年前的变暖和随后的变冷、中世纪暖期和小冰期的存在乃至千年尺度的气候振荡。蒙德极小期 (太阳活动的极小期之一, Maunder Minimum, 1645-1715) 与小冰期 (LIA) 存在时间重叠, Haigh^[29]认为蒙德极小期时的太阳辐照度比现代低了 $3.4\text{W}/\text{m}^2$, 但 AR4 中仅低了 $1\text{W}/\text{m}^2$ 。王绍武^[11]通过对太阳活动影响的相关研究进行综合分析后认为, 太阳活动在气候变化中的作用是不容忽视的, 但太阳活动对气候变化的影响机制还有待于进一步研究。

2. 针对气候预测的争论—变暖加速? 还是减缓? 甚至变冷?

20 世纪以来的气候变暖是否停滞甚至变冷, 这一问题的争议源于在 2001 年 IPCC 发布第三次评估报告 (TAR) 之后近 10 年来的气候观测数据研究, 在这 10 年里还经历了第四次评估报告 (AR4) 的发布。

IPCC 在 TAR 中根据 SRES 排放情景预测全球平均地面气温在 1990~2100 年期间将升高 $1.4\sim 5.8\text{ }^\circ\text{C}$, 所预测的温度升高幅度比第二次评估报告 (SAR) 中基于 IS92 情景的温度升高 $1.0\sim 3.5\text{ }^\circ\text{C}$ 的范围更大。至第四次评估报告 (AR4) 中预计: “至 21 世纪末 (2090-2099 年), 与 1980-1999 年时段相比, 全球平均地表温度增幅的最佳估计为 $1.8\sim 4.0\text{ }^\circ\text{C}$ 不等, 可能的范围是 $1.1\sim 6.4\text{ }^\circ\text{C}$, 预计未来 20 年将以每十年增加约 $0.2\text{ }^\circ\text{C}$ 的速率变暖。” 如图 1.3, 红色、绿色和蓝色实线表示在 SRES 中 A2、A1B 和 B1 情景下相对于 1980~1999 年多模式地表增温的全球平均值, 是 20 世纪模拟结果的延续, 最下面一条枚红色实线表示稳定在 2000 年浓度值的模拟试验结果, 右侧条块表示最佳估计 (条块中的实线) 和与 1980~1999 年相比, 2090~2099 年在 6 个 SRES 标志情景下评估的可能性范围。SRES 情景见第 2 章 2.2.1 节。

然而, 2009 年 8 月 Knight 指出, 根据 HadCRUT3 资料, 1998~2008 年全球平均温度增量为 $0.07\pm 0.07\text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$, 明显低于 1979~2005 年的全球平均温度增量 ($0.18\text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$) 和 IPCC 在 AR4 中预估的全球变暖速率 ($0.2\text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$)。IPCC 在 2009 年 11 月发表的《哥本哈根诊断 (The Copenhagen Diagnosis)》中采用美国国家航空航天管理局戈达德空间研究所 (NASA GISS) 的全球平均温度序列, 得出 1999~2008 年温度变率为 $0.19\text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$, 但首次指出年代际尺度上自然原因造成的变冷可能超过温室效应的影响。2009 年 Kerr 发表评论《What happened to global warming? Scientists say just wait a bit》, 采用的 CO_2 浓度倍增实验结果中出现了多

个 10 年内温度增量很小的情况 ($-0.05 \sim +0.05 \text{ }^{\circ}\text{C}$), 实验中的停滞状况都没有超过 15 年, 认为在变暖趋势中可能出现停滞或略有变冷的时段, 但是很快会恢复变暖。王绍武指出 Kerr 的观点“代表了颇为流行的一种见解”, 但并未对此观点作出判断, 并指出, 从过去 10 年全球温度增量与平均温度看, 即使 1999~2008 年温度增量很小, 但这 10 年平均温度距平为 $0.40 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 高于 1989~1998 年的 $0.22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 1979~1988 年的 $0.07 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 1999~2008 年依然是近 30 年最暖的 10 年。然而, 王绍武指出目前的观测数据及模拟研究都不足以支持或否定全球变暖停滞结论^[11]。

IPCC 对 21 世纪温度变化预测的变化幅度不断增加, 从 SAR 中 $1.0 \sim 3.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 TAR 中 $1.4 \sim 5.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 再到最新 AR4 中 $1.1 \sim 6.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 意味着预测的不确定性更大, 温度变化相差 $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 这个数值几乎是近百年观测温度变化的 10 倍, 大体相当于冰期和间冰期的变化幅度。有学者指出^[12]这里温度变化预测的不确定性主要来源于对气候参数及其变化的低认知水平和对辐射强迫的估计以及参数化处理, 可信度相对较低, 很可能偏高。

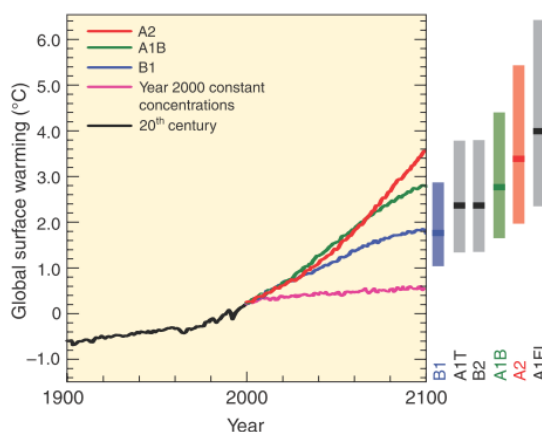


图 1.3 AR4 中 2000~2100 年地表温度预估^[6]

1.2.3 气候变化问题的国际政治因素

全球气候变暖引发的气候变化问题原本是一个自然现象和环境问题, 但由于气候变化问题延伸到社会、经济、政治和国家战略等各个领域, 受到各个国家利益取舍和国际关系制约。随着问题的深入, 逐步演化为气候政治, 发达国家和发展中国家的政治较量和利益博弈趋于常态化和长期化^[30]。气候变化从限于科学家间的争论发展成为国际焦点, 有关气候变化的国际谈判变成对温室气体排放空间和发展权益的争夺^[31]。

气候变化已被联合国列为首要全球性问题^[30], 气候变化的应对是人类必须成功解决的难题, 经过多年气候谈判, 有学者指出当前气候变化政治格局呈现出群雄角逐、中美欧三足鼎立的局面^[32]。中国与美国必然存在互相观望的双边博弈, 哥本哈根会议召开之前, 国际社会已将最大发展中国家和最大发达国家代表

看成是谈判成败的关键^[33]。发达国家“先发展后保护”发展道路给自身争取到了巨大的经济和技术优势，发展中国家则压力巨大。“气候门”、“冰川门”^[34]相继出现，主流气候变化说法的科学性和权威性遭到质疑。

在错综复杂的国际气候政治格局中，发展中国家应该何去何从？作为以煤炭生产和消费为主导的能源需求和能源供应大国^[33]，中国又该如何应对？中国科学院副院长、院士丁仲礼在分析全球气候变化趋势后指出“气候变化是一个波动的过程，气候有它自然波动的规律，人类活动排放 CO₂ 引起的增暖不足以改变气候自然变化的规律，温室效应的影响有很大程度的夸大”，并指出“排放权实质就是发展权，中国要改变被动地局面，争取话语权”。

1.3 气候变化对建筑能源需求的影响

人类已经进入了“能源气候时代”，气候与能源已然成为 21 世纪首当其冲的两大全球性问题。国际能源机构(IEA)预测：全球对一次能源的需求在 2006—2030 年将增加 45%，到 2030 年时化石燃料还将占初级能源的 80%，石油仍然是主要燃料，对煤和天然气的需求也是有增无减^[35]。在经济快速发展的推动下，世界面临着巨大的能源需求压力，同时出现的气候变化和环境问题又将能源的开发利用推至一个尴尬的境地，人们必须在环境问题和能源紧缺的夹缝中求生存、求发展。

如今科学界主流的观点认为，近几十年人类无限度、大规模的使用石油、煤炭、天然气等化石能源是 20 世纪的气候变化的主要原因，这一观点目前还存在质疑和争议，然而，不容否认，气候变化与能源问题存在着紧密的联系。中国能源网首席信息官韩晓平^[34]在分析了气候变化问题的争议之后指出，“无论气候变暖还是变冷，中国都面临着能源资源和节能减排的巨大压力。解决问题的关键是能源结构的调整和能源技术的进步，通过高效供能和终端节能提高能源利用效率。”在“九五”期间，我国能源发展顺应世界能源格局，消费构成中的煤炭下降，石油上升，优质能源（天然气和水电）消费比重增加，能源结构得到了一定的优化，然而这样的能源生产结构与我国能源资源的分布并不适应，导致石油供不应求的结构性矛盾，存在很大的石油缺口，每年近 1 亿 t 左右的石油进口需求暗藏着国家能源安全问题^[36]。可见，我国运用市场经济机制进一步优化能源结构将是一个漫长而复杂的过程。在此期间，气候变化的共识必然会对能源资源的开发和利用产生重要影响，而人类在短期内无法找到规模化的低碳能源来取代化石能源，从能源利用的源头 - 能源消费者来合理控制能源需求将会成为应对气候变化的主要路径。不同的经济发展道路和政策取向对能源需求有着显著的影响，

研究全球气候变化趋势对人类的生存与发展及国家能源政策具有重大意义。人们必须认清在气候变化背景下能源的需求压力，这是解决能源危机的重要前提。

1.3.1 建筑能源需求变化研究现状

2009年，我国在哥本哈根国际气候峰会上确定的减排目标是：至2020年，全国单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40~45%。IPCC在AR4中预计，到2030年，在世界各国的行业发展中，建筑业对于减缓全球温室气体排放的经济潜力均显著高于其他行业。经济减缓潜力是考虑了社会成本、效益和社会贴现率的相对于排放基准线所能够实现温室气体减排的规模评估。龙惟定^[37]指出建筑能耗在总能耗中的比例是经济发展的晴雨表，是经济结构和人民生活水平的标志，从宏观经济角度来看，建筑能耗的比例越大，说明第三产业在国民经济中占有较大比重，生产有较大的附加值，也说明人们的生活水平较高，经济发展是合理的和健康的。在发达国家，建筑耗能、交通（汽车）耗能和工业耗能在其总耗能中各占三分之一左右^[38]。我国建筑能耗（终端使用能耗）目前占总能耗的比例平均值为19.8%，建筑耗能引起的CO₂排放也占总排放量的19~20%，其中暖通空调的贡献率约在15%以上^[39]。气候变化会改变建筑采暖和降温的能源需求，势必会影响温室气体以及污染物的排放。我国建筑用能还处在很低的水平，随着城市化水平和建筑舒适性要求的提高，能耗增长潜力大，趋势也很明显，如此，建筑能耗在社会总能耗中的比例势必日趋提高^[37]。

当节能减排已然成为国家责任时，建筑节能更是行业发展的重中之重。面对全球气候变化，建筑行业需要认清行业现状，冷静应对的前提则是正确估计建筑能源需求的发展趋势，如此才能从长远出发，提出合理的应对策略和发展方针。

1.3.2 建筑能源需求预测方法

21世纪之前，很少有研究涉及到气候变化相关的能源需求预测，在意识到气候变化与能源危机的紧密联系之后，人们渐渐将目光落实到气候变化对城市能源利用可能产生的影响，从而适应和减缓气候变化^[5]。随着建筑能耗占社会总能耗的比例增加，建筑能源需求的预测逐渐成为气候变化研究的重要内容。

1. 统计学方法

最初的能源需求预测大多采用统计学方法，建立气象参数与能源需求之间的统计关系，基于气候变化预测能源需求的变化趋势。常用的统计学方法是回归分析（Regression Analysis）。回归分析（RA）是对具有因果关系的影响因素（自变量）和预测对象（因变量）所进行的数理统计分析处理，依据自变量和因变量的

历史统计资料进行计算，在此基础上建立回归分析方程，即回归分析预测模型，在相关分析、误差分析和检验后将回归模型用于预测。

Matthias Ruth 和 Ai-Chen Lin^[42]建立了美国 Maryland 供冷/采暖度日数 (CDD/HDD)、能源价格等与住宅和商业建筑的用电量 (1977-2001 年)、天然气用量 (1989-2001 年) 和单位采暖石油用量 (1989-2001 年) 之间的回归模型。从回归模型中可以看出，住宅建筑用能对 HDD/CDD 的变化敏感度高于商业建筑，同时两类建筑用能对于 CDD 的变化敏感度均大于 HDD。根据气候模式在该地区的预测结果，结合当地人口发展趋势，预测至 2025 年 Maryland 处在不同能源价格水平时的建筑用能水平，并建立基准模型，对比分析气候变化造成的用能增量占总用能增量的比例。预测结果显示，气候变化引起建筑天然气用量和采暖用油量降低，但变化较小。与 2000 年之前相比，至 2025 年，住宅建筑用电需求增长幅度较小，在能源价格保持较低的现状时，气候变化引起的耗电量增加在总耗电量增量中所占的比例为 20~24%，当能源价格较高时，同等比例只有不到 3%。然而，与住宅建筑有所不同，商业建筑用电需求大幅增加，其中气候变化因素所占比例不超过 10%，但同比超过住宅建筑 (<3%)，超过 90% 的用电增加是经济发展造成的。

Joseph C. Lam 等^[43]针对香港 1979~2008 年气象观测数据和气候模式在排放情景 (低排放情景 SRES B1 和中排放情景 SRES A1B, IPCC 2001) 下输出预测结果进行主成分分析 (Principal Component Analysis)，建立一个新的综合气候变量 Z 用来反映香港地区在 1979~2100 年近百年的主要气候变化，综合气候变量 Z 中包含了干球温度、湿球温度和总太阳辐射。采用能耗模拟工具 VisualDOE4.1 基于基准时段 (1979~2008 年) 香港办公建筑的普遍情况和建筑能效标准建立典型办公建筑模型，得到基准时段典型办公建筑能耗结果。针对 1979~2005 年建立综合气候变量 Z 和典型办公建筑逐月冷热负荷、逐月建筑能耗之间建立回归模型，将回归模型用在未来 100 年预测在综合气候变量 Z 的影响下办公建筑冷热负荷和建筑用能需求的变化趋势，在低、中排放情景下 2009~2100 年香港办公建筑冷负荷将分别增加 9.1% 和 10.7%，建筑能耗将分别增加 4.3% 和 4.9%，由于当地办公建筑热负荷本身很小，不同排放情景下建筑热负荷减少量均超过了 50%。

在气候变化对某个局部地区或城市范围电力、天然气需求的影响研究中，采用预测模型不同，得出的结论也有差异。总结来看，在较冷地区 (即供热地区) 每升高 1℃，全年用能可减少 2%，而在较热地区能源需求则有相当的增加^[38]。Sailor 等研究得出若月平均气温升高 1℃，将会使美国住宅部分的天然气耗量降低 8.1%；Segal 等研究了伊拉克高峰电力负荷与气候变量的关系，指出气温若升高 4℃，伊拉克平均夏季高峰用电量会增加 10%；Pardo 等指出西班牙电力负荷

有一个明显的趋势，且存在季节变化，度日数在影响同期西班牙电力负荷之外，还对其有滞后影响^[45]。

国内许多关于气候变化对建筑用能需求的影响分析多以度日数为切入点探索中国近 50 年来气候变化对采暖和供冷能耗的影响。利用气象台站多年的历史观测气温数据，分析气候变化对采暖/供冷期、采暖/供冷度日数的影响，基于度日数与能耗较高的线性相关性假设，将度日数变化量/变率作为能耗变化的强度指标，量化气候变化对建筑能源需求的影响程度，并且分析气温距平与度日数变率的相关性，用于建筑能耗评估^{[46]~[50]}。

文远高等^[38]对北方 4 个城市以 1961~1990 年平均情况为基准，分析了 1987~1998 年冬季平均气温、采暖期天数及度日数的变化情况。以度日数变化代表冬季采暖能耗的变化情况，得出了气候变暖在冬季对于这 4 个城市的建筑供热节能率在 2.5%~7.4% 之间。从广州地区 1951~1980 年与 1986~1995 年这两个时期夏季气象参数分析中看出，当地最热月平均气温有增加的趋势，日照率和相对湿度有减少的趋势。室外干球、湿球温度以及太阳照度是影响建筑物空调能耗的主要气象因素，仅采用度日数指标分析的话，不够全面。室外温度对建筑物空调能耗的影响主要通过影响围护结构的传热和新风负荷。由于研究条件的限制，只简单分析了气候变暖对于建筑得热量的影响，认为当考虑气候变暖引起夏季空调室外计算日平均温度升高 1℃ 时，通过围护结构单位面积的逐时传热得热量增加 11~28%。

陈峪等^[47]发现 1998~1999 年度采暖季节北方各地采暖需求都较常年减少，减少量大多在 15%~40% 之间。在分析了北方地区 1961~1998 年冬季温度和采暖度日变率变化之后指出，异常变化显著地影响着采暖能耗的需求。对于整个采暖区来说，最冷的采暖季节能源需求将超过平均需求量的 20% 以上，而超过最暖的采暖季节达 60%。对采暖区各地，在极端冷冬年份，40°N 以北地区采暖需求变率一般不超过平均需求量的 30%，极端暖冬年份采暖需求变率一般都大于极端冷冬年份，而各地差别比较明显。各地最冷、最暖年份的采暖能耗最少相差 36%，最大的可相差 1 倍以上。

度日数方法缺乏考虑建筑对室外环境的响应过程，采用度日数法量化采暖和供冷能耗仅适用于室内温度、内部负荷和建筑性能较稳定的情况^[51]。李明财等^[52]也指出，虽然采暖/制冷度日与建筑能耗有显著线性关系，被认为是最简单可靠的衡量能源需求的指标，然而模拟研究发现单纯从度日数的角度分析建筑能耗未免不够全面和准确，采暖度日确实可以反映办公、商场及居住建筑的热负荷特征，用于分析气候变化对能耗的影响是可行的；但制冷度日不能完全反映办公及商场建筑冷负荷的变化，仅可分别解释冷负荷变化的 64~55%，通过分析能耗与气候

要素的关系发现, 冬季采暖期能耗主要受气温的影响, 而夏季制冷能耗受气温和湿度的共同影响。Scott 等对美国 4 个不同气候区域的研究发现, 度日数模型对于商业建筑供热因全球变暖而减少的能源需求预测值偏高, 而对供冷所需能源的预测值偏低^[38]。

还有一些统计学方法用于建筑能源需求的短期预测, 如人工神经网络 (Artificial Neural Networks) ^{[40]~ [41]}和时间序列分析 (Time Series Analysis) ^[44]方法。许多建筑能耗预测研究中, 采用回归分析和正交试验等方法从建筑负荷、围护结构特性、空调系统形式、冷热源特性等方面分析某地区某种建筑类型的能耗影响因素, 从而建立预测模型。这类研究中对于气候变化的处理环节则较薄弱, 大多注重建筑本身物理特性和负荷特性对能源需求的影响作用, 这也是目前大多数建筑能源需求预测研究的特点。

统计学方法用于建筑能耗的预测时对气象参数变化的处理往往比较简单, 对于气候变化的表征不够全面, 相应预测结果的准确度不高。

2. 基于建筑模拟技术的预测方法

恰逢其时, 建筑能耗模拟软件在建筑行业的应用趋近成熟, 被越来越多的业内人士关注和使用, 尤其是随着建筑设计与功能分布的复杂性越来越高, 建筑能耗模拟已经成为建筑设计中不可或缺的环节, 将其应用于建筑能耗模拟预测不失为一个好办法。

建筑能耗模拟工具可以分为 5 类: 简化能耗分析软件、逐时能耗模拟计算引擎、通用逐时能耗模拟软件、特殊用途逐时能耗模拟软件和网上逐时能耗模拟软件。简化能耗分析软件采用简化的能耗计算方法 (如度日数法) 计算建筑能耗的逐月、典型日或年能耗; 逐时能耗模拟计算引擎是详细的逐时能耗模拟工具, 没有或仅有简单的用户界面, 用户通常需要编辑 ASCII 输入文件, 输出数据也需要自己进行处理, 如 DOE-2、BLAST、EnergyPlus、ESP-r、TRNSYS 等; 通用逐时能耗模拟软件是在逐时能耗模拟计算引擎的基础上开发的具有成熟的用户界面的逐时能耗模拟工具, 如 Energy-10、eQUEST、VisualDOE、PowerDOE 等; 特殊用途逐时能耗模拟软件是一些专门为某种系统或在某类建筑中应用的逐时能耗模拟软件, 如 DesiCalc 用来模拟商业建筑中的除湿系统; 网上逐时能耗模拟软件则是在逐时能耗模拟引擎之上开发的具有网上计算用户界面的模拟工具, 如 Home Energy Saver、RVSP、Your California Home 等。

目前应用比较广泛的建筑全能耗分析软件主要有 Energy-10、HAP、TRACE、DOE-2、BLAST、EnergyPlus、TRANSYS、ESP-r、DeST 等。EnergyPlus 是比较流行的应用模拟工具, 是由美国能源部 (DOE) 和劳伦斯伯克利实验室 (LBNL) 共同开发的。美国政府同时出资支持两个建筑能耗分析软件 - DOE-2

和 BLAST 的开发，这两个软件的主要区别就是负荷计算方法，DOE-2 采用传递函数法，BLAST 采用热平衡法，两者的应用范围都比较广。DOE 于 1996 年重新开发了一个新的软件 - EnergyPlus，它集成了 DOE-2 和 BLAST 的优点，具备很多新的功能，于 2001 年发布。EnergyPlus 是一个建筑能耗逐时模拟引擎，采用集成同步的负荷/系统/设备的模拟方法（如图 1.4 所示）。

借助模拟工具进行建筑能源需求预测的重要条件是能耗模拟用未来天气参数。详细的逐时能耗模拟需要采用逐时天气参数。由于天气参数逐年变化，通常采用能够代表某地区或城市长期气象条件的逐时气象数据构成典型年气象文件，作为建筑全年能耗模拟计算的天气输入条件。

目前建筑模拟中采用的典型年气象文件类型主要有典型气象年（Typical Meteorological Year, TMY）和参考年（Test Reference Year, TRY）。大多数建筑能耗模拟软件使用的是典型气象年 TMY。

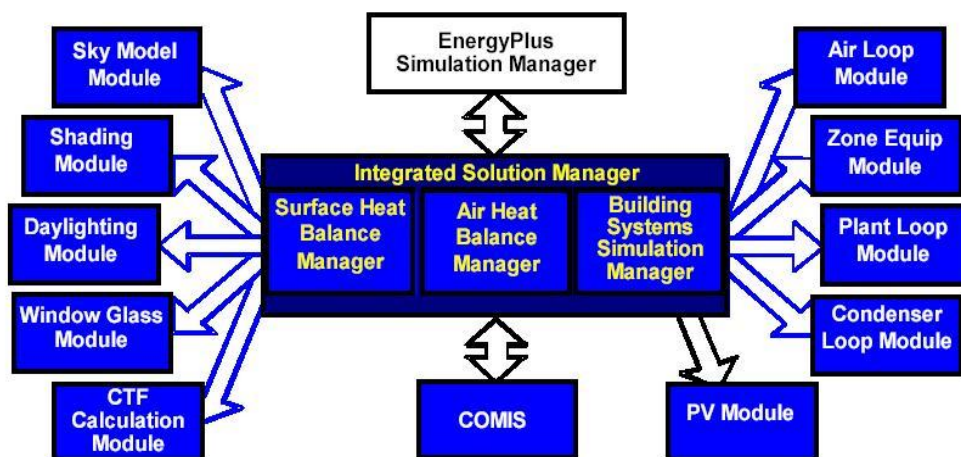


图 1.4 EnergyPlus 集成模拟结构

TMY 生成方法最早由美国 Sandia 国家实验室于 1978 年提出的，典型气象年 TMY 由 12 个具有气候代表性的典型月(TMM)组成一个“假想”气象年。典型月的选择需要考虑各气象要素在热环境分析中所占的权重，选取最接近历史时间段（一般取 30 年）平均值的月份。具体分析方法为 Finkelstein-Schafer（FS）统计方法，以 FS 统计量来衡量所选月份的逐年累积分布函数与长期（30 年）的累积分布函数的接近程度来确定。FS 统计量是考虑若干主要气象参数在热环境分析中所占的权重后确定的，被分析的气象要素是干球温度、露点温度、风速和水平面总辐射。这一方法得到了业内认可，许多建筑模拟用天气参数相关的研究都是基于此方法。1994 年，美国国家可再生能源实验室分析研究组（NREL's Analytic Studies Division）在国家太阳能辐射数据库（NSRD）的基础上通过优化主要天气参数的权重系数修正了 Hall 的方法，使用 239 个城市 1961-1990 年的观

测数据生成了 TMY2 天气文件。

国际上多个机构使用 FS 方法生成了不同版本的 TMY 文件,用于 EnergyPlus 的天气参数来源于各国多达 20 个研究项目。用于中国城市的 TMY 文件有 IWEC (International Weather Year for Energy Calculation)、CSWD (Chinese Standard Weather Data)、SWERA(Solar and Wind Energy Resource Assessment)和 CTYW(Chinese Typical Year Weather)这四个版本,其中 IWEC 是 ASHRAE 和 NCDC (美国国家气候数据中心)利用 DATSAV3 数据库生成的除美国和加拿大之外的 227 个城市的典型气象参数文件,历史数据年份跨度是 1982-1999 年;CSWD 是清华大学基于中国气象局收集的中国 270 个地面气象台站 1971-2003 年的实测气象数据开发的中国建筑热环境分析专用气象数据集,包括了设计用室外气象参数、TMY 全年逐时数据,还针对常规空调、供暖和太阳能环境控制系统提供了 5 套代表性的设计典型年逐时数据-温度极高年、温度极低年、焓值极高年、辐射极高年和辐射极低年;SWERA 是由联合国环境规划署支持的资源评估项目针对包括中国在内的 14 个发展中国家进行太阳能和风能资源评估,开发了 156 个城市的逐时典型年数据;CTYW 是由日本筑波大学张晴原教授与 LNBL 的 Joe Huang 基于美国 NCDC 资料库里我国 57 个台站 1982-1997 年的气象数据建立的中国建筑用标准气象数据库。

目前应用的建筑能耗模拟软件中的典型气象年天气输入参数文件是在当前气候观测条件下生成的,不适用于未来气候条件下的建筑能源需求预测,因此,未来建筑能源需求预测的重要前提就是生成一系列结合了气候变化预测的未来天气参数文件,应用于建筑能耗模拟软件,这也是探讨未来气候变化对能源需求影响的关键。美国劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)^{[53]~[54]}在 2005~2008 年先后在全国范围和加州区域开展了 2 个研究项目,进行气候变化对建筑能耗产生的影响预测,直接应用 IPCC SRES 情景下(A1F1、A2、B1 和 B2)全球气候模式 HadCM3 在多个气候区内多个城市的月平均尺度模拟结果,包括未来 100 年月平均温度、日较差、相对湿度和云量这四个主要气象参数的预测变化,采用降尺度方法将月平均尺度的预测变化与各城市已有典型气象年相结合生成气候变化影响下未来各时段(2010~2039、2040~2069 和 2070~2099)的典型气象年,将这些未来典型气象年用于代表全国和加州建筑业基本情况的住宅和商业建筑典型模型进行全年能耗模拟,考虑不同区域的不同建筑类型的数量确定区域权重系数,将各区域的建筑能耗模拟结果整合为全国和加州建筑能源需求对 21 世纪气候变化的响应。如图 1.5~1.6,以 1980~2009 年为基准,至 2020s,美国建筑需求侧用能减少 7%,一次能源消耗减少 1~2%,至 2080s,建筑需求侧用能增加 18%,一次能源消耗增加 6%。

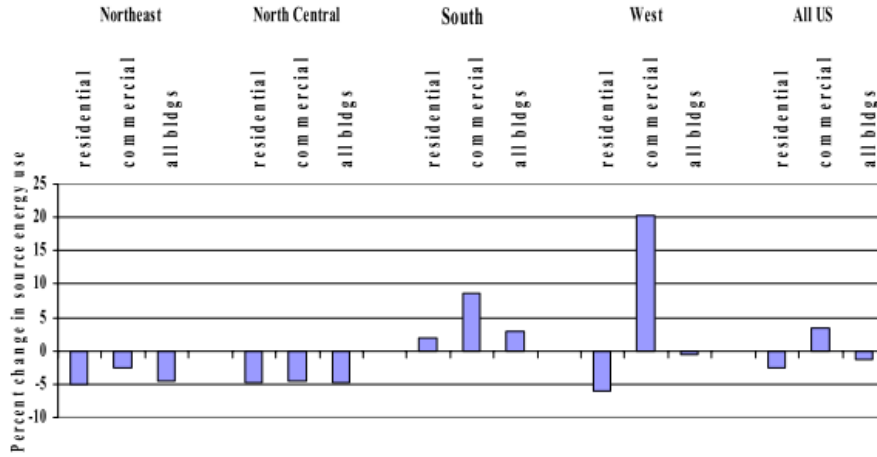


图 1.5 至 2020 年气候变化对美国建筑用能的影响^[53]

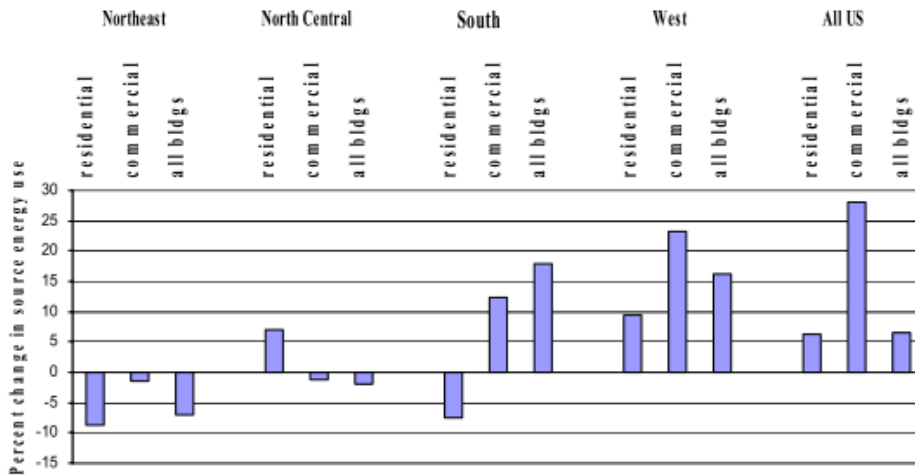


图 1.6 至 2080 年气候变化对美国建筑用能的影响^[53]

在对 20 世纪气候变化问题存在诸多争议的情况下，气候变化的预测研究无疑具有更大的不确定性。本文通过对多种气候变化研究的深入了解，充分认识目前全球气候变化的地区差异、气候变化检测与归因的难度、研究工具和方法的缺陷、以及气候基础数据的缺失，从而造成的气候变化预测的不确定性和在空间尺度、时间尺度上的局限性。基于对现有气候变化预测方法的局限性认识，本文试图从长期历史气候变化和实际气象观测的角度，找到区域气候变化预测的新方法。根据中国近百年气候变化分析，了解 20 世纪以来的中国气候变暖与全球气候变暖的一致性和差异性，通过对 10 万年冰期-间冰期旋回、全新世气候、中世纪暖期、小冰期和 20 世纪现代变暖的了解和对比，分析中国在历史重要冷暖时期的气候特征。基于常规时间序列方法在气象学中的应用，本文提出基于气候变化周期性的时间序列预测方法，将中国区域百年及以上尺度的气候特征、实际气象观测与时间序列分析相结合，分析当前时期气候变化的规律性和不确定性，建立时间序列预测模型，根据对未来气候变化不确定性的变化情况假设，设定 3 种发展

情景，用于 21 世纪城市月平均温度的长期预测；采用统计降尺度方法 - 时间序列调整方法 *Morphing*，以城市现有典型气象年（TMY）为基础，结合本文提出的预测方法在城市未来 100 月平均温度的预测结果，生成该城市未来气候条件下的典型气象年。在 *Morphing* 方法的应用过程中，基于日间波动在未来气候发展中的变化假设，同样提出了 3 种发展情景，分别与气候的不确定性情景相叠加，从而在未来 100 年里生成不同发展情景下多个时段的未来典型气象年，并将其转化为常用的建筑能耗模拟工具天气参数文件，文件格式为 .epw。根据当地建筑的概况和国家、地方建筑相关标准，建立办公、酒店和商场这 3 个重要建筑类型的典型模型，把前述多个未来典型气象年作为典型模型的天气参数输入文件，进行全年能耗模拟，从而预测气候变化对建筑能源需求的影响。

本文提出了基于气候变化周期性分析的时间序列预测方法，采用统计降尺度方法将预测的未来 100 年上海地区月平均温度变化与已有典型气象年相结合，生成的未来典型气象年用于典型建筑模型进行能源需求变化预测。气候变化对建筑能耗的影响能够为建筑节能标准、节能技术扶持政策 and 能源相关政策的制定提供科学依据，为分析气候变化条件下建筑节能技术的适用性提供研究基础，同时能够为决策层以发展的眼光规划城市发展与能源的开发应用提供技术支持。本文提出的预测方法在一定程度上解决气候变化预测中的空间和时间尺度问题，尤其对于缺乏长期气象观测资料的区域气候变化预测，具有一定的借鉴意义，同时，因已有气候变化预测方法在区域年代以下时间尺度气候变化预测的不确定性和应用局限性，本文从区域长期历史气候变化和实际气象观测的角度提出的预测方法提高了区域建筑能源需求预测结果的可信度和应用价值。

研究技术路线如图 1.7。

研究步骤分为：

一、通过对气候变化问题的深入了解，认识气候变化研究的现状和争议焦点，分析已有气候变化预测方法在能耗模拟用天气参数预测上的局限性。基于区域长期历史气候变化研究和时间序列方法在气象学中的应用，提出了基于气候变化周期性分析的时间序列预测方法；

二、采用基于气候变化周期性分析的时间序列预测方法，在区域近百年以上气候变化规律性分析和近几十年区域观测月平均温度的基础上，建立时间序列预测模型，对区域未来 100 年月平均温度进行预测；

三、采用统计降尺度时间序列调整方法 - *Morphing*，基于区域现有典型气象年（TMY），对区域未来 100 年月平均温度进行降尺度处理，生成 21 世纪多情景下多个时段的未来典型气象年（TMY）逐时天气参数；

