

夏热冬暖地区居住建筑应对气候变化节能适应性*

宋鑫焱^{1,2,3,4}, 叶灿滔^{1,2,3†}, 马伟斌^{1,2,3}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为研究夏热冬暖地区居住建筑应对气候变化的适应性, 运用 TRNSYS 动态能耗模拟软件对该地区典型居住建筑能耗进行仿真, 制定了居住建筑节能星级评估体系。以广州市为例, 分析预测了广州 2020 年、2050 年及 2080 年的气候变化, 并提出应对气候变化的节能措施。研究表明: 气温上升 1℃, 4.0、5.5 及 6.5 星级建筑能耗将分别增长 25%、20% 及 20%; 到 2080 年, 气温上升近 3.5℃, 4.0 星级建筑 CO₂ 年排放量达 53 t/m², 将 4.0 星建筑升级到 5.5 和 6.5 星级, 每年可相应减排 19.5 t/m² 和 23.2 t/m²; 若以 4.0 星级建筑当前的 CO₂ 排放量为控制目标, 则需把建筑围护结构热工性能提升到 6.5 星级水平, 可以实现未来 70 年减排 45%。

关键词: 夏热冬暖; 居住建筑; 气候预测; 星级评估; 气候变化适应性

中图分类号: TK-9; TU831.6

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2016.05.012

Climate Change Adaptation Pathways for Residential Buildings in Hot Summer and Warm Winter Zone in China

SONG Xin-yan^{1,2,3,4}, YE Can-tao^{1,2,3}, MA Wei-bin^{1,2,3}

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to investigate the climate change adaptation pathways for residential buildings in hot summer warm winter zone in China, the building energy consumption rating schemes in this area were built based on the dynamic thermal performance of residential buildings by using TRNSYS software. The future climate change of Guangzhou in 2020s, 2050s and 2080s was analyzed, and then adaptation pathways were put forward. The results showed that an increase of 1°C in global warming will induce the energy consumptions of 4.0-, 5.5-, and 6.5-star buildings by 25%, 20%, and 20%, respectively. And if an increase of 3.5°C comes true in 2080s, annual CO₂ emission of the 4.0-star building will reach 53 t/m². However, if we retrofit and update the building to 5.5- or 6.5-star, 19.5 or 23.2 t/m² reduction of CO₂ emission can be obtained accordingly. Moreover, 45% reduction of CO₂ emission in the future 70 years is available if the envelopes of current buildings can be retrofitted to 6.5-star.

Key words: hot summer and warm winter zone; residential building; climate prediction; house energy rating; climate change adaptation

0 前言

能源与气候是当今世界最为关注的热点问题之一, 建筑能耗因气候而生, 气候变化对建筑能源的消耗产生决定性影响, 自 1980 年以来, 全球变暖显著, 建筑能耗必将随之发生变化^[1]。2015 年, 全球碳

排放量总量为 335.1 亿 t, 中国碳排放量为 91.5 亿 t, 占世界碳排放量的 27.3%, 成为碳排放量最多的国家^[2-3]。卞家涛等^[4]提出, 通过大幅度降低建筑能耗、开发利用 CO₂ 捕集和封存技术, 是减排温室气体的最佳途径之一。我国建筑能源消耗约为全国总能源消耗的三分之一, 在建筑能耗中, 空调能耗 (制冷

* 收稿日期: 2016-06-27

修订日期: 2016-07-26

基金项目: 广东省重大科技专项 (2013A011404007); 广东省科技计划项目 (2013B091500026)

† 通信作者: 叶灿滔, E-mail: yect@ms.giec.ac.cn

或供热)与气候变化直接相关,所占能耗比例较大,具有重要研究意义^[5-6]。研究气候变化应建立在一定的情景条件下,目前被广泛使用的是 IPCC 在《排放情景特别报告中》公布的 SRES 情景,包括 A1、A2、B1 及 B2 四个场景。刘涛^[7]基于 SRES 情景预测法中的 B1 情景,利用 NetCDF 软件计算出西安市 2050 年的气象数据,并利用 Energy Plus 分析了气候变化对建筑能耗的影响。REN 等^[8]用 Morphing 降尺度方法预测出包括悉尼在内的 6 座城市未来气候变化对建筑能耗的影响,并提出了节能应对措施。

