

上海地区建筑能耗模拟用天气参数预测研究

PREDICTION OF FUTURE WEATHER DATA USED IN BUILDING ENERGY SIMULATION IN SHANGHAI

朱明亚¹ 潘毅群¹ 黄治钟² 沙华晶¹

1 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804, E-mail: z_mingya@126.com

2 同济大学中德工程学院, 上海 201804

摘要: 本文将中国东部近百年和近千年气候变化的周期性与常规时间序列方法相结合, 针对上海近 50 年 (1961~2010 年) 月平均温度观测结果进行时间序列分析。考虑气候变化的不确定性设定 3 种月际振动情景, 建立时间序列预测模型, 用于上海地区未来 100 年月平均温度预测。为了使气候变化预测结果能够用于建筑能耗模拟工具, 采用统计降尺度方法 **Morphing** 将预测的温度变化与当地现有典型气象年 (TMY) 相结合, 设定 3 种日间波动变化情景分别与月际振动情景叠加, 生成不同情景下上海地区未来 5 个时段的 TMY。将未来 TMY 用于当地典型建筑模型, 预测 21 世纪气候变化对上海地区建筑能源需求的影响。

关键词: 气候变化周期性; 时间序列分析; 温度预测; 典型气象年 (TMY); 能源需求预测

0 引言

当今社会已步入“能源气候危机时代”, 气候与能源成为了 21 世纪首当其冲的两大全球性问题。气候变化与能源、社会经济的紧密联系导致国际气候谈判中充斥着国际政治较量和经济竞争, 逐渐演变成各国对温室气体排放空间和发展权益的争夺^[1]。发达国家“先发展后保护”发展道路给自身争取到了经济和技术优势, 发展中国家则压力巨大。作为以煤炭生产和消费为主导的能源需求和供应大国^[2], 我国必须积极配合国际气候应对, 同时最大限度的争取发展权和排放空间。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是我国成功谈判的重要基础。我国建筑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^[3]。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, 建筑能耗在社会总能耗中的比例会日趋提高^[4]。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。因此, 建筑能源需求预测成为了应对和减缓气候变化的重要研究内容。

国内外相关研究多以度日数为切入点, 利用多年气温观测数据, 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^{[5]~[7]}。然而, 单纯从度日数分析建筑能耗不够全面和准确, 尤其在夏季对空调能耗的解释能力

非常有限^[8]。随着建筑功能分布的复杂性日趋提高, 能耗模拟已成为设计中不可或缺的环节。这使得能耗模拟软件在建筑行业的应用逐渐成熟, 成为了建筑能源需求预测的有效工具。目前应用于模拟软件中的典型气象年 (TMY) 天气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, 这也是探讨未来气候变化对能源需求影响的关键。

鉴于已有气候变化分析方法在能耗模拟用未来天气参数预测中的应用局限性, 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。以上海 1961~2010 年逐年观测月平均温度为基准, 根据中国东部近百年和近千年气候变化的周期性分析, 同时考虑气候变化不确定性的不同月际振动情景, 建立时间序列预测模型, 预测上海地区未来 100 年月平均温度。为了将预测结果用于模拟工具, 采用 **Morphing** 方法对未来月平均温度进行降尺度处理, 生成未来时段的 TMY。并将未来 TMY 用于上海地区 3 种典型建筑模型, 从而预测未来 100 年气候变化影响下的上海地区建筑能源需求变化。

1 建筑能耗模拟用天气参数预测方法

1.1 已有气候变化预测方法

现阶段气候变化预估在很大程度上是依赖于气候模式 (GCM)。1990 年以来, IPCC 基于对未来社会经济可能的发展途径做出假设, 定量估计未来温室气体的排放情景, 从而驱动气候模式进行气候变化预估。不论是气候变化的检测、归因与预估,

GCM 都从中承担重要角色。但 GCM 对区域或者局地气候变化的解释能力较差,在年际、年代际尺度上模拟与实测结果的对应关系也较弱。鉴于人们对气候变化影响因子作用机制的低认知水平,基于排放情景的模拟预估还存在着很大的不确定性,将其用于中国城市气候变化预测存在很大的局限性。

1.2 结合气候变化周期性的月际天气参数预测方法

本文试图从区域历史长期气候变化和实际气象观测出发,找到新的月平均天气参数预测方法,作为建筑模拟用未来天气参数的生成基础。

1.2.1 常规时间序列分析方法

时间序列分析是目前气象学中应用较广泛的预测方法。采用统计方法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,定量估计该指标的未来发展趋势。时间序列方法可以在预测中维持原有观测气象参数的时间精度,但仅在用于短期预测时的可信度较高,若延伸到长期预测,就会产生很大的偏离。而短期预测对于城市能源规划、能源政策制定的支撑力度明显不足。