四、将区域未来典型气象年（TMY）作为区域典型建筑模型的天气参数输

入条件进行建筑能耗模拟，预测 21 世纪区域建筑能源需求的变化。

详见第二章。

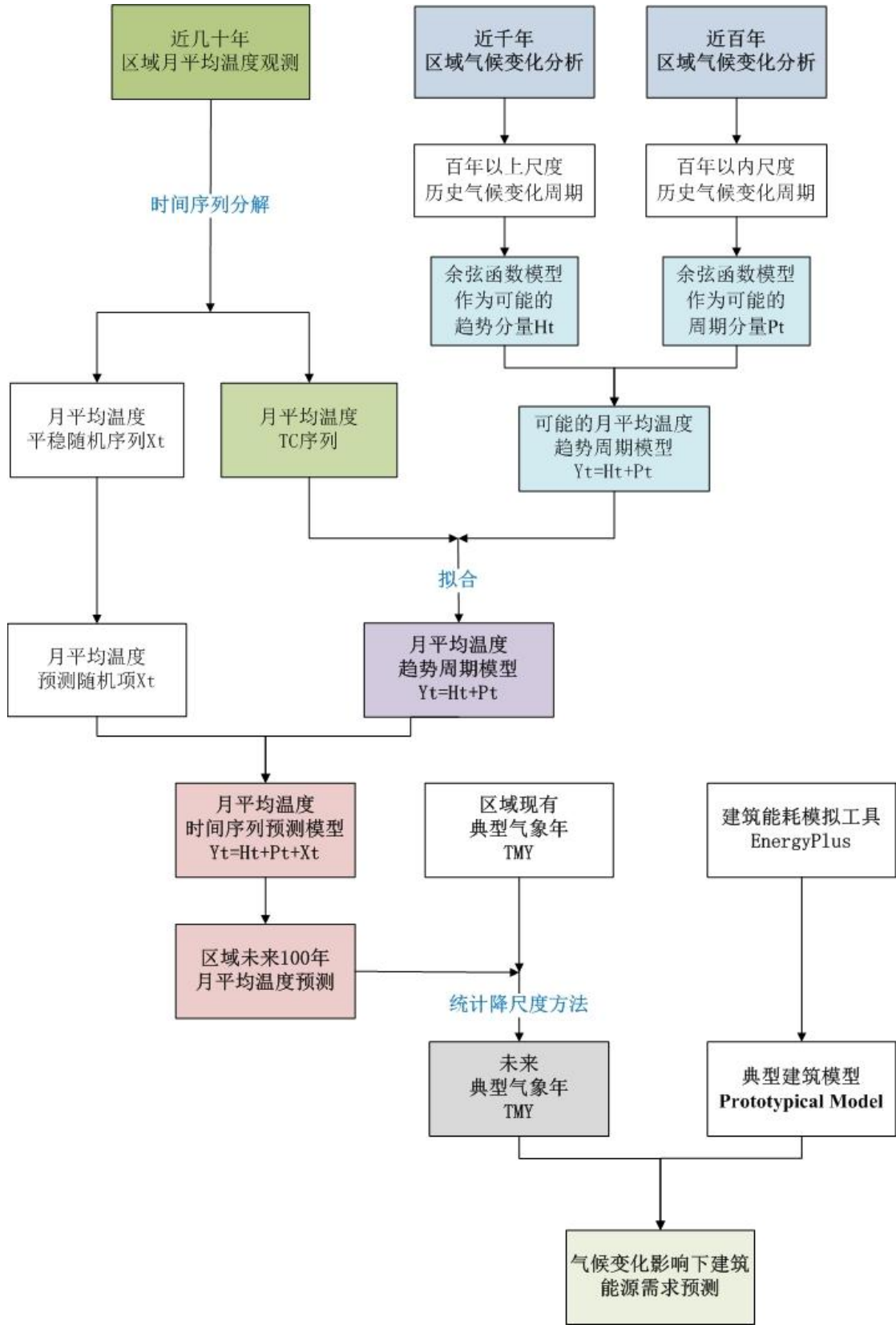


图 1.7 本文研究技术路线

第二章 建筑能耗模拟用未来天气参数预测方法研究

气候变化问题存在诸多争议，全球共同应对气候变化的推进更是困难重重，然而世界经济发展的脚步不容停滞，尤其是发展中国家的经济发展和排放空间需求很大，中国作为温室气体排放大国中的发展中国家代表，将同时面临着气候外交、发展需求、资源紧缺和环境恶化的多重重压。在这场气候外交战中，认清气候变化问题的本质、对本国气候变化影响下的能源和碳排放空间需求的正确预估就尤为重要，这是我国成功应对巨大的国际减排压力、争取气候谈判话语权、维护自身生存和发展权益的重要基础。在众多能源消费行业中，建筑业对于减缓温室气体排放的经济潜力显著高于其他行业，建筑能源的需求预测对于城市发展和能源规划以及应对气候变化的策略制定都有很大的参考价值。气候变化预测作为气候变化影响下建筑能源需求预测的重要基础，其空间和时间尺度的选择尤为重要，会直接影响预测结果的可信度和应用价值。本章将总结对气候变化预测的研究现状，分析已有气候变化预测方法在区域空间尺度和年代以下时间尺度的应用局限性，提出能耗模拟用未来天气参数预测的新方法 – 基于气候变化周期性分析的时间序列预测方法。

2.1 气候变化预测研究现状

2.1.1 基于排放情景的气候变化模拟预估

1.全球气候系统模式

现阶段气候变化预估在很大程度上是依赖于全球气候系统模式（Global Climate System Model, GCSM/GCM），气候和环境变化是气候系统五大圈层（气圈、水圈、岩石圈、冰雪圈、生物圈）相互作用的结果^[55]，用于研究各圈层的相互、反馈作用以及与外强迫的关联这一复杂过程的核心技术就是耦合各圈层的气候系统模式^[56]。针对不同的气候圈可以分别建立气候模式，如大气环流模式（AGCM）、海洋环流模式（OGCM）、陆面过程模式（LSM）和海冰动力模式（SIDM）。20世纪80年代以来，气候模式有了很大的发展，并实现了气候模式的耦合，如建立了大气-海洋耦合气候模式（AOGCM）。耦合的气候系统模式中包括了发展成熟的大气环流模式、海洋环流模式、陆面过程模式，甚至包括海冰和碳循环等模块，用以研究包括海洋状况、冰雪过程、土壤温湿等在内的气候系统变化规律。

1995 年, 世界气候研究计划 (WCRP) 的 “气候变率与可预报性研究 (CLIVAR)” 数值试验组重组为 WCRP 耦合模式工作组 (WGCM), 开启了一项国际性科学研究计划 - 耦合模式比较计划 (Coupled Model Intercomparison Project, CMIP), 探究模式比较研究的问题, 以推动气候系统模式的发展, 至今, CMIP 已完成了 4 个阶段, 先后有来自美国、日本、英国、法国、加拿大、中国、德国、韩国、澳大利亚、挪威和俄罗斯的 25 个以上气候模式参与了对比研究, 其中美国国家大气研究中心 (NCAR)、英国 Hadley 气候预测与研究中心和德国马普实验室是国际上最具影响力的气候模式开发机构。2008 年 9 月, 耦合模式工作组 (WGCM) 确定开展一系列气候模式调整试验, 联合国际地圈-生物圈计划 (IGBP) 中地球系统分析、综合与模拟计划 (AIMES) 的研究成果进行新一轮的耦合模式比较计划 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5), 旨在^[56]解决目前模式中由于碳循环和云相关的反馈机制不明确造成的模式差异, 探究类似的强迫在不同模式中得到不同响应的原因, 开展气候可预报性、模式的年代尺度预测能力研究, 为 IPCC 即将发布的第五次评估报告 (AR5) 组织气候模拟和预估试验。

2. 温室气体排放情景

预估未来全球和区域气候变化需要构建未来社会经济变化的情景, 由此衍生出温室气体排放情景, 未来温室气体排放情景是气候模式对未来人类活动引起的气候变化进行情景预估的基础数据。人类社会经济发展路径不同、政府政策干预程度不同以及人类自身对环境意识的改变, 都会对未来温室气体排放情景产生影响, 从而进一步影响到未来气候变化。

一直以来, IPCC 组织各国专家在对未来社会经济可能发展途径做出一定假设的基础上, 定量估计了未来温室气体的排放情景, 并借助各种不同的气候模式对未来不同排放情景下的气候变化趋势进行了预估。

1990 年 IPCC 首次在第一评估报告 (FAR) ^[3] 中发布了 4 个全球温室气体排放情景, 用来驱动地球气候模式预估未来气候变化趋势, 如图 2.1 所示。这四种构想均假定全球经济按世界银行的预测速度增长以及世界人口按联合国有关研究估算的速度增长。情景 A (基准情景) 假设几乎或根本不采取措施限制温室气体排放量。能源使用和热带森林砍伐将继续, 矿物燃料 (尤其是煤) 仍然是全世界的主要能源。情景 B (低排放情景) 假设矿物燃料供应主要转为天然气, 效率大为提高, 森林砍伐趋势扭转, CFC 排放量从 1986 年水平上减少 50%。情景 C (政策控制情景) 假设下个世纪后半叶转用可再生能源和安全的核能, CFC 逐步停止使用, 农业引起的排放 (CH_4 和 N_2O) 受到限制。情景 D (政策加速情景) 假设下个世纪初迅速转用可再生能源和安全的核能, 工业化国家严格控制排放,

发展中国家的排放仅略有增多。

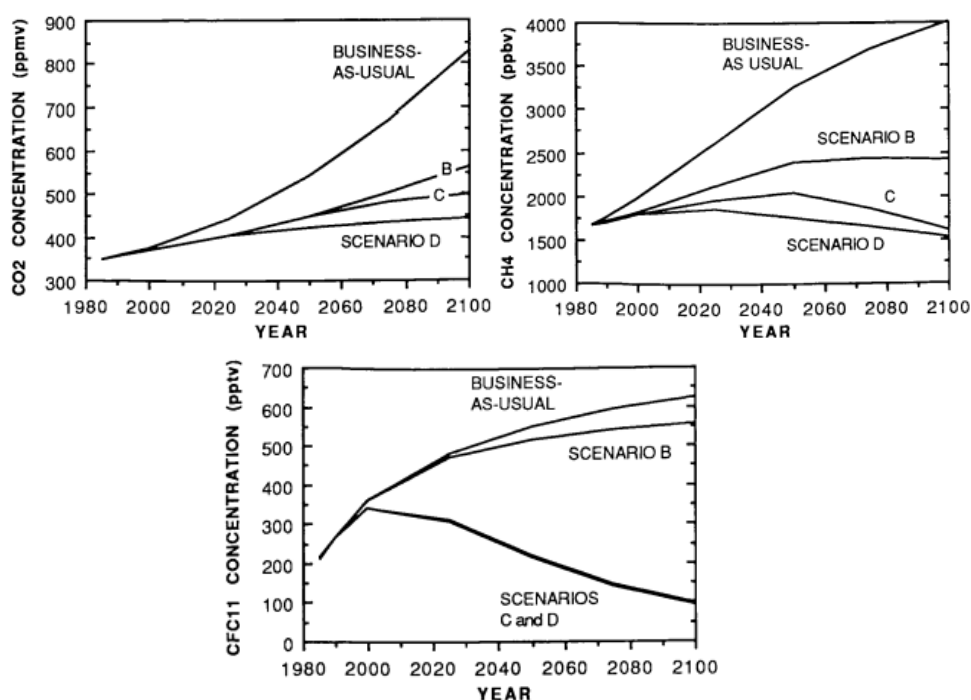


图 2.1 IPCC 首次提出的 4 种温室气体排放情景^[3]

1995 年 IPCC 在第二次评估报告 (SAR)^[4] 中依据未来不同社会经济、环境状况建立了 IS92 系列情景, 包括 6 种排放情景, 如图 2.2: IS92a、b、c、d、e 和 f, 其中 IS92a 情景作为气候敏感度和排放的最佳估计, 人口中等程度增长, 预计至 2100 年地表平均温度比 1990 年上升 2℃; b 情景与 a 情景接近; IS92c 情景作为低排放情景, 人口按中-低速率增加, 传统能源供应低于 a、b 情景, 核能使用成本逐年降低, 预计至 2100 年地表平均温度比 1990 年上升 1℃, 相比于 c 情景, d 情景太阳能使用成本降低, 适当使用生物质能; IS92e 情景作为高排放情景, 人口增长速率同 a、b 情景, 石油供应大幅增加, 至 2075 年淘汰使用核能, 预计至 2100 年地表平均温度比 1990 年上升 3.5℃, 相比于 e 情景, f 情景人口按中-高速率增加, 太阳能使用成本降低, 核能使用成本增加。虽然 IS92 系列情景仅考虑了与能源、土地利用等相关的 CO₂、CH₄、N₂O 和 S 排放, 但其 CO₂ 排放曲线能够较合理地反映当时各种排放情景研究得出的 CO₂ 排放趋势。

2000 年, IPCC 第三次评估报告《排放情景特别报告》(TAR)^[5] 中发布了新的排放情景系列, 即 SRES 情景。SRES 情景分为探索可替代发展路径的四个情景族(A1、B1、B2 和 A2), A1 情景假定这样一个世界: 经济增长非常快, 全球人口数量峰值出现在 21 世纪中叶, 新的和更高效的技术被迅速引进。A1 情景分为三组, 分别描述了技术变化中可供选择的方向: 化石燃料密集型(A1FI)、非化石燃料能源(A1T)以及各种能源之间的平衡(A1B)。B1 情景描述了一个趋同的

世界：全球人口数量与 A1 情景相同，但经济结构向服务和信息经济方向更加迅速地调整，伴之以材料密集程度的下降，以及清洁和资源高效技术的引进。B2 情景描述了一个人口和经济增长速度处于中等水平的世界：强调经济、社会和环境可持续发展的局地解决方案。A2 情景描述了一个很不均衡的世界：人口快速增长、经济发展缓慢、技术进步缓慢。各地域间生产力方式的趋同异常缓慢，人口出生率很不协调，由此导致人口持续增长。经济发展主要面向区域，人均经济增长和技术变化是不连续的，低于其它情景的发展速度，图 2.3 是 TAR 中 SRES 情景与 IS92a 情景的排放量对比

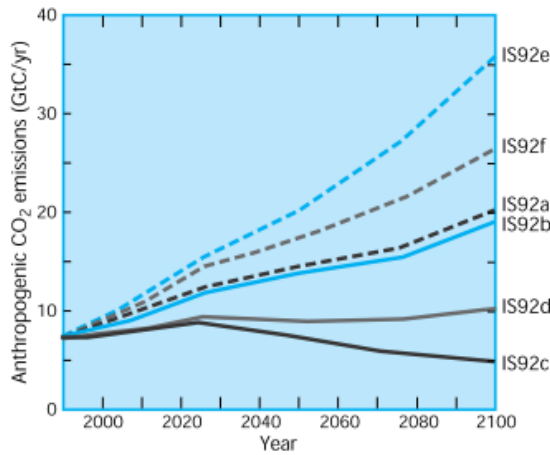


图 2.2 IS92 排放情景下温室气体的年排放量^[4]

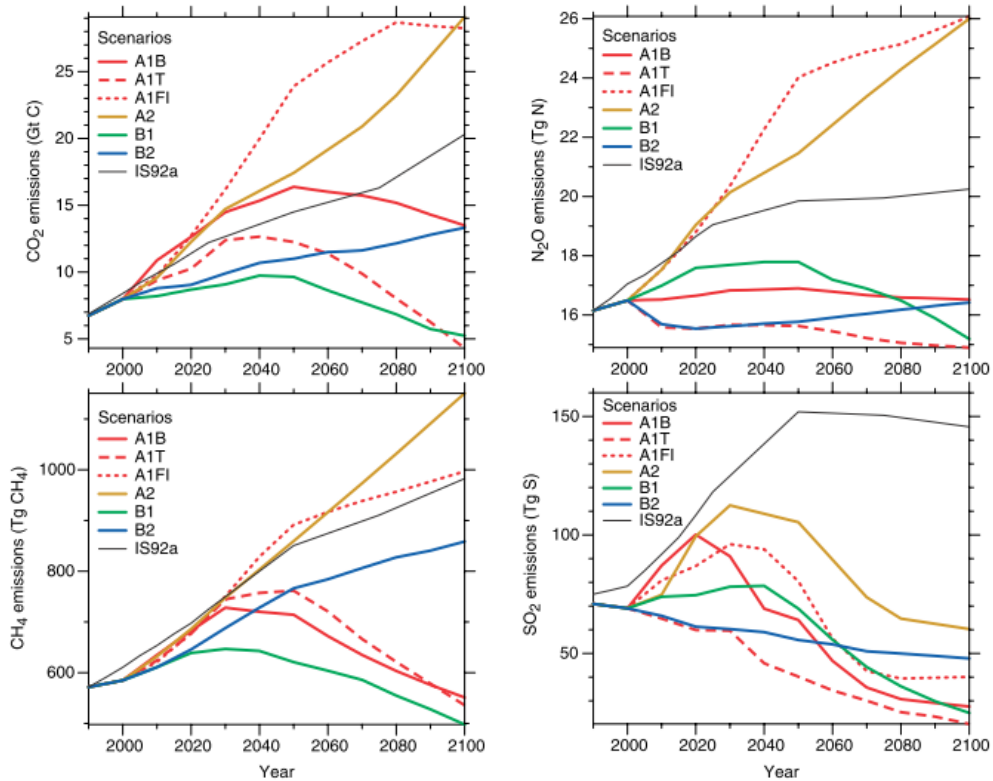


图 2.3 2001 年 SRES 排放情景下温室气体排放量与 IS92a 的对比^[5]

IPCC 于 2007 年发表的第四次评估报告 (AR4) [6]沿用了 SRES 系列情景, 相比于 TAR 中的 SRES 情景, 使用了一些排放驱动因子的偏低值, 尤其是人口预估, 改进了对气溶胶排放和气溶胶前体物 (Aerosol Precursor Emissions) 排放的描述, 总体上, 新的 SRES 情景预估的排放将低于 TAR 中 SRES 情景排放水平。图 2.4 是 AR4 中在无气候政策出台的情况下全球温室气体排放量(CO₂当量)变化, 有色实线是 6 个 SRES 标志情景, 灰色阴影区是自 SRES 以来近期公布情景中 80%的范围, 虚线表示 SRES 之后情景的全部范围。

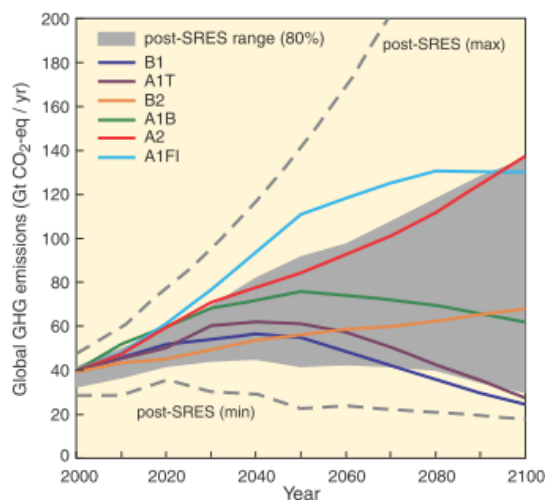


图 2.4 2007 年 SRES 排放情景下温室气体排放量^[6]

2006 年, IPCC 在第 25 次会议上决定今后由研究界协调情景的开发过程, 而不再由 IPCC 直接协调和批准新的情景。为了协调不同科学研究机构和团队的相关研究工作, 强化排放情景对研究者和决策者研究和应对气候变化的参考作用, 并在更大范围内研究潜在气候变化和不确定性, IPCC 于 2007 年为第五次评估报告开发了新的系列情景 - 代表性浓度路径 (Representative Concentration Pathways, RCPs) 情景^[57]。RCPs 系列情景中包括一套温室气体、气溶胶和化学活性气体的排放和浓度以及土地利用/土地覆盖的时间路线。RCPs 是指“对辐射活性气体和颗粒物排放量、浓度随时间变化一致性预测, 作为一个集合, 它涵盖广泛的人为辐射强迫 (Radiation Forcing)”。采用单位面积的辐射强迫表示的未来 100 年稳定浓度的新情景, 各种各样的气体和气溶胶的辐射强迫作用被归纳成一个个 RCP 的全球净辐射强迫路径, 净辐射强迫路径的单位表达为 W/m^2 或者当量 CO₂ 浓度(即可以代表所有温室气体及气溶胶净辐射强迫作用的 CO₂ 浓度)。目前已确定 4 类 RCPs, 分别是 RCP8.5、RCP6、RCP4.5 和 RCP3-PD, 其中 RCP3-PD 有 RCP2.9 和 RCP2.6 两种选择, 大多数研究者倾向于使用 RCP2.6。其中, RCP8.5 是 CO₂ 排放参考范围 90 百分位数的高端路径, 即: 到 2100 年其辐射强迫达到 $8.5W/m^2$, 并将继续上升一段时间, 其辐射强迫高于 SRES 中高排放 (A2) 情景

和化石燃料密集型 (A1FI) 情景, 至 2100 年相对与工业革命前预计升温 $6.9\text{ }^{\circ}\text{C}$; RCP6 和 RCP4.5 都是中间稳定路径, 其辐射强迫在 2100 年之后大约分别稳定在 $6\text{W}/\text{m}^2$ 和 $4.5\text{W}/\text{m}^2$, 至 2100 年相对与工业革命前预计升温分别为 $4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 且 RCP4.5 的优先性大于 RCP6; RCP3-PD 是比 CO_2 排放参考范围低 10 百分位数的低端路径, 其辐射强迫在 2100 年之前达到大约 $3\text{W}/\text{m}^2$ 的峰值, 然后下降, 至 2100 年相对与工业革命前预计升温为 $2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 与实现 2100 年相对工业革命之前全球平均温升低于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的目标一致, 因而受到广泛关注。相比之前的排放情景, RCPs 系列情景考虑了应对气候变化的各种政策对未来排放的影响, 还提出了辐射强迫达到峰值后下降的新概念, 将促进对气候变化及影响不可逆性的深入分析 [58]。

除 IPCC 给出的排放情景系列, 还有一些常规的二氧化碳加倍情景、温室气体每年增加 1% 达到两倍情景和每年增加 1% 达到四倍情景用于复杂气候模式的试验和对比, 另外, 一些直接用于国际公约谈判的排放情景, 如温室气体按照实际排放到 2000 年不再增加, 继续维持 2000 年的排放值, 直到 2100 年的未来近百年的继续增暖情景; 按照 SRES A1B 和 B1 情景到 2100 年不再增加, 继续维持 2100 年的排放值, 直到 2300 年的未来 200a 的继续增暖情景等 [59]。

3. 气候变化预估研究

气候变化的预估往往基于气候变化的检测和归因研究, 气候模式依然从中承担着重要角色。利用自然和人为强迫因子驱动气候模式, 并把模拟结果和观测结果进行比较, 是理解气候演变特别是近百年气候增暖的重要方法 [60]。这里的自然强迫因子则包括气候系统自然内部振荡, 如北大西洋涛动 (NAO)、厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO), 和自然外部强迫, 如太阳辐射和火山活动。所谓外部强迫则包括自然外部强迫和人为外部强迫。

李立娟等 [61] 利用中国科学院大气物理研究所 LASG 格点大气环流模式分析了外强迫因子对 20 世纪全球变暖的综合影响。LASG 大气环流模式参与了“气候变率与可预报性研究 (CLIVAR)” 设立的“20 世纪气候模拟国际比较计划 (climate of the 20th century, C20C)”。观测资料显示, 对于 20 世纪发生的两次变暖: 1) 1910~1940 年主要发生在北半球中高纬度 (尤其是 $60\text{ }^{\circ}\text{N}$ 以北), 增暖幅度达 $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上; 2) 1980 年代以后的增暖几乎覆盖全球, 按照 C20C 设定的数值模拟方案, LASG 模式能够模拟出这两次变暖, 但是范围和幅度都偏小。对于第一次变暖, LASG 模式的模拟结果显示内部振荡贡献很小 (小于 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$), 远小于外部强迫的综合影响引起的增暖幅度 ($0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$)。Zhou 等 [63] 基于耦合模式模拟研究, 认为第一次变暖是由太阳辐射的年代际变化引起的, 即主要受自然外部强迫影响, 而 Delworth 等 [63] 认为此次变暖是模式内部振荡的作用。对于第二

次变暖, LASG 在大部分区域的内部振荡 ($0.01\sim 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$) 远小于多模拟集合平均的增暖幅度 ($0.4\sim 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$), 至少说明此次变暖中外部强迫起到了主要作用。许多相关研究^[64]则认为第二次变暖是温室气体增加引起的, 即主要受人为外部强迫影响。LASG 模拟结果还显示, 模式中在变冷期自然内部振荡的影响比增暖期显著。

随着气候模式耦合技术的快速发展, 采用耦合气候模式进行气候变化归因研究已成为主要发展趋势, 其中应用最为广泛的是大气-海洋耦合气候模式 (AOGCM)。目前, 在考虑人为温室气体排放和硫酸盐气溶胶作用的前提下, 气候系统模式能够比较成功的模拟出 20 世纪的第二次全球变暖。然而, 20 世纪的第一次变暖则需要同时考虑太阳辐射、火山活动等自然外部强迫因子和气候系统内部振荡的作用才能在模拟结果中有所体现^{[63]~[64]}。Zhou 等^[62]认为, 就全球年平均温度在 1880~1999 年的变化而言, 在自然因子和人为因子的共同强迫作用下, 多数耦合模式能够成功再现全球平均气温在过去百年的实际演变, 相关系数可以达到 0.87, 这种高相关系数主要来自 20 世纪的变暖趋势, 多模式集合的变暖趋势为 $0.67\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$, 非常接近观测的 $0.53\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 。但模式间的离差很大 (尤其在 20 世纪前半期)。方差分析表明, 外部强迫可以解释 20 世纪全球年平均气温变化的 60.5%, 而气候系统内部振荡 (变率/噪音) 则解释了 39.5%。整体来看, 耦合模式对 20 世纪后半期温度变化的模拟效果比 20 世纪前半期效果好。相比之下, 耦合模式对于 20 世纪中国气温变化的模拟效果比全球平均要差, 多模式集合结果与实际观测之间的相关系数只有 0.55, 同时外部强迫对 20 世纪中国年平均温度变化的解释程度仅有 32.5%, 气候系统内部振荡则为 67.5%, 而且中国 1920 年代出现的变暖在模拟结果中未能得到体现。

以 IPCC 为代表的气候模式预估研究均针对全球近百年时间尺度进行讨论, 大多气候模式能够成功的模拟出近百年的变暖, 对于 20 世纪后半期需要考虑人为强迫才能在模拟结果中体现出来, 并将人类活动导致的温室效应增强作为主要影响因子。目前对于这一归因存在的疑问主要在于气候变暖在时间和空间上的不均匀分布与温室气体增长过程的不一致, 有别于温室效应理论^[65]。近百年的变暖主要由 3 次突变性增温组成, 但 CO_2 是持续性增加的, 而且增量随时间增加, 二者的时间变化特征并不一致。20 世纪后半期 CO_2 的年增长率平均是前半个世纪的 3~4 倍, 相比于工业化前的 CO_2 浓度, 至今增长了 1/4, 但这个增量中的 2/3 发生在二战之后, 而相应时间尺度上的温度增量里有 2/3 出现在二战之前, 气候变暖与温室气体增长在时间上出现了矛盾。空间上, 虽然大部分 CO_2 排放源在北半球, 但是南北半球的 CO_2 浓度差仅有 3ppm (1991 年), 仅占浓度的 1%, 所以, 温室效应应该遍布全球, 同时各种气候模式模拟结果显示, 极区, 特别是两

个大洋北部变暖最强烈，但在 70~80 年代大部分地区变暖时，两个大洋北部的气温反而下降，如图 2.5 所示。

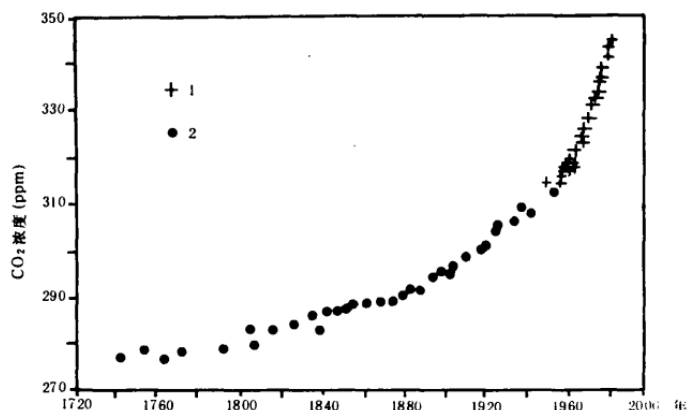


图 2.5 大气中的 CO₂ 浓度 1.观测值 2.冰心资料^[65]

由于气候模式在气候变化的检测与归因中存在诸多争议，使得将气候模式用于气候变化预估同样不可避免的存在很大的不确定性。

IPCC 在 AR4 中根据 SRES 排放情景驱动海气耦合模式 (AOGCM) 估计“至 21 世纪末 (2090~2099 年)，与 1980~1999 年时段相比，全球平均地表温度增幅的最佳估计为 1.8~4.0 °C 不等，可能的范围是 1.1~6.4 °C，预计未来 20 年将每十年增加约 0.2 °C 的速率变暖。”在不同的排放情景下，预估的 21 世纪温度变化都表现为正距平。但“对于 2020~2029 年间的变暖，模式间的一致性较好，而对于 2090~2099 年间的变暖，模式间的一致性则较之短期增暖要差。此外，不同情景下的变暖特征在 2020~2029 年间较为相似，但是到了 2090~2099 年间则区别明显，是由于此时不同情景下的温室气体浓度的巨大差异造成的。”IPCC 也指出了多个 GCM 的预测结果存在很大差异主要源于不同的气候模型对一些气候反馈的处理和估算结果存在很大差异，其中云反馈、海洋热吸收和碳循环反馈造成的不确定性较大。

秦大河等^[66]通过模拟预测 21 世纪中国气候将继续明显变暖，尤以冬半年北方最为明显。与 1961~1990 年的 30a 平均相比，到 2020 年我国将可能升温 1.3~2.1 °C，到 2030 年将可能升温 1.5~2.8 °C，2050 年将升温 2.3~3.3 °C，到 2100 年升温将达到 3.9~6.0 °C。日最高和最低气温都将上升，但最低气温的幅度较最高气温的大，日较差减小。

赵宗慈等^[67]选用国外 7 个较好的全球大气海洋环流模式集合，考虑多种人类活动排放情景，同时选用 19 个地球气候系统模式考虑所有外部辐射强迫 (太阳活动、火山活动、温室气体、自然和人为气溶胶等)，针对 1990~2025 年中国年平均温度进行预估。相对于 1961~1990 年，1990~2005 年这 16a 观测的平均气温距平为 0.72 °C，气温变化的线性趋势为 0.90 °C/16a。考虑对来自自然外部强迫

尚不能预估，在对未来 20 年年平均温度的预估中，仅采用了大气海洋环流模式集合考虑人为强迫影响的模拟结果。结果显示，相对于 1961~1990 年，2010、2015、2020 和 2025 年的年平均气温距平分别是 1.08、1.20、1.43 和 1.39℃，预估 2006~2025 年的 20a 间增暖平均 0.55℃。由此预测，未来 20a 由于人类排放增加，中国年平均气温很可能有继续变暖的趋势，变暖程度高于气候模式考虑人类排放情景（SRES A2、A1B、B1）对全球变暖的预估值（至 2010 年全球变暖 0.50~0.60℃，至 2025 年变暖 0.80~0.90℃）。但该预测研究仅考虑了未来人类排放增加对中国气温变化的可能影响，没有考虑太阳活动和火山活动可能对气温的影响以及气候系统内部相互作用如海温、冰雪变化的影响。

4.全球气候模式用于区域尺度气候预估的不确定性

IPCC 认为对于已观测到的自然系统响应人为变暖的归因全面性受到很多限制，其中区域尺度气候自然变率较大是一个关键因素。这里 IPCC 提及的“气候自然变率 (Climate Variability)”是指由于气候系统内部的自然过程产生的振荡，区别于外部强迫。IPCC 将“气候自然变率”的表现形式称为“气候变率的模态 (Patterns of Climate Variability)”，例如：厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)、北大西洋涛动(NAO)、北半球环状模态(NAM)、南半球环状模态(SAM)、太平洋-北美型态(PNA)以及太平洋年代际振荡 (PDO)。IPCC 认为“20 世纪观测到的许多气候变化事实可利用这些型态的变化来解释”，同时也指出“在评估自然内部气候变率方面仍存在不确定性”。NIPCC (Nongovernmental International Panel on Climate Change, 非政府间国际气候变化专门委员会)肯定了 IPCC 对于气候自然变率的理解和描述，然而 NIPCC 认为传统气候模式对气候自然变率的预测信度很低。NIPCC 报告^[18]中引用了 Tsonis 等建立在大尺度气候环流指数，如 ENSO、PDO 和 NAO 等分析后得出的结论，认为多个内部振荡在 1976/1977 年产生了联合作用影响了气候变化，并且预计下一次的联合影响会发生在 2035 年左右。

NIPCC 报告主编 Singer^[68]认为从 20 世纪 80s 开始近地面气温确实有变暖趋势，然而同时期的卫星观测和探空气球观测温度数据都没有明显的上升趋势，并指出同时期城市热岛效应明显，很可能城市热岛效应造成了全球变暖的假象。时至今日，20 世纪的变暖已经得到了广泛的认可。然而 Singer 对于城市热岛效应这一不确定性的关注并不乏科学性，值得关注。IPCC 曾在其引用的观测数据集中对热岛效应进行了部分订正，但由于各地经济和城市发展水平不同，无法对每一个观测站都进行热岛效应的检验和订正，并且对站点热岛效应的订正比例在全球不同地区分布非常不均匀，有待提高^[69]。同时，IPCC 认为在全球尺度上城市热岛效应对地表气温的影响是可以忽略不计的，这一论断主要参考了 Parker, D. E.、Peterson, T. C.和 Jones, P. D. 的研究成果，然而这三位学者分别在地表温度

的影响机制、研究年份和站点选择等环节受到了许多质疑, IPCC 在论证“城市热岛对增温贡献可以忽略”时采用的研究方法存在诸多漏洞。龚道溢^[12]则指出目前观测资料中最大的问题是城市热岛效应的影响,所使用的地面温度观测数据大部分来自于大城市和城镇站点,考虑到资料中的城市热岛效应、资料覆盖面、分辨率等的影响,近一个世纪以来的温度变化趋势可能并没有原来估计的那样高。

5.区域气候模式 (RCM/RegCM)

