[文章编号]1002-8528(2016)10-0065-08

# 城市扩张对城市热环境影响的模拟研究

陈 光 赵立华 持田灯<sup>2</sup>(1. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室 广州 510641;2. 日本东北大学 仙台 9808579)

[摘 要] 中尺度气象数值模式(Weather Research & Forecasting, WRF) 耦合城市冠层模型(Urban Canopy Model, UCM) 是 模拟城市尺度热环境的1种方法。本文通过遥感影像获取2012年土地利用数据替代WRF默认数据,并将城市用地再分类作 为UCM 的城市原型,耦合WRF对其热环境进行模拟,模拟结果与观测结果具有很好的一致性。

[关键词] 城市扩张; 遥感影像; 马尔科夫链一元胞自动机; WRF 耦合 UCM 模式

[中图分类号] X124 [文献标识码] A

# Simulation Study on the Impact of Urban Sprawl on the Urban Thermal Environment

CHEN Guang<sup>1</sup>, ZHAO Lihua<sup>1</sup>, AKASHI Mochida<sup>2</sup> (1. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology Guangzhou 510641 China; 2. Tohoku University Sendai 9808579 Japan)

**Abstract**: In order to investigate the impact of urban sprawl on the urban thermal environment, the land use data of Guangzhou city in 2012 was firstly extracted from the remote sensing data, and then the Cellular Automaton–Markov Model was constructed to predict the urban sprawl in south-north direction with different building densities. The thermal environment of the scenario in 2012 and three urban sprawl scenarios were simulated by the WRF coupled UCM model. The simulation results of the scenario in 2012 were in agreement with the observation which showed that the method was suitable for the urban scale.

Keywords: urban sprawl remote sensing data ,Markov chain-Cellular Automata model ,WRF/UCM model

# 0 引 言

近年来我国城镇化进程非常迅猛,城市用地不断增加、人类对环境干扰增强和城市建筑物密集增加,这些改变了城市热力和动力作用影响并带来了 一系列城市环境问题。城市下垫面生态性质和物理 界面的改变,使得城市热岛效应更是愈演愈烈。

首先,城市扩张伴随着城市用地的增加,土地利 用变化带来相应的物理过程变化会影响能源消耗、 动力、地表和大气之间的物质交换<sup>[1]</sup>。下垫面是近 地面空气运动的边界面,局地气候对其变化非常敏 感<sup>[2]</sup>,进而造成城市热岛范围因城市用地扩张而不 断增大的问题。李苑<sup>[3]</sup>采用 WRF 模式模拟分析, 发现不同的土地利用模型对城市热环境影响巨大。

[收稿日期] 2015-12-21 [修回日期] 2016-04-05 [基金项目] 亚热带建筑科学国家重点实验室自主课题"快速城镇 化下城市热环境的模拟研究"(2015ZC12);国家自然 科学基金青年基金"多尺度城市热气候及其对建筑能 耗影响的协同仿真方法研究"(51408303) [作者简介] 陈 光(1986-) 男 在读博士研究生

其次 城市扩张伴随着城市区域内人为活动的强力 干扰,工业生产、交通以及人类生活所排放的大量人 为热量改变了城市环境的大气组成部分并使得城市 比郊区增加了很多额外的热量收入<sup>[2]</sup>。Khan 等<sup>[4]</sup> 调整三维气象模型(Colorado State University,CSU) 并应用于模拟 结果表明人为排热会影响城市风场 和温度场。佟华等<sup>[5]</sup>利用城市边界层模型进行了 人为热对热环境影响的敏感试验 ,结果显示人为热 对城市热岛的形成有很大作用,人为热使市中心白 天气温上升 0.5 ℃ 夜间上升 1.0~3.0 ℃。第三, 城市扩张使得城市建筑密集增加。城市建筑群的密 布改变了短波辐射、大气和地面长波辐射的传输过 程。建筑物的高低错落分布使得城市下垫面的粗糙 度增大 对低层大气的摩擦拖拽作用增强 边界层的 湍流作用增强 从而影响城市区域内的局地气候 城 区夜间具有较高温度的建筑物对天空辐射的遮挡是 城区夜间维持较高温度的主要原因,也是城市热岛 在夜间最强的重要原因。

珠三角地区是我国城镇化最快和水平最高的地

<sup>[</sup>联系方式] urbanchg@ qq. com

区之一 40 年来建成区面积不断增大,城市气温也 一直在上升,从建国初期的年平均 22.0 ℃,到 2003 年上升至 23.1 ℃<sup>[6]</sup>。夏季白天,城市局部气温甚 至比郊区高出6 ℃以上。建立马尔科夫链一元胞自 动机模型生成南北方向下的城市扩张模型,对不同 的扩张模型进行基于 WRF 耦合城市冠层模型 (UCM)的数值模拟,得到不同城市扩张强度下的气 温分布及其差值,量化对比和分析城市扩张对城市 热环境的影响,为城市空间扩张模式给出若干建议。