1.2.2 中国东部历史长期气候变化的气象学分析

20 世纪的变暖处于小冰期结束后的回暖。历史上气候冷暖阶段转化往往呈现快速变化的特点,20 世纪的增温并不唯一。过去 2000 年里,中国东部升降幅度与 20 世纪暖期基本相同的冷暖转换过程有 4 次^[9]。气象学领域^[9-14]针对 20 世纪变暖特征值,在重建中国东部近 2000 年温度序列的基础上展开了现代变暖时间相似型研究。从目前的研究成果来看,中国东部历史长期气候变化具有一定的周期性。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,波动幅度为 1.0°C 左右。在百年尺度上,观测和模拟研究^[15-20]表明近百年来中国东部气候受自然变率的影响显著。自然变率包括外部影响和内部振荡。目前,人类了解程度较高的外部影响因子即太阳活动和火山活动。最明显的太阳活动周期是 80~100a 周期。在内部振荡中,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。AMO 具有 65~80a 周期^[21]。我国 1911 年以来 5 年平均的全年温度等级变化中也体现了 40a 周期^[22]。从目前的研究成果来看,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,可能出现的年代尺度周期为 40~80a,振幅在 1.5~2°C 之间。

1.2.3 结合气候变化周期性分析的时间序列方法

气象观测数据是典型的时间序列。基于气象观

测数据建立的预测模型,多采用加法型时间序列模型: $Y_t = H_t + P_t + X_t$, 其中趋势项 H_t 和周期项 P_t 是从观测结果中捕捉到的确定性气候变化规律,随机项 X_t 则反映观测时段气候变化的不确定性。作为趋势分量, H_t 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。这一点恰好与中国东部历史长期气候变化的周期性特点相吻合。基于二者之间的共性,本文以上海近 50 年观测月平均温度为基准,结合中国东部历史长期气温变化的周期性分析,采用时间序列方法进行上海地区未来 100 年月平均温度预测。

采用时间序列方法对温度序列进行分解,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。选取一个百年尺度周期(200a~600a,以下称大周期)余弦函数作为温度 TC 序列的趋势项 H_t ,把一个年代尺度周期(40~80a,以下称小周期)余弦函数作为温度 TC 序列的周期项 P_t 。根据历史气候中呈现出的大小周期长度、距今最近的大小周期中重要冷事件的发生时段作为 H_t 和 P_t 分量中周期长度和谷值年份的可能范围,建立加法型时间序列模型 $Y_t = H_t + P_t$ 。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 分别与温度 TC 时间序列进行拟合,从中辨识最优大周期 T_1 和小周期 T_2 。从而确定近 50 年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 。以从观测温度序列中剔除的平稳序列分量 X_t 为基准,考虑不确定性可能的变化提出了 3 种发展情景,确定不同情景下的随机分量 X_t ,与前述 Y_t 相叠加,建立时间序列模型,预测 21 世纪城市月平均温度变化。

结合了气候变化周期性分析的时间序列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。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。

1.3 月际天气参数的降尺度方法

建筑能耗模拟工具需要逐时天气参数才能进行全年能耗模拟,停留在月际以上时间精度的预测结果无法直接应用。本文采用统计学降尺度方法 - Morphing^[23],将未来 100 年月平均温度预测结果与

上海现有 TMY 相结合, 生成气候变化条件下的建筑能耗模拟用 TMY, 作为典型建筑模型的输入天气参数进行上海地区建筑能源需求预测。

对于干球温度 (dbt), Morphing 方法主要通过以下算法实现:

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

(1) 其中, dbt_0 是已有典型气象年的逐时干球温度; $(dbt_0)_m$ 是已有典型气象年中 m 月月平均干球温度; $\Delta TEMP$ 是 m 月月平均干球温度变化预测值; $adbt_m$ 是 m 月的降尺度伸缩系数, 其计算方法是:

$$adbt_m = \frac{\Delta TMAX_m - \Delta TMIN_m}{(dbt_{0max})_m - (dbt_{0min})_m} \quad (2)$$

其中 $\Delta TMAX_m$ 是 m 月每日最大干球温度的月平均值的预测变化; $\Delta TMIN_m$ 是 m 月每日最小干球温度的月平均值的预测变化; $(dbt_{0max})_m$ 是已有典型气象年中 m 月每日最大干球温度的月平均值; $(dbt_{0min})_m$ 是已有典型气象年中 m 月每日最小干球温度的月平均值。