全球气候模式 (GCM) 对区域或者局地尺度的气候变化过程解释能力较差,如在年际、甚至年代际变化上耦合模式结果与实际观测的对应关系较弱,耦合模式对于中国 20 世纪早期 (1920s) 的暖期无从解释等均体现了全球气候模式的分辨率缺陷。由于区域尺度上强迫机制较之全球平均情况更为复杂,为了弥补全球气候模式的分辨率缺陷,采用较高分辨率的区域气候模式 (Regional Climate Model, RCM/RegCM) 成为目前气候变化预估研究的一个重要部分。

许吟隆等^[70]认为区域气候模式系统 PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) 能够很好地模拟出气候基准时段 (1961~1990 年) 中国区域年、冬季和夏季平均地面气温的局地分布特征。与观测相比,模式模拟的年平均地面气温在青藏高原偏低,而在长江中下游以南的南方区域偏高。冬季平均地面气温的模拟结果与观测值吻合较好,但仍然是青藏高原上模拟的温度偏低,在东北和华南地区模拟值略偏高。夏季在塔克拉玛干沙漠地区和长江中游的部分区域模拟值偏高。PRECIS 在 SRES B2 情景下的模拟结果中,相对于 1980s,中国 2080s 年、冬季和夏季平均地面气温变化均呈增加的趋势,北方地区增温幅度大于南方地区。

综上所述,在基于排放情景的气候模式方法进行气候变化预估的研究中,IPCC 担任了重要角色。在国际性科学计划-气候模式对比试验和集人类社会和经济发展路径的温室气体排放情景建立之后,IPCC 组织各国各领域的专家展开气候变化评估工作。虽然 IPCC 对于气候变化的检测、归因和预估受到诸多质疑,其中重要的研究工具 - 全球气候模式 GCM 本身也存在很大的不确定性,GCM 的高复杂程度还可能暗藏着无法估计的系统性偏差。然而,不容否认,GCM 是现阶段由温室气体排放导致的气候变化预估的重要工具。目前,气候模式对于全球和区域气候变化的预估呈现出线性变暖或加速变暖的态势,几乎无一例外。一些研究认为气候模式高估了温室效应效应 (人为强迫因子),同时对于其他强迫因子,包括自然外部强迫 (太阳辐射和火山活动) 和自然内部振荡 (自然系统内部“海洋-陆地-大气-海冰”相互作用而产生的自然振荡等) 未能合理描述,有所忽略或低估。IPCC 对于 20 世纪气候变化中的人类活动影响起主要作用这一观点的确定性不断提高,但目前还不能对过去气候变化的原因给出明确的解释,对

未来气候变化预估的可靠性也还比较低。GCM 的分辨率缺陷虽然可以通过多模式集合方法和区域气候模式来弥补,但是许多将 GCM/RCM 用于区域气候变化预估研究中依然只能针对人类活动造成温室效应(有些包括气溶胶)的排放情景,未来各阶段的气候变化预估结果不尽相同,气候模式对于其他强迫因子的可预测性也尚不清楚。

2.1.2 基于地球系统科学和气象学的气候变化统计学预估

针对基于气候模式进行气候变化检测、归因和预估研究的讨论和争议往往来自于气象学、地球物理学和大气物理学等地球系统科学的相关研究。

早在 1991 年,Friss-Christensen 等^[71]首次发现太阳黑子周期长度的变化与全球气温变化有很好的一致性。汤懋苍等^[72]通过对 2500 年来太阳黑子周期长度(Sunspot Cycle Length, SCL)、中国旱灾频率及气候冷暖期的相关分析后提出:对年代际(10 年)和百年尺度,太阳黑子周期长度(SCL)可以作为气候变化的具体指标,SCL 较长时对应我国的寒冷期,SCL 较短时对应我国的温暖期,而且 SCL 较长时的旱灾频率显著多于 SCL 较短时。

高晓清等^[73]进行了地磁场与气候变化关系的探索。太阳活动强烈地影响着地球磁场,太阳黑子周期平均为 11 年左右。实际上,太阳黑子周期的长度在不同的周期内是不同的,表示了太阳磁场活动的强弱。太阳黑子周期长度也有长时间变化,最明显的是 80~100 年周期。通过比较近 600 年来太阳黑子周期长度、全球平均气温和地核-地幔边界(Core-Mantle Boundary, CMB)上的地磁场能量变化发现三者有很好的一致性。在斯玻勒极小期(1460~1550AC),太阳黑子周期长度变长,太阳活动减弱,CMB 上的地磁场能量达到一个最小期,但全球平均气温并不是最低的。而在蒙得尔极小期(1645~1715AC),太阳活动又进入一个平静期,此时 CMB 上的地磁场能量仍然很小,全球气温也降到一个极低期。太阳活动在 1750 年前后再次活跃,地磁场能量同时增加,达到极大值,而气温在过了约 40 年才回升,达到极大值。在这段时间内,太阳活动的最后一次平静期在 1850 年前后出现,CMB 上的地磁场能量有所下降,同时全球气温变冷,19 世纪为最冷期。之后太阳进入强的活跃期,CMB 上地磁场能量和气温均持续上升,但气温变化滞后于地磁场能量的变化。基于前人的研究理论,对“地磁场影响气候变化”给出了可能的物理解释:根据地球发电机理论,地磁场的变化意味着地内电流发生了变化,而地内电流的变化将引起地球内部的热状况发生变化,使得从地内向大气圈的热量输入(同时还应该有物质输入,如 CO₂、H₂O 等)发生变化,从而引起气候变化。同时指出,地磁场先于气温变化约几十年,可能小于 50 年。如果这种关系继续存在,地磁场观测结果则预示着重 21 世纪初,全球增温的趋势将减缓。

王绍武等^[74]指出近百年（1880~1989）和近千年（1000~1989）全球平均气温与太阳活动的相关系数分别为 0.88 和 0.73，与火山活动的相关系数分别为-0.40 和-0.49，可见这两个因子无论在近千年还是在近百年气候变化中均有重要意义。利用太阳黑子数预计，与 1960~1990 年平均水平相比，1990 年、2000 年、2010 年、2020 年和 2030 年由于太阳活动减弱造成的全球温度变化分别是-0.10℃、-0.19℃、-0.25℃、-0.16℃和-0.10℃。一次强火山爆发对半球尺度气温的影响估计在 0.1~0.5℃之间。1880s~1900s 和 1910s~1930s 火山活动两次明显减弱，同期全球平均气温上升 0.12℃及 0.22℃。根据周期分析，未来 50 年是火山活动比较激烈的时期。10 年平均气温可能因此而下降 0.10~0.18℃，相比于 1960~1990 年平均水平，1990 年、2000 年、2010 年、2020 年和 2030 年由于火山活动增强造成的全球温度变化分别是-0.11℃、-0.16℃、-0.10℃、-0.11℃和-0.18℃。由此可以估计，相比于 1960~1990 年平均水平，1990 年、2000 年、2010 年、2020 年和 2030 年由于自然变率造成的全球温度变化分别是-0.21℃、-0.35℃、-0.35℃、-0.27℃和-0.28℃。

目前，对于气候变化问题普遍存在 3 种观点，第 1 种认为 20 世纪气候变暖主要由于人类活动造成的温室效应增强所导致，21 世纪不同的温室气体排放情景将导致气候进一步变暖，而且是加速变暖，同时认可自然外部强迫（太阳活动和火山活动）将对气候产生冷却作用，但是这一冷却作用仅能抵消很小一部分温室效应造成的变暖，可以忽略。以 IPCC 为代表的气候模式预估大多支持这一观点。第 2 种观点认为 20 世纪气候变暖仅是气候自然变化的结果，20 世纪的变暖幅度并没有超过工业化以前的自然变率的限度，而且温室气体与气候变化的相关性被夸大了，主导地球气候的因素是自然变率。这一观点主要来自于 NIPCC。第 3 种观点则认为温室效应和自然变率这两方面对于气候变化的影响均不可忽略，而且未来两者对于气候变化的影响趋势相反，其中一方的部分影响会被另一方所抵消。第 3 种观点来自于目前地球系统科学和气象学领域，然而目前对于气候变化中自然和人类影响的联合预估仅仅停留在将利用统计学方法估算未来自然变率（包括太阳活动、火山活动、太阳黑子和地磁场等）对气温的影响与基于未来人类排放情景的气候模式模拟结果进行简单的叠加^{[74]、[75]}。不难理解，各种外强迫和气候系统内部的相互影响具有无法估计的复杂性，这种简单叠加必然存在着很大的不确定性。

2.2 中国区域百年至千年以上尺度气候变化分析

2.2.1 近百年气候变化分析

在 2007 年发布的第 4 次评估报告(AR4)中,IPCC 指出“近 100 年(1906-2005 年)全球地表温度的线性趋势为 $0.74 \pm 0.18 \text{ }^\circ\text{C}$ ”。

在 20 世纪全球气候变暖的背景下,中国近百年的气候变化情况如何?

王绍武^[76]在对已有的 4 个长度达到百年以上的中国温度序列进行相关分析之后,认为虽然这 4 个序列的资料来源与分析方法不同,但是反映的温度变化却基本一致,相关系数在 0.73~0.93 之间,其中由王绍武等(W 序列)和唐国利等(T 序列)^[78]建立的温度序列与各序列的相关较高,代表性较好。从 W 和 T 序列可以看出,进入 20 世纪后,我国除了在 1950s 到 1960s 出现过降温阶段之外,其他时间段都处于增温阶段,1910~1940 年是第一个升温期,1940s 出现温度第一个峰值,1950s 温度明显下降,1950s 到 1960s 保持较低的温度。从 1970s 开始温度缓慢上升,直到 1970s 末至 1980s 初才恢复到接近平均。1980s 末到 1990s 显著回升。如果计算直线增温趋势,1906~2005 年这一百年里,W 序列的变暖速率为 $0.53 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ a}$, T 序列为 $0.86 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ a}$ 。可以相信,中国处于气候变暖进程之中。

早在 1990 年左右,许多学者为了研究全球气候变化开始针对北半球或全球建立气温序列,并不断更新。研究全球温度变化时包括陆地温度和海表温度,对于中国而言全部为地面温度,不包括中国所属海域的海温。目前较有代表性和说服力的陆地温度序列有 4 个,分别是 2000 年 Hansen 等^[78]、1999 年 Jones 等^[79]、1999 年 Vinnikov 等^[80]和 1998 年 Peterson 等^[81]建立的。这 4 个序列在北半球和全球范围内的序列相关性较高^[76]。一般认为 Jones 等建立的温度序列涵盖的资料最全面,是较好的序列,IPCC 曾在评估报告中将 Jones 等的温度序列与 Folland 等的海温序列结合作为全球温度序列。比较近百年(1906~2005 年)4 个中国温度序列与北半球、全球温度序列发现,相关系数在 0.60~0.86 之间,同时中国与北半球的相关高于与全球的相关。总体上可以认为中国温度与全球、北半球温度变化的一致性在统计学上是可以接受的。

中国的气候变暖与全球气候变暖有较好的同步性,但不完全一致,中国气候变暖也有自己的特点。从全球来看,1940 年以前,气候变暖主要集中在北半球高纬度地区,1940 年以后,气候变暖开始向全球化发展,其中 1965 年至 1980 年变暖强度较大。1980s 全球开始显著增暖。然而中国在 1980s 并没有像全球平均那样显著高于 1970s,气温略低于近百年平均值,1980 年前后的变暖未达到突变程度^[65]。不仅如此,1970s~1980s 中国长江流域气温下降,长江中、上游最为突出^[82]。实际上中国南部是 1980s 北半球温未上升的少数几个地区之一,这一点对于采用根据温室气体排放情景预测未来中国气候变化来说,需要特别注意^[74]。王绍武等^[83]在 1990 年和 1998 年先后两次建立了中国近百年年平均气温序列,

这两次序列中分别包括 1880~1989 年和 1880~1996 年的观测气温,从这两个序列全球或北半球平均温度序列的比较中可以看出,近百年中国气温变化与北半球或全球平均的最大不同是最暖时期出现在 1920s~40s,而全球则是 1980s 最暖。1996 年以来,中国年平均温度持续上升,至 2007 年到达峰值,这次变暖幅度已经超过了出现在 1920s~40s 的暖期,在全球范围内至 1998 年也到达了峰值,同样超出了 1920s~40s 的变暖幅度,如此一来,前述王绍武等关于中国与全球温度变化的区别就不太成立。然而不可否认,虽然中国与全球的两次变暖均呈现逐渐增强的态势,但中国发生在 1920s~40s 的增暖明显强于全球平均水平,几乎是后者的 2 倍,随后 1950s~1970s 发生的降温幅度也明显强于全球平均水平,中国先后发生的暖期和冷期之间的温度波动达到了 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$,而且中国第二次暖期比全球平均推迟了近 10 年。

目前普遍认为中国近百年(1906~2005 年)增暖幅度在 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,但是值得注意的是,根据以中国东部为主的 1905~2001 年台站观测到的最高和最低温度,平均得到的中国气温增幅为 $0.81\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{a}$,根据包括中国西部的日平均气温观测资料和代用资料的综合分析,得到 1880~2002 年中国气温增幅则为 $0.58\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ ^[66]。从近 50 年(1951~2005 年)中国年平均温度变化速率分布情况可以看出,变暖速率有明显向北增加的趋势^[76]。王绍武等^[83]于 1998 年建立近百年(1880~1996 年)中国年温度序列时,将中国划分为 10 个区,然后根据每个区的面积加权平均得到代表中国的气温序列。根据这一序列,1880~1996 年中国年平均增温为 $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{a}$,这一升温幅度小于前述 $0.5\sim 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{a}$,主要是因为序列中缺少 1996 年至今的气温观测数据。然而,该序列依然很有价值,从中可以看出各个区域在 1880~1996 年的温度变化幅度差异很大,从 $-0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ 到 $1.01\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ 不等。可见,气候变化的地区性差异在中国体现的比较明显。

有研究发现^[84],近 50 年来中国东部的年代际气候变化也呈现出显著的季节特征和区域性特征。北方在变暖,而长流流域则在变冷。北方地区的增暖在冷季更为显著,而长江流域的变冷在春夏两季更强。目前无论是大气环流模式还是海气耦合模式的模拟研究均能够模拟出近 50 年以来中国年平均温度的变暖趋势,并体现出变暖与自然和人为外部强迫因子的相关性^{[85]~[87]}。然而,对于中国东部地区的变冷,在机理上并不清楚。观测和模拟研究多认为春季变冷与北大西洋涛动的年代际变化有关(周期为 65 年)。对于夏季变冷则说法不一,许多观测分析和数值模拟研究指出气溶胶浓度是主要影响因子^{[88]~[93]},模拟结果显示,该区域夏季硫酸盐气溶胶的负辐射效应超过了温室气体的增暖效应,从而对温度的变冷贡献显著。同时,太阳辐射减少,太阳常数变化^{[93]、[94]}、大尺度环流的年代际变化^{[84]、[95]~[97]}、大西洋和印度洋变暖^{[98]~[100]}均有研究认为对中国东部变冷产生了

影响,许多区域气候模式的模拟结果证实,硫酸盐气溶胶对中国东部变冷具有显著影响^{[87]、[101]~[105]}。不难发现,上述因子均属于自然变率,这意味着自然变率对中国东部气候的影响值得关注。

2.2.2 千年及以上尺度气候变化的气象学分析

1. 10万年冰期-间冰期旋回与全新世

进入距今 250 万年前的第四纪以来,全球气候存在一个重要特征:冰期-间冰期旋回 (Glacial-Interglacial Cycle)。根据近 740ka 的南极冰芯资料^[106], 100ka (10 万年) 旋回明显存在,尤其在近 430ka 非常突出。深海沉积 $\delta^{18}\text{O}$ 、海平面、黄土磁化率和中国黄土粒度等资料也提供了明显的冰期-间冰期旋回的证据,在不同时期还能看到 400ka、66ka、41ka、23ka 和 19ka 周期,除了 41ka 周期在距今 80~250 万年较强之外,其他周期都相对微弱,距今 60 万年以来,100ka 周期占绝对优势。总体来看,100ka 周期占比很大。但是无论如何,大部分周期反映了地球轨道要素变化的影响,如地轴倾斜度 41ka 周期,地球轨道偏心率 400ka 及 100ka 周期,及岁差 19 ka 及 23 ka 周期,这些周期是第四纪冰期-间冰期旋回的主旋律^[107]。

在一个 100ka 年旋回中,间冰期平均只占旋回长度的 20%,即 20ka 左右,并处于旋回的尾部,在不同的旋回中,间冰期长短并不一样,240kaBP (距今 24 万年) 的间冰期只有几千年,而 400kaBP 的间冰期长达 28ka。目前我们正处于间冰期中,气候温暖,这个间冰期被地质学家称为全新世,一般把冰期冷事件 - 新仙女木事件 (YD) 结束的时间看作全新世的开始,即从 11.5kaBP 开始的,至今已延续了 1 年以上,目前已经超过了过去最短的间冰期。近百万年格陵兰冰盖活动的记录表明末次间冰期 (约 130~115kaBP) 及更早的两个间冰期,持续时间均较短,只有 15~20ka,此前的间冰期长达 30~45ka,温度也比全新世高。根据地球轨道要素变化计算未来 100ka 地球各纬度冬夏接收太阳辐射的变化来看,未来 30ka 之内不存在北半球高纬夏季接受太阳辐射明显减弱的可能,因此,不可能在此时间内开始一个新的冰期。下一个冰期可能要到 30 ka 之后才能到来,全新世可能是一个持续时间较长的间冰期^[108]。

2. 全新世的气候特征

19 世纪后期,人们根据北欧孢粉记录提供的植被情况划分北欧的气候区^[109]。1970 年, Hafsten 把全新世分为温度上升期,即小暖期 (Microthermal), 大暖期 (Megathemal) 和温度下降期,即降温期 (Katathemal), 并将 9.5~2.5kaBP 定为大暖期。Hafsten 曾根据树林向高山扩展的高度,按气温随高度递减率计算,得到大暖期温度比现代高 2~3℃。施雅风等^[110]估计大暖期温度比现今高 2℃左右,华北等地可能高 3℃,华南仅高 1℃。经分区计算后合并为中国温度距平 (对

1880~1979 年平均) 约 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[111]。

全新世以来近万年的气候变迁可以通过 4 个关键时期 (特征时期) 来描述: 大暖期 (Megathemal)、中世纪暖期 (Medieval Warm Period, MWP)、小冰期 (Little Ice Age, LIA) 和现代暖期。其中现代暖期即 20 世纪变暖, 中世纪暖期 (MWP) 一般指公元 900~1300 年, Lamb 最早提出小冰期 (LIA) 为公元 1550~1850 年。

王绍武等^[112]将中国划分为 10 个地区, 选取 10 个有代表性的孢粉序列, 按各区面积加权平均得到近万年中国的平均气温序列, 从中得出, 如果以气温稳定高于现今 (近百年平均) 为标准, 则大暖期在 9.5~3.0kaBP, 在大暖期的盛期, 全国平均气温比现今高 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 时间在 5.5~6.0 kaBP 及 7.0 kaBP 前后。10 个地区在大暖期的年平均气温高于近百年平均的气温值从 $1.0\text{~}4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 不等, 区域差异较大。

对中世纪暖期 (MWP) 和小冰期 (LIA) 的年代划分一直是古气候研究领域争议最大、资料最繁多的问题之一。

王绍武等^[112]根据多人的研究重建了近 1200 年中国东部、西部和东西部平均气温序列, 指出 MWP 时期中国东部存在 2 个温暖阶段, 分别是公元 9 世纪后半叶到 11 世纪末和 13 世纪, 中国西部 10~13 世纪则无明显暖期, 12 世纪的寒冷在中国西部比东部明显。

竺可桢^[113]最早指出中国小冰期有 3 个寒冷阶段, 出现于公元 1470~1520 年, 1620~1720 年和 1840~1890 年。竺可桢进一步根据物候的变化推测小冰期的寒冷程度, 认为 17 世纪中期冬季要比现代气温低 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年平均气温可能低 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据王绍武等^[112]建立的华北和华东小冰期气温的 10 年平均气温距平曲线, 可以看出两个地区在小冰期的气温变化比较一致, 基本代表了我国东部小冰期的气温变化情况, 大体上小冰期气温比近百年低 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 同时说明近千年来中国有 5 个冷期, 分别是 12 世纪前半期、14 世纪前半期、15 世纪后半期到 16 世纪前半期, 17 世纪和 19 世纪, 后 3 个冷期可以认为是小冰期的 3 个冷期。王绍武^[114]还综合分析了东亚、欧洲、原苏联、北美、北极及南半球近千年的温度变化, 得出了与中国东部基本一致的 5 个冷期, 其中前 3 个较弱, 后 2 个较强。

3. 近 2000 年的气候特征

近 2000 年以来的气候特征对于 21 世纪气候变化预估具有重要意义, 中世纪暖期 (MWP) 与小冰期 (LIA) 发生在现代气候变暖之前, 属于自然气候变化, 也是距现代最近的暖期和冷期, 研究这两个特殊时期的气候特征、千年尺度上气候波动的幅度和速率等能够为气候变化预估提供参考。

在经历了全新世大暖期后, 全球气候进入了相对稳定的公历纪元, 近 2000 年以来, 发生在公元 900~1300 年的中世纪暖期 (MWP)、公元 1550~1850 年的

小冰期 (LIA) 和 20 世纪的现代变暖这 3 个特征时期先后出现, MWP 由两个温暖阶段(公元 850~1100 年和公元 1200~1300 年)和一个寒冷阶段(公元 1100~1200 年)组成, 小冰期则由 3 个寒冷阶段(公元 1450~1550 年、公元 1600~1700 年和公元 1800~1900 年), 初步呈现数个程度不一的冷暖期交替出现的气候波动。

根据分布于全球 10 个 50 年平均温度序列, 近千年最暖在 11 世纪, 最冷在 17 世纪; 11 世纪可能比近千年平均温度高 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 17 世纪比近千年平均温度低 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^{[114]、[115]}。MWP 及 LIA 之间的振幅则约为 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。中国是世界上 MWP^{[116]、[117]}和 LIA^{[118]、[119]}均比较明显的地区。目前来看, 大多数研究人员同意 MWP 和 LIA 形成源于太阳活动^{[120]、[121]}和火山活动^{[122]、[123]}。近千年平均温度与这两个因子有很高的相关性, 与火山活动相关系数为 -0.49 , 与 ^{14}C 丰度相关系数为 -0.73 ^[114]。

到 1999 年为止, 中国东部 20 世纪的温暖程度并未超出过去 2000 年的最暖水平, 同时波动幅度也没有超过过去 2000 年曾经出现的最高水平。

以 1951~1980 年为基准, 中国东部在 20 世纪 80 年代之后的 19 年(1981~1999 年)相比于 1951~1980 年增暖 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在近 2000 年里比 1951~1980 年温暖的 30 年时段共有 23 个, 明显偏暖(温差 $>+0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)的时段有 5 个, 其中 2 个最暖时段均处于在 MWP 后期。与 1981~1999 年温暖程度相当的时期有 2 个。比 1951~1981 年寒冷的时段共有 34 个, 明显偏冷(温差 $<-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)的时段有 21 个。相对于 1951~1980 年来说, 中国东部 20 世纪(1920s~1990s)的温度距平为 $0.20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 略高于中世纪暖期(930s~1310s, $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$)。但是, 中世纪暖期两个温暖时段(930s~1100s 和 1200s~1310s)的温度距平则分别为 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}$, 均高于 20 世纪的温暖程度。另外, 隋唐暖期(570s~770s)的温度距平为 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}$, 也高于 20 世纪变暖。若以年代际(10a 尺度)气候作为分析对象, 20 世纪最暖年代(1990s)的温度距平为 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, 与中世纪暖期第一个暖期中最暖 10 年(1060s, $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$)很接近。从相邻年代间的最大升温幅度来看, 20 世纪年代间的最大升温幅度为 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 略低于中世纪暖期第一个暖期和小冰期中后期年代间的最大升温幅度, 同时 20 世纪年代间的降温幅度也明显偏小。由此说明, 20 世纪暖期总体上较暖, 年代际的波动幅度相对较小^[124]。

中国 20 世纪第一个暖期开始(1920s)以来, 作为参考基准的 1951~1980 年是唯一的降温期, 则 20 世纪的温度波动幅度为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在多个冷暖期内最冷 30 年与最暖 30 年温度距平之差从 0.3 到 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 不等, 最大波动发生在中世纪暖期。纵观过去 2000 年的温度变化, 最大波动为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[124]。

从百年以上尺度来看, 20 世纪的变暖处于小冰期结束后的回暖, 始于 19 世纪中后期, 至 20 世纪末迅速转暖。在过去 2000 年中, 气候冷暖阶段转化往往呈

现快速变化的特点，20 世纪快速升温也不是唯一的。20 世纪增暖可以从 1861~1890 年开始考虑，至 1981~1999 年，温度升高了 1.5℃，升温率高达 1.1℃/100a。对中国东部每 5 个 30 年计算距平变化率，过去 2000 年中，除 20 世纪变暖之外，百年温度升降幅度达 1℃ 的冷暖转换过程共有 4 次^[124]。

20 世纪气候变化的不唯一性为气候相似型相关研究提供了可能。气候相似型包括时间相似和空间相似两种类型，近 2000 年气候长期变化的重现有利于对现代变暖历史相似型的探索，从而讨论历史上某一阶段在未来出现的可能性，对今后的气候变化预估具有重要的借鉴意义。

过去的时间相似型研究中，常常将中世纪暖期（MWP）作为 20 世纪变暖的主要候选^{[125]、[126]}。对此葛全胜等^[124]持不同看法，认为隋唐暖期（公元 570s~770s）与 20 世纪暖期最为相似。20 世纪初的增暖可以看做气候从持续数百年的寒冷阶段（LIA）向温暖阶段转变的快速升温期，纵观 2000 年以来与 20 世纪变暖速度接近的 3 个暖期（隋唐暖期、中世纪暖期的第一个暖峰和中世纪暖期的第二个暖峰），只有隋唐暖期前期的寒冷期在持续时间和寒冷程度上可与 LIA 相类比，而 MWP 前期的寒冷期与小冰期并不相似。

基于气候冷暖交替的时间相似型探索，许多研究围绕着气候变化在千年尺度上的自相似特征展开，中国科学院地理科学专家葛全胜^{[124]、[127]~[130]}对此进行了大量的研究工作。

根据中国东部地区过去 2000 年温度序列，针对 1500s~1990s（包括 20 世纪的升温过程与小冰期中后期的 2 个冷谷）的气温序列与包括其他 3 个暖期及之前的寒冷过程气温序列进行相关分析也得出了同样的结论，与 150s~650s（包括隋唐暖期与其前冷期的 2 个冷谷）相关系数较大，为 0.72^[124]。

20 世纪暖期与隋唐暖期之间相距 1350a，根据过去 2000 年的温度序列，从现代开始向前的 20 个时段数据（1410s~1990s，共 600a）、17 个时段数据（1500s~1990s，共 510a）和 13 个时段数据（1620s~1990s，共 390a）为子序列，逐点（30a 间隔节点）向前滑动计算落后相关系数，以估算二者的相似程度，结果显示，3 组数据生成的落后自相关系数序列均在落后 1350a 左右处的自相关系数达到最大，其中 2 组达到 0.7 以上。基于过去 3000 年我国冷暖变化阶段，1350a 的重现周期包括了 4 个长度在百年以上的冷暖期，分别是持续 200~250a 的暖期、150~200a 的冷期、350~400a 的暖期和 550~600a 的冷期，每个冷暖期中包含若干个年代际的相对冷暖事件。过去 2000 年温度序列中，从 570s 到 1910s 构成了一个完整的 1350a 周期旋回，较 1950s~1970s 平均温度来说，570s~770s 为暖期，长度为 210 a，温度距平为 +0.23℃；780s~920s 为冷期，长度为 150 a，温度距平为 -0.50℃；930s~1310s 为暖期，长度为 390 a，温度距平为 +0.18℃；1320s~

1910s, 长度为 600 a, 温度距平为 $-0.39\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[127]。将中国东部作为一个整体来看, 百年以上的冷暖交替过程往往存在 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上升降幅度, 变化速率一般也在 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ 年}$ ^[130]。

在温度序列的落后自相关分析中, 自相关系数序列在落后 210~240a, 450~480a, 690~720a 和 960~990a 分别出现峰值, 说明在气候的百年际波动上, 双世纪(及其倍数)波动是最为突出的^[127]。将重建温度序列与大气-海洋耦合模式所模拟的中国东部过去 1000a 温度变化结果相结合, 发现在年代和百年际尺度上, 中国东部温度变幅分别达 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.5\sim 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。通过小波分析方法得出在百年至千年尺度间, 可能存在 100a、200/250a、300a、400a、600a 和 1000a 等时间尺度的准周期波动。从重建温度序列中可以看出, 1~3 世纪、9~13 世纪(MWP) 以及 20 世纪等 3 个温度阶段是千年尺度上的暖锋, 而隋唐暖期只属于 200~600a 尺度的暖锋, 而且 20 世纪在其他百年际时间尺度的波动上也属于暖锋^[129]。

10 万年冰期-间冰期旋回, 进入全新世以来的大暖期, 进入公元纪元以来的中世纪暖期、小冰期和现代变暖都是客观存在的气候变化。现代变暖的不唯一性为气象学、地理科学领域打开了对千年尺度气候变化规律性的探索之门。一些学者从对现代气候变暖特征的深入研究入手, 根据古气候、物候资料和近期观测数据, 建立了千年尺度中国东部的气温序列, 从气象学角度针对包括现代变暖和之前的小冰期在内的冷暖交替波动振幅、冷暖阶段持续时间和温度变化速率等方面展开了现代变暖时间相似型研究, 从统计学角度对气温序列进行相关分析。从目前的研究成果来看, 长期气候变化具有一定的周期性。综合来看, 从当前时段至未来 100 年的气候变化中, 会起到重要趋势性影响的百年尺度周期可能在 200a~600a 之间, 在百年尺度周期内的温度波动幅度为 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

依据百年至千年尺度的温度序列进行分析时, 往往采用 30a、50a 等年代尺度作为时间节点, 往往掩盖了年代际气候变化特征。IPCC 曾在 AR4 中指出对于区域尺度气候变化归因存在难度的重要原因之一就是区域尺度的自然气候变率较大, 也就是说自然气候变率对区域气候的影响较大。目前, 人类了解程度较高的自然外部影响因子即太阳活动和火山活动。太阳黑子周期约为 11a 左右。太阳黑子周期长度也有长时间变化, 最明显的是 80~100a 周期。在自然系统内部振荡中, 北大西洋年代际振荡(AMO) 对东亚季风气候的年代际变化具有显著的调制作用, 暖位相 AMO 增强东亚夏季风, 减弱冬季风, 冷位相则相反, 最近 20 多年来我国冬季的显著增暖与 AMO 处于暖位相有关。AMO 具有 65~80a 周期^[131]。根据近 400 年北半球的重建气温进行经验模态分解(EMD), 可以分解出多个振荡周期, 其中 11a 和 22a 的“海尔周期”是和太阳活动相联系的周期特征, 还有 40~45a 周期和 80a 周期, 并将最后得到的波动性趋势分量认为是更长尺度的气

候变化,其中包含了气候系统以外的周期变化和非线性反馈作用^[132]。我国 1911 年以来 5 年平均的全国年温度等级变化中也体现了 40a 周期^[133]。

年代际尺度的振荡会不可避免的出现在当前时段至未来 100 年的气候变化中,可能出现的百年以内尺度的振荡周期为 40~80a,波动振幅约在 1.5~2℃ 之间。目前来看,基于气象学分析的历史长期气候变化分析大多只有年平均气温变化,由于不同季节建筑能耗对于温度变化的响应程度不同^[134],这对于气候变化对建筑用能需求的影响研究来说略显粗糙。不同季节的年代际振荡幅度并不完全一致。根据重建的 1470 年以来我国华东四季的 10 年平均气温分析了不同季节的气温变化幅度,可以看出在年代际尺度上,冬季振动幅度最大,约有 2℃,春季振荡幅度最小,约有 1.5℃,秋季和春季居中,在 1.5~2.0℃ 之间,并指出春季和秋季在近百年比小冰河时期的低温波动减小^[135]。

2.3 时间序列分析方法

时间序列分析 (Time Series Analysis) 是研究事物发展变化规律的一种量化分析方法,隶属于统计学^[136]。早期的时间序列分析通常都是通过直观的数据比较或绘图观测,寻找序列中蕴含的发展规律,然而,随着研究领域的不断拓广,人们发现单纯的描述性时序分析有很大的局限性。在金融、保险、法律、人口、心理学社会科学领域,随机变量的发展通常会呈现出非常强的随机性,而仅通过对序列简单的观察和描述,总结出随机变量发展变化的规律,并准确预测出它们将来的走势通常是非常困难的。为了更准确地估计随机序列发展变化的规律,从 20 世纪 20 年代开始,越来越多的科学家利用数理统计学原理分析时间序列。研究的重心从表面现象的总结转移到分析序列值内在的相关关系上,从此开辟了一门应用统计学科 - 时间序列分析^[137]。时间序列分析是动态数据分析处理的一种重要的方法,以概率统计学作为理论基础来分析随机数据序列(或动态数据序列),并对其建立数学模型,应用于预测、自适应控制等诸多方面。

2.3.1 随机变量与时间序列

随机变量若同时随着另一参数(如时间 t) 而演变,则必然组成多个随机变量,假定每一时刻都对应着一个随机变量,必然组成无穷多个随机变量,这种随着另一个参数(如时间 t) 而变化着的随机变量就称为随机过程。

一簇按参数 $t \in T$ 变化的随机变量,称为随机过程,记为 $\{X(t), t \in T\}$, 简记为 $\{X(t)\}$ 。通常 T 是取: 1) $T = (-\infty, +\infty)$ 或 $T = [0, +\infty)$; 2) $T = \{\dots -2, -1, 0, 1, 2 \dots\}$ 或 $T = \{1, 2 \dots\}$ 。若 T 取 1), 则称 $\{X(t)\}$ 为连续参数过程, 若取 2) 则称 $\{X(t)\}$ 为离散参数过程或随机序列。 T 称为参数集,一般都只指

时间 t , 连续参数过程的观测结果是 $t \in T$ 的连续域上的数值记录, 时间上的连续函数, 而离散参数过程的观测结果则是一个有序数值集合。

一般说来, 概率统计仅仅涉及到个别随机变量或有限个随机变量 (即随机向量), 而“随机过程”则是兼有随机变量与普通函数双重属性的一簇无穷多个随机变量的集合, 因而其概念和性质更为复杂。所谓双重性质是指, 一方面, 对于某固定时刻 t_0 来说, 过程 $\{X(t)\}$ 表现为随机变量 $X(t_0)$, 这一固定时刻 $t = t_0$ 所对应的随机变量就称为该随机过程的一个“截面”, 另一方面, 对某一次观测而言, 过程 $\{X(t)\}$ 又表现为时间 t 的 (非随机) 函数, 即由各个时刻的一种可能取值所构成的样本函数, 可记为 $x_i(t)$ 。那么, 全部样本函数 $i = [1, N]$ 的集合必然构成随机过程 $\{X(t)\}$ 的总体, 随机过程的总体就是 $\{X(t)\}$ 所有可能取值的集合。