本文利用 TRNSYS 动态能耗模拟软件计算建筑能耗,对夏热冬暖地区典型居住建筑制定了星级评估体系。首先,有别于传统研究中对于建筑结构热工参数采取逐项达标再强化的方式,从总能耗水平对各星级的建筑进行定量优化分析,具有更好的经济效益,为建筑节能研究探索了新的思路;其次,在应对未来气候变化中,对各星级建筑进行节能减排量化,具有更好的实用性。

1 建筑模型建立

本文研究的居住建筑模型取自《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》^[9],典型居住建筑围护结构各项基本参数如下:建筑体形:一梯两户平面布局,高 6 层,每户 80 m²,矩形建筑;建筑外墙:相当于 180 mm 砖墙,传热系数 2.17 W/(m²·K),太阳辐射吸收系数 0.7;楼板:100 mm 钢筋混凝土楼板,加 10 mm 聚苯乙烯泡沫塑料外保温隔热,太阳辐射吸收系数 0.7;窗墙比:南 43%,北 30%,东、西均 15%;外窗:铝合金窗,传热系数 5.61 W/(m²·K),遮阳系数 0.9;室内环境:温度为冬天 16℃以上,夏天 26℃以下,换气次数 1.5 次/h。建筑立面及平面如图 1 所示。

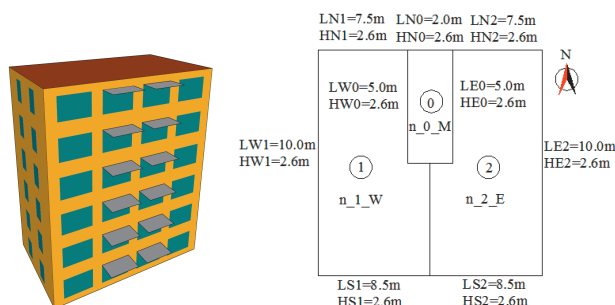


图 1 夏热冬暖地区典型居住建筑模型

Fig. 1 3D model and plain figure of the studied building

TRNSYS 所用的逐时气象数据库为自带的典型年气象数据库^[10]。根据典型居住建筑的各项物理参数,在 TRNSYS 动态能耗仿真平台中建立如图 1a 所示的建筑模型,计算模型能耗,并依据规范值来校核模型。根据《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》中的能耗结果,空调能耗 264.0 MJ/(m²·a),采暖能耗 55.9 MJ/(m²·a),总能耗 319.9 MJ/(m²·a)。本平台计算结果为:空调能耗 300.2 MJ/(m²·a),采暖能耗 38.6 MJ/(m²·a),总能耗 338.8 MJ/(m²·a)。二者总能耗百分比误差约 5.9%,在合理的误差范围内^[11]。

2 居住建筑模型

2.1 居住建筑节能星级评估体系

为定量分析居住建筑的节能潜力,降低建筑能耗水平,本文开展夏热冬暖地区居住建筑节能星级评估体系研究。以广东省为例,根据调研和走访,结合广东省各气象台站数据的空间完整性和时间连续性,以及典型气象年(TMY)的干球温度、相对湿度、风速、风向、太阳辐射五要素最大值、最小值、平均值的相关性,最后筛选的气象数据台站为 12 个,所在的行政区分别为韶关、清远、肇庆、广州、河源、梅州、汕头、深圳、江门、阳江、茂名以及湛江,每一个气象站覆盖的气象范围代表一个独立的气候区,其气候区划分如图 2 所示。

根据 12 个气候区内典型居住建筑的能耗特征值,将居住建筑节能等级分为 20 档,从 0.5 到 10.0 星级(Lv0.5~Lv10.0),星级间隔为 0.5,低级别代表能耗高、舒适度较差的建筑,高级别代表能耗低、舒适度较好的建筑。具体步骤为:

(1) 参考澳大利亚 NatHERS 评级制度^[12],取 Lv4.0 为星级达标底线,对应《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 75-2012)中的居住建筑模型;