2 上海建筑模拟用未来天气参数预测

2.1 未来月平均温度预测

2.1.1 上海近 50a 观测月平均温度

上海 1961~2010 年逐年观测月平均温度序列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。但该数据源对于上海的历史记录最早是 1992 年。对于 1961~1992 年的月平均温度, 笔者从丁裕国教授的著作^[24]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, 二者在重叠年份的月平均温度相差 0.1~0.5°C, 年平均相差 0.3°C, 因此在建立的观测月平均温度序列中, 对于 1992 和 1993 年采用二者的平均值代替。

在进行时间序列分析之前, 笔者选取最新的 GCM 模拟结果与上海观测温度进行对比分析。根据 HadGEM2-CC 模式在 RCP4.5 情景 (RCPs 系列情景中的中间稳定路径) 下的试验输出结果中最接近上海经纬度的节点模拟数据与观测温度对比可以看出, GCM 模拟结果与观测温度有较大的不一致。观测温度呈上升趋势, 而模拟结果呈先下降后上升。在 1980s、1990s 和 2000s, 模拟结果均显著低于实际温度, 差值达到了 1°C, 如图 1。可见, 对于区域尺度的气候变化, GCM 模拟结果具有较大的不确定性, 模拟能力略显不足。

2.1.2 月平均温度时间序列预测模型

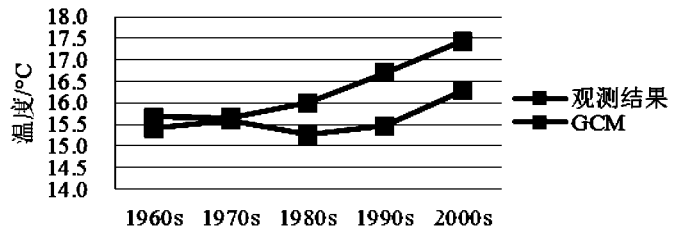


图 1. 上海近 50 年年际温度变化

选取 200a、300a、400a、500a 和 600a 作为趋势项可能的大周期; 选取 40a、50a、60a、70a 和 80a 作为周期项可能的小周期。根据小冰期研究^[9,12-14,25,26], 将大周期的谷值时间节点确定在 1840~1890 年之间。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, 建立大、小周期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。拟合效果最好的大周期为 300a, 小周期为 60a。各月最优拟合函数特征值详见表 1。

表 1. 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/°C	大周期振幅/°C	拟合 R^2
Jan	1972	1865	1.84	1.00	0.78
Feb	1973	1844	2.11	1.03	0.76
Mar	1973	1853	2.06	0.99	0.74
Apr	1973	1851	1.95	0.97	0.74
May	1973	1853	1.74	0.92	0.73
Jun	1976	1837	1.71	0.95	0.70
Jul	1978	1895	1.33	1.02	0.76
Aug	1979	1875	1.42	1.00	0.75
Sep	1979	1900	1.51	1.02	0.81
Oct	1976	1860	1.70	1.02	0.81
Nov	1975	1900	1.61	1.02	0.84
Dec	1971	1870	1.77	0.96	0.77

设定 3 种不同的月际随机振动情景分别是振动稳定情景 S1 (振动程度维持现状)、振动减弱情景 S2 (振动程度减弱, 缩小系数取 0.8) 和振动增强情景 S3 (振动程度增强, 增大系数取 1.2)。以此建立不同情景下的随机量 X_t , 与拟合最优趋势分量 H_t 和周期分量 P_t 相加, 建立不同情景下的时间

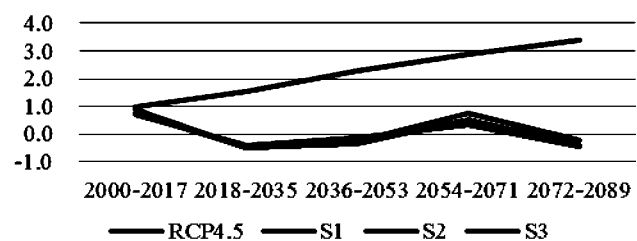


图 2. 相对于基准时段上海年平均温度变化/°C

根据式(1)，未来干球温度 dbt 的生成可以看作是在基准逐时 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 $\Delta TEMP$ ，再将基准逐时 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的时间跨度须与基准TMY保持一致。本文所选基准TMY的时间跨度为1982~1999年，则未来TMY的时间跨度是2000-2017、2018-2035、2036-2053、2054-2071和2072-2089年，即生成上海5个未来时段的TMY。