在实际工作中, 常常不需要了解或不可能得到连续参数过程的全部可能记录, 而只能获得离散参数过程的观测记录或连续参数过程的离散化采样记录。这些时间上有序的记录, 都可认为是随机过程的观测结果, 即样本函数。与连续性参数过程不同的是, 它们是以离散时间为参数的数据记录序列, 通常把这种记录序列叫做时间序列, 或随机序列 (不一定以时间 t 为参数)。不难理解, 相比于“随机过程”而言, 时间序列就是一种离散参数随机过程或它的观测记录。

时间序列大致可以从“时间域”和“频率域”这两个方面加以分析, “时域”和“频域”是描述时间序列内部结构及其信号特征的两个不同的侧面。目前, 统计时序分析中的时域分析方法成为时间序列分析的主流方法, 它已经广泛应用于自然科学和社会科学的各个领域, 这种方法主要是从序列自相关的角度揭示时间序列的发展规律^[137]。

2.3.2 从气象学的角度理解时间序列分析方法

气象数据记录, 无论是连续的自记记录, 或者是离散时刻的观测记录或某一定时间区间的统计记录, 最终总是采用在等距时间间隔上获取的数字时间序列形式加以分析, 都可以认为是在时间上连续变化的气象变量随机过程的离散化采样的结果, 是典型的时间序列。气象数据时间序列如同其它自然科学的数据时间序列一样, 蕴含着极其丰富的气象信息, 人们必须根据各自的研究目的和需要, 设法提取那些具有规律性的气象信号而排除混杂其中的“噪声”干扰。

直观上, 气象时间序列的数据观测记录往往具有这些特点: 1) 数据的取值随时间坐标而变化, 任一给定时刻或给定时间区间上其数据取值具有某种随机性 (即不确定性)。2) 前后两两时刻 (不一定相邻) 的取值具有一定的关联性。这种关联性主要表现为两种形式, 第一种是循环性, 数据取值每间隔一定的时间又大致重复出现, 周而复始; 第二种是持续性, 数据取值持续保持在某固定值附近

摆动，经过一定时间后才有较大变动。3) 突变性或转折性。数据取值在某一时刻前后突然发生明显变动，形成转折。4) 从全序列整体来看，具有某种上升或下降趋势，甚至呈现波动性上升或下降趋势。这些特点虽然并不一定在某个序列中同时存在，但从直观上看，气象时间序列大都可能存在这些特点。一般来说，大多数气象时间序列都不是平稳时间序列，只有借助于各类数据处理方法将其非平稳特性从序列中分离出来，才能将原序列转化为平稳序列，分离序列中的非平稳信号正是气象时间序列信号处理的重要环节。

实际的气象记录序列，由于其非平稳性特征，可以表现为以下三种类型的结构：

$$\text{加法型: } Y_t = H_t + P_t + X_t \quad (2.1)$$

$$\text{乘法型: } Y_t = H_t P_t X_t \quad (2.2)$$

$$\text{混合型: } Y_t = H_t X_t + P_t \quad (2.3)$$

$$\text{或 } Y_t = P_t X_t + H_t \quad (2.4)$$

式中 H_t 称为趋势分量（一般指气候趋势），它表示气象要素在相当长年代内显示出的上升或下降的变化趋势。 P_t 称为周期分量（或循环分量），它一般是由两个以上周期不同的循环变化组成的，其中包括因受天文气候因素影响而固有的年（日）变化和周期长度不很严格（如几天、几天、几年或几十年）的周期性振动等。 X_t 称为平稳序列分量，它是由于气象要素受到各种不确定因素（含纯随机因素）的影响而形成的。

各个分量在实际序列中并不一定同时存在，往往可视问题的性质和研究目的采取不同的处理方法。例如，可根据研究对象和它的时间尺度，选取合理的采样间隔，以便使序列中有些分量显现清楚，而使另一些分量受到削弱或从序列中消除。如作气候预测时，因分析时间尺度往往在月（季）以上，有时用年际序列，这就自动消除了年（日）变化周期而使周期小于或接近统计时段的 P_t 分量也大受削弱。例如，在进行中期天气预报时，若采用逐日或逐候序列，则 H_t 不予考虑， P_t 中超过数年的周期也不必考虑，序列中只留下年变化和较短周期分量以及平稳随机项。 H_t 和 P_t 往往反映出数据的确定性变化，一般可采用经验函数（如多项式、指数函数、正弦函数、样条函数等）来逼近。而 X_t 分量主要由平稳随机序列的分析方法进行处理。

一般对非平稳时间序列可采用两类方法进行预处理。第一类是需要了解趋势项 H_t 和周期项 P_t 的具体演变规律，因而采用数学模型确定这两项的解析形式，第二类是无需确定趋势项 H_t 和周期项 P_t 的具体情况，希望通过某些方法消除它们的非平稳影响。前者常用趋势分离法来处理，后者则常采用差分运算及平稳性检验等处理方法。

趋势分离法的关键就是要确定或估计 H_t ，一般有移动平均法、经验函数拟

合法、正交多项式法和样条函数拟合法 4 种方法。移动平均又称滑动平均，它是以一连串部分重叠的序列平均值组成新序列的一种方法。移动平均值组成的新序列既可显示序列中的趋势，又可使短于移动平均时段的周期受到削弱和消除。移动平均方法简便易行，十分普及。经验函数拟合法就是建立以时间 t 及其乘幂项为自变量的多元回归方程来描述趋势分量，又称为回归分析法。一般趋势项 H_t 的多项式形式是 $H_t = a_0 + a_1t + a_2t^2 + \dots + a_p t^p$ 或 $b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^{1/2} + b_4t^{-2} + b_5e^t + b_6 \ln t + \dots$ 。根据最小二乘法或逐步回归实现拟合。但是，经验表明，对温度、降水等要素时间序列，取到二次曲线的形式即已足够。正交多项式法是针对经验函数拟合法的改进，若增加项数时，系数不必重新计算，而可在每次拟合时，逐次计算。样条函数拟合时间序列趋势线是近年来受关注较多的方法，样条函数 (Spline) 实质上是一种分段多项式。仅用经验函数拟合或正交多项式拟合，往往效果较差。样条函数拟合趋势线，可以较准确地反映复杂的升降趋势，这是它的最大优点，但计算繁琐。

识别和提取周期项 P_t 常用的方法有方差分析、相关分析、谐波分析和周期图分析方法。谐波分析常用于提取基本周期长度为已知的振动项，周期图分析可用于周期长度未知的隐含周期分析。谐波分析在气象上运用十分广泛，一般气象要素序列都有年 (日) 变化隐含其中，为了各种研究和分析的需要，通过谐波分析可将这类基本周期为已知的周期现象分离出来，同时又能以振幅和位相来加以定量描述，便于比较各种周期现象的差异。若给定序列的长度为 N ，谐波分析所能识别的各谐波周期长度只能是 $N, N/2, N/3, N/4, \dots, N/K$ 等，而实际序列存在的主要周期波动不一定临近这些周期，尤其在低频波段中，漏掉周期的可能性很大，周期图分析能够弥补这些不足。针对某周期函数的观测时间序列 Z_t ，取各种不同的 τ 作为试验周期，把 Z_t 展成傅里叶级数，根据其一阶谐波的傅氏系数可以得到一阶谐波的位相 ψ 和振幅 C_τ ，由于 τ 并不一定是 Z_t 的真正周期，则 C_τ 也不一定是它的振幅，只能称为试验周期 τ 的强度，记为 S_τ ，当 τ 是真正的周期 T 时， S_τ^2 达到最大值，此时 S_τ^2 则为周期 T 的谐波振幅的平方， S_τ^2 是 τ 的函数，将 S_τ^2 称为周期图。由于实际序列中混有随机成分，即使原序列中并不存在周期振动， S_τ^2 也会因随机影响而波动，甚至出现若干个极大值，因此需进行显著性检验，把周期振动造成的 S_τ^2 的极大值与因随机起伏造成的极大值区别开来。采用谐波分析或周期图方法，实际上都是把气象序列中的周期性统统视为正弦波，来逼近真实序列。

2.4 基于气候变化周期性分析的时间序列预测方法

2.4.1 已有预测方法的局限性

鉴于气候模式和地球科学的高度复杂程度,基于它们的预测方法对于研究人员的专业性要求较高,对于非气象学、地球物理学和大气科学专业研究人员来说,气候模式和地球系统基本可以看作一个黑箱。

然而,无论是基于未来排放情景的气候模式方法,还是基于气象学和地球科学的统计学方法,为了保证一定的准确性和可信度,多局限于年代际/年际时间尺度和区域以上空间尺度的气候变化分析,这对于气候变化对城市建筑能源需求的影响预测研究来说未免粗糙,一定程度上会降低预测结果对于城市能源规划和建筑可持续节能管理的参考价值。

目前出现的一些气候变化对区域建筑能源需求的影响研究大多采用 IPCC 温室气体排放情景驱动全球气候模式在区域范围模拟输出的月际天气参数预测结果作为研究基础。20 世纪的中国确实处于气候变暖进程之中,中国的气候变暖与全球气候变暖有很好的同步性,但不完全一致,中国的气候变暖有着自己的特点。从近百年气候变化中可以看出气候变化的季节性和地区性差异在中国体现的非常明显,在地区和城市空间尺度上可能有温室效应之外的重要影响因子存在,已有预测方法应用于中国地区或城市尺度气候变化预测存在很大的局限性。

从观测气象参数的时间序列特点来看,时间序列分析方法在气候变化预测中也有重要的研究价值。基于历史观测数据建立预测模型,多采用加法型时间序列模型: $Y_t = H_t + P_t + X_t$, 模型中的趋势项 H_t 和周期项 P_t 都是根据历史观测数据的时间序列分析捕捉到的历史时段气候的确定性变化规律,随机项 X_t 则反映时段气候变化的不确定性。采用基于历史观测数据建立的时间序列预测模型,可以在预测中维持原有观测气象参数的时间尺度,能够进行较高时间精度的预测。但常规的时间序列分析方法对长期气候变化的处理非常局限,多用于短期预测。在时间序列预测模型中,趋势项多为线性或非线性单调变化分量。由于短期内当前气候特征出现突变的可能性较小,当前时段趋势直接用于短期预测具有较强的可信度,单调变化的趋势项在预测时间段里仅仅体现为当前时段趋势的延伸,这样,对于预测结果的约束主要来自于周期分量。从历史长期发展规律来看,近 2000 年里出现了 7 次重要的冷、暖事件和多个冷暖波动,很显然,单调变量对于百年尺度及以上气候变化趋势的预测能力较弱。虽然样条函数拟合方法可以做到非单调预测,但是样条函数对于历史观测数据的长度和特征要求较高,才能进行分段多项式拟合。另外,以往的时间序列分析在气象参数预测中的应用往往受历史观测数据的时间长度限制,基于常规时间序列分析方法对于未来近百年的气候变化

预测需要建立在近千年的历史观测数据之上,然而迄今最早的气温观测记录大约在 1880 年,距今不足 150 年,只能用于未来几年或十几年的直接预测,十几年的预测结果确实能够用于短期内建筑能耗的变化预测,但城市能源规划产生的影响会波及一代、甚至几代人的能源开发和使用,必须站在发展的角度进行长远的合理规划,短期建筑能源需求预测对于基于城市能源发展的角度进行能源规划、能源政策和资源开发利用管理的参考价值不大。

2.4.2 本文提出的预测方法和技术路线

气候变化条件下的建筑能源需求研究中,如果气候变化预测这一重要的研究内容没有在合适的空间和时间尺度上进行,得到的能源需求变化的可信度和应用价值就会大打折扣。而已有预测方法在区域尺度和时间尺度上存在很大的应用局限性,为此,本文试图从区域历史长期气候变化和实际气象观测结果出发,找到新的气候变化预测方法,用于建筑能源需求的预测研究。

目前,气象学中应用较广泛的统计预测方法是时间序列方法。时间序列是指将某个统计指标按照时间顺序排列起来而形成的序列,并不是任何一组按时间排序的数据都是可以认为是时间序列,只有当数据能够反应某一现象的统计特性,才能构成时间序列。时间序列分析最初应用于经济领域,用时间序列表示某种生产活动、社会经济现象的统计指标随时间变化的过程,从这些指标中分析各种现象的演变规律。

时间序列预测是采用统计技术和统计方法从已知的时间序列中分析出某个统计指标随时间的变化规律,从而建立数学模型,对这一指标的未来发展趋势做出定量的估计。

时间序列用于预测分析有一个至关重要的前提:连续性,连续性是指客观事物的发展遵循一定的、合理的连续性,这是由事物本身的物理特性决定的。事物发展则是按照本身固有的规律进行的,在一定的条件下,只要规律赖以发生作用的条件不产生质变,事物的基本发展趋势在未来会继续延续下去。在气候系统中,土壤和水具有蓄热/蓄湿特性,温室气体具有保温效应,等等,这些气候要素的固有物理特性使得相关的天气参数具有连续性特点,如前后不同时间节点之间的年/月/日平均温度、年/月/日平均湿度参数之间具有一定的相关性。这种相关性也正是气候系统物理特性的体现,也许人们对于气候、地球系统本身物理特性和相互作用科学认知程度并不高,还不足以从物理方法上了解和呈现其发展变化,但是这种规律性是客观存在的,这也是时间序列预测方法能够应用于气象学预测的重要原因。

时间序列分析根据连续性规律,将历史数据中体现出的演变规律用来预测未来的发展趋势,认为事物的过去会延续到未来,这一理念的应用前提是在未来不

会发生突变,而且当前的现象能够表现未来的发展变化趋势,基于当前的现象的分析只能对当前时段呈现出的规律性给出较好的诠释,而对于较远时期的变化趋势则基本没有描述能力,这也是为什么时间序列分析用于短期预测的可信度较好,若延伸到长期预测,就会产生很大的偏离。因此,作者认为,如果能够跳出常规时间序列分析仅针对当前现象进行规律性分析的研究范围,将事物的长期发展规律通过合理的方式加诸于对当前现象的规律性之上,共同作为建立预测模型的依据,以长期发展规律来作为未来较远时期发生变化的趋势预测因子,或许能够弥补常规时间序列分析方法在长期预测上的不足。

由此,作者尝试将上述想法用于未来较远时段月平均气象参数的预测研究中,若将长期历史气候变化的规律性用于未来 100 年的气候预测,则需要对至少 2000 年的历史气候进行研究。基于对 20 世纪变暖的深刻认识,近千年尺度的中国东部温度序列在气象学、统计学的角度确实呈现出了一定的规律性和周期性。目前基于气候模式的气候变化预估大多只是针对 19 世纪中后期以来气候变化的模拟,来讨论 20 世纪的变暖。因此,这类气候变化预估中将无法体现基于千年尺度气候变化的气象学研究对于 20 世纪变暖的分析和对未来气候变化预估的讨论。作者认为,基于历史长期气候变化的研究虽然时间尺度较大,但它对于气候变化预估的参考作用是其他预测方法所不可替代的。

在常规的时间序列分析中,往往首先剔除时间序列中的不规则变动,从剩下序列分量中分析趋势和周期变化规律,将二者的组合用于时间序列的预测,但是这样的预测结果只能反映现象未来的发展趋势,在各个未来时间节点的预测值从本质上只能起到一个平均数的作用,实际值将围绕着它上下波动。因此,在对未来月平均时间尺度气候变化的预测研究中,作者考虑在建立时间序列预测模型时,不仅包含常规的趋势和周期变化,还在二者的基础上增加一个随机变化,希望通过这一方法使预测结果更接近于实际变化。在常规的时间序列分析中,主要是由于不规则变动来源于多个不可预测的影响因子,导致不规则变动的预测值难以求得。对于气象参数时间序列来说,在最初的分析中被剔除的不规则变动其实就是气候系统不确定性的反映,这一不确定性同样不可预测,因此,作者考虑以最初被剔除的不规则变动为基础提出对于未来月平均气候变化不确定性的预测情景,从而建立随机变量作为未来不规则变动的预测模型。

长期气候的规律性和气象系统中的不确定性因素是客观存在的,这在古气候演变、近万年和近千年的气候变迁中都有体现,无论造成这种变化的原因是什么,规律性和不确定性在当前时期和未来气候发展中很可能都会有所呈现。因此,充分了解和认识当前时期气候的变化规律和不确定性能够为未来气候变化的预测提供重要基础。

对于当前气候的全面认识主要来源于两方面：历史气候和近期气象观测。气象观测记录是典型的时间序列，在时间尺度较长的序列中，往往具有明显的长期趋势和不规则波动叠加于细微的随机振动之上。在气象时间序列中， H_t 作为趋势分量（一般指气候趋势），它表示气象要素在相当长年代内显示出的上升或下降的变化趋势。这种上升或下降趋势往往只是相对于有限序列长度的一种表现，如果序列更加延长，它可能只是循环变化或某种周期波动的一段升（降）分支。这一点与历史长期气候变化的规律性和周期性特点不谋而合，同时也为作者考虑将长期变化规律与常规时间序列分析相结合的想法提供了可能的突破口。

根据时间序列方法与历史气候变化的规律性之间体现出的共性，本文提出了基于区域气候变化周期性分析的时间序列预测方法，在近几十年区域实际气象观测的基础上，结合中国近百年和近千年气候变化的周期性分析，进行城市尺度上的月平均气候变化预测。这一方法将区域历史气候变化分析的区域性特点和长期预测能力，与实际气象观测在时间序列方法中得以保留的时间尺度优势相结合，解决了传统气候变化预测方法用于建筑能源需求预测的空间和时间尺度问题，技术路线见图 2.6。

本文将在区域尺度上以近千年的历史长期气候变化和近百年的气候波动趋势为基础，从近几十年的气象观测结果中探索气候变化的规律性和不确定性在当前气候中的表现形式和影响程度，基于这些特征，建立气候变化预测模型，考虑不确定性在未来气候发展中可能出现的变化，提出不同的随机振荡情景，对该区域未来 100 年的气候变化进行预测研究，作为评估该区域 21 世纪气候变化对建筑能源需求产生的影响提供重要依据。

为了排除不确定性因素对月平均温度的影响，充分认识月平均温度中的气候变化规律，本文采用时间序列方法对区域历史观测的多年逐月温度数据进行分解，剔除平稳序列分量 X_t 的噪声干扰，从而提取出带有趋势和周期特征的月平均温度 TC 序列。

本文对当前时期气候的规律性探索将通过对月平均温度 TC 序列的时间序列分析来完成，这个过程将与气候变化的周期性分析相结合，把一个百年尺度的温度变化周期作为温度 TC 序列的趋势项 H_t ，把一个百年以内尺度的温度变化周期作为温度 TC 序列的周期项 P_t ，根据历史气候中呈现出的百年际和年代际振荡周期长度、距今最近的百年际和年代际周期中重要冷事件的发生时段作为 H_t 和 P_t 分量中大、小周期的长度和谷值年份的可能范围，常规的时间序列分析中周期分量常常用正弦/余弦函数表示，本文中采用余弦函数来描述大、小周期的特征，建立加法型时间序列模型 $Y_t=H_t+P_t$ ，为了确定当前时段表现最为明显的气候变化周期，将不同的大、小周期长度和谷值假定构成的多个时间序列模型 Y_t 分别于

温度 TC 时间序列进行拟合, 从中辨识最明显的百年尺度大周期 $T1$ 和百年以内尺度小周期 $T2$, 最优大、小周期组合的判断过程中考虑了时间序列模型对历史气候中重要冷暖时期的体现程度, 同时将历史长期气候变化中百年际和年代际周期的温度波动范围作为大、小周期振幅确定的重要依据, 对于年代际小周期振荡还考虑了周期振幅的季节差异, 从而确定当前时段月平均温度的趋势特征和周期特征, 建立体现当前气候特征的最优时间序列模型 Y_t 。

本文基于区域气候变化周期性分析的时间序列方法针对近几十年月平均温度观测结果而建立的加法型时间序列模型中, 来源于历史发展规律的百年尺度大周期在当前时期的几十年里可能表现为一种上升(或下降)趋势, 但这种趋势是带有周期特征的趋势项, 从气候变化规律的角度来说, 其中可能包含了未来长期气候发展的特征信息, 具备一定的长期预测能力。因此, 基于千年尺度区域气候变化的规律性和周期性分析, 将百年以上气候变化周期用于温度时间序列预测模型中的趋势分量, 能够提高时间序列分析方法对气候变化的长期预测能力, 这对于缺少长期气象观测数据的气候变化预测来说, 具有一定的研究意义。本文将把该时间序列模型 Y_t 作为未来 100 年气候变化预测的重要基础。

在气候变化预测中, 前述 Y_t 模型在未来时间节点的预测结果只能看作是可能的平均值, 各种气象要素的不确定性因素会以围绕着这一平均值的波动来体现, 因此, 在已建立的时间序列模型 Y_t 的基础上, 需要叠加一个反映了气候变化不确定性的随机分量, 才能作为未来月平均气候变化的时间序列预测模型。本文预测模型中的随机分量根据从近几十年观测月平均温度序列中剔除的平稳序列分类 X_t 来确定, 同时考虑气候要素不确定性在未来 100 年可能产生的变化, 提出了 3 种发展情景, 分别是维持当前的不确定性影响程度、不确定性影响程度减弱和不确定性影响程度加强, 在不同发展情景下分别建立随机分量 X_t , 与原有的时间序列模型 Y_t 相叠加, 形成不同发展情景下的时间序列预测模型, 用于预测 21 世纪区域月平均温度的变化情况。

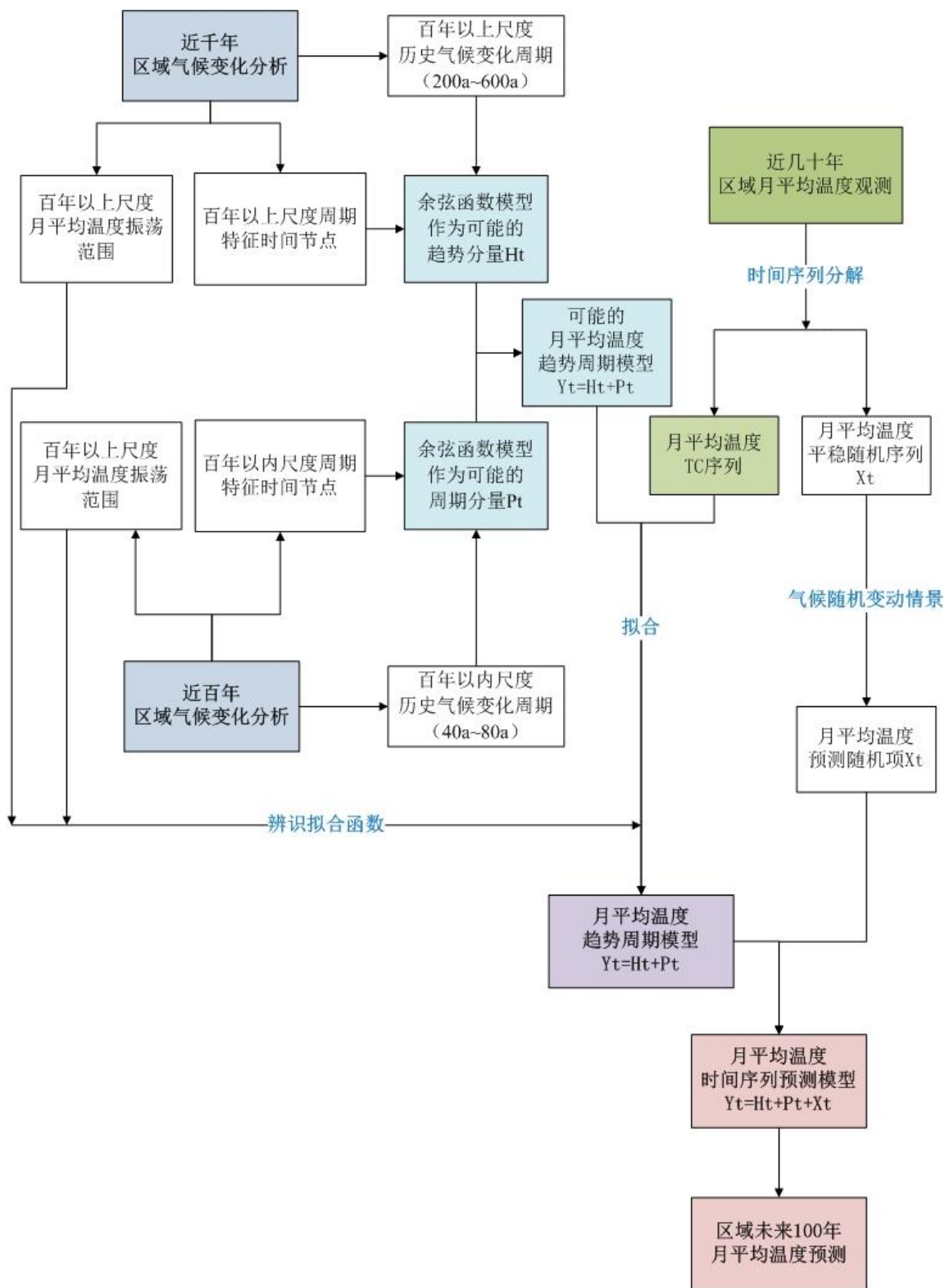


图 2.6 基于区域气候变化周期性分析的时间序列预测方法技术路线

2.5 月际天气参数的降尺度方法

建筑能耗模拟软件作为未来气候变化对建筑能源需求预测的重要工具,已被越来越多的业内人士关注和使用,尤其是随着建筑设计与功能分布的复杂性越来越高,建筑能耗模拟已经成为建筑设计中不可或缺的环节。然而,目前应用的建筑能耗模拟软件中的典型气象年天气输入参数文件是在当前气候观测条件下生成的,不适用于未来气候条件下的建筑能源需求预测,因此,未来建筑能源需求预测的重要前提就是生成一系列结合了气候变化影响预估的未来天气参数文件,应用于建筑能耗模拟软件,这也是探讨未来气候变化对能源需求影响的关键。

基于区域气候变化周期性分析的时间序列方法得到的月平均气象参数预测结果,本文将采用统计学降尺度方法,将月平均气候变化与城市现有典型气象年相结合,生成城市未来典型气象年,作为典型建筑模型的未来天气输入参数,利用建筑能耗模拟工具进行气候变化影响下的建筑能源需求预测。

2.5.1 降尺度方法

目前,无论是全球气候模式还是统计学、气象学、地球物理科学对于气候变化的预测时间尺度几乎都只能在月际及以上,才能保证一定的可信度。而建筑能耗模拟工具的使用需要输入逐时天气参数文件,才能进行全年能耗模拟,停留在月际以上时间尺度的气候变化预测结果将无法直接应用,这对于建筑能耗模拟工具在气候变化影响下的能源需求预测来说是一个不小的障碍。

降尺度方法打通了低时间精度气候变化预测结果应用于建筑能耗模拟工具的道路,一定程度上推进了气候变化条件下建筑能源需求变化的预测研究。

降尺度方法是区域化技术的一种,区域化技术的广泛应用源于全球气候模式(GCM)的空间分辨率问题,由于现阶段用于气候变化预估的GCM分辨率水平较低,不能很好地对区域地形特征和陆面物理过程予以正确的表述,使得模式对区域气候的模拟和预测存有很大的局限性和不确定性,从而引进了区域化技术。

除了降尺度方法之外,区域化技术还主要包括以下几种:1)建立分辨率极高的全球模式,使其分辨率达到60~100 km;2)建立分辨率可变的全球模式,并提高研究区域的水平分辨率。但这两种方法均存在计算量大、耗时长等不足;3)插值,即利用数理统计方法(如一般内插、勒让德降阶插值、指定圆半径内降阶插值等)做降阶处理。

降尺度方法较多用于将GCM输出的大尺度气候信息转化为区域尺度的地面气候变化信息。降尺度方法主要包括动力降尺度和统计降尺度两种。动力降尺度法就是利用与GCM耦合的区域气候模式RCM来预估区域未来气候变化情景,它的优点就是物理意义明确,能应用于任何地方而不受观测资料的影响,也

可应用于不同的分辨率。但它的缺点就是计算量大、费机时；区域模式的性能受 GCM 提供的边界条件的影响很大，区域耦合模式在应用于不同的区域时需要重新调整参数。统计降尺度方法则是应用数学统计方法将 GCM 输出的大尺度气候信息与独立的区域观测资料相结合，从而降尺度预估区域未来的气候参数变化。

目前，常用的降尺度方法有 3 种：1) 随机天气发生器方法；2) 插值方法；3) 时间序列调整方法 - Morphing。

随机天气发生器方法是以大尺度气候情况为条件运用天气发生器建立统计模型，天气发生器是一系列可以构建气候要素随机过程的统计模型，可以看做复杂的随机数发生器。天气发生器通过直接拟合气候要素的观测值，得到统计模型的拟合参数，然后用统计模型模拟生成随机的气候要素的时间序列，这样生成的气候情景的时间序列与观测值很相似，不仅能产生气候平均值，而且可以任意调整气候变率，生成任意长度的时间序列。

插值方法是直接对 GCM 输出的大尺度气候参数进行空间和时间上的插值，这种方法无法修正模式输出参数的偏差。

时间序列调整——Morphing 方法是目前国外研究项目中应用较广泛的降尺度方法。该方法是 2005 年由 S.E. Belcher 等提出，用于生成建筑能耗模拟所需的未来气象参数文件，Belcher 等^[138]基于 2002 年英国气候影响计划 (UKCIP02) 中由 SRES 系列情景 (IPCC, 2000) 驱动气候模型 HadCM3 的模拟结果，以 1971-1990 年为基准年，采用 Morphing 方法分别生成了 London、Manchester 和 Edinburgh 这 3 个城市在 2020s、2050s 和 2080s 时间段的典型气象年文件。香港现有典型气象年由历史年 1979-2003 年的气象数据生成，2011 年 A.L.S. Chan^[139]用 Morphing 方法生成了 2011 - 2030, 2046 - 2065 和 2080 - 2099 三个未来时段的典型气象年文件。该方法通过位移和伸缩，将已有气象参数时间序列与气候变化相结合，生成新的气象参数文件，保留了已有气象参数的物理特征，未来气候变化对建筑能耗的影响研究领域的许多研究人员^{[140]-[144]}都采用了该方法。

Morphing 方法包括 3 个计算步骤：

$$(1) \text{位移: } x = x_0 + \Delta x_m \quad (2.5)$$

$$(2) \text{线性伸缩: } x = a_m x_0 \quad (2.6)$$

$$(3) x = x_0 + \Delta x_m + a_m \times [x_0 - (x_0)_m] \quad (2.7)$$

式中 x_0 - 已有逐时气象参数；

Δx_m - m 月气象参数月平均变化预测值；

a_m - m 月气象参数预测变化率；

$(x_0)_m$ - m 月已有逐时气象参数月平均值。

2.5.2 月平均温度和露点温度的降尺度处理方法

建筑能耗模拟工具中使用的逐时天气参数是典型气象年 (TMY)，通常采用能够代表某地区或城市长期气象条件的逐时气象数据构成典型年气象文件，现有典型气象年则代表了当前基准气象条件，TMY 中的温度参数有 2 个，干球温度和相对湿度 (露点温度)。

对于干球温度 (dry bulb temperature, dbt)，Morphing 方法主要通过以下算法实现：

$$dbt = dbt_0 + \Delta TEMP + adbt_m \times [dbt_0 - (dbt_0)_m] \quad (2.8)$$

式中 dbt_0 ——已有典型气象年的逐时干球温度；

$(dbt_0)_m$ ——已有典型气象年中 m 月月平均干球温度；

$\Delta TEMP$ —— m 月月平均干球温度变化预测值；

$adbt_m$ —— m 月的降尺度伸缩系数，其计算方法是：

$$adbt_m = \frac{\Delta TMAX_m - \Delta TMIN_m}{(dbt_{0max})_m - (dbt_{0min})_m} \quad (2.9)$$

其中 $\Delta TMAX_m$ ： m 月每日最大干球温度的月平均值的预测变化；

$\Delta TMIN_m$ ： m 月每日最小干球温度的月平均值的预测变化；

$(dbt_{0max})_m$ ：已有典型气象年中 m 月每日最大干球温度的月平均值；

$(dbt_{0min})_m$ ：已有典型气象年中 m 月每日最小干球温度的月平均值。

气象参数变化预测量，如 $\Delta TEMP$ 、 $\Delta TMAX_m$ 和 $\Delta TMIN_m$ 均通过未来典型气象年所在年份的月平均温度预测值与现有典型气象年所在历史年份相应的月平均温度观测值对比得到。

对于相对湿度 (relative humidity, R) 和露点温度 (dew point temperature, dpt)，由于 R 是湿空气的绝对湿度与同温度下饱和空气的饱和绝对湿度的比值，同时，dpt 是指空气在水蒸气含量和气压不变的条件下冷却到饱和时的温度，即上述两个参数作为相对量，反映了湿空气中水蒸气含量接近饱和的程度，其取值均受干球温度变化的影响，如果直接对 R 或 dpt 采用 Morphing 方法进行预测，无法排除干球温度变化带来的影响，因此需要选取一个绝对量进行预测，之后利用湿空气状态函数关系进行换算，从而得到相对湿度 R 和露点温度 dpt。

含湿量 (specific humidity, S) 表示在含有 1kg 干空气的湿空气中所混有的水蒸气质量，是绝对量参数，因此基于该参数进行相对湿度和露点温度预测。运用 morphing 方法预测 S 通过以下算法实现：

$$S = \alpha S_m \times S_0 \quad (2.10)$$

式中 S —— 已有典型气象年的逐时含湿量；

αS_m —— m 月的降尺度伸缩系数，其计算方法是：

$$\alpha S_m = 1 + \frac{SPHU_m}{100} \quad (2.11)$$

其中 $SPHU_m$ — m 月含湿量的预测变化百分数。

结合含湿量 S 参数和干球温度 dbt 的预测结果,即可得到相对湿度 R 和露点温度 dpt 的逐时预测值。

本文中采用 2.2.4 中所述基于气候变化周期性的时间序列方法能够得到未来 100 年月平均温度预测结果,采用时间序列调整方法 - **Morphing**, 将预测的未来月平均温度相对于基准时段观测温度的变化与现有典型气象年相结合,生成未来典型气象年参数文件,作为采用建筑能耗模拟工具进行未来气候条件下建筑能源需求预测的天气参数输入文件,用于典型建筑模型进行建筑能源需求预测。技术路线见图 2.7。由于缺乏露点温度(相对湿度)观测数据,本文仅针对典型气象年中的干球温度气象参数进行研究。