(2) 根据表 1 中的参数,逐一调整仿真平台中 Lv0.5、Lv5.5、Lv6.0 以及 Lv10.0 等级建筑物围护结构模型的参数(Lv0.5 建筑代表超高能耗建筑,Lv10.0 建筑代表近零能耗建筑,Lv5.5 建筑表示相对 Lv4.0 建筑节能 30%,Lv6.0 建筑为在 Lv5.5 基础上,仅将普通铝合金窗框白玻璃更换为木质窗框中空玻璃得到的建筑模型)。

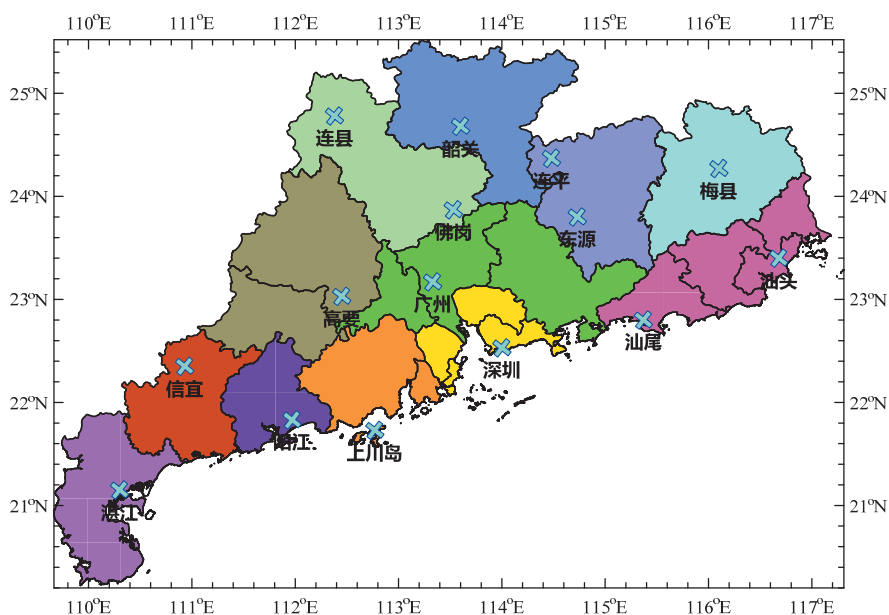


图 2 广东省 12 个气候区

Fig. 2 The 12 climate regions in Guangdong province

表 1 TRNSYS 模型参数设置

Table 1 Parameters of TRNSYS simulation model

热工参数	评价星级			
	Lv0.5	Lv5.5	Lv6.0	Lv10.0
墙 U-value / (W/m ²)	3.33	3.33	3.33	0.16
屋面 U-value / (W/m ²)	3.03	0.43	0.43	0.23
外窗 U-value / (W/m ²)	5.61	5.61	2.83	1.05
遮阳系数	0.9	0.86	0.76	0.22
窗墙比	0.9	0.2	0.2	0.1
渗透率 / (vol/h)	1.5	0.5	0.5	0.08
换气次数 / (次/h)	2.5	0.5	0.5	0.1

注：vol 为测试房间体积。

(3) 计算各气候区 4 个级别模型的年能耗值，参考澳大利亚 NatHERS 星级图谱，构建 Weibull 模型，确定其余 16 档节能星级的能耗水平。

Weibull 模型是概率统计学中的一个著名的分布^[13]，该预测模型具有较好的实用性，在生态环保变化预测、人口数量变动、城市化水平等领域有广泛的应用。其图线在前期发展阶段呈加速度增长趋势，发展到一定程度后出现一个拐点，最终趋于一个有限值。Weibull 分布的数学表达式如下。

$$y = \alpha - \beta \exp(-\gamma \times t^\delta) \quad (1)$$

式中： y 为各星级建筑的年能耗，MJ/(m²·a)； t 为星级级别； α 与曲线的渐进性有关； β 与截距有关； γ

与相应变量从初值到终值的变化速度有关； δ 与数据拟合模型的灵活性有关。 α 、 β 、 γ 和 δ 的值由 Lv0.5、Lv5.5、Lv6.0 以及 Lv10.0 的年能耗值算出。将 α 、 β 、 γ 和 δ 的值带入 Weibull 模型表达式中，得到其余 16 个星级建筑的能耗水平，然后得到 12 个气候区 Lv0.5 ~ Lv10.0 节能星级对应的年能耗水平，如图 3 所示。