2.2.2 未来TMY生成情景设定

在Morphing方法的应用中有一个重要参数：降尺度伸缩系数 $adbt_m$ ，见式(2)。式中包括的两个预测变化值， $\Delta TMAX_m$ 和 $\Delta TMIN_m$ 。 $TMAX_m$ 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， $(TMAX_m - TMIN_m)$ 即m月日较差的月平均值。以基准时段日间波动水平为基准，设定了3种不同的日间波动情景，分别是日间波动稳定情景S1（波动程度维持现状）、日间波动减弱情景S2（波动程度减弱，缩小系数取0.8）和日间波动增强情景S3（波动程度增强，增大系数取1.2）。将日间波动和月际随机振动情景这两类情景相叠加，即3种日间波动情景下的 $(TMAX_m - TMEAN_m)$ 和 $(TMEAN_m - TMIN_m)$ 分别与相应月际随机振动情景下的月平均温度 $TMEAN_m$ 预测结果相结合，按照Morphing方法，在已有TMY的基础上计算未来TMY文件中的温度参数，生成不同情景下的未来TMY天气参数文件。

2.2.3 未来TMY时段温度变化趋势

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，如图2~图4。整体来看，S1、S2和S3情景下，夏季温度的波动范围在1°C左右，年平均温度波动范围在1.5°C左右，而冬季温度波动则达到了2°C。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。

3 上海未来100年建筑能源需求预测

基于气候变化周期性的时间序列模型预测的

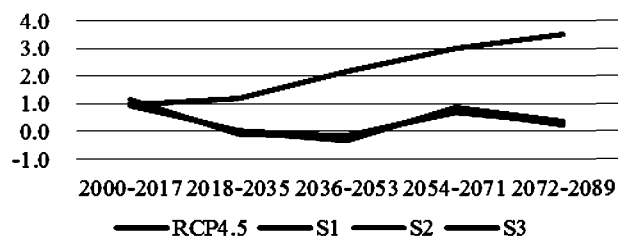


图3. 相对于基准时段上海夏季(6-9月)平均温度变化/°C

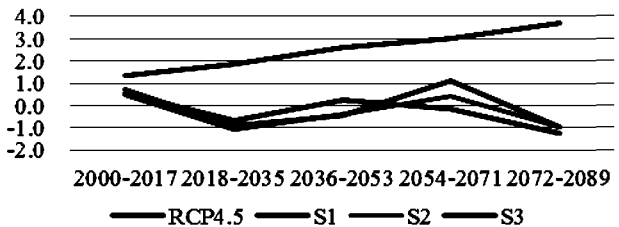


图4. 相对于基准时段上海冬季(12-3月)平均温度变化/°C

列出了模型建筑的基本情况。

表2 建筑基本情况

建筑类型	建筑外形	建筑层数	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	方形	12	19200	0.40	0.888	0.638	2.67
酒店	L型	12	23316	0.42	0.791	0.552	2.95
商场	方形	-1+7	33800	0.11	1.304	0.653	3.66
							7

3.2 采用未来TMY的能耗模拟结果

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建筑冷热供应需求上。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，在3种情景下各建筑类型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。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。

比较同是作为情景设定中稳定情景的RCP4.5和本文S1情景来看，RCP4.5情景下，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%。如图5所示为办公建筑能耗变化。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°C，冬季温度上升 0.5°C，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°C，冬季温度上升 0.3°C，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°C，冬季温度下降 1.2°C，供

冷需求和供热需求同时增加。

图 6 为 3 种不同情景下办公建筑能耗变化。S1、S2 和 S3 三种波动情景办公、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。