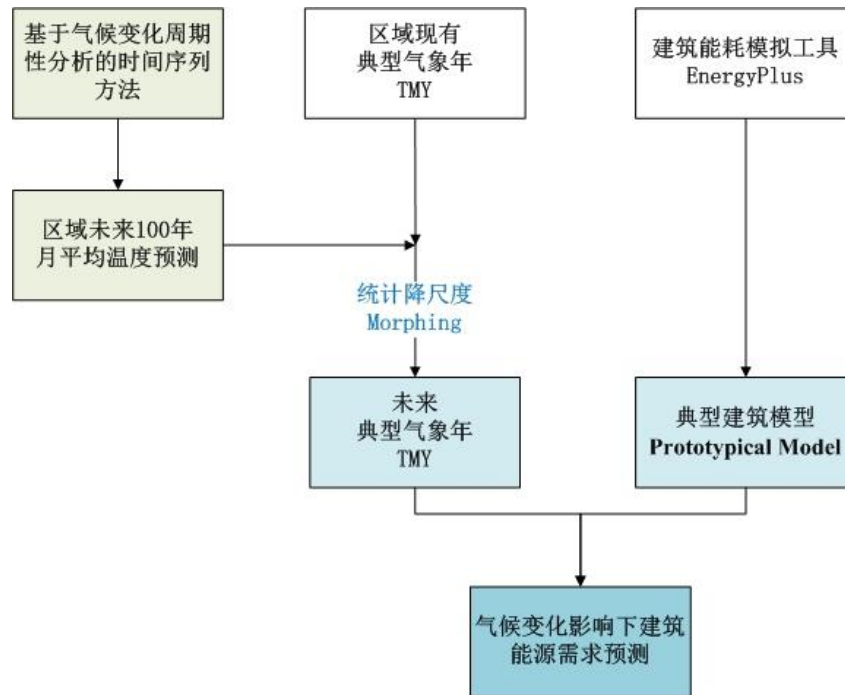


图 2.7 建筑能源需求预测技术路线

第三章 上海未来天气参数预测

本章根据上海 1961~2010 年 50 年月平均温度观测数据, 采用基于中国东部气候变化周期性分析的时间序列方法, 对未来 100 年的月平均温度进行预测。为了将月平均预测结果用于建筑能耗模拟工具进行建筑能源需求预测, 选用统计降尺度时间序列调整方法 – Morphing, 将预测月平均温度变化与上海地区现有典型气象年 (TMY) 相结合, 生成符合上海未来 100 年气候变化情况的 TMY 天气参数文件, 研究对象只涉及 TMY 文件中的干球温度。

3.1 上海未来月平均温度预测

进入 21 世纪以来, 对于气候变化的原因和预测研究争议不断, 对这一问题的认识仍莫衷一是, 究其原因, 除了气候变化的复杂性、历史气象参数重建和研究方法的不确定性之外, 气候变化的区域差异也是造成争议的一个重要原因。针对空间尺度较大的气候变化研究往往对区域气候特征捕捉的不够全面, 本文提出的基于中国东部气候变化周期性分析的时间序列方法, 在历史长期气候周期性分析研究所需近 2000 年温度序列的重建过程中, 用到了上海地面台站的观测数据作为原始资料, 而且上海的观测和资料信息相对较完整, 整体来看, 可以用于上海地区的气候变化研究。

为了即将发布的第五次评估报告, IPCC 已于 2007 年召开专家会议通过了新的 RCPs 系列排放情景, RCPs 系列包括 4 类 RCPs, 分别是 RCP8.5、RCP6、RCP4.5 和 RCP3-PD, 其中 RCP8.5 是高端路径, RCP6 和 RCP4.5 都是中间稳定路径, RCP3-PD 是低端路径, RCP4.5 情景因与 2℃ 温升阈值目标较一致而收到了广泛关注。耦合模式工作组 (WGCM) 也于 2008 年开展一系列气候模式调整试验, 联合国际地圈-生物圈计划 (IGBP) 中地球系统分析、综合与模拟计划 (AIMES) 的研究成果进行新一轮的耦合模式比较计划 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5), 目前, CMIP5 的大部分模型试验已经完成, CMIP5 所有试验数据已通过地球系统网格联盟 (Earth System Grid Federation, ESGF) 发布, 并提供免费共享。CMIP5 的试验结果数据格式为 NetCDF (Network common data form) 格式, 即网络通用数据格式, 可以使用 Matlab 读取该文件格式。NetCDF 文件中存储的数据格式是多自变量的单值函数, 预测天气参数变量是三维单值函数, 三维变量分别是时间变量 (time)、纬度变量 (lat) 和经度变量 (lon), 时间变量精度为月, 如预测数据时间跨度是 2005 年 12 月至 2099 年 12 月, 则共有

1129 个时间节点，纬度变量精度为 1.25° ，共 145 个纬度节点，经度变量精度为 1.875° ，共 192 个经度节点。每一个数据集均覆盖了全球多个纬度和经度气象参数的预测和历史时段的模拟结果，针对不同的城市，在数据集中可以选择最接近的经纬度节点数据，并从中选取所需的天气参数数据，其中，干球温度预测变量有月平均干球温度（tas）、每日最大干球温度的月平均值（tasmax）和每日最小干球温度的月平均值（tasmin）。

根据已有的气候变化预测研究，作者将选取 HadGEM2-CC 模式在 RCP4.5 情景下的试验输出结果，选取最接近上海经纬度的节点数据与本文中相应的观测和预测结果进行对比分析。数据节点选择见表 3.1。

表 3.1 城市经纬度与数据节点选择

城市	实际位置		CMIP5 试验数据临近节点	
	纬度 $^\circ$	经度 $^\circ$	纬度 $^\circ$	经度 $^\circ$
上海	31.4	121.467	31.25	121.875

3.1.1 月平均温度时间序列分析

上海地区 1961~2010 年温度观测数据中，采用美国国家气候资料中心(NCDC)由上海虹桥机场提交的 1~3h 间隔温度处理得到，由于该数据源对于上海的历史温度记录最早是 1992 年，对于 1961~1992 年的月平均温度，作者从丁裕国教授的著作^[145]中收集得来，两个数据源有 1992 和 1993 年的年份重叠，经计算发现，对于重叠年份，两数据来源的月平均温度相差 $0.1\sim 0.5^\circ\text{C}$ ，年平均相差 0.3°C ，因此在建立的月平均温度数据中，对于 1992 和 1993 年采用两个数据源的平均值代替。

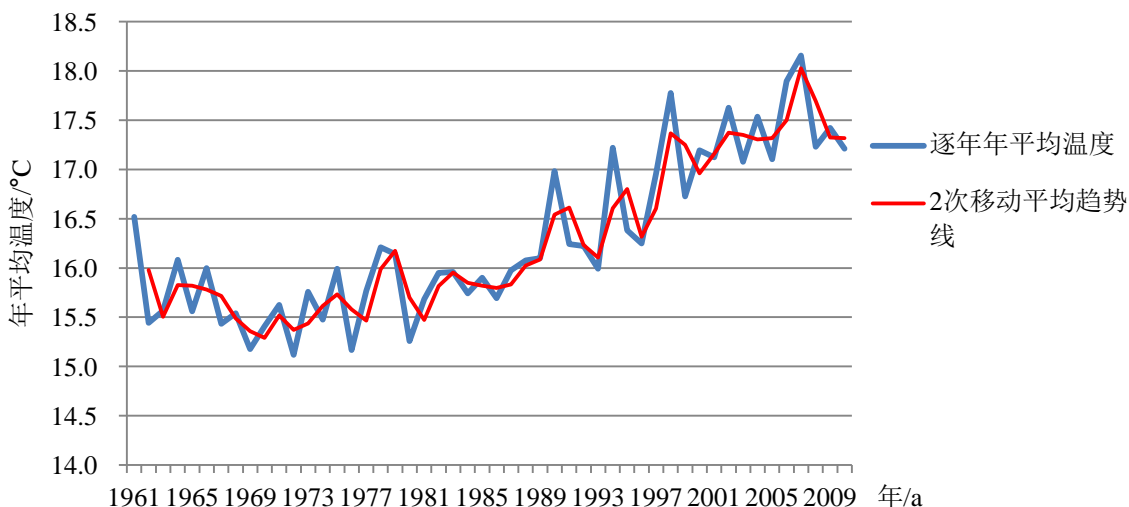


图 3.1 上海 1961~2010 年年平均温度观测结果

图 3.1 为上海 1961~2010 年观测年平均温度变化。近 50 年里，上海年平均最低温度发生在 1972 年，为 15.1℃，最高温度发生在 2007 年，为 18.2℃，温度峰谷转化速率为 0.88℃/10a。

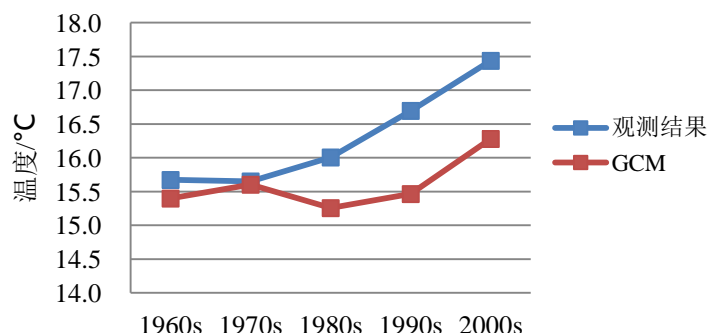


图 3.2 上海近 50 年代际温度变化

近 50 年来的平均温度为 16.3℃，从年代际温度变化来看，1960s、1970s 和 1980s 均低于平均水平，1980s 相对于 1970s 来说，温度上升幅度为 0.3℃，至 1990s 和 2000s，温度上升加快，近 20 年里达到了 0.7℃/10a，见图 3.2。可见，与中国东部的研究结论相同，上海的变暖不同于全球气候变暖的节奏，从 1970s 到 1980s，没有出现显著变暖，而且 1980s 也低于 50a 平均水平。

图 3.2 中，历史条件下气候模式在上海地区的模拟结果与近 50a 实际观测温度有较大的不一致，观测结果呈上升趋势，而模拟结果呈现出先下降后上升，在 1980s、1990s 和 2000s，模拟结果均显著低于实际温度，差值达到了 1℃。

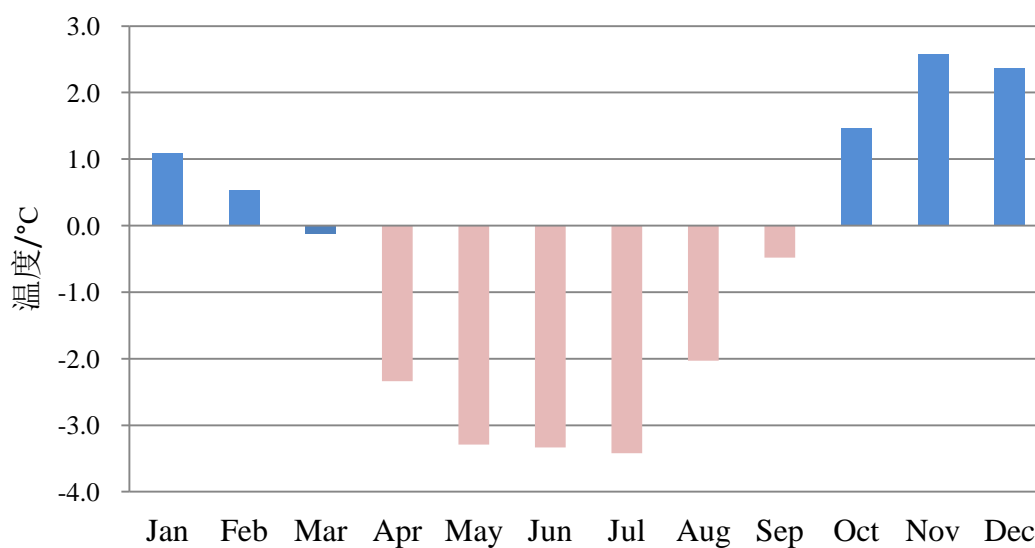


图 3.3. 不同月份历史条件下 GCM 模拟结果与观测温度差值的 50 年平均值
从图 3.3 近 50a 来气候模式模拟的 1~12 月温度与观测温度的对比可以看出，

对于上海地区而言，气候模式过高的估计了冬季变暖，实际冬季的变暖程度比模拟结果低了 1.3 ℃ 左右，同时气候模式低估了夏季和过渡季节的温度，夏季模拟结果比实际夏季温度低了 2.3 ℃ 左右，过渡季节低了 0.3 ℃，全年来看，气候模式模拟的年平均温度比实际温度低了 0.6 ℃。可见，对于区域尺度的气候变化，气候模式的模拟结果具有较大的不确定性，模拟能力略显不足。

按照本文提出的基于气候变化周期性的时间序列预测方法，作者采用统计分析工具 SPSS 对上海 1961~2010 年 50 年观测逐月月平均温度数据进行时间序列分解，见图 3.4，分解结果中包含平稳序列噪声分量、季节因子、季节调整序列和季节趋势-周期序列。

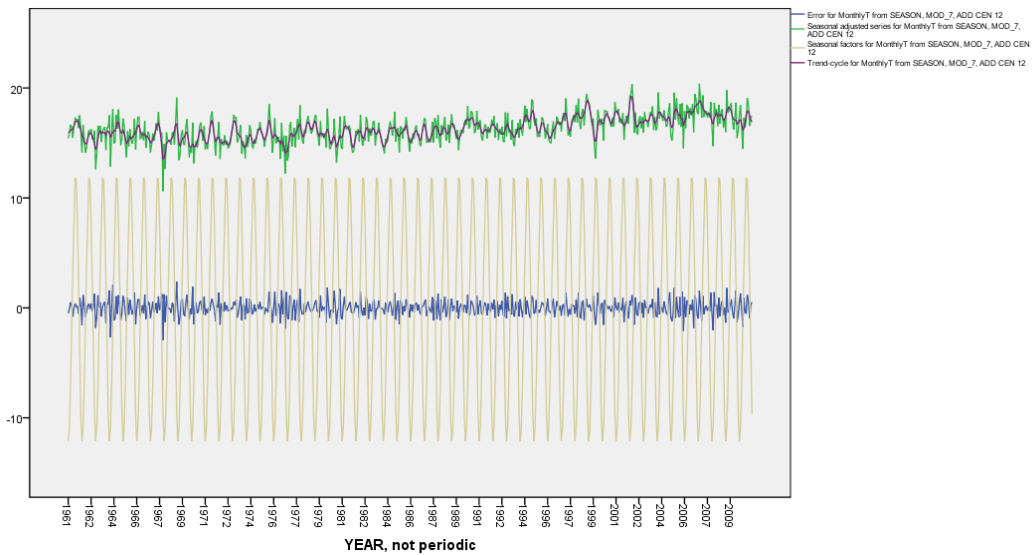


图 3.4 1961~2010 年逐月平均温度时间序列分解

为了在分析中排除一年中的季节因子影响，将 50 年月平均温度的时间序列分解结果，共 600 个月际数据分至 1~12 月分别讨论，即针对每个月的 50 个时间序列分解结果进行分析，也便于在百年以内尺度小周期分析中考虑不同季节的振幅差异。

针对 1~12 月的时间序列分解结果中的平稳序列分量 X_t 分别进行自相关分析、噪声零和、中位数与平均数比较等平稳性检验，确定了各月的平稳序列分量 X_t 基本为白噪声，1~12 月 X_t 序列见图 3.5。

在观测数据中剔除了噪声序列之后，得到了包含趋势和周期变化的月平均温度 TC 序列，其中 TC 序列为时间序列分解结果中的季节因子、季节调整序列和季节趋势-周期序列之和，1~12 月 TC 序列见图 3.6。

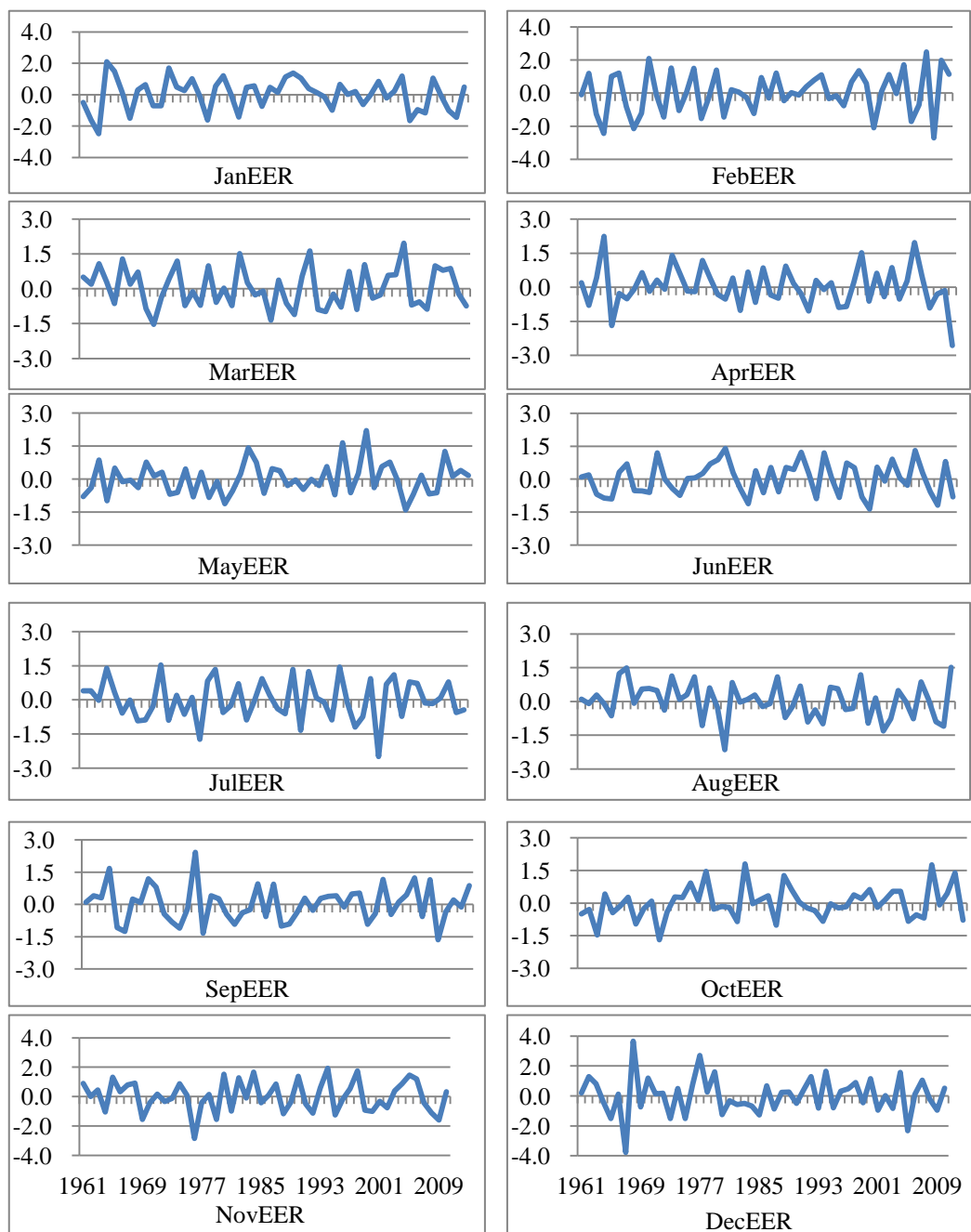


图 3.5 1 月~12 月噪声序列温度/℃

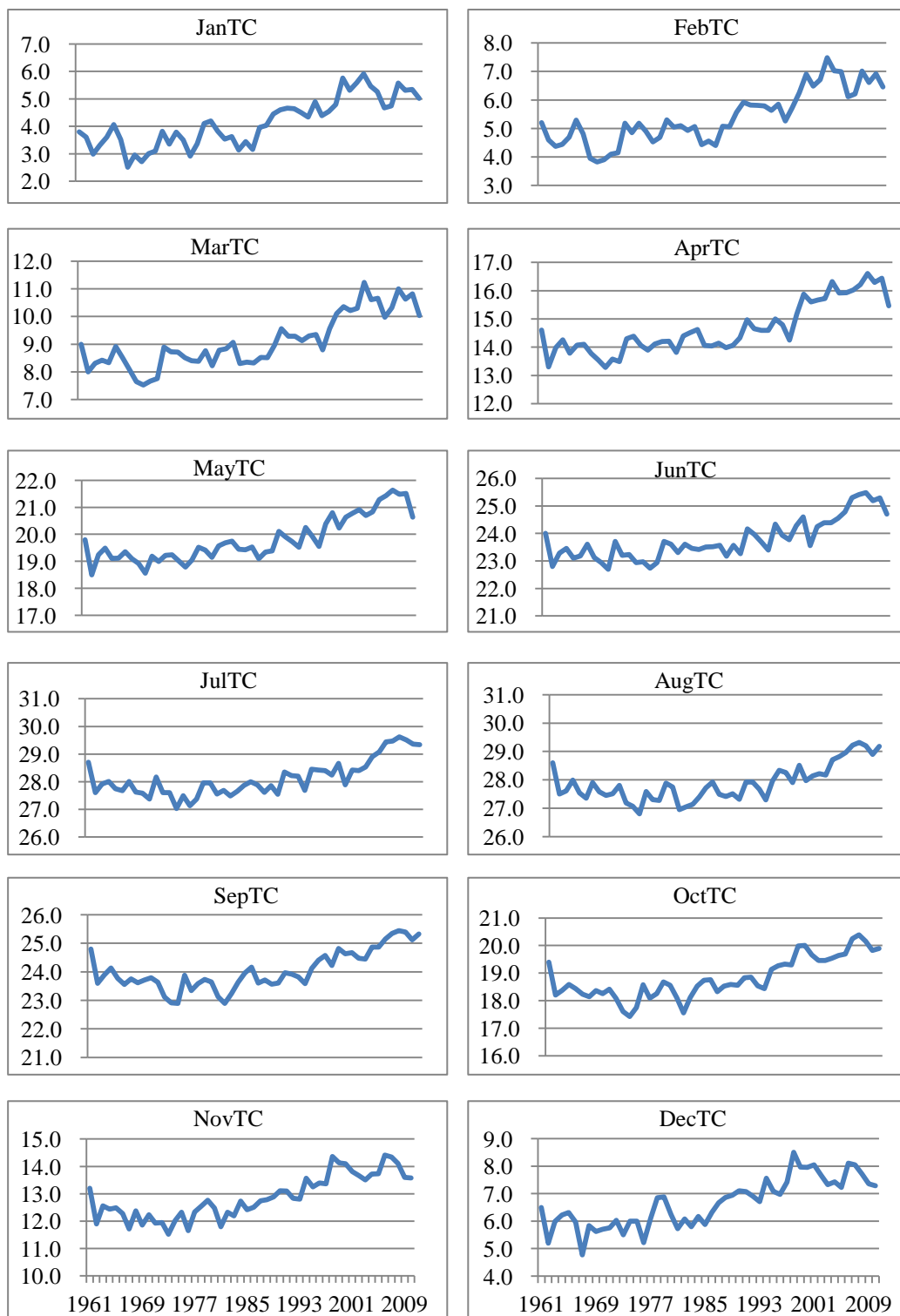


图 3.6 1月~12月 TC 序列温度/℃

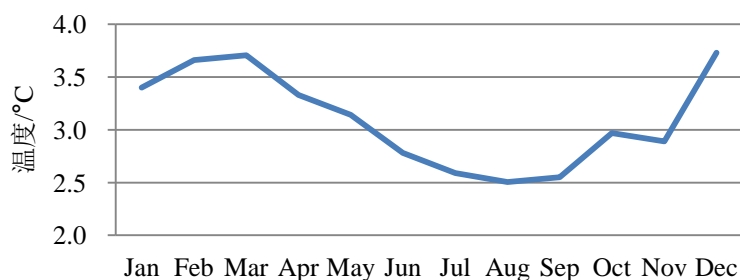


图 3.7 不同月份 TC 序列中出现的温度峰谷差

从 1~12 月的 TC 序列中,不同月的温度波动情况不同,见图 3.7,整体来看,近 50 年里,冬季的变暖幅度最大,过渡季节次之,夏季最小。各月温度变化的峰谷值出现时间比较接近,谷值大多出现在 1970 年先后,4~10 月的温度峰值均出现在 2007 年,时间间隔在 30~40 年之间,见表 3.2。

表 3.2 1961~2010 年不同月份 TC 序列中温度峰谷值出现时间

月份	谷值所在年	峰值所在年	时间间隔/a
Jan	1968	2002	34
Feb	1969	2002	33
Mar	1970	2002	32
Apr	1970	2007	37
May	1970	2007	37
Jun	1970	2007	37
Jul	1974	2007	33
Aug	1974	2007	33
Sep	1974	2007	33
Oct	1973	2007	34
Nov	1973	2006	33
Dec	1967	1998	31

根据中国东部历史气候变化的规律性研究,在 21 世纪的气候变化中,会起到重要趋势性影响的百年尺度周期可能在 200a~600a 之间,作者分别选取 200a、300a、400a、500a 和 600a 作为时间序列趋势项可能的大周期,年代际尺度的振荡在未来百年可能出现的振荡周期为 40~80a,综合上海 1961~2010 年月平均温度 TC 序列中的峰谷间隔时间,作者分别选取 40a、50a、60a、70a 和 80a 作为时间序列周期项可能的小周期。

小冰期是距今最近的寒冷时段,根据郑景云、王绍武和葛全胜等^[112,124,127~130,135]专家的研究,在中国,小冰期结束后的回暖始于 19 世纪中后期,我国的小冰期中包含 3 个寒冷阶段,最后一个发生在 19 世纪,大约 1840~1890 年之间。据此,作者将大周期的谷值时间节点确定在 1840~1890 年之间。对于小周期,

则根据上海月平均温度 TC 序列中呈现在 1970s 的冷期，将小周期的估值时间节点确定在 1965~1975 年之间。

依据上述大、小周期的长度和关键节点的可能情况，建立针对大、小周期分别建立余弦函数作为时间序列模型的趋势分量 H_t 和周期分量 P_t ，与上海 1961~2010 年 1~12 月月平均温度 TC 序列进行拟合，对拟合结果进行筛选，筛选标准主要有以下 3 点：

1) 与 1961~2010 年各月温度 TC 序列的拟合程度。

2) 振幅比对。对于小周期的振幅，考虑季节差异，冬季为 2℃ 左右，夏季为 1.5℃ 左右，春季和秋季在 1.5~1.8℃ 之间。对于大周期的振幅，均在 1℃ 左右。

3) 对于近千年里重要冷暖阶段，如中世纪暖期 (MWP) 和小冰期 (LIA) 的体现情况。

从前到后，优先级逐渐减弱。

针对每个月建立的趋势分量 H_t 和周期分量 P_t 之和与相应月平均温度 TC 序列的拟合结果，根据上述标准，作者确定了拟合效果最好的大周期为 300a，1~12 月的大周期谷点分别出现在 1837~1900 年之间，小周期为 60a，相应的谷点则分别出现在 1971~1979 年，见表 3.3。拟合最优的余弦函数将作为时间序列模型的趋势分量 H_t 和周期分量 P_t ，用于预测未来 100 年上海月平均温度。

表 3.3. 大、小周期函数拟合结果

月份	小周期谷点/a	大周期谷点/a	小周期振幅/℃	大周期振幅/℃	函数常数项/℃	拟合 R^2
Jan	1972	1865	1.84	1.00	3.8	0.78
Feb	1973	1844	2.11	1.03	5.0	0.76
Mar	1973	1853	2.06	0.99	8.7	0.74
Apr	1973	1851	1.95	0.97	14.3	0.74
May	1973	1853	1.74	0.92	19.4	0.73
Jun	1976	1837	1.71	0.95	23.4	0.70
Jul	1978	1895	1.33	1.02	28.1	0.76
Aug	1979	1875	1.42	1.00	27.7	0.75
Sep	1979	1900	1.51	1.02	24.1	0.81
Oct	1976	1860	1.70	1.02	18.5	0.81
Nov	1975	1900	1.61	1.02	12.8	0.84
Dec	1971	1870	1.77	0.96	6.3	0.77

采用基于周期分析的时间序列预测模型中的趋势分量 H_t 和周期分量 P_t 能够预测 1~12 月在未来 100 年里的变化趋势，如图 3.8~3.9。

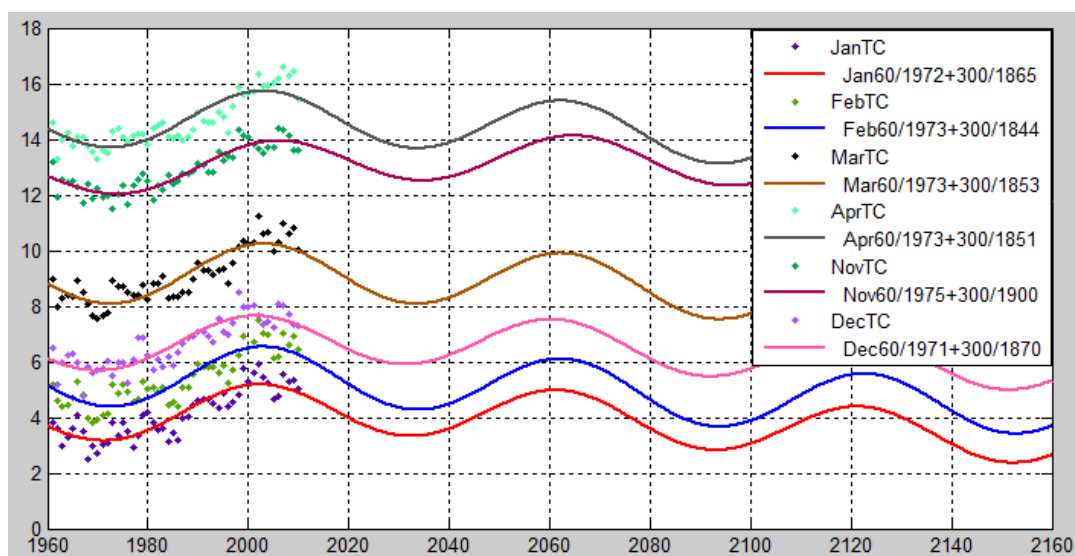


图 3.8 冬半年 11~4 月未来 100 年的变化趋势/℃

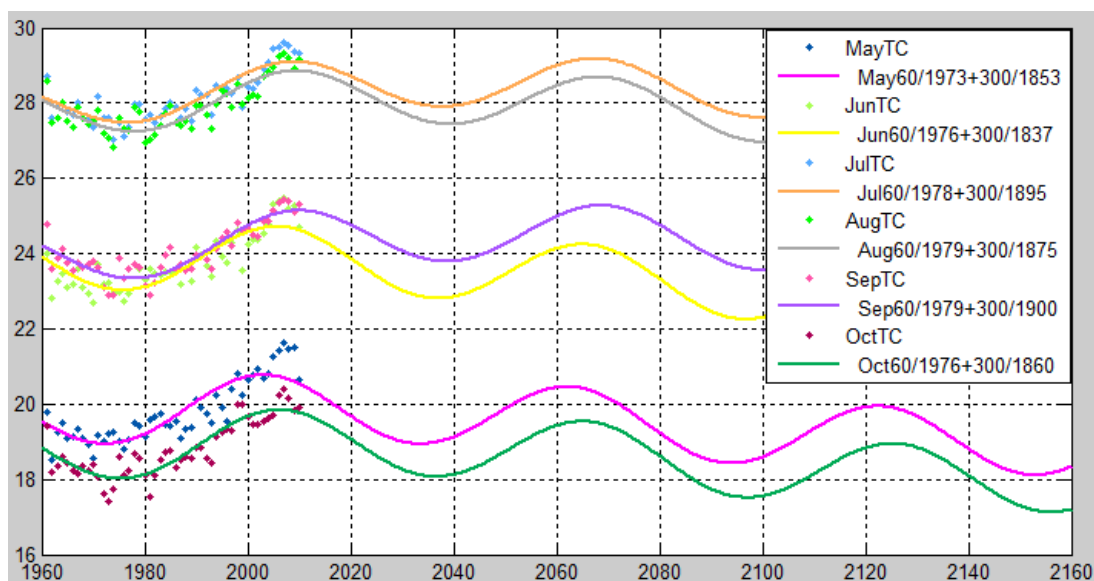


图 3.9 夏半年 5~10 月未来 100 年的变化趋势/℃

从预测的变化趋势来看，一年中大多月份双周期在 2005 年左右均到达周期波动的峰值，在未来 100 年里的变化趋势为波动性下降，而 7、9 和 11 月的 60a 小周期在 2005 年左右到达峰值，但 300a 大周期还未到达峰值，在未来的 100 年里大周期将在 2060~2070 年左右达到波峰，由于小周期的影响，这 3 个月呈先波动性上升至 2060~2070 年左右后波动性下降。