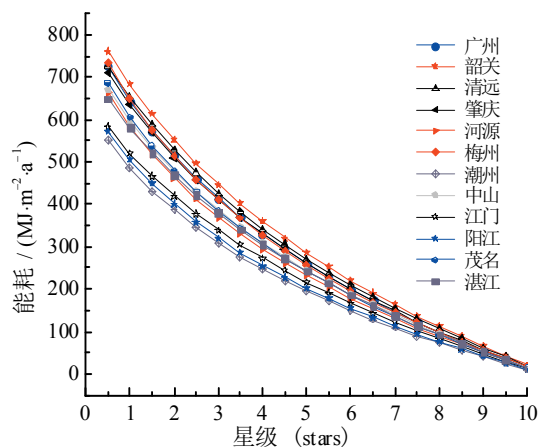


图 3 广东省居住建筑节能评估星级能耗水平图谱

Fig. 3 Guangdong provincial house energy consumption rating scheme

2.2 未来典型气象数据预测

建筑能耗需求随着全球气温逐渐上升而日趋加剧，进行气候变化情景预估的主要工具是全球气候系统模式^[14]。目前，国际上对未来情景进行模拟研究时，应用较为广泛的为时间序列调整——Morphing

方法^[15-16]。该方法通过伸缩和位移,将气候变化与已有气象参数时间序列相结合,生成新的气象参数文件。文中对于未来气候的预测,主要包括干球温度、相对湿度和太阳辐射,数学表达式为式(2)~式(4)^[8]。

$$\begin{cases} T = T_0 + \Delta T_m + \alpha_{T_m} (T_0 - \langle T_0 \rangle_m) \\ \alpha_{T_m} = \frac{\Delta T_{MAX,m} - \Delta T_{MIN,m}}{\langle T_{0max} \rangle_m - \langle T_{0min} \rangle_m} \end{cases} \quad (2)$$

$$H_R = H_{R0} (1 + \alpha_{H_m}) \quad (3)$$

$$I = I_0 (1 + \alpha_{R_m}) \quad (4)$$

式中: T 、 T_0 分别为未来和现在的逐时干球温度, $^{\circ}\text{C}$; $\langle T_0 \rangle_m$ 、 $\langle T_{0max} \rangle_m$ 和 $\langle T_{0min} \rangle_m$ 分别是月平均干球温度、每日最大干球温度和最小干球温度, $^{\circ}\text{C}$; ΔT_m 、 $\Delta T_{MAX,m}$ 和 $\Delta T_{MIN,m}$ 分别是月平均干球温度变化、每日最大干球温度变化和每日最小干球温度变化, $^{\circ}\text{C}$; H_R 和 H_{R0} 分别是未来和现在的逐时相对湿度; I 和 I_0 分别是未来和现在的逐时太阳辐射, W/m^2 ; α_{T_m} 、 α_{H_m} 和 α_{R_m} 分别是干球温度、相对湿度、太阳辐射的降尺度伸缩系数。由南安普顿大学开发的 CCWorldWeatherGen 是基于 Morphing 方法来预测未来气候的软件^[17],通过输入气候区的历史气象数据,计算各区域的未来气象数据。以广州市为例,其 2010 年、2020 年、2050 年和 2080 年的干球温度如图 4 所示。

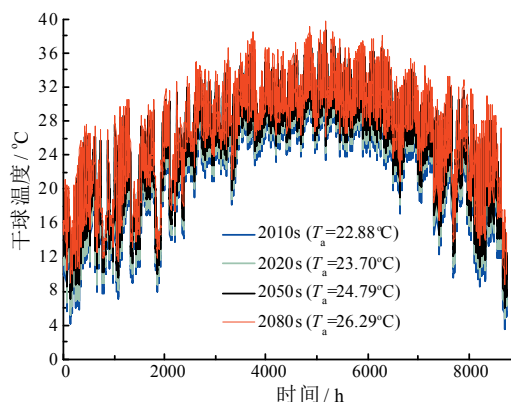


图 4 广州市干球温度预测

Fig. 4 Predicted ambient dry-bulb temperature in Guangzhou

由计算结果可知,广州地区 2020、2050 及 2080 年平均干球温度 (T_a) 分别较 2010 年上升了 0.82°C 、 1.91°C 和 3.41°C 。居住建筑能耗中,照明、热水家电等对于气候变暖敏感性比空调能耗小,研究气候变化对于居住建筑降低空调、采暖的能耗具有重要作用。