## 1 研究区域及研究方法

本文采用数值模拟的方法研究城市扩张对热环 境的影响。中尺度 WRF 模式模拟过程中,辐射传 输模式(Radiation scheme) 向陆面过程模式(Landsurface model) 提供长波、短波的向下辐射通量,而 陆面过程模式向辐射传输模式提供地表长波、短波 向上辐射通量。传统的中尺度模式将陆面简化为平 坦的板(Slab) 通过调整反射率、粗糙度等参数来反 映城市用地的影响,对城市下垫面的描述过于简单 且未能详细地考虑城市下垫面结构的非均匀性和城 市建筑对城市低层大气的动力、热力特征及地面能 量平衡的影响<sup>[7]</sup>。Kusaka 首次用城市冠层模型 (UCM) 替代平板模型描述陆面过程,并和 WRF 模 式耦合。UCM 考虑了建筑物对辐射的遮挡和反射、 街道走向、不同表面(屋面、墙面和路面)的能量收 支等<sup>[8]</sup>,并且直接以显热形式计入人为热。将 UCM 计算得到的向上传输的显热通量、潜热通量等变量 输入到 WRF 模式。UCM 模型对陆面过程的描述更 准确,因此中尺度模式 WRF 耦合 UCM (WRF/ UCM) 已被用于南京、日本东京、仙台等城市尺度热 环境的模拟研究<sup>[3,5]</sup>。

但 WRF 模式中的默认土地利用数据 USGS 来 自于美国调查局于 1992 ~ 1993 年间的 AVHRR 遥 感调查数据,共有 24 类土地利用类型数据。伴随着 快速城镇化进程,广州城区面积不断增加,该土地利 用数据已经不能准确反映现实情况。对 UCM 模型, 若将单一城市用地细分为 3 类不同建设强度的城市 用地可获得更好的模拟结果,但该数据极难获取。 研究通过遥感影像提取 2012 年所模拟区域的土地 利用数据,再将城市用地分类为高、中和低密度 3 类 用地,即研究改善的模拟方法,具体改进见图 1。依 据以上土地利用数据建立现状城市模型,并结合观 测数据对模拟方法进行验证。形成 WRF/UCM 的 模拟方法。在 2012 年土地利用数据基础上通过马 尔科夫链-元胞自动机模型建立城市南北方向高密 度、中密度和低密度扩张 3 个模型 应用 WRF/UCM 数值模拟 3 个城市扩张模式对热环境的影响。



图1 研究采用的模拟方法

#### 1.1 研究对象

WRF/UCM 模拟将采用 3 级嵌套,3 级嵌套中 第一层区域为 1 800 km × 1 800 km,大体包含了中 国的南方区域;第二层区域 500 km × 500 km,包含 珠三角区域;第三级区域为 120 km × 120 km,单位 网格大小为 1 km。第三级区域是研究的主要区域, 以广州为中心,包含了佛山、中山、深圳、东莞等珠三 角主要城市的部分地区。选择包含广州市南部 7 个 行政区的区域作为城市扩张的区域,选择帽峰山郊 区气象站和番禺国家站的实测气象数据与模拟结果 对比,详见图 2。





## 1.2 城市现状土地利用数据获取与再分类

为了获取 2012 年的土地利用数据,使用 Landsat-7 ETM + 卫星 2012 年的遥感数据集,运用遥 感学中的监督分类法中的最大似然数法<sup>[9]</sup>,使用 IDRISI 软件来提取模拟区域 2012 年的土地利用数

湿地

裸地

据 然后在 GIS 中对提取的土地利用信息进行重采 样,生成模拟区域2012年的土地利用数据,实现对 WRF 自带的模拟区域土地用数据修正。最终提取 的土地利用数据包含常绿针叶林、混合林、常绿阔叶 林、灌木、农田、水体、城市用地等用地类型,如图3 所示 记做 RS 12。该模型中城市作为一种用地类 型参与热环境模拟。

为了将城市用地细分为高密度区、中密度区和 低密度区 3 类 引入(Human Settlement Index ,HSI) 来对城市用地进一步分类,HSI利用归一化植被指 数 NDVI 的遥感影像数据和美国国防气象卫星计划 (Defense Meteorological Satellite Program ,DMSP) 上 的线性扫描业务系统(Operational Linescan System, OLS) 采集的夜间灯光影像数据通过以下运算获 得<sup>[10]</sup>:

$$HSI = \frac{(1 - NDVI_{max}) + OLS_{nor}}{(1 - OLS_{rot}) + NDVI_{rot} + OLS_{rot} \times NDVI_{rot}}$$
(1)