由于 100 年只占了 300a 周期的 1/3，因此呈现出的大周期波动趋势不明显，

这里给出了这两种趋势的代表月- 1 月和 7 月的长期周期性变化情况，如图 3.10~3.11。

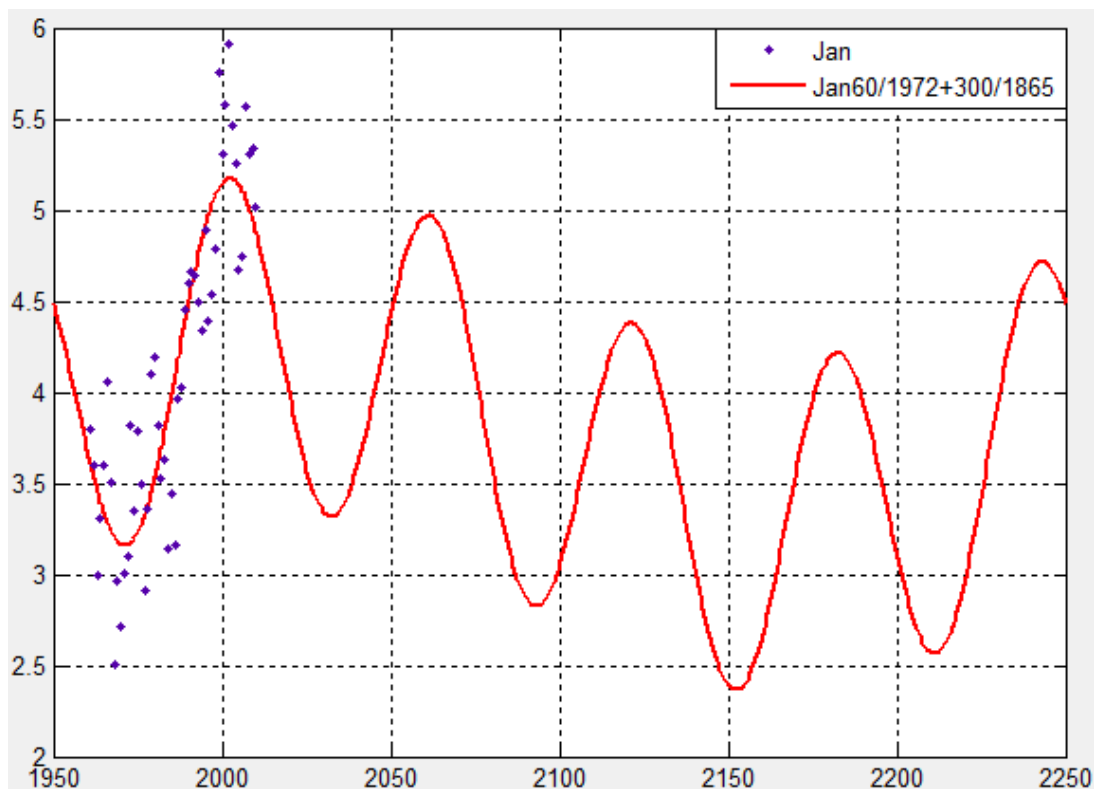


图 3.10 1 月 1950~2250 年的变化趋势/℃

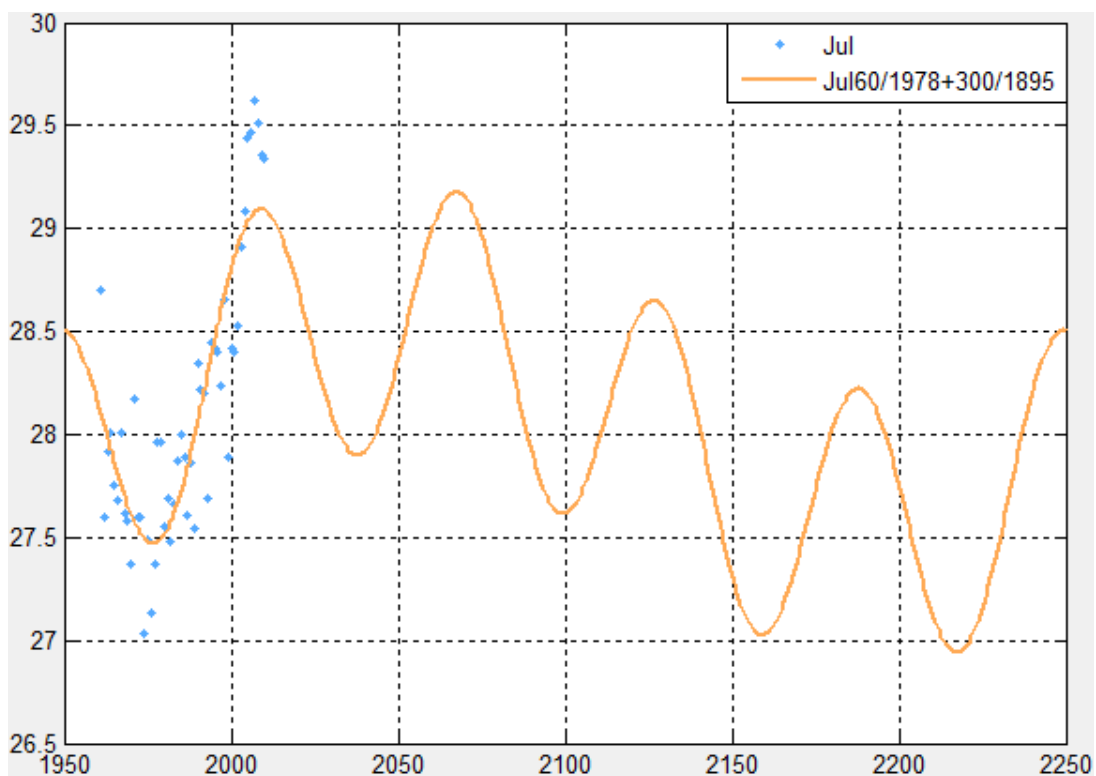


图 3.11 7 月 1950~2250 年的变化趋势/℃

3.1.2 月平均温度时间序列预测模型的情景设定

在用于月平均温度预测的时间序列模型中, $Y_t=H_t+P_t+X_t$, 前文基于气候变化周期性分析的余弦函数拟合确定了趋势分量 H_t 和周期分量 P_t , 模型中的随机量 X_t 则反映了未来 100 年里月平均温度的随机变化情况, 在观测数据的时间序列分解过程中, 剔除了近 50 年里月平均温度的随机变动, 这一随机量可以作为未来月平均温度随机变动的参考依据。

近 50 年观测月平均温度在 1~12 月的振动情况不同, 见表 3.4。

表 3.4 1961~2010 年 1~12 月中随机量 X_t

月份	最小值 ℃	最大值 ℃	振动范围 ℃
Jan- X_t	-2.5	2.1	4.6
Feb- X_t	-2.7	2.5	5.2
Mar- X_t	-1.5	2.0	3.5
Apr- X_t	-2.6	2.2	4.8
May- X_t	-1.4	2.2	3.6
Jun- X_t	-1.4	1.4	2.8
Jul- X_t	-2.5	1.5	4.0
Aug- X_t	-2.2	1.5	3.7
Sep- X_t	-1.7	2.4	4.1
Oct- X_t	-1.7	1.8	3.5
Nov- X_t	-2.9	1.9	4.8
Dec- X_t	-3.8	3.7	7.4

可以看出, 相对于其他季节来说, 冬季的振动幅度较大。

本文中, 作者针对未来月平均温度的随机变动情况考虑 3 中未来情景, 分别是振动稳定 S1、振动减弱 S2 和振动增强 S3:

S1: 未来月平均温度的随机振动程度维持现有状态, 即随机量 X_t 的峰谷值维持 1961~2010 年观测数据中剔除的随机量最大最小值;

S2: 未来月平均温度的随机振动程度减弱, 即随机量 X_t 的峰谷差小于 1961~2010 年观测数据中剔除的随机量峰谷差, 峰谷值缩小系数取 0.8;

S3: 未来月平均温度的随机振动程度增强, 即随机量 X_t 的峰谷差大于 1961~2010 年观测数据中剔除的随机量峰谷差, 峰谷值增大系数取 1.2。

按照上述 3 中情景下的随机量范围和峰谷值, 建立不同情景下时间序列预测模型中的随机量 X_t , 预测未来 100 年月平均温度的随机振动, 均与 3.2 节中拟合最优余弦函数构成的趋势分量 H_t 和周期分量 P_t 相加, 建立不同情景下的时间序列预测模型, 预测未来 100 年上海月平均温度变化。

3.1.3 不同情景下月平均温度预测

不同振动程度的随机量叠加到余弦趋势分量 H_t 和周期分量 P_t ，能够得到不同振动程度的月平均周期性波动变化趋势，这里以 1 月和 7 月为例分析不同的振动程度对两种走势的月平均温度变化趋势的影响，如图 3.12~3.13。

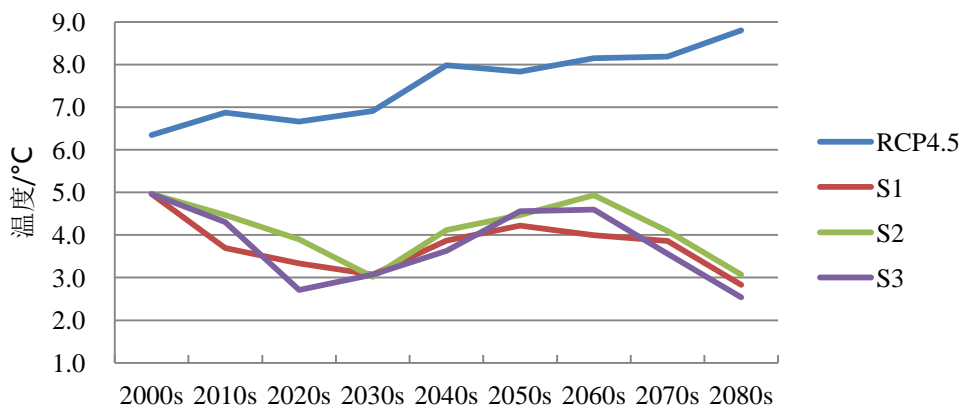


图 3.12 21 世纪 1 月年代际变化

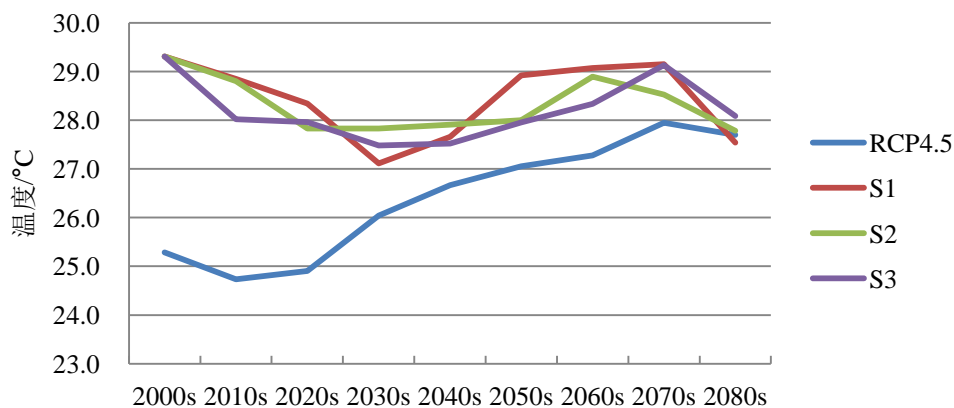


图 3.13 21 世纪 7 月年代际变化

在趋势分量 H_t 和周期分量 P_t 的影响下，21 世纪 1 月的走势是波动性下降，当在 S1 情景下叠加一个与 1961~2010 年振动程度相同的随机量时，保持了波动性下降的走势，但在 S2 和 S3 情景下，波动性下降的走势则有所改变，原本发生在 2050s 的第二个波峰被推迟到了 2060s，而且峰值接近 21 世纪初的高度，另外原本发生在 2030s 的第一个波谷，在 S3 情景下提前到了 2020s，温度也有所下降。在 7 月，振动对于周期性峰谷的影响作用更加明显，大、小周期的预测结果表明 7 月在未来 100 年里呈波动性上升至 2060a 左右，此时大周期达到了百年尺度上的峰值，之后呈波动性下降趋势，然而，在叠加了随机量后，原本应发生在 2060s 后期的波峰在 S1、S2 和 S3 情景下都被削减了，大周期的峰值未能得到体

现,同时第二个波峰出现的时间也被 S1 和 S3 振动情景推迟到了 2070s,原本应发生在 2030s 的周期性峰谷,被 S2 和 S3 振动情景所延长。总体来看,气候的随机变化会对气候的周期性波动产生较大的影响,尤其可能对周期波动中冷暖时段的发生、延长时间和温度变化程度产生影响,从 1 月和 7 月的预测结果来看,随机振动会使周期性峰谷的出现时间推迟或提前 5~10a。

从 RCP4.5 情景下气候模式与本文时间序列模型预测结果的对比中,可以看出,在 2000s,即历史条件下气候模式的模拟结果与实际观测结果有一定偏差,模式模拟高估了 1 月的温度,而低估了 7 月的温度。相对而言,RCP4.5 情景下未来 100 年里 1 月温度波动较大,波动范围在 2.5℃ 左右。S1 情景下未来 1 月的波动范围均在 2℃ 左右,在 2010s~2020s(下降)和 2030~2040s(上升)趋势相同,但整体走向不一致;对于 7 月,S1 情景下的未来波动在 2℃ 左右,而 RCP4.5 的波动达到了 3℃,RCP4.5 情景下 7 月温度在 2000s~2010s 与 S1 一样存在下降,之后便开始大幅上升,而 S1 的下降则趋势延续至 2030s 后才开始有所回升,但 RCP4.5 与 S1 在 2030s 之后的走势基本一致,都在 2070s 出现一个峰值后回落,而且上升阶段的幅度基本一致,有区别的地方在于 7 月在 S1 情景下的快速升温发生在 2040s~2050s,而在 RCP4.5 情景下则晚于 S1,发生在 2060s~2070s。总体来看,RCP4.5 情景下气候模式对于 1 月的预测温度显著高于本文时间序列模型的预测结果,7 月则低于本文的时间序列模型预测,RCP4.5 情景下 7 月的温升趋势明显,在 2030a 后两种预测的差距有所改善,在 2080s,RCP4.5 与 S1 的 7 月预测结果很接近。

3.2 上海未来典型气象年 (TMY) 生成

3.2.1 未来 TMY 生成时间段划分

目前用于建筑能耗模拟软件的中国城市典型气象年文件共有 3 个不同版本,分别是 IWECC (International Weather for Energy Calculation files)、CTYW (Chinese Typical Year Weather) 和 CSWD (Chinese Standard Weather Data),见表 3.5。

表 3.5 中国典型气象年版本比较

版本	数据范围	数据历史年份	数据来源
IWECC	非美国、加拿大的 227 个城市	1982-1999	ASHRAE 和 NCDC: DATSAV3 数据库
CTYW	中国 57 个典型城市	1982-1997	张晴原, Joe Huang: 《中国建筑用标准气象数据库》
CSWD	中国 270 个典型城市	1971-2003	江亿: 《中国建筑热环境分析专用气象数据集》

根据 Morphing 方法对于 TMY 中干球温度 (dry bulb temperature, dbt) 的处理方法:

$$dbt = dbt_0 + \Delta TEMP + adbt_m \times [dbt_0 - (dbt_0)_m] \quad (3.1)$$

式中 dbt_0 ——已有典型气象年的逐时干球温度;

$(dbt_0)_m$ ——已有典型气象年中 m 月月平均干球温度;

$\Delta TEMP$ —— m 月月平均干球温度变化预测值;

$adbt_m$ —— m 月的降尺度伸缩系数, m 代表一年中 1~12 月。

未来 TMY 中干球温度 dbt 的生成可以看作在已有 TMY 逐时 dbt_0 的基础上叠加一个未来时段与基准时段月平均温度的变化值 $\Delta TEMP$, 再将已有 TMY 中的逐时 dbt_0 与相应的月平均温度 $(dbt_0)_m$ 之差, 即温度波动进行伸缩处理后叠加上去。因此未来 TMY 的时间跨度需要与已有 TMY 保持一致, 本文作者所选基准 TMY 的时间跨度为 1982~1999 年, 则未来 TMY 的时间跨度分别是 2000-2017、2018-2035、2036-2053、2054-2071 和 2072-2089 年, 即上海生成 5 个未来时间段的 TMY 逐时数据文件。

未来时段与基准时段月平均温度的变化值 $\Delta TEMP$ 由未来 TMY 所在时段的月平均温度预测值与已有 TMY 所在历史年份相应的月平均温度观测值对比得到, 取两个时段对应年份的逐年 m 月平均值差值的中位数。

3.2.2 未来 TMY 生成的情景设定

在 Morphing 方法的应用中有一个重要参数: 降尺度伸缩系数 $adbt_m$, 对应 m 月该系数的计算方法是:

$$adbt_m = \frac{\Delta TMAX_m - \Delta TMIN_m}{(dbt_{0max})_m - (dbt_{0min})_m} \quad (3.2)$$

其中 $\Delta TMAX_m$: m 月每日最大干球温度的月平均值的预测变化;

$\Delta TMIN_m$: m 月每日最小干球温度的月平均值的预测变化;

$(dbt_{0max})_m$: 已有典型气象年中 m 月每日最大干球温度的月平均值;

$(dbt_{0min})_m$: 已有典型气象年中 m 月每日最小干球温度的月平均值。

计算过程中包括的两个预测变化值, $\Delta TMAX_m$ 和 $\Delta TMIN_m$, 从定义上来看, 需要 m 月的逐日温度峰谷值才能确定, 然而本文作者采用的时间序列模型预测精度只有月平均, 为了计算这两个重要参数, 作者分析了本文观测数据来源之一美国国家气候资料中心 (NCDC) 的 1992~2010 年 1~3h 间隔温度数据中历史年份的日峰谷温度月平均值的基本情况。

在对 1~3h 间隔温度进行插值处理后, 分别计算 1~12 月每日最大干球温度的月平均值 $TMAX_m$ 和每日最小干球温度的月平均值 $TMIN_m$ 。经分析后发现, 在 1992~2010 年这 18 年里, 各月 $TMAX_m$ 、 $TMIN_m$ 这两个参数分别与该月的月平均

温度 $TMEAN_m$ 的差值, 均在一个 $1\sim 2\text{ }^\circ\text{C}$ 的范围内随机波动, 可以近似看作一个随机量, 因此本文将各月 $(TMAX_m - TMEAN_m)$ 和 $(TMEAN_m - TMIN_m)$ 作为随机量与未来月平均温度 $TMEAN_m$ 预测结果相结合, 预测未来各月 $TMAX_m$ 和 $TMIN_m$, 从而与基准时段的该参数对比的到 $TMAX_m$ 、 $TMIN_m$ 的预测变化值 $-\Delta TMAX_m$ 和 $\Delta TMIN_m$ 。

在 IPCC 不同情景下驱动气候模式的模拟结果中除了月平均温度之外, 还包含每日最大干球温度的月平均值 $TMAX_m$ 和每日最小干球温度的月平均值 $TMIN_m$ 这两个参数的预测结果。在 1992~2010a 里, 1~12 月的实际日间波动月平均情况与历史条件下相应时间段气候模式的输出结果有一定差距。

从图 3.14 和图 3.15 可以看出, 气候模式的模拟结果与实际观测的日间波动在一年 1~12 月的变化趋势比较一致, 从日峰值温度与日平均温度的差值月平均情况来看, 4 月和 5 月的高温波动幅度较大, 对于日平均温度与日谷值温度的差值月平均, 12 月、1~5 月均大于其他月的低温波动幅度。总体来看, 气候模式的模拟日间波动显著小于实际情况, 1~12 月的差距在 $0.8\sim 1.7\text{ }^\circ\text{C}$ 之间。

$TMAX_m$ 和 $TMIN_m$ 这两个指标其实反映了每个月日间波动的平均情况, $(TMAX_m - TMIN_m)$ 其实就是 m 月日较差的月平均值。根据这一理解, 结合 3.2 中月平均温度随机量的不同振动情景 S1、S2 和 S3, 本文对于未来上海地区的气候变化情况考虑了 3 种情景:

S1: 1) 未来月平均温度的随机振动程度维持现有水平, 即随机量 X_t 的峰谷值维持 1961~2010 年观测数据中剔除的随机量最大最小值; 同时, 2) 未来日间波动程度维持现有状态, 即 $(TMAX_m - TMEAN_m)$ 和 $(TMEAN_m - TMIN_m)$ 维持 1992~2010 年观测数据中波动范围的最大最小值。

S2: 1) 未来月平均温度的随机振动程度减弱, 即随机量 X_t 的峰谷差小于 1961~2010 年观测数据中剔除的随机量峰谷差, 缩小系数取 0.8; 同时, 2) 未来日间波动程度低于现有水平, 即 $(TMAX_m - TMEAN_m)$ 和 $(TMEAN_m - TMIN_m)$ 的波动范围小于 1992~2010 年观测数据中的波动范围, 缩小系数取 0.8。

S3: 未来月平均温度的随机振动程度增强, 即随机量 X_t 的峰谷差大于 1961~2010 年观测数据中剔除的随机量峰谷差, 增大系数取 1.2; 同时, 2) 未来日间波动程度高于现有水平, 即 $(TMAX_m - TMEAN_m)$ 和 $(TMEAN_m - TMIN_m)$ 的波动范围大于 1992~2010 年观测数据中的波动范围, 增大系数取 1.2。

也就是将不同的日间波动情景叠加到 3.2 节中相应的随机振动情景上, 形成新的 S1、S2 和 S3 情景。

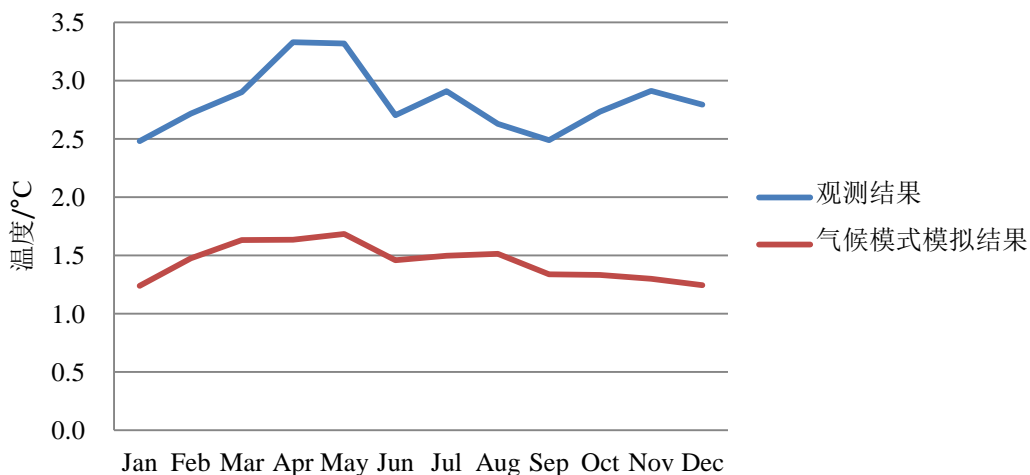


图 3.14 1992~2010 年 TMAXm 与 TMEANm 差值对比

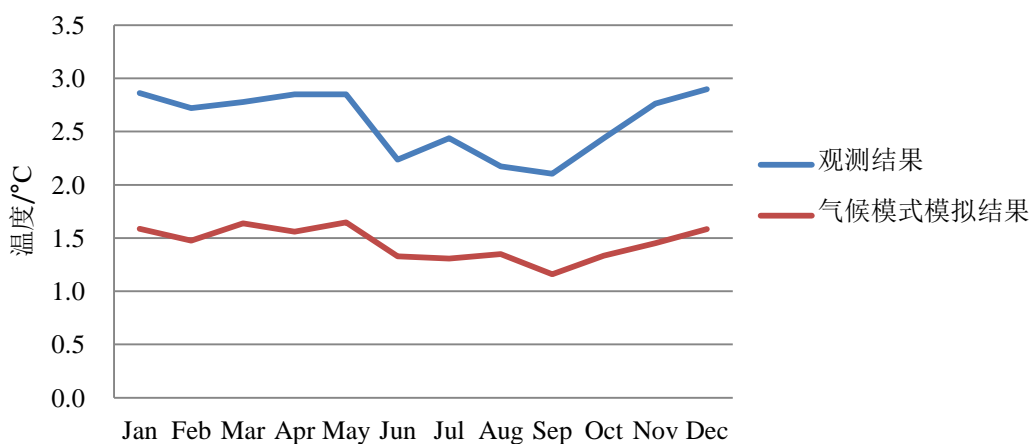


图 3.15 1992~2010 年 TMEANm 与 TMINm 差值对比

在新的情景下，针对 1~12 月在未来 5 个时间段里分别计算 $(TMAX_m - TMEAN_m)$ 和 $(TMEAN_m - TMIN_m)$ ，结合月平均温度 $TMEAN_m$ 的预测结果，按照 Morphing 方法，在已有 TMY 的基础上计算未来 TMY 文件中的逐时干球温度参数，更新至已有 TMY 中，生成气候变化条件下的未来 TMY 天气参数文件。

3.2.3 未来 TMY 变化分析

本文中时间序列模型和 RCP4.5 情景下气候模式模拟的月平均温度预测结果都采用 Morphing 方法进行降尺度处理，生成未来典型气象年文件，用于典型模型中进行能耗预测。其中 RCP4.5 情景下预测结果 Morphing 中需要用到的预测变化值，如 $\Delta TEMP$ 、 $\Delta TMAX_m$ 和 $\Delta TMIN_m$ 均通过气候模式在未来典型气象年所在年份的月际预测值与历史条件下模拟的相应月际温度输出结果对比得到，而非与实际观测值的对比结果，这一点区别于 S1、S2 和 S3 波动情景。

上海地区现有典型气象年（TMY）的历史时间跨度为 1982~1999 年，以此作为基准，21 世纪相应存在 5 个 TMY 时间跨度，即 2000-2017、2018-2035、2036-2053、2054-2071 和 2072-2089 年，根据时间序列模型得到未来月平均温度的预测结果，在未来 5 个时间段里呈波动性变化。

从图 3.16 中的年平均温度变化情况来看，在 3 个不同的波动情景 S1、S2 和 S3 影响下，上海地区年平均温度的变化趋势基本相同，2000~2017 年和 2054~2071 年年平均温度高于基准时段，在其他三个时段则均低于基准时段，波动情景的影响主要体现在 2054~2071 年的年平均温度上，3 个情景下均在该时段呈现峰值，S3 对应的温度较高，S1 和 S2 略低。夏季温度的变化趋势与年平均温度基本一致，不同的地方在于 5 个时间段里，2018~2035 年的年平均温度最低，而夏季最低温度发生在 2036~2053 年，虽然与年平均温度一样，夏季温度也呈波动性下降趋势，但整体来看 21 世纪夏季温度高于基准时段，而年平均温度则在基准水平附近波动，而且波动情景对夏季温度的影响较小，见图 3.17。冬季温度的波动情况则比较复杂，不同波动情景下变化趋势有较大差异，S1 和 S2 作用下，冬季温度呈波动性下降，但 S1 和 S2 的第二个峰值分别发生在 2036~2053 年和 2054~2071 年，S3 和 S2 的峰谷值出现时间一致，但是 S3 的第二个峰值高于发生在 2000~2017 年的第一个波峰，整体呈波动性上升，见图 3.18。

整体来看，S1、S2 和 S3 情景下，夏季温度的波动范围在 1℃ 左右，年平均温度波动范围在 1.5℃ 左右，而冬季温度波动则达到了 2℃。

在 RCP4.5 情景下，无论年平均温度，还是冬、夏季平均温度均呈稳定上升趋势，而且预测温度显著高于 S1、S2 和 S3 情景。

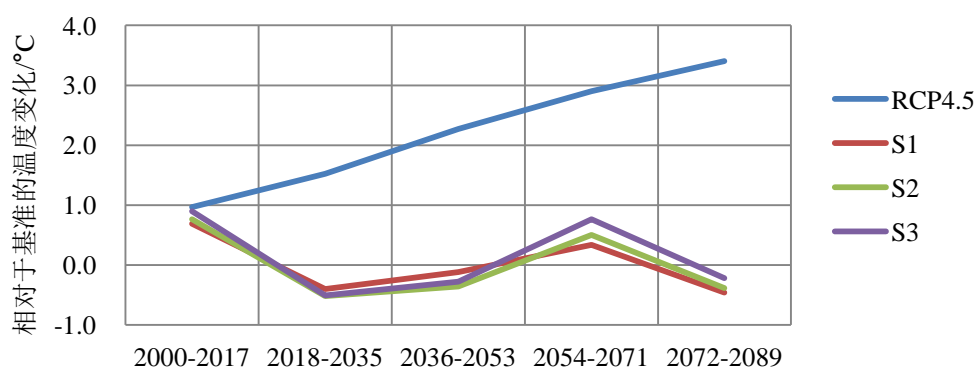


图 3.16 21 世纪上海年平均温度变化

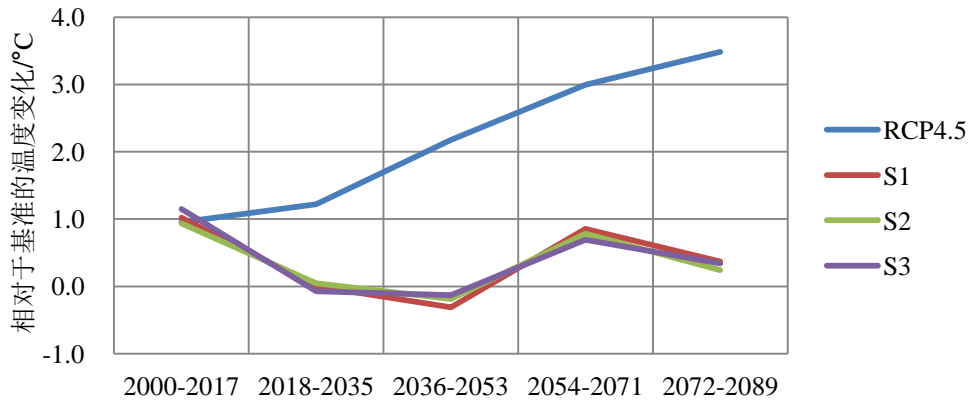


图 3.17 21 世纪上海夏季（6-9 月）平均温度变化

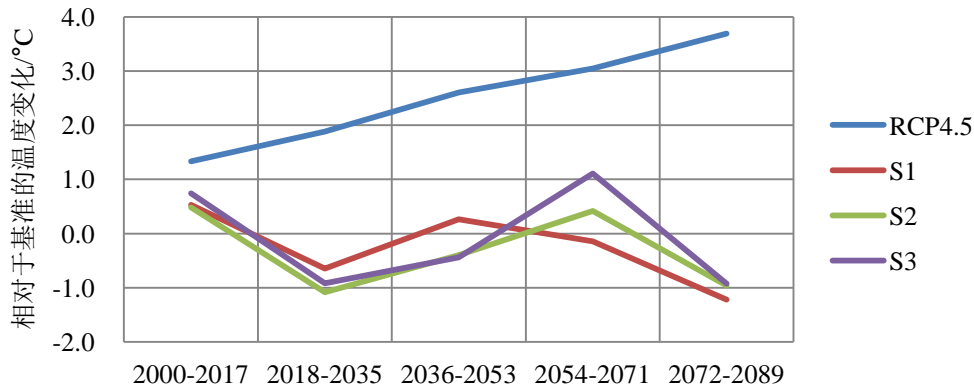


图 3.18 21 世纪上海冬季（12-3 月）平均温度变化

在将不同情景下生成的典型气象年用于典型建筑模型进行全年能耗模拟之前，通过度日数可以了解上海地区未来 100 年采暖、供冷需求的变化情况，如图 3.19~3.20。

在 RCP4.5 情景下，CDD26 呈现出明显的上升趋势，至 2072~2089 年，相对于基准时段上升了 1.6 倍，HDD18 呈现明显的下降趋势，至 2072~2089 年，相对于基准时段下降了 40%；与 RCP4.5 情景相比，S1 情景下的度日数波动较小，CDD26 呈波动性微弱下降趋势，波动范围在 100℃ 以内，HDD18 则称波动性上升趋势，至 2072~2089 年，上升了 10%，波动范围则相对较大，达到了 300℃。

对于 S1、S2 和 S3 情景，在不同的时间段里，均呈现出 S2 的供冷需求最小，其次是 S1，S3 情景下的供冷需求最大，3 种情景下的供冷需求变化趋势一致。而供热需求则受到波动情景的影响较大。在 2000~2017 年、2018~2035 年和 2072~2089 年这 3 个时间段，3 种情景的供热需求相差不大。在 2036~2053 年和 2054~2071 年这两个时间段里，相差 100~150℃，S3 的波动幅度比 S1 和 S2 大。

从 2036~2053 年到 2054~2071 年，S1 呈微弱上升趋势，而 S2 和 S3 则呈现明显的下降趋势。

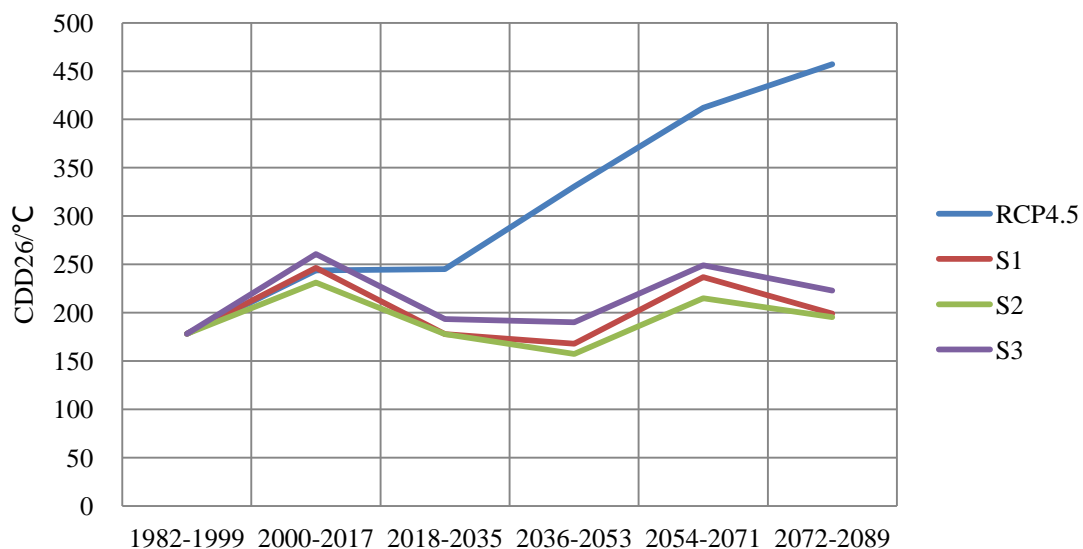


图 3.19 21 世纪上海 CDD26 变化

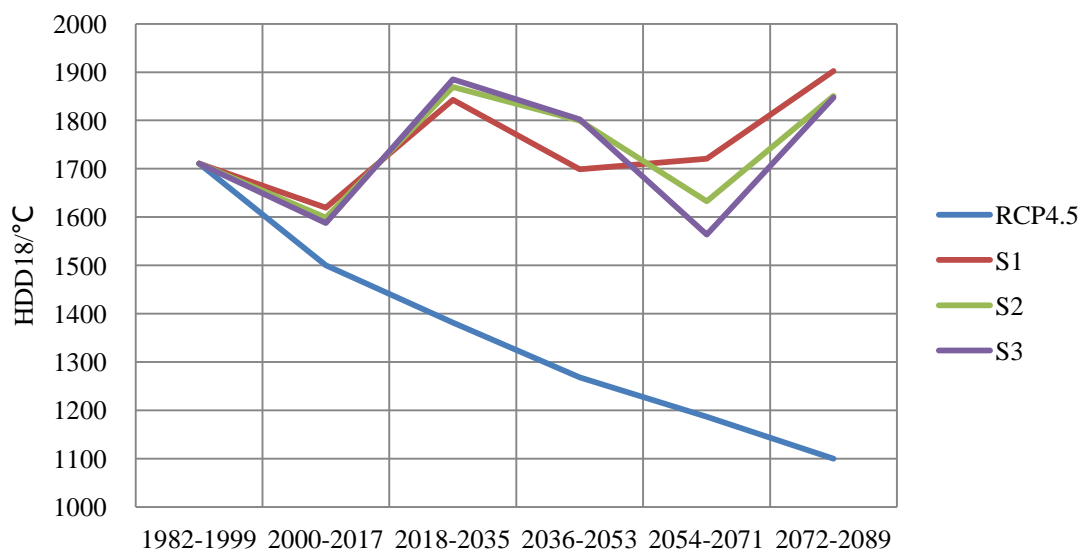


图 3.20 21 世纪上海 HDD18 变化

第四章 采用未来典型气象年的建筑能源需求预测

本章基于气候变化周期性分析的时间序列模型预测的上海未来 100 年月平均温度经时间序列调整方法 - Morphing 的降尺度处理后, 针对 3 种不同的波动情景和 5 个未来时间段, 生成了气候变化条件下适用于上海地区建筑能耗模拟的未来典型气象年 (TMY) 逐时数据, 并将其转化为建筑能耗模拟工具 EnergyPlus 应用的 EPW 格式天气参数文件, 用于上海地区不同类型的典型建筑模型 (Prototypical Building Models), 从而进行未来 100 年气候变化影响下上海地区建筑能源需求的变化预测。