3 未来预测气候下的节能途径

3.1 未来气候对于建筑能耗的影响

在 TRNSYS 中导入 CCWorldWeatherGen 预测的未来气象数据,设定建筑中空调系统 COP 值为 2.5,计算出各星级建筑在未来气候条件下的建筑总能耗和 CO_2 排放量,包括空间加热和冷却、照明和其他用电设施的能耗。广州地区在未来气候条件下的能耗情况如图 5 所示。

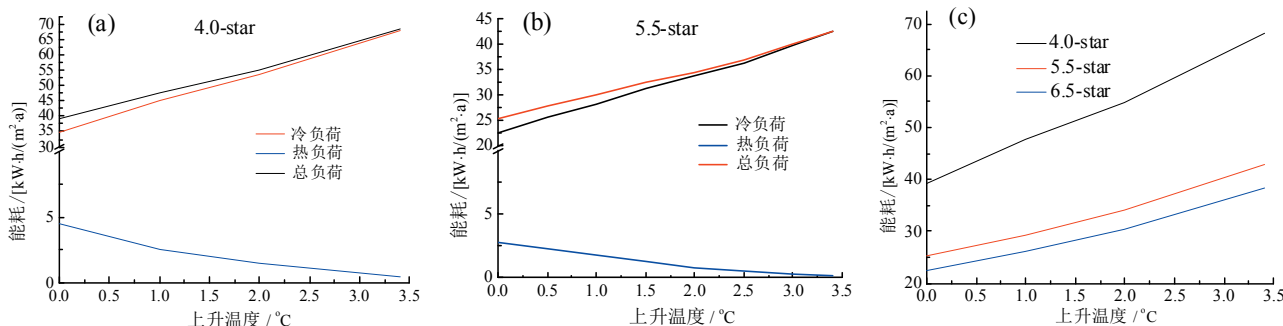


图 5 广州地区气候变化 (a) 对 4.0 星级建筑能耗的影响, (b) 对 5.5 星级建筑能耗影响, (c) 对 4.0、5.5、6.5 星级建筑总能耗的影响

Fig. 5 Effects of climate change on (a) energy consumption of 4.0-star building, (b) energy consumption of 5.5-star building, (c) general energy consumption of 4.0-, 5.5-, and 6.5-star buildings in Guangzhou

基于以上模型计算结果,分析可知,由于冷却能耗显著增加,增加的总能耗中存在加热和冷却的互补抵消区。大气温度上升 1°C , 4.0 星级建筑能耗

增长 25%, 5.5 星级建筑能耗增长 20%, 6.5 星建筑能耗增长 20%。

对于广州地区居住建筑的未来能源消耗, 5.5 星

级建筑可以应对气温上升 3℃的节能需求，即当气温上升 3℃时，5.5 星级建筑的能耗与当前 4.0 星级建筑的能耗相当；当气温上升 1℃时，6.5 星级建筑的能耗将超过 5.5 星级建筑的当前能耗，6.5 星级建筑不满足气温升高 1℃时维持 5.5 星级当前能耗的节能需求。

在气候变化温度上升 3.5℃的条件下，5.5 星级建筑的能耗将高于当前 4.0 星级建筑能耗，6.5 星级建筑能耗水平与当前 4.0 星级建筑能耗水平相当，6.5 星级建筑满足气温升高 3.5℃时维持 4.0 星级当前能耗的节能需求。