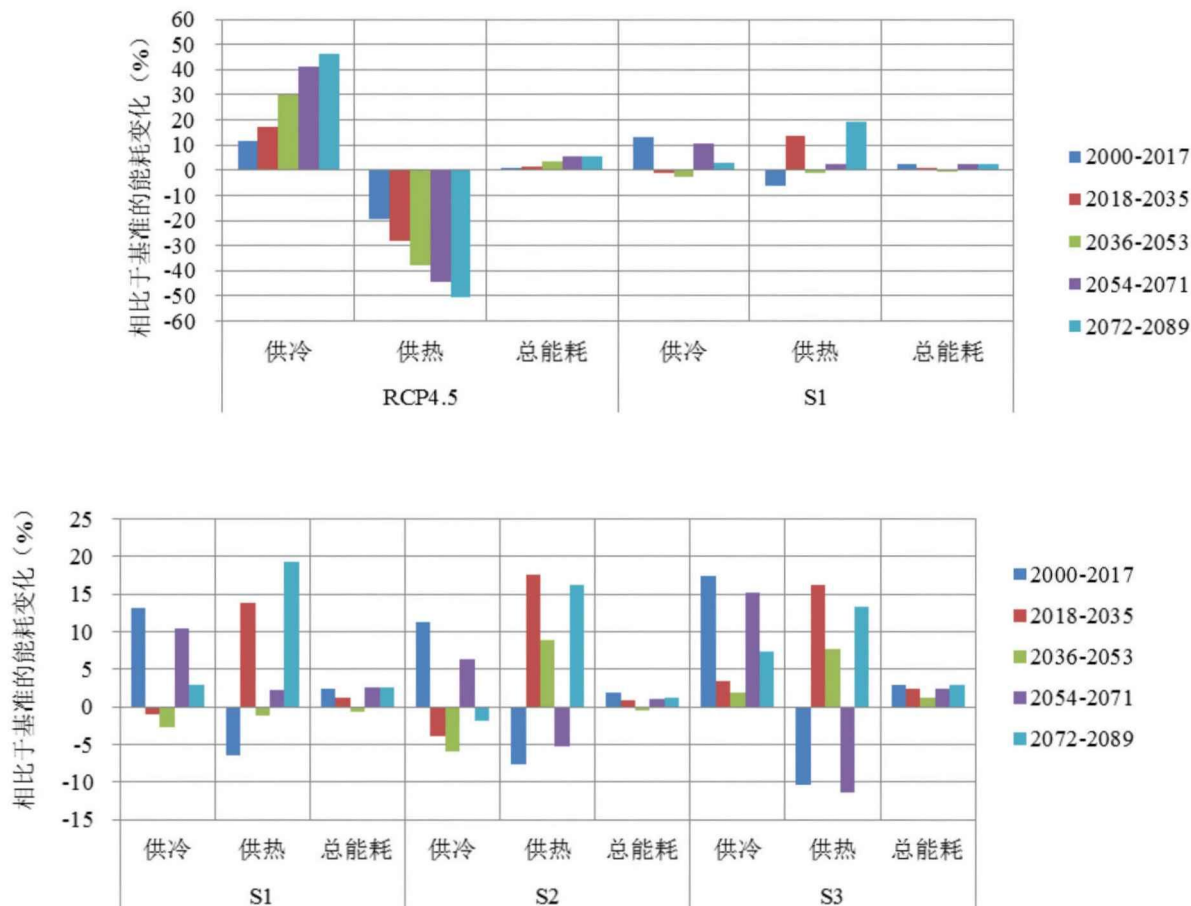


图 6. 不同波动情景下上海办公建筑能耗变化

4 总结

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，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的表现形式和影响程度。分析发现，当前气候中体现最明显是 300a 大周期和 60a 小周期。考虑气候变化不确定性的发展，提出了 3 种月际随机振动情景。从而建立时间序列模型，对上海未来 100 年的月平均温度进行预测。考虑当前日较差情况的发展变化，提出了 3 种日间波动情景，分别与月际随机振动情景相结合形成新的情景。通过 Morphing 方法，将预测未来月平均温度与上海现有 TMY 相结合，生成了不同情景下上海地区未来 5

个时段的 TMY。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，预测上海 21 世纪气候变化影响下的建筑能源需求变化。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。

参考文献

- 1 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
- 2 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
 - 3 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
 - 4 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
 - 5 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
 - 10 Crowley T J, Lowery T S. How warm was the medieval warm period? AMBIO, 2000, 29 (1): 51~54
 - 11 Zhang De'er. A study on the Medieval Warm Period in China. Quaternary Research, 1993, (1): 7~13
 - 12 葛全胜, 方修琦, 郑景云. 千年尺度上冷暖变化的自相 17 (1): 96~103
 - 14 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
 - 15 Li L, Wang B, Zhou T. Contribution s 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
 - 16 李立娟. 格点大气环流模式(GAMIL)对流、云辐射方案
 - 19 Gong D Y, H o 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
 - 20 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
 - 21 李双林, 王彦明, 郇永祺. 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
 - 22 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
 - 6 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
 - 7 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
 - 8 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
 - 9 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 似特征研究. 自然科学进展, 2002, Vol. 12 (12): 1280~1284
 - 13 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): 108~112 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
 - 17 Yu R, Zhou T. Impact s of winter-NAO on March cooling trends over subtropical Eurasia continent in the recent half century. Geophys. Res. L et t. , 2004, 31, L12204, doi: 10.1029/ 2004GL019814
 - 18 Li J, Yu R C, Zhou T J, et al. Why is there an early spring cooling shift down stream of the Tibetan Plateau. J. Climate, 2005, 18 (22): 4660~4668 增刊: 85~91
 - 23 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.
 - 24 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.
 - 25 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
 - 26 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