4.1 上海地区典型建筑模型

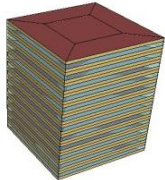
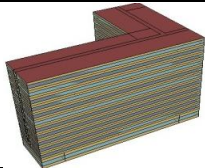
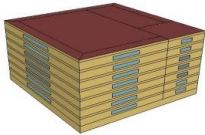
典型建筑模型是建立在建筑能耗调查的基础上的, 如美国能源部最新商业建筑能耗调查 CBECS 是美国最好的关于商业建筑的公开资料, 其 2003 版本中包含了 5215 个建筑样本, 以此为基础的典型建筑模型能够很好地代表当地各类建筑的基本特点^[146]。

由于缺乏类似美国 CBECS 的详细建筑数据, 本文采用建筑能耗模拟软件 EnergyPlus, 主要参照相关国家及上海地区建筑标准, 针对办公楼、酒店和商场 3 种建筑类型进行建模, 该组模型没有实际存在的建筑原型, 而是根据相关规范和调研数据建立的能够基本反映上海地区城市建筑普遍情况的典型模型。表 4.1~4.2 列出了模型建筑的基本情况。

表 4.1 建筑基本情况

建筑类型	层数	层高 m	建筑总面积 m ²	窗墙比	围护结构传热系数 W/(m ² ·K)		
					外墙	屋顶	窗户
办公	12	4	19200	0.40	0.888	0.638	2.67
酒店	12	3.5~5	23316	0.42	0.791	0.552	2.959
商场	地下 1 层、 地上 7 层	3.5	33800	0.11	1.304	0.653	3.667

表 4.2. 建筑外形、功能分区、冷热源及空调系统形式

建筑类型	建筑外形	建筑分区	冷热源与空调系统
办公		均为办公区	冷水机组&锅炉 风机盘管加新风
酒店		1 层: 大堂、咖啡厅、商店、洗衣房、 储藏室、设备用房、备用 2 层: 餐厅、厨房、备用、走廊 标准层: 客房、备用、走廊	冷水机组&锅炉 风机盘管加新风
商场		地下 1 层: 车库 标准层: 购物区、楼梯间 7 层: 餐厅、厨房、楼梯间	冷水机组&锅炉 全空气

4.2 上海未来 TMY 用于典型建筑能耗模拟结果分析

本文将已有 TMY 用于不同建筑类型的能耗模拟结果作为建筑能源需求的基准水平, 从而进行未来不同时段能源需求变化预测。典型模型中热源锅炉采用燃油锅炉, 其余均采用电能, 在比较时均转换成一次能源, 其中柴油的转换系数为 1.05, 电能的转换系数为 3.167。

不同季节的变化情况对于建筑能源需求的影响主要体现在供热、供冷能耗的变化上。根据不同类型建筑在不同情景下未来时段的供热、供冷能耗相对于基准时段的变化百分率来看, 对于各建筑类型在多种情景下, 供热能耗的变化率均与冬季温度的变化成反比, 即冬季温度升高则供热需求降低, 反之, 供冷能耗的变化率均与夏季温度的变化成正比, 即夏季温度升高则供冷能耗升高, 反之。

RCP4.5 和本文的 S1 情景同样都是情景设定中的稳定情景, 从二者的比较来看, RCP4.5 情景下各建筑供冷能耗随着夏季温度的稳定升高而增加, 供热能耗则随着冬季温度的持续上升而下降, 总能耗随着年平均温度的升高而增加, 至 2072~2089 年, 办公建筑、酒店建筑和商场建筑的供冷能耗相对于基准时段分别上升了 46.1%、79.7% 和 22.3%, 供热能耗则分别下降了 50.7%、19.5% 和 99.2%, 总能耗分别上升了 5.7%、10.4% 和 5.7%, 均高于 S1 情景, 在 S1 情景下, 办公建筑相对于基准时段的总能耗变化率最大为 2.6%, 酒店建筑为 3.1%, 商场为 1.4%, 见图 4.2~4.4。

根据 RCP4.5 和 S1 情景下不同建筑类型的供热、供冷需求变化, 本文将相对于基准能耗水平的供冷能耗变化率峰值与夏季温度温升最大值之比、供热能耗

变化率谷值与冬季温度温升最大值之比分别作为不同建筑类型对冬季和夏季温度变化的敏感度，即单位温升产生的能耗变化率（%/℃），分析发现，RCP4.5和S1情景下同类建筑的敏感度计算结果很接近，因此取二者的平均值作为本文中不同建筑类型对温度变化的敏感度结果，从不同建筑类型对季节温度变化的敏感度对比来看，办公建筑的供热能耗对于冬季温度变化的敏感度较高，酒店建筑的供冷能耗对于夏季温度变化的敏感度较高，如图4.1。

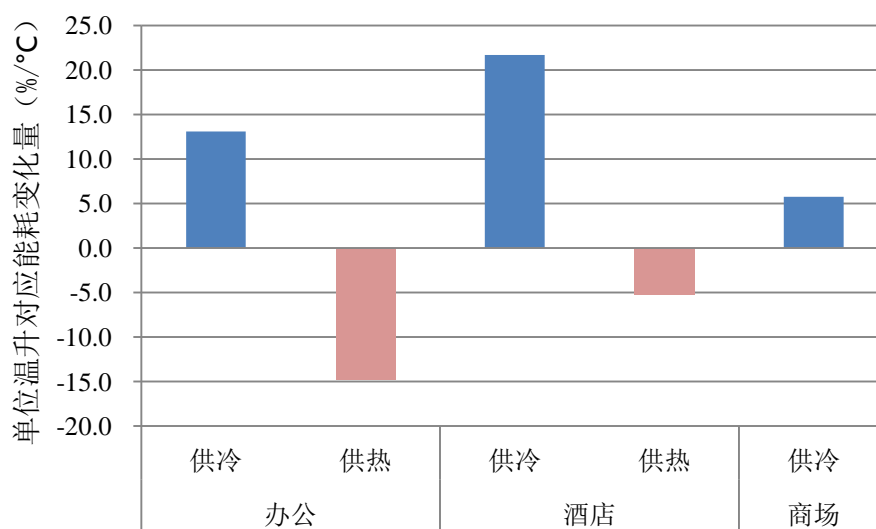


图 4.1 不同建筑类型对季节温度变化的敏感度对比

在 S1 情景下，随着温度的波动性变化，供冷、供热需求相应变化，与基准时段相比，至 2000~2017 年，夏季温度上升 1℃，冬季温度上升 0.5℃，供冷需求上升，供热需求下降，供冷需求的增加均会被供热需求的大幅下降所抵消，在 2036~2053 年时段，夏季温度下降 0.3℃，冬季温度上升 0.3℃，供冷需求和供热需求同时下降，各类建筑在此时间段的总能耗变化均为最小，低于基准水平，而在 2072~2089 年，夏季温度上升 0.4℃，冬季温度下降 1.2℃，供冷需求和供热需求同时增加。

S1、S2 和 S3 三种波动情景对办公、酒店和商场建筑产生的影响基本一致，与基准时段相比，在未来 5 个时间段里，相同的季节平均温度波动下，随着月平均随机振动和日间波动的加强，供冷、供热和总能耗的波动均有所加强，如图 4.5~4.7。

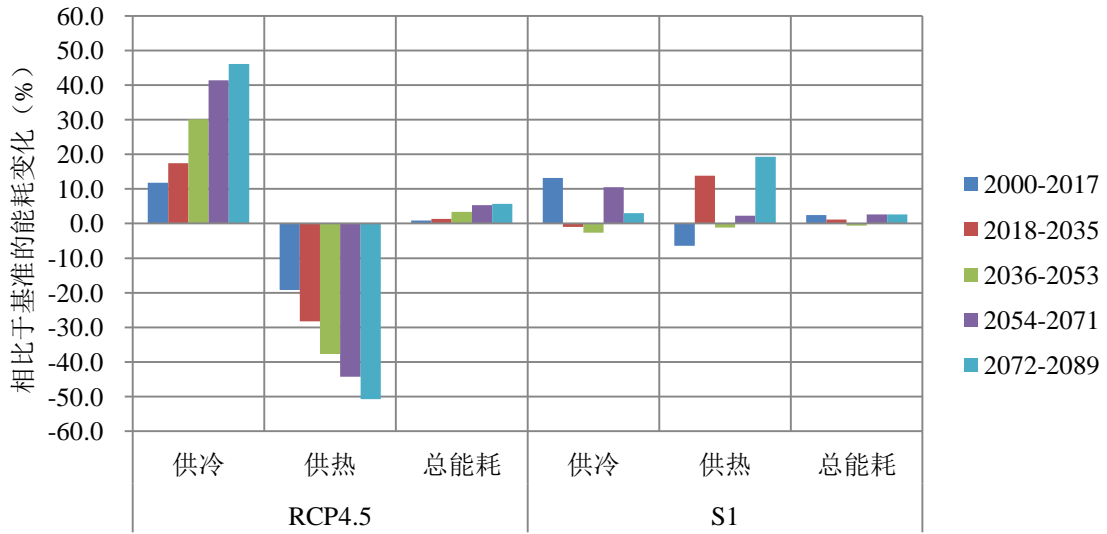


图 4.2 21 世纪 RCP4.5 与 S1 情景下上海办公建筑能耗变化

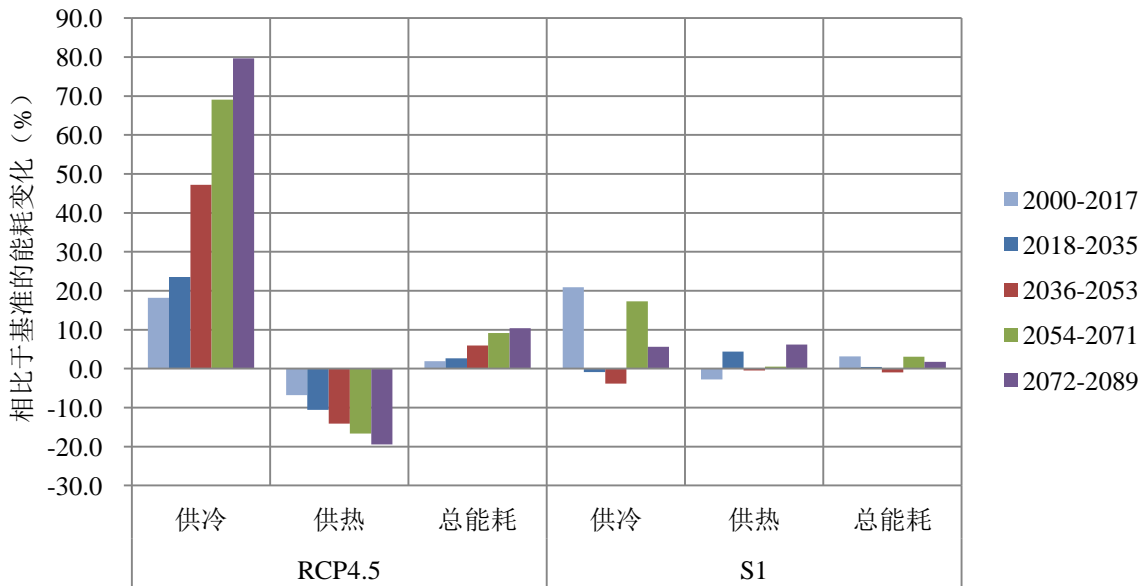


图 4.3 21 世纪 RCP4.5 与 S1 情景下上海酒店建筑能耗变化

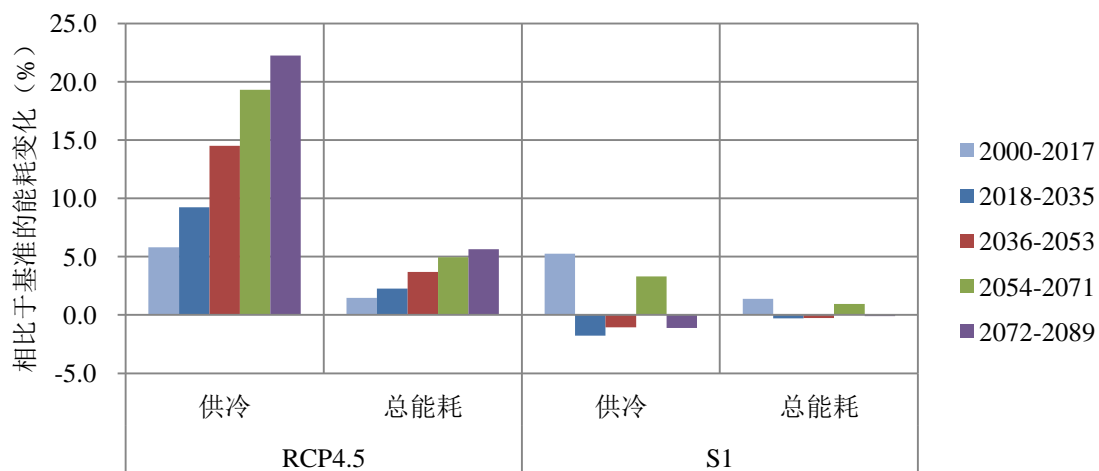


图 4.4 21 世纪 RCP4.5 与 S1 情景下上海商场建筑能耗变化

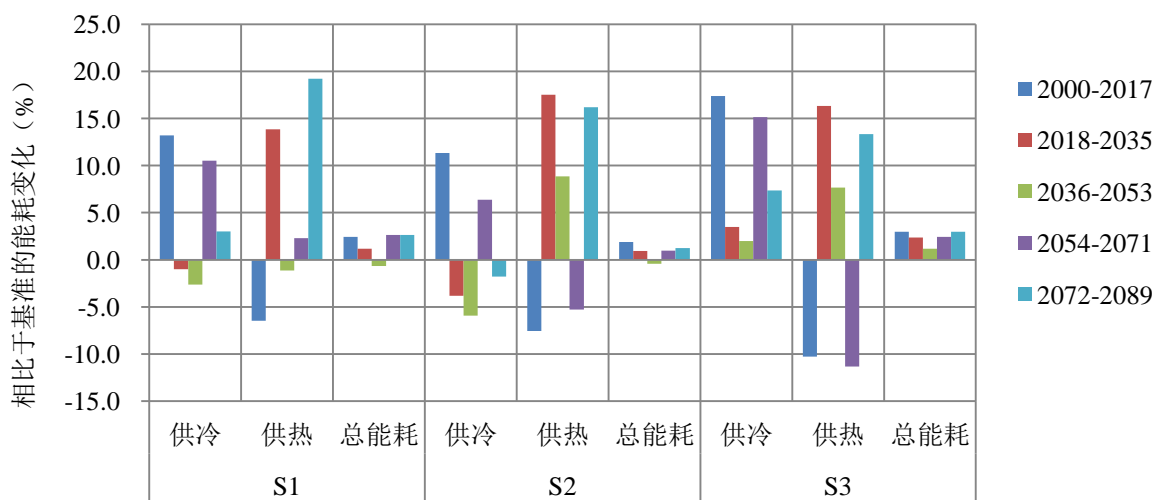


图 4.5 21 世纪不同波动情景下上海办公建筑能耗变化

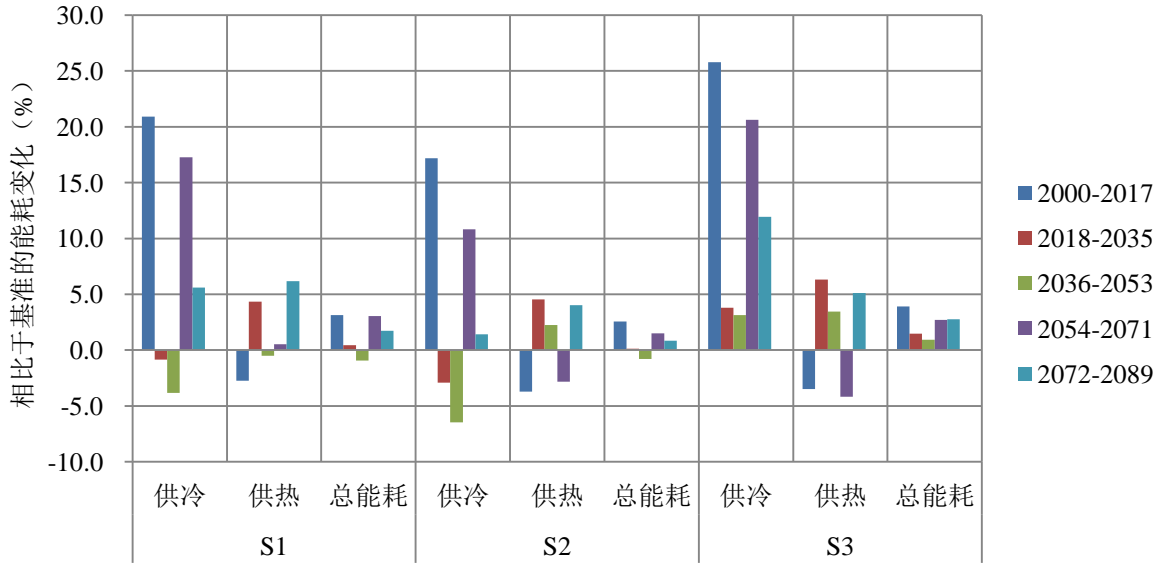


图 4.6 21 世纪不同波动情景下上海酒店建筑能耗变化

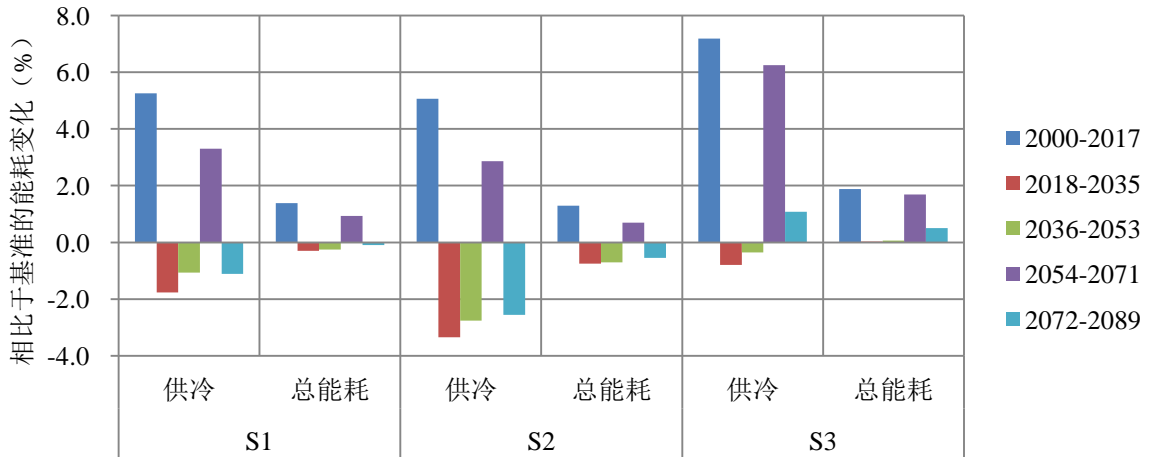


图 4.7 21 世纪不同波动情景下上海商场建筑能耗变化

第五章 总结与展望

5.1 总结与结论

本文通过对气候变化问题的深入分析,了解到气候变化问题争议的焦点主要在于气候变化的主要原因和未来气候的变化趋势。目前,气候变化的检测与归因的不确定性对气候变化预测造成了很大的阻碍。气候变化预测结果的范围和多个预测结果之间的差异很大,在空间尺度和时间尺度上也存在很大的局限性。然而,在用于建筑能源需求预测的气候变化研究中,空间和时间尺度的选择会直接影响预测结果的可信度和应用价值。因此,本文基于时间序列分析在气象学中的应用,从区域历史长期气候变化和实际气象观测结果出发,提出了基于区域气候变化周期性分析的时间序列预测方法。作者基于中国东部近千年的历史气候变化和近百年的气候波动趋势分析,采用时间序列分析方法从上海地区 1961~2010 年观测月平均温度中探索气候变化周期性和不确定性在当前气候中的表现形式和影响程度。分析发现,当前气候中体现最明显的百年以上尺度周期和百年以内尺度周期分别是 300a 和 60a,各月份的大周期谷点出现在 1837~1900 年范围内,小周期谷点则出现在 1971~1979 年范围内,同时考虑当前气候不确定性在未来可能出现的变化,提出振动稳定、振动减弱和振动增强这 3 种不同的随机振动情景,从而建立未来月平均温度的时间序列预测模型,对上海未来 100 年的气候变化进行预测。为了使月平均预测结果能够用于建筑能耗模拟工具,本文采用统计降尺度时间序列调整方法 – Morphing,将预测的上海未来月平均温度变化与当地现有典型气象年(TMY)相结合,考虑当前日较差情况在未来可能出现的变化,提出了日间波动稳定、日间波动减弱和日间波动增强这 3 种不同的日间波动情景,分别与之前提出的月平均随机振动情景相结合,形成新的情景,从而生成不同情景下上海地区未来 100 年里 2000-2017、2018-2035、2036-2053、2054-2071 和 2072-2089 年这 5 个时段的典型气象年(TMY)逐时天气参数,并将未来 TMY 用于上海地区办公、酒店和商场这 3 种建筑类型的典型模型(Prototypical Building Models),预测上海地区 21 世纪气候变化影响下的建筑能源需求变化。

本文针对上海地区未来 100 年月平均温度和建筑能源需求的预测研究可以得出以下结论:

1. 单从月平均温度时间序列预测模型中大、小周期项的预测结果来看,一年中大多月份双周期在 2005 年左右均到达周期波动的峰值,在未来 100 年里的变化趋势为波动性下降,而 7、9 和 11 月的 60a 小周期在 2005 年左右到达峰值,

但 300a 大周期还未到达峰值，在未来的 100 年里大周期将在 2060~2070 年左右达到波峰，由于小周期的影响，这 3 个月呈先波动性上升至 2060~2070 年左右后波动性下降。

2.当叠加了不同振动情景下的随机项之后，气候的随机变化会对月平均温度的周期性波动产生较大的影响，尤其可能对周期波动中冷暖时段的发生、延长时间和温度变化程度产生影响，从 1 月和 7 月的预测结果来看，随机振动会使周期性峰谷的出现时间推迟或提前 5~10a。

3.从全球气候模式 HadGEM2-CC 在 RCP4.5 情景下上海地区的 1 月和 7 月平均温度预测结果与本文时间序列模型预测结果的对比中，可以看出，RCP4.5 情景下气候模式对于 1 月的预测温度显著高于本文时间序列模型的预测结果，7 月则低于本文的时间序列模型预测，RCP4.5 情景下 7 月的温升趋势明显，在 2030a 后两种预测的差距有所改善，在 2080s，RCP4.5 与随机振动稳定情景的 7 月预测结果很接近。

4.RCP4.5 情景下各建筑供冷能耗随着夏季温度的稳定升高而增加，供热能耗则随着冬季温度的持续上升而下降，总能耗随着年平均温度的升高而增加，至 2072~2089 年，办公建筑、酒店建筑和商场建筑的总能耗相对于基准时段分别上升了 5.7%、10.4%和 5.7%，均高于 S1 情景，在 S1 情景下，办公建筑相对于基准时段的总能耗变化率最大为 2.6%，酒店建筑为 3.1%，商场为 1.4%，各建筑类型的供冷、供热能耗均随温度的变化呈波动性变化趋势。不同类型建筑总能耗随季节温度变化的差异则主要是由不同建筑类型中供冷、供热需求在总能耗中所占比例不同，以及不同建筑类型的供热、供冷需求对于季节温度变化的响应程度不同这两方面的原因造成的。

5.从不同建筑类型对季节温度变化的敏感度对比来看，办公建筑的供热能耗对于冬季温度变化的敏感度较高，酒店建筑的供冷能耗对于夏季温度变化的敏感度较高。

6.随机振动及波动情景对办公、酒店和商场建筑产生的影响基本一致，与基准时段相比，在未来 5 个时间段里，相同的季节平均温度波动下，随着月平均随机振动和日间波动的加强，供冷、供热和总能耗的波动均有所加强。

5.2 不足之处和展望

本文对于上海地区月平均温度的预测结果在未来 100 年呈现出与 IPCC 不同的变化趋势，作者在此只是根据上海地区的实际观测与中国东部区域的历史长期气候变化分析进行的探索性研究，并非否认 IPCC 的论断，相反，IPCC 的研究

成果对本文的研究工作具有重要的参考价值。

作者提出的基于区域气候变化周期性分析的时间序列预测方法在本文中仅针对上海地区的观测数据进行了深入研究,历史长期气候变化的规律性分析仅针对中国东部地区,而中国气候变化的地区性差异很大,这一方法目前则仅适用于中国东部,存在一定的地域局限,对于其他地区,则需要根据当地长期气候变化的分析来判断是否具有规律性,才能进一步考虑能否采用该方法。另外,本文中只针对月平均温度进行了预测研究,而已有典型气象年中主要的天气参数,除干球温度之外,还有露点温度(相对湿度)、太阳辐射、风速和云量等多个气象要素,有研究表明,露点温度(相对湿度)的变化会对建筑能源需求产生较大的影响,尤其在夏季,由于缺少实际露点温度(相对湿度)观测资料,同时该预测方法对露点温度(相对湿度)的应用可行性还有待分析,本文仅针对上海地区未来100年月平均温度变化进行了预测,对于建筑能源需求的预测来说尚有不足,值得以后进行研究和探索。

致谢

转眼间，硕士毕业在即，不免感慨，近三年来，我在父母、导师和欢乐课题组的陪伴下共同走过了人生中又一段重要的学习生涯。在我的硕士论文即将完成之际，细细回想这段短暂而又充实的生活，深感自己的幸运。

首先，我非常感谢能够得到导师潘毅群老师的垂青，三年来对我的学习、成长都产生了很大的影响，在忙碌的生活中她一直保持积极乐观的学习和工作态度，保持很高的自我要求和自我约束能力，作为年轻人的我们却倦怠许多，这一点让我受益良多。对我来说，她不仅是学习上的导师，更是我努力的方向。潘老师不求回报，默默耕耘，为了我们的学业，付出了很多。在此，我衷心的感谢潘毅群老师对我的栽培和鼓励，让我收获一笔宝贵的人生财富。

黄治钟老师是我研究生阶段的第二导师，从最初进入课题组直到现在，我相信更久的将来，黄老师都是我学习的榜样，他严谨的学术态度、独到的思维方式以及快速的反应能力都让我们年轻人汗颜。黄老师在我的论文完成中也起到了重要的作用，他总能一针见血的找出问题，指点迷津，让我受益匪浅。在此，我同样衷心的感谢黄老师对我的提点和指导。

与此同时，在两位严父慈母般的老师的带领下，欢乐课题组里的兄弟姐妹都忙碌而充实。与各位师弟师妹朝夕相处给我带来了许多快乐，尤其在我完成硕士论文阶段给予我很大的帮助和照顾。在此，我也衷心的感谢他们的陪伴。

最后，我要衷心感谢我的父亲母亲，感谢他们一直以来给予我无私的爱，以及在我成长的过程中对我的严格要求和永远的支持与信任。

参考文献

- [1] 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 为减缓全球变暖而奋斗. 气候变化研究进展, 2013, Vol. 9 (1): 61~66
- [2] 王绍武, 龚道溢. 对气候变暖问题争议的分析. 地理研究, 2001年, Vol. 20 (2): 153~160
- [3] J.T.Houghton, G.J.Jenkins, J.J.Ephraums. CLIMATE CHANGE The IPCC Scientific Assessment. Report Prepared for IPCC by Working Group 1, 1990
- [4] Houghton J T, Filhol G M, Callander B A, et al. Climate Change 1995 : The Science of Climate Change [M].Cambridge, UK:Cambridge University Press, 1996
- [5] IPCC, Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2001.
- [6] IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2007
- [7] Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Northern Hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties and limitations [J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26: 759~762
- [8] 王绍武. 中世纪暖期与小冰期. 气候变化研究进展, 2010年, Vol. 6 (5): 388~390
- [9] 葛全胜, 王绍武, 方修琦. 气候变化研究中若干不确定性的认识问题. 地理研究, 2010, Vol. 29 (2): 191~203
- [10] Mann M E, Zhang Z H, Rutherford S, et al. Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval climate Anomaly[J]. Science, 2009, 326: 1256~1260
- [11] 王绍武, 葛全胜, 王芳, 等. 全球气候变暖争议中的核心问题. 地球科学进展, 2010, Vol. 25 (6) :656~665
- [12] 龚道溢, 王绍武. 全球气候变暖研究中的不确定性. 地学前缘(中国地质大学, 北京), 2002, Vol. 9 (2): 371~376
- [13] MONNIN E, INDERMUL E A, DOL ENBACH A, et al. Atmospheric CO₂ concentrations over the last glacial termination [J]. Nature, 2001, 391: 112~114
- [14] FISCHER H, WAHL EN M, SMITH J, et al. Ice core records of atmospheric CO₂ around the last three glacial terminations [J].Science, 1999, 283: 1712~1714
- [15] PETIT J R , JOUZEL J, RAYNAUD D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420, 000 years from the Vostok ice core, Antarctica[J]. Nature, 1999, 292: 699~702
- [16] INDERMUHL E A, STOCKER T F, JOOS F, et al. Holocene carbon-cycle dynamics based on CO₂ trapped in ice at Taylor Dome, Antarctica[J]. Nature, 1999, 298: 121~126
- [17] Santer B D, Mears C, Wentz F J, et al. Identification of human-induced changes in atmospheric moisture content [J]. PNAS, 2007, 104: 15248~15253
- [18] S. Fred Singer, ed., Nature, Not Human Activity, Rules the Climate: Summary for Policymakers of the Report of the Nongovernmental International Panel on Climate Change, Chicago, IL: The Heartland Institute, 2008

- [19] Allen R, Sherwood S C. Warming maximum in the tropical upper troposphere deduced from thermal winds [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1: 399-413
- [20] Thorne DW. The answer is blowing in the wind [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1: 347-348
- [21] SERREZE M C, WALSH J E, CHAPIN F S III, et al. Observation evidence of recent change in the northern high-latitude environment [J]. *Climatic Change*, 2000, 46: 159~207
- [22] PRYZBYLAK R. Temporal and spatial variation of surface air temperature over the period of instrumental observations in the Arctic [J]. *Inter J Climatol*, 2000, 20: 587~614
- [23] KAHL J D. Absence of evidence for greenhouse warming over the Arctic Ocean in the past 40 years [J]. *Nature*, 1993, 361: 335~337
- [24] HURRELL J W. Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on northern hemisphere [J]. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 665~668
- [25] THOMPSON D W J, WALLACE J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields [J]. *Geophysical Res Lett*, 1998, 25: 1297~1300
- [26] THOMPSON D W J, WALLACE J M, GABRIEL E C. Annular modes in the extratropical circulation, Part II: Trends [J]. *J Climate*, 2000, 13 (5): 1018~1036
- [27] Kikby J. Cosmic rays and climate [J]. *Surv Geophys*, 2007, 28: 333~375
- [28] Bond G, Kromer B, Beer J, et al. Persistent solar influence on North Atlantic climate change during the Holocene [J]. *Science*, 2001, 294: 2130~2135
- [29] Haigh J D. The effects of solar variability on the Earth's climate [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society Lond A*, 2003, 361: 95~111
- [30] 王东. 气候变化问题: 国际政治的较量与利益的博弈. *学术界 (月刊)*, 2012, 第 173 期 (10): 45~59
- [31] 曹文振. “气候变化”问题剖析. *中国人口 资源与环境*, 2010, Vol. 20: 26~33
- [32] 万珍妮. 国际气候政治格局中的中美欧博弈: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2011
- [33] 韩文科, 杨玉峰, 庄幸, 等. 从政策视角看全球能源趋势与气候变化谈判前景. *中国能源*, 2009, Vol. 31 (11): 5~8
- [34] 韩晓平. 迎接全球气候变异的挑战. *电力需求侧管理*, 2010, Vol. 12 (2): 1~4
- [35] 史义. 意大利应对能源危机和气候变化的主要措施. *全球科技经济瞭望*, 2010, Vol. 25 (12): 39~49
- [36] 韩可琦, 王玉浚. “九五”期间我国能源需求预测问题的探讨. *中国矿业大学学报*, 2002, Vol. 31 (6): 547~551
- [37] 龙惟定. 建筑能耗比例与建筑节能目标. *中国能源*, 2005, Vol. 27 (10): 25~27
- [38] 文远高, 连之伟. 气候变暖对建筑能耗的影响. *建筑热能通风空调*, 2003, Vol. 22 (3): 37~42
- [39] 龙惟定. 试论我国暖通空调业的可持续发展. *暖通空调 HV&AC*, 1999, Vol. 29 (3): 25~30
- [40] 鄢涛, 卜增文, 刘俊跃. 基于人工神经网络的建筑能耗预测. 首届国际智能与绿色建筑技术研讨会论文集, 2005
- [41] 夏栋良, 龚延风. 基于多规则实时学习组合型 BP 神经网络的城市建筑能耗预测模型. *建筑科学*, 2008, Vol. 24 (6): 90~94
- [42] Matthias Ruth, Ai-Chen Lin. Regional energy demand and adaptations to climate change: Methodology and application to the state of Maryland, USA. *Energy Policy*, 2006, 34:2820~2833
- [43] Joseph C. Lam, Kevin K.W. Wan, Tony N.T. Lam, et al. An analysis of future building energy