3.2 气候变暖条件下的节能途径

一般而言，在不改变居民行为的情况下，减少建筑能耗主要有四种方式：

(1) 提高建筑围护结构的热工性能，降低建筑能源需求；

(2) 采用节能、高效产品；

(3) 使用可再生能源及其产品，如太阳能组件，风力涡轮机，地热能等；

(4) 使用替代燃料、低温室气体排放的电器。

对于建筑围护结构的热工性能，通过提高围护结构节能星级水平，可以实现温室气体减排。电能的碳排放系数取 $0.785 \text{ kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})^{[18]}$ ，则计算结果如表 2 所示。

表 2 提高围护结构节能星级的 CO₂ 减排量

Table 2 The reduction of CO₂ emission by enhancing the star level of envelope

星级	当前气候环境 CO ₂ 排放量/[t/(m ² ·a)]	气温上升 3.5℃CO ₂ 排放量/[t/(m ² ·a)]
4.0	30.6	53
4.0→5.5	10.6	19.5
4.0→6.5	13	23.2

由表 2 可知，广州地区 4.0 星级建筑在当前和气候变化温度上升 3.5℃时的 CO₂ 年排放量分别为 30.6 t/m² 和 53 t/m²；在当前气候条件下，将 4.0 星级建筑升级到 5.5 和 6.5 星级，每年可分别减排 10.6 t/m² 和 13 t/m²；当气温升高 3.5℃时，将 4.0 星级建筑升级到 5.5 和 6.5 星级，每年可分别减排 19.5 t/m²、23.2 t/m²。应对全球气候变暖，加强建筑节能适应能力，可以从以下两个方面着手：

(1) 对于既有建筑的改造，将 4.0 星级建筑升级到 5.5 星级，具体改进措施为：热阻由 55%屋顶面积的 R1.0 提升到 100%屋顶面积的 R2.0，外墙砖贴面升级到 R1.0 保温面砖贴面。

(2) 对于新建建筑，建筑的标准从 5.5 星级提升到 6.5 星级，具体提升措施为：热阻由屋顶 R4.0 降低到 R3.5，外墙提升到 R2.0，外墙砖贴面升级到 R3.0 保温面砖贴面，外窗窗框由铝合金升级到木质窗框，采用双玻璃窗。

实施节能改造措施后，各星级建筑适应气候变化的能耗情况如图 6 所示。

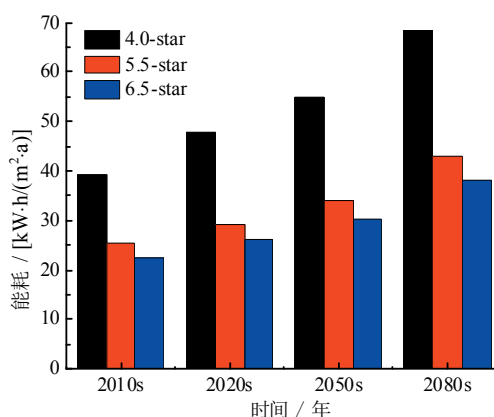


图 6 节能改造前后建筑应对未来气候变化的能耗水平

Fig. 6 Energy consumption of the original and retrofitted buildings on condition of predicted weather data

在 2050 年末，气温将上升 2.0℃，由图 6 可知，为维持建筑物的能源消耗在其使用寿命内不超过原设计水平，只需把目前建筑按照 5.5 星级施工。对于 2080 年末，气温上升近 3.5℃，若以该时期的建筑能耗为控制目标，则需把目前建筑围护结构提升到 6.5 星级水平，通过提高围护结构的热工性能来实现减排的目的。

4 结 论

本文依据夏热冬暖地区居住建筑设计标准设立了典型居住建筑模型，通过对居住建筑模型进行能耗模拟，建立了广东省居住建筑节能评估星级，并预测出广东省未来气象数据的变化，计算出各星级建筑在未来气候条件下的能耗水平，并制定出相应的节能减排措施，结果表明：