- use in subtropical Hong Kong. *Energy*, 2010, 35: 1482~1490
- [44] 周芮锦, 潘毅群, 黄治钟. 时间序列方法及其在实际办公楼能耗预测中的应用. *建筑节能*, 2012, Vol. 40 (252): 55~62
- [45] 陈莉, 方修琦, 李帅, 张海东. 气候变暖对中国夏热冬冷地区居住建筑采暖降温年耗电量的影响. *自然资源学报*, 2008, Vol. 23 (5): 764~771
- [46] 陈莉, 方修睦, 方修琦, 等. 过去 20 年气候变暖对我国冬季采暖气候条件与能源需求的影响. *自然资源学报*, 2006, Vol. 21 (4): 590~597
- [47] 陈峪, 黄朝迎. 气候变化对能源需求的影响. *地理学报*, 2000, Vol. 55 增刊: 11~19
- [48] 李喜仓, 白美兰, 杨晶, 等. 气候变暖对呼和浩特地区采暖期能源消耗的影响. *气候变化研究进展*, 2010, Vol. 6 (1): 29~34
- [49] 陈莉, 方修琦, 李帅. 气候变暖对中国严寒地区和寒冷地区南界及采暖能耗的影响. *科学通报*, 2007, Vol. 52 (10): 1195~1198
- [50] 陈峪, 叶殿秀. 温度变化对夏季降温耗能的影响. *应用气象学报*, 2006, Vol. 16 增刊: 97~104
- [51] M. Christenson a, H. Manz, D. Gyalistras. Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47: 671~686
- [52] 李明财, 郭军, 史瑗, 等. 利用采暖 / 制冷度日分析建筑能耗变化的适用性评估[J]. *气候变化研究进展*, 2013, Vol. 9(1): 043~048
- [53] Thomas J. Wilbanks, Vatsal Bhatt, Daniel E. Bilello, et al. Effects of Climate Change on Energy Production and Use in the United States. U.S. Climate Change Science Program. Synthesis and Assessment Product 4.5. 2008
- [54] Peng Xu, Yu Joe Huang, Norman Miller. EFFECTS OF GLOBAL CLIMATE CHANGES ON BUILDING ENERGY CONSUMPTION AND ITS IMPLICATIONS ON BUILDING ENERGY CODES AND POLICY IN CALIFORNIA. PIER FINAL PROJECT REPORT, 2009, CEC-500-2009-006
- [55] 王在志, 宇如聪, 包庆, 等. 大气环流模式(SAMIL) 海气耦合前后性能的比较. *大气科学*, 2007, Vol. 31 (2): 202~213
- [56] 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 气候模式. *气候变化研究进展*, 2013, Vol. 9 (2): 150~154
- [57] Richard Moss, Mustafa Babiker, Sander Brinkman, et al. 《为分析排放、气候变化、影响和对策, 迈向新情景》. 政府间气候变化专门委员会, 日内瓦, 2008, 页数: 25 页
- [58] 陈敏鹏, 林而达. 代表性浓度路径情景下的全球温室气体减排和对中国的挑战. *气候变化研究进展*, 2010, Vol. 6 (6): 436~442
- [59] 赵宗慈. 全球气候变化预估最新研究进展. *气候变化研究进展*, 2006, Vol. 2 (2): 67~70
- [60] 周天军, 李立娟, 李红梅. 气候变化的归因和预估模拟研究. *大气科学*, 2008, Vol. 32 (4): 906~922
- [61] 李立娟, 王斌, 周天军. 外强迫因子对 20 世纪全球变暖的综合影响. *科学通报*, 2007, Vol. 52 (15): 1820~1825
- [62] TIANJUN ZHOU, RUCONG YU. Twentieth-Century Surface Air Temperature over China and the Globe Simulated by Coupled Climate Models. *JOURNAL OF CLIMATE*, 2006, Vol. 19: 5843~5858

- [63] Thomas L. Delworth, Thomas R. Knutson. Simulation of Early 20th Century Global Warming. *SCIENCE*, 2000, Vol. 287: 2246~2250
- [64] Peter A. Stott, S. F. B. Tett, G. S. Jones, et al. External Control of 20th Century Temperature by Natural and Anthropogenic Forcings. *SCIENCE*, 2000, Vol. 290: 2133~2137
- [65] 王绍武. 全球气候变暖与未来发展趋势. *第四纪研究*, 1991, 第三期: 269~276
- [66] 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 等. 中国气候与环境演变评估 (I): 中国气候与环境变化及未来趋势. *气候变化研究进展*, 2005, Vol. 1 (1): 4~9
- [67] 赵宗慈, 罗勇, 江滢, 等. 未来 20 年中国气温变化预估. *气象与环境学报*, 2008, Vol. 25 (5): 1~5
- [68] Singer S F. Human contribution on climate change remains questionable [J] *EOS*, 1999, 80 (16)
- [69] 王芳, 葛全胜, 陈泮勤. IPCC 评估报告气温变化观测数据的不确定性分析. *地理学报*, 2009, Vol. 64 (7): 828~838
- [70] 许吟隆, 张勇, 林一骅, 等. 利用 PRECIS 分析 SRES B2 情景下中国区域的气候变化响应. *科学通报*, 2006, Vol. 51 (17): 2068~2074
- [71] E. Friis-Christensen, K. Lassen. Length of the solar cycle_an indicator of solar activity closely associated with climate. *Science, New Series*, 1991, Vol. 254 (5032): 698~700
- [72] 汤懋苍, 柳艳香, 郭维栋. 天时、气候与中国历史 (I): 太阳黑子周长与中国气候. *高原气候*, 2001, Vol. 20 (4): 369~373
- [73] 高晓清, 柳艳香, 董文杰, 等. 地磁场与气候变化关系的新探索. *高原气候*, 2002, Vol. 22 (4): 395~401
- [74] 王绍武, 赵宗慈. 未来 50 年中国气候变化趋势的初步研究. *应用气象学报*, 1995, Vol. 6 (3): 333~342
- [75] 赵宗慈, 王绍武, 罗勇, 等. 气候变化预测预估方法研究——气候变暖中自然和人类影响的联合估算. *中国环境科学学会学术年会论文集*, 2009, 244~248
- [76] 王绍武, 赵宗慈, 唐国利. 中国的气候变暖. *《国际政治研究》(季刊)*, 2009, Vol. 30 (4): 1~11
- [77] 闻新宇, 王绍武, 朱锦红, 等. 英国 CRU 高分辨率格点资料揭示的 20 世纪中国气候变化. *大气科学*, 2006, Vol. 30 (5): 894~904
- [78] J. Hansen, M. Sato, R. Ruedy, et al. Global Warming in the Twenty-first Century: An Alternative Scenario. *PNAS*, 2000, 9875~9880
- [79] P.D. Jones, M. New, D. E. Parker. Surface Air Temperature and Its Changes over the Past 150 Years. *Rev Geophysics*, 1999, 173~199
- [80] K. Y. Innikov, A. Robock, R. J. Stouffer, et al. Global Warming and Northern Hemisphere Sea Ice Extent. *Science*, 1999, 1934~1937
- [81] T.C. Peterson, D. R. Easterling, T. R. Karl, et al. Homogeneity Adjustments of in Situ Atmospheric Climate Data: A Review. *Int. J. Climatol*, 1998, 1493~1517
- [82] 王绍武, 叶瑾琳. 近百年全球气候变暖的分析. *大气科学*, 1995, Vol. 19 (5): 545~553
- [83] 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢, 等. 近百年中国年气温序列的建立. *应用气象学报*, 1998, Vol. 9 (4): 392~401
- [84] 宇如聪, 周天军, 李建, 等. 中国东部气候年代际变化三维特征的研究进展. *大气科学*, 2008, Vol. 32 (4): 893~905
- [85] Dai, A., T. M. L. Wigley, B. A. Boville, et al. 2001a: Climates of the 20th and 21st centuries

- simulated by the NCAR Climate System Model. *J. Climate*, 14: 485~519
- [86] Hu, Z. Z., S. Yang, and R. Wu, 2003: Long-term climate variations in China and global warming signals. *J. Geophys. Res.*, 108, 4614, doi:10.1029/2003JD003651
- [87] Qian, Y., and F. Giorgi, 1999: Interactive coupling of regional climate and sulfate aerosol models over eastern Asia. *J. Geophys. Res.*, 104, 6477~6499
- [88] 周秀骥, 李维亮, 罗云峰. 中国地区大气气溶胶辐射强迫及区域气候效应的数值模拟. *大气科学*, 1998, Vol. 22 (4): 418~427
- [89] Xu Q. Abrupt change of the mid-summer climate in central East China by the influence of atmospheric pollution. *Atmos. Environ.*, 2001, 35: 5029~5040
- [90] 张立盛, 石广玉. 硫酸盐和烟尘气溶胶辐射特性及辐射强迫的模拟估算. *大气科学*, 2001, 25 (2): 231~242
- [91] Menon S , Hansen J, Najarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, 2002, 297: 2250~2252
- [92] 马晓燕, 石广玉, 郭裕富, 等. 温室气体和硫酸盐气溶胶的辐射强迫作用. *气象学报*, 2005, 63: 41~48
- [93] Li L, Wang B, Zhou T . Contributions of natural and anthropogenic forcings to the summer cooling over eastern China: An AGCM study. *Geophys. Res. Lett.* , 2007, 34, L18807, doi: 10.1029/2007GL030541
- [94] 李立娟. 格点大气环流模式(GAMIL)对流、云辐射方案的改进与数值模拟: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2007, 70~73
- [95] 徐影, 罗勇, 赵宗慈, 等. BCC-AGCM1.0 模式对 20 世纪气候变化的检测. *气候变化特别评估报告*, 2005, Vol. 6: 1~ 6
- [96] Yu R, Zhou T. Impacts of winter-NAO on March cooling trends over subtropical Eurasia continent in the recent half century. *Geophys. Res. Lett.* , 2004, 31, L12204, doi: 10.1029/2004GL019814
- [97] Li J, Yu R C, Zhou T J, et al. Why is there an early spring cooling shift downstream of the Tibetan Plateau. *J. Climate*, 2005, 18 (22): 4660~4668
- [98] Gong D Y, Ho C H . Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s. *Geophys. Res. Lett.* , 2002, 29 (10) , 1436, doi: 10.1029/2001GL014523
- [99] Hu Z, Yang S, Wu R. Long-term climate variations in China and global warming signals . *J. Geophys. Res.* , 2003, 108 (D19) , 4614, doi: 10.1029/2003JD003651
- [100] 周连童, 黄荣辉. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究. *气候与环境研究*, 2003, 8 (3) : 274~290
- [101] 陈隆勋, 周秀骥, 李维亮, 等. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制. *气象学报*, 2004, 62 (5) : 634~646
- [102] Li X, Zhou X, Li W, et al. The cooling of Sichuan Province in recent 40 years and its probable mechanisms. *Acta Meteor. Sinica*, 1995, 9: 57~68
- [103] 王喜红, 石广玉, 马晓燕. 东亚地区对流层人为硫酸盐辐射强迫及其温度响应. *大气科学*, 2002, 26: 751~760
- [104] 吴润, 蒋维楣, 刘红年, 等. 硫酸盐气溶胶直接和间接辐射效应的模拟研究. *环境科学学报*, 2002, 22 (2) : 129~134
- [105] Huang Y, Chameides W L, Dickinson R E. Direct and indirect effects of anthropogenic aerosols on regional precipitation over East Asia. *J. Geophys. Res.* , 2007, 112: D03212, doi: 10.

1029/2006JD007114

- [106] EPICA community members. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 2004, Vol. 429: 623~628
- [107] 王绍武. 冰期-间冰期旋回. *气候变化研究进展*, 2008, Vol. 4 (1): 61~62
- [108] 王绍武. 全新世气候. *气候变化研究进展*, 2009, Vol. 5 (4): 247~248
- [109] 王绍武. 全新世大暖期. *气候变化研究进展*, 2011, Vol. 7 (5): 383~384
- [110] 施雅风. 中国全新世大暖期气候与环境. 北京: 海洋出版社, 1992
- [111] Shaowu Wang, Daoyi Gong, Jinhong Zhu. Twentieth-century climatic warming in China in the context of the Holocene. *The Holocene* 11,3 (2001), 313~321
- [112] 王绍武, 龚道溢. 全新世几个特征时期的中国气温. *自然科学进展*, 2000, Vol. 10(4): 325~332
- [113] 竺可桢. 中国五千年气候变迁的初步研究. *考古学报*, 1972, 第一期: 15~38
- [114] Wang Shaowu. Studies on climate of the Little Ice Age [J]. *Chinese Quat Sci*, 1995 (3): 202~212
- [115] Wang Shaowu, LuoYong, Zhao Zongci, et al. Debating about the climate warming [J]. *Progress in Natural Science*, 2006, 16: 1~6
- [116] Zhang De'Er. Evidence for the existence of the Medieval Warm Period in China [J]. *Climatic Change*, 1994, 26: 289~297
- [117] Yang B, Braeuning A, Johnson K R, et al. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia [J]. *Geophys Res Letts*, 2002, 29: 1234, doi:10.1029/2001GL014485
- [118] Wang Shaowu, Ye Jinlin, Gong Daoyi. Climate in China during the Little Ice Age [J]. *Chinese Quat Sci*, 1998 (2): 54~64
- [119] Zhang De'Er. The Little Ice Age in China and its correlations with global change [J]. *Chinese Quat Sci*, 1991 (2): 104~112
- [120] Stuiver M, Braziunas T F, Grootes P M, et al. Is there evidence for solar forcing of climate in the GISP2 oxygen isotope record? [J]. *Quat Res*, 1997, 48: 259~266
- [121] Jones P D, Osborn T J, Briffa K R. The evolution of climate over the last millennium [J]. *Science*, 2001, 292: 662~667
- [122] Robock A. Volcanic eruptions and climate [J]. *Rev Geophys*, 2000, 38: 191-219
- [123] Crowley T J. Causes of climate change over the past 1000 years [J]. *Science*, 2000, 289: 270-277
- [124] 郑景云, 葛全胜, 方修琦. 从中国过去 2000 年温度变化看 20 世纪增暖. *地理学报*, 2002, Vol. 57 (6): 631~638
- [125] Crowley T J, Lowery T S. How warm was the medieval warm period? *AMBIO*, 2000, 29(1): 51~54
- [126] Zhang De'er. A study on the Medieval Warm Period in China. *Quaternary Research*, 1993, (1): 7~13
- [127] 葛全胜, 方修琦, 郑景云. 千年尺度上冷暖变化的自相似特征研究. *自然科学进展*, 2002, Vol. 12 (12): 1280~1284
- [128] 葛全胜, 方修琦, 郑景云. 中国过去 3 ka 冷暖千年周期变化的自然证据及其集成分析. *地球科学进展*, 2002, Vol. 17 (1): 96~103
- [129] 葛全胜, 郑景云, 刘健. 过去 2000 a 中国东部冬半年温度变幅与周期. *气候变化研究*

- 进展, 2006, Vol. 2 (3): 108~112
- [130] 葛全胜, 郑景云, 满志敏, 等. 过去 2000 年中国温度变化研究的几个问题. 自然科学进展, 2004, Vol. 14 (4): 449~455
- [131] 李双林, 王彦明, 郜永祺. 北大西洋年代际振荡(AMO)气候影响的研究评述. 大气科学学报, 2009, Vol. 32 (3): 459~465
- [132] 林振山, 汪曙光. 近四百年北半球气温变化的分析: EMD 方法的应用. 热带气象学报, 2004, Vol. 20 (1): 90~96
- [133] 王永光, 龚振淞, 许力, 等. 中国温度、降水的长期气候趋势及其影响因子分析. 应用气象学报, 2005, Vol. 16 增刊: 85~91
- [134] 朱明亚, 潘毅群, 沙华晶, 等. 气候变化条件下中国典型城市未来天气参数与建筑能源需求预测. 建筑节能, 2013, Vol. 41 (265): 57~64
- [135] 王绍武, 王日昇. 1470 年以来我国华东四季与年平均气温变化的研究. 气象学报, 1990, Vol. 48 (1): 26~35
- [136] 薛薇. SPSS 统计分析方法及应用. 北京: 电子工业出版社, 2009
- [137] 赵玮英. 时间序列分析在气象中的应用: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2010
- [138] SE Belcher, JN Hacker, DS Powell. Constructing design weather data for future climates.[J] Building Services Engineering Research and Technology, 2005, Vol. 26(1).49~61.
- [139] A.L.S. Chan. Developing future hourly weather files for studying the impact of climate change on building energy performance in Hong Kong.[J] Energy and Buildings, 2011, Vol. 43.2860~2868
- [140] Drury B. Crawley. Creating weather files for climate change and urbanization impacts analysis[C]. Proceedings: Building Simulation 2007:1075~1082
- [141] Mark F. Jentsch, AbuBakr S. Bahaj, Patrick A.B. James. Climate change future proofing of buildings-Generation and assessment of building simulation weather files[J].Energy and Buildings(S0378-7788), 2008, 40:2148~2168
- [142] Guan, L., Yang, J., Bell, J.M. A method of preparing future hourly weather data for the study of the impact of global warming on built environment[C]. Proceedings: The Queensland University of Technology Research Week International Conference, Brisbane, 2005
- [143] Lisa Guan. Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings[J]. Building and Environment(S0360-1323), 2009, 44:793~800
- [144] A.L.S. Chan. Developing a modified typical meteorological year weather file for Hong Kong taking into account the urban heat island effect[J]. Building and Environment(S0360-1323), 2011, 46:2434~2441
- [145] 丁裕国, 江志红. 气象数据时间序列信号处理.北京: 气象出版社. 1998, 第一版.
- [146] Michael Deru, Kristin Field, Daniel Studer, et al. U.S. Department of Energy Commercial Reference Building Models of the National Building Stock[R].Oak Ridge:NREL.2011

附录 A 上海月平均温度观测数据

℃	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年平均
1961	3.3	5.1	9.5	14.8	19.0	24.1	29.1	28.7	24.9	18.9	14.1	6.7	16.5
1962	2.0	5.8	8.2	12.5	18.1	23.0	28.0	27.4	24.0	17.9	11.9	6.5	15.4
1963	0.5	3.1	9.4	14.4	20.1	22.6	27.9	27.9	24.2	16.9	13.0	6.8	15.6
1964	5.4	2.0	8.7	16.5	18.5	22.6	29.4	27.9	25.8	19.0	11.4	5.8	16.1
1965	5.1	5.7	7.7	12.1	19.6	22.2	28.1	26.9	22.7	18.0	13.8	4.8	15.6
1966	4.2	6.5	10.2	13.8	19.0	23.5	27.1	28.6	22.3	18.1	12.6	6.1	16.0
1967	2.0	4.0	8.7	13.6	19.3	24.3	28.0	29.4	24.0	18.4	12.5	1.0	15.4
1968	2.8	1.8	8.8	13.7	18.7	22.6	26.7	27.5	23.7	17.4	13.3	9.5	15.5
1969	3.6	2.6	6.8	14.2	19.7	22.4	26.7	28.0	24.9	18.0	10.3	4.9	15.2
1970	2.0	6.0	6.0	13.1	18.7	22.1	27.1	28.1	24.6	18.5	11.8	6.9	15.4
1971	2.3	4.0	7.3	13.9	19.5	24.9	29.7	28.3	23.2	16.4	12.1	5.9	15.6
1972	4.8	2.7	8.2	13.4	18.3	23.2	26.7	26.8	22.3	17.2	11.6	6.2	15.1
1973	4.3	6.7	10.1	15.7	18.6	22.8	27.8	28.2	21.8	17.7	11.4	4.0	15.8
1974	3.6	3.8	8.0	15.0	19.7	22.2	26.4	26.9	22.7	18.0	12.9	6.5	15.5

℃	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年平均
1975	4.8	5.2	8.6	13.9	18.2	23.0	27.6	27.9	26.3	19.5	12.4	4.5	16.0
1976	3.4	6.4	7.8	13.7	19.1	22.8	25.4	28.4	22.0	18.2	8.8	6.0	15.2
1977	1.3	3.0	9.4	15.3	18.2	23.2	28.2	26.2	24.0	19.7	11.9	8.8	15.8
1978	3.9	4.4	7.8	14.6	19.4	24.4	29.3	28.5	24.0	18.4	12.7	7.1	16.2
1979	5.3	6.7	8.8	13.9	18.3	24.5	27.4	27.5	23.2	18.4	11.2	8.5	16.1
1980	4.2	3.6	7.5	13.3	18.6	24.7	27.3	24.8	22.2	17.9	14.0	5.0	15.3
1981	2.4	5.3	10.3	14.8	19.8	23.9	28.4	27.9	22.5	16.7	10.8	5.4	15.7
1982	4.0	5.0	9.1	13.5	21.1	23.0	26.6	27.1	23.0	19.9	13.6	5.5	16.0
1983	4.2	4.8	8.8	15.3	20.5	22.3	27.6	27.5	24.6	18.5	12.1	5.3	16.0
1984	2.4	3.2	8.2	13.4	18.8	23.9	28.8	28.0	23.4	18.9	14.4	5.5	15.7
1985	3.9	5.5	7.0	14.9	19.9	22.9	28.2	27.7	25.1	19.1	12.0	4.6	15.9
1986	3.3	4.1	8.7	13.8	19.9	24.1	27.5	27.4	22.6	17.3	12.6	7.0	15.7
1987	5.1	6.3	7.9	13.5	18.8	22.6	27.0	28.5	22.8	19.8	13.6	5.8	16.0
1988	5.4	4.6	7.4	15.0	19.3	24.1	29.2	26.8	23.2	19.2	11.6	7.1	16.1
1989	5.5	5.6	9.5	14.5	18.9	23.7	26.2	27.1	23.9	18.6	12.5	7.2	16.1
1990	5.0	5.8	11.2	14.7	20.1	25.4	29.6	28.6	23.7	18.6	14.5	6.6	17.0
1991	4.8	6.2	8.4	13.6	19.6	24.2	28.3	27.0	24.2	18.5	12.6	7.5	16.2
1992	4.5	6.6	8.3	14.9	20.3	22.8	28.1	27.3	24.2	17.7	11.7	8.2	16.2
1993	3.5	6.9	8.9	14.5	18.8	24.6	26.8	26.3	24.0	18.4	13.4	5.9	16.0

℃	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年平均
1994	5.0	5.3	8.5	15.2	21.9	24.4	29.9	28.6	24.0	18.9	15.5	9.2	17.2
1995	4.9	5.7	10.1	13.9	19.3	23.1	28.3	28.9	24.9	19.1	12.0	6.3	16.4
1996	4.6	4.5	7.9	13.4	19.8	24.5	27.2	27.9	25.1	19.7	13.2	7.3	16.2
1997	3.9	6.4	10.6	15.4	22.6	24.8	27.5	27.6	23.3	19.5	13.9	7.9	17.0
1998	4.8	7.6	9.7	17.4	20.4	23.8	29.6	29.7	24.4	20.6	16.1	9.4	17.8
1999	6.6	7.5	10.1	15.0	20.8	22.2	25.4	27.0	25.8	19.8	13.2	7.5	16.7
2000	5.1	4.4	10.8	16.3	21.4	24.8	29.1	28.3	24.2	19.8	13.1	9.1	17.2
2001	5.8	6.8	10.9	15.3	20.7	24.3	29.5	26.9	24.6	20.0	13.5	7.1	17.1
2002	7.1	8.6	13.2	17.2	19.5	25.3	27.8	27.4	24.9	20.0	12.9	7.7	17.6
2003	3.8	7.0	9.9	15.4	20.0	24.6	29.7	29.2	26.1	18.7	13.9	6.5	17.1
2004	4.3	8.7	10.1	16.2	21.0	24.5	29.8	28.8	24.3	19.1	14.6	9.0	17.5
2005	3.5	4.4	9.1	18.0	20.6	26.6	29.3	28.2	26.3	19.0	15.2	4.9	17.1
2006	5.8	5.5	11.3	16.7	20.8	25.7	29.3	30.1	23.7	22.0	15.6	8.2	17.9
2007	5.5	9.5	11.8	15.7	22.9	24.9	29.7	29.4	25.1	20.3	13.9	9.1	18.2
2008	4.3	3.9	11.5	16.0	21.6	24.0	30.3	28.3	25.6	20.6	13.0	7.5	17.2
2009	3.9	8.9	10.6	16.3	21.9	26.1	28.8	27.8	25.0	21.2	12.0	6.4	17.4
2010	5.5	7.6	9.3	12.9	20.8	23.9	28.9	30.7	26.2	19.1	13.9	7.8	17.2

附录 B 上海月平均温度预测结果

平均温度 度℃	1月				2月				3月			
	RCP4.5	S1	S2	S3	RCP4.5	S1	S2	S3	RCP4.5	S1	S2	S3
2000s	6.3	5.0	5.0	5.0	6.2	7.1	7.1	7.1	9.2	10.8	10.8	10.8
2010s	6.9	3.7	4.5	4.3	7.4	4.9	6.0	5.5	9.7	9.7	9.5	9.4
2020s	6.7	3.3	3.9	2.7	7.1	4.5	4.2	4.6	9.9	8.8	8.3	8.4
2030s	6.9	3.1	3.0	3.1	7.8	4.4	4.0	4.3	10.5	8.7	8.3	8.8
2040s	8.0	3.9	4.1	3.6	8.1	5.6	4.9	4.4	10.2	9.2	9.0	9.2
2050s	7.8	4.2	4.5	4.6	8.0	4.9	5.6	5.7	11.1	9.9	10.3	10.3
2060s	8.1	4.0	4.9	4.6	8.6	5.9	5.8	5.9	11.0	9.7	9.7	10.8
2070s	8.2	3.9	4.1	3.6	8.6	4.5	4.4	4.9	11.0	9.7	9.2	9.0
2080s	8.8	2.8	3.1	2.5	9.5	4.0	4.1	4.2	11.6	8.0	7.8	8.5
平均温 度℃	4月				5月				6月			
	RCP4.5	S1	S2	S3	RCP4.5	S1	S2	S3	RCP4.5	S1	S2	S3
2000s	12.6	16.0	16.0	16.0	16.6	21.0	21.0	21.0	21.4	25.0	25.0	25.0
2010s	13.2	14.3	14.6	14.3	17.1	20.6	20.2	21.2	21.1	24.3	23.9	24.5
2020s	13.2	13.8	14.0	13.1	17.4	19.1	19.4	20.1	21.1	23.5	23.3	23.5
2030s	13.9	14.1	13.6	13.5	18.0	19.8	19.3	19.6	21.9	23.1	22.7	22.4
2040s	14.1	13.9	14.5	14.3	18.1	19.9	20.3	19.5	22.2	22.9	23.3	23.8
2050s	15.0	14.8	15.0	15.3	19.1	20.5	20.3	20.9	23.2	24.1	23.8	23.5
2060s	15.0	15.1	15.2	16.3	19.2	20.4	20.6	20.7	23.3	24.0	24.1	24.4
2070s	15.1	14.3	13.9	14.4	19.4	19.8	20.0	20.3	23.3	23.9	23.6	23.7
2080s	14.9	12.9	14.0	14.3	19.8	19.6	19.6	19.4	23.5	22.7	22.8	22.8

平均温 度 ℃	7 月				8 月				9 月			
	RCP4.5	S1	S2	S3	RCP4.5	S1	S2	S3	RCP4.5	S1	S2	S3
2000s	25.3	29.3	29.3	29.3	26.8	28.7	28.7	28.7	24.3	25.2	25.2	25.2
2010s	24.7	28.8	28.8	28.0	26.2	27.4	28.3	28.2	24.3	25.1	25.4	25.7
2020s	24.9	28.3	27.8	28.0	26.6	27.7	28.0	28.2	24.8	24.5	23.9	24.8
2030s	26.0	27.1	27.8	27.5	27.2	26.9	27.8	27.0	25.2	23.3	24.0	23.8
2040s	26.7	27.7	27.9	27.5	27.3	27.2	27.1	26.8	25.7	23.9	24.4	25.0
2050s	27.1	28.9	28.0	28.0	28.1	28.1	27.8	28.6	26.4	24.9	24.7	24.7
2060s	27.3	29.1	28.9	28.3	28.3	28.2	29.0	27.9	26.3	25.8	25.8	25.8
2070s	27.9	29.2	28.5	29.1	28.8	28.1	28.5	28.4	26.5	25.1	25.5	25.8
2080s	27.7	27.5	27.8	28.1	28.2	27.5	27.9	27.2	26.8	25.0	24.7	25.4
平均温 度 ℃	10 月				11 月				12 月			
	RCP4.5	S1	S2	S3	RCP4.5	S1	S2	S3	RCP4.5	S1	S2	S3
2000s	20.6	20.0	20.0	20.0	16.3	13.9	13.9	13.9	9.8	7.4	7.4	7.4
2010s	20.9	19.4	19.6	19.6	15.8	12.2	13.3	13.0	9.8	6.1	5.9	6.6
2020s	21.4	18.9	18.6	19.0	16.7	12.0	12.4	13.1	10.2	6.5	4.7	5.4
2030s	21.6	17.8	18.1	17.6	16.9	12.0	12.4	12.0	11.1	5.9	5.6	5.9
2040s	22.2	17.7	17.9	19.1	17.2	12.5	12.3	12.2	11.2	7.5	6.6	6.5
2050s	22.4	19.4	19.0	19.2	17.3	13.1	12.7	13.5	10.6	7.2	7.2	9.2
2060s	22.7	19.5	19.5	19.0	17.0	13.5	14.0	12.9	12.0	7.5	7.3	7.0
2070s	22.9	18.6	19.1	19.6	17.8	13.0	12.9	13.2	11.3	5.9	6.2	7.8
2080s	23.4	17.7	18.1	18.4	17.7	12.6	12.1	12.5	12.0	6.4	5.6	5.1

附录 C 上海典型气象年时段温度和度日数变化

相对于基准时段的 温度变化 ℃	RCP4.5			S1			S2			S3		
	夏季	冬季	年平均	夏季	冬季	年平均	夏季	冬季	年平均	夏季	冬季	年平均
2000-2017	1.0	1.3	1.0	1.0	0.5	0.7	0.9	0.5	0.8	1.1	0.7	0.9
2018-2035	1.2	1.9	1.5	0.0	-0.6	-0.4	0.0	-1.1	-0.5	-0.1	-0.9	-0.5
2036-2053	2.2	2.6	2.3	-0.3	0.3	-0.1	-0.2	-0.4	-0.4	-0.1	-0.4	-0.3
2054-2071	3.0	3.0	2.9	0.9	-0.1	0.3	0.8	0.4	0.5	0.7	1.1	0.8
2072-2089	3.5	3.7	3.4	0.4	-1.2	-0.5	0.2	-1.0	-0.4	0.3	-0.9	-0.2

度日数 ℃	CDD26				HDD18			
	RCP4.5	S1	S2	S3	RCP4.5	S1	S2	S3
1982-1999	178	178	178	178	1711	1711	1711	1711
2000-2017	244	247	231	261	1500	1619	1599	1587
2018-2035	245	178	178	193	1382	1843	1870	1885
2036-2053	331	168	157	190	1268	1699	1800	1802
2054-2071	412	237	215	249	1186	1721	1633	1564
2072-2089	457	199	195	223	1099	1903	1851	1848

附录 D 上海典型建筑能源需求变化

办公建筑 相对于基准时段能耗 变化率%	RCP4.5			S1			S2			S3		
	供冷	供热	总能耗	供冷	供热	总能耗	供冷	供热	总能耗	供冷	供热	总能耗
2000-2017	11.8	-19.2	0.9	13.2	-6.5	2.4	11.3	-7.6	1.9	17.4	-10.3	3.0
2018-2035	17.4	-28.3	1.3	-1.0	13.9	1.2	-3.8	17.5	0.9	3.5	16.3	2.3
2036-2053	30.1	-37.7	3.4	-2.6	-1.1	-0.6	-5.9	8.9	-0.4	2.0	7.7	1.2
2054-2071	41.3	-44.3	5.3	10.5	2.3	2.6	6.4	-5.3	1.0	15.2	-11.3	2.4
2072-2089	46.1	-50.7	5.7	3.0	19.2	2.6	-1.8	16.2	1.2	7.4	13.3	3.0
酒店建筑 相对于基准时段能耗 变化率%	RCP4.5			S1			S2			S3		
	供冷	供热	总能耗	供冷	供热	总能耗	供冷	供热	总能耗	供冷	供热	总能耗
2000-2017	18.2	-6.8	1.9	20.9	-2.8	3.1	17.2	-3.7	2.6	25.8	-3.5	3.9
2018-2035	23.5	-10.5	2.6	-0.8	4.3	0.4	-2.9	4.5	0.1	3.8	6.3	1.5
2036-2053	47.2	-14.1	5.9	-3.8	-0.5	-0.9	-6.5	2.3	-0.8	3.1	3.5	0.9
2054-2071	69.1	-16.7	9.2	17.3	0.5	3.0	10.8	-2.8	1.5	20.6	-4.2	2.7
2072-2089	79.7	-19.5	10.4	5.6	6.2	1.7	1.4	4.0	0.8	11.9	5.1	2.8

商场建筑 相对于基准时段能耗 变化率%	RCP4.5		S1		S2		S3	
	供冷	总能耗	供冷	总能耗	供冷	总能耗	供冷	总能耗
2000-2017	5.8	1.5	5.3	1.4	5.1	1.3	7.2	1.9
2018-2035	9.2	2.3	-1.8	-0.3	-3.3	-0.8	-0.8	0.0
2036-2053	14.5	3.7	-1.1	-0.3	-2.8	-0.7	-0.4	0.1
2054-2071	19.3	4.9	3.3	0.9	2.9	0.7	6.2	1.7
2072-2089	22.3	5.7	-1.1	-0.1	-2.6	-0.5	1.1	0.5

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

朱明亚, 女, 1990年7月生。

2010年7月毕业于重庆大学建筑环境与设备工程专业 获学士学位

2010年9月入同济大学读硕士学位

已发表论文:

[1] Yiqun Pan, Mingya Zhu, Kwan Seok Jeong, Li Hua, Yujian We. Energy Efficiency Technologies Applicable for Buildings in China – Status, Challenges and Opportunities. International Conference on Applied Energy (ICAE 2012) . Suzhou. Jul 5-8, 2012

[2] Jie Shi, Wei Su, Mingya Zhu, Huaning Chen, Yiqun Pan, Shui Wan, Yawei Wang. Solar water heating system integrated design in high-rise apartment in china. Energy and Buildings, March 2013, Volume 58: 19-26

[3] 朱明亚, 潘毅群, 沙华晶, 许鹏, 黄治钟. 气候变化条件下中国典型城市未来天气参数与建筑能源需求预测. 建筑节能. 2013. Vol.41: 57-64