(1) 广东省居住建筑节能星级分为 Lv0.5 ~ 10.0 级，Lv0.5 星级表示高能耗建筑，星级越高建筑能耗水平越低。

(2) 广东省气温呈上升趋势, 以广州为例, 该地区 2020、2050 及 2080 年平均全球温度较 2010 年分别提升了 0.82℃、1.91℃和 3.41℃。在大气气温上升 1℃的情况下, 4.0、5.5 及 6.5 星级建筑能耗增长 25%、20%及 20%; 若气温上升 2.0℃, 将当前建筑按照 5.5 星级施工, 可以维持既有建筑物的能源消耗在其使用寿命内不超过原设计水平; 气温上升 3.5℃时, 将 4.0 星级建筑升级到 5.5 和 6.5 星级, 每年可分别减排 CO₂ 19.5 t/m² 和 23.2 t/m²。

(3) 若以当前的 CO₂ 排放量为控制目标, 则需把目前建筑围护结构提升到 6.5 星级水平, 未来 70 年可以实现节能 45%, 为实现国家制定的节能 65% 的目标研究做了一定的探索。

参考文献:

- [1] 刘大龙, 刘加平, 杨柳. 气候变化下我国建筑能耗演化规律研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(3): 439-444.
- [2] 杨占红, 裴莹莹, 罗宏, 等. 国际碳排放特征演进及中国应对建议[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(3): 185-192. DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2015.170.
- [3] BP. BP Statistical Review of World Energy, June 2015[R]. London, 2015: 1-48.
- [4] 卞家涛, 余珊珊. 碳减排问题研究综述与展望[J]. 华南理工大学学报(社会科学版), 2011, 13(5): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1009-055X.2011.05.002.
- [5] 郭洪旭, 黄莹, 赵黛青, 等. 基于情景分析的广东省建筑节能减排潜力研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(12): 305-310.
- [6] 林立身, 江亿, 燕达, 等. 我国建筑业广义建造能耗及 CO₂ 排放分析[J]. 中国能源, 2015, 37(3): 5-10. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2355.2015.03.03.
- [7] 刘涛. 基于气候变化下的办公建筑节能设计[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- [8] REN Z G, CHEN Z D, WANG X M. Climate change adaptation pathways for Australian residential buildings[J]. Building and environment, 2011, 46(11): 2398-2412. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.05.022.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准: JGJ 75-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [10] KLEIN S A, BECKMAN W A, DUFFIE J A. TRNSYS—a transient simulation program[J]. Ashrae Transactions, 1976, 82.
- [11] 叶灿滔, 马伟斌, 刘金平, 等. 基于谐波反应法的净化空调系统节能研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(12): 81-89. DOI: 10.3969/j.issn.1000-565X.2013.12.014.
- [12] DEWSBURY M A. Background to australian house energy rating[M]//The Empirical Validation of House Energy Rating (HER) Software for Lightweight Housing in Cool Temperate Climates. Switzerland: Springer International Publishing, 2015: 7-30. DOI: 10.1007/978-3-319-14337-8_2.
- [13] 陈元千, 胡建国. 预测油气田产量和储量的 Weibull 模型(为纪念克拉玛依油田勘探开发 40 周年而作)[J]. 新疆石油地质, 1995, 16(3): 250-255.
- [14] 王冀. 中国地区极端气温变化的模拟评估及其未来情景预估[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
- [15] HESSAMI M, GACHON P, OUARDA T B M J, et al. Automated regression-based statistical downscaling tool[J]. Environmental modelling & software, 2008, 23(6): 813-834. DOI: 10.1016/j.envsoft.2007.10.004.
- [16] BELCHER S E, HACKER J N, POWELL D S. Constructing design weather data for future climates[J]. Building services engineering research & technology, 2005, 26(1): 49-61. DOI: 10.1191/0143624405bt112oa.
- [17] JENTSCH M F, JAMES P A B, BAHAJ A S. CCWorldWeatherGen software: Manual for CCWorldWeatherGen climate change world weather file generator[Z]. Southampton, GB: Sustainable Research Energy Group, University of Southampton, 2012.
- [18] 王大川. 四川省制造业碳排放源分类与计量研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.

作者简介:

宋鑫焱(1990-), 女, 硕士研究生, 主要从事建筑节能研究。

叶灿滔(1980-), 男, 高级工程师, 主要从事建筑节能、可再生能源建筑一体化研究。

马伟斌(1959-), 男, 研究员, 主要从事地热能发电、制冷和太阳能发电、供热研究。