式中: NDVImax 为全年归一化植被指数的最大值,该值 从 2012 年全年的 NDVI 影像中进行选择 见式(2)。



#### 1.3 建立城市扩张模型

城市扩张包含城市用地的扩张模式和新增城市 用地建设强度两部分。研究首先基于马尔科夫链一 元胞自动机来建立城市用地扩张模型 进而在 UCM 模型中设定新增城市用地的建设强度和人为热水

$$NDVI_{max} = MAX(NDVI1, NDVI2, \dots, NDVI23)$$

OLS<sub>m</sub>为标准化的 DMSP-OLS 影像的值,其计 算公式见式(3):

$$DLS_{nor} = \frac{OLS - OLS_{min}}{OLS_{max} - OLS_{min}}$$
(3)

OLS<sub>max</sub>为 DMSP-OLS 影像的值最大值,OLS<sub>min</sub>则 是最小值。

在研究区域内,OLS\_\_\_是用来区分城市与非城 市区域 依据城市区域占比研究区域的比例 进而按 照同等比例换算 确定本研究 OLS.....值为 23<sup>[11]</sup>。

在研究区域内经过计算得到的 HSI 值和用地数 据进行叠加分析。按照以下标准进行划分得到不同 的密度的城市用地:1) HSI 值大于等于所有城市用 地 HSI 值的 80% 为高密度区域; 2) HSI 值大于等于 所有城市用地 HSI 值的 30% 且小于 80% 的为中密 度区域; 3) HSI 值小于所有城市用地 HSI 值的 30% 的为低密度区域。分类结果如图4所示,记做 UCM 12.



图 4 UCM\_12

平。最终建立城市扩张模型。

1.3.1 城市用地扩张模型

元胞自动机是定义在一个由具有离散、有限状 态的元胞组成的元胞空间上,并按照一定局部规则, 在离散的时间维上演化的动力学系统。一个元胞在 某时刻的状态取决于上一时刻该元胞的状态以及该 元胞的所有邻居元胞的状态; 元胞空间内的元胞依 照这样的局部规则进行同步的状态更新,整个元胞 空间则表现为在离散的时间维上的变化。城市用地 扩张下的标准的元胞自动机模型可以描述为:

 $S^{t+1}(x \ y) = f(S^{t}(x \ y) \ N)^{[12]}$ 

 $S^{t}(x,y)$ 表示目标点(x,y)在 t 时间的土地利 用类型 N 代表周边的土地利用类型。周边土地利 用类型直接决定了目标点用地类型的转化。图 5 为 其转化规则: 如果目标点(x,y) 不是水体且周边用 地记为  $\Omega$  ,那么点(x,y) 转化为城市用地的概率为  $P(x,y) = \sum_{m,n \in \Omega} P(m,p)/8° \oplus P(x,y)$ 大于某个值 $\mu$ 时 ,目标点(x,y) 转化为城市用地。



图 5 目标点与周边示意

 $P(m_n)$ 为周边  $\Omega$  中每个网格  $(m_n)$ 转化为 城市用地的概率  $,P(m_n)$  通过马尔科夫链建立矩 阵计算得到 ,其计算模型见图  $6^{[13]} \cdot P_{ij}$ 为从土地利 用类型 i 转化为土地利用类型 j 的概率。利用研究 区域 2000 年土地利用数据作为初始状态 ,2005 年 土地利用数据作为终点数据 ,1 年作为一个计算周 期共 5 个周期计算出土地利用类型相互转化概率。 2000 年和 2005 年的土地利用数据同样通过遥感影 像数据获得。



图6 转化概率计算矩阵

对标准马尔科夫链和元胞自动机模型进行修正 可以按不同城市发展模式生成土地利用数据,修正 后的模型表述为:

$$S^{t+1}(x, y) = f(S^{t}(x, y), D(x, y), N)^{[12]}$$

其中 D( x y) 是标准模型中点 P( x y) 的扩充, 该方程也可以被表述为:

$$S^{i+1}(x, y) = f(P_s^i(x, y))$$
$$P_s^i(x, y) = f(D(x, y) \times P(x, y))$$

城市的扩张受到国家政策、城市战略及城市经 济等诸多因素影响。为建立研究区内南北方向发展 的城市扩张模式,对研究区域进行分区,见图7。大 于1的参数D<sub>m</sub>。被引入并且不等值地定义到各个区 域来控制各个区域的城市扩张速度和规模,各区域

D<sub>mo</sub> 值见表 1。



图7 城市分区示意图

	衣I 谷区域 D <sub>mo</sub> 值	
扩张方向	区域	$D_{mo}$
	E1-1	1.15
南北方向(SN)	E1-2	1.0
	E1-3	1.4

1.3.2 不同密度城市用地的建设强度设定

高、中、低密度的城市用地的建设强度用建筑高 度、街谷宽度、屋顶宽度、人为热强度来描述。实际 各区域平均数据极难获取,定义低密度主要为一到 三层的低层建筑,中密度为多层建筑,高密度为高层 建筑,并据此确定屋顶宽度与街谷宽度,人为热强度 缺少相关的准确数据,采用 UCM 中的缺省值。各密 度区域具体的参数见表2。

表 2	新增城市区域的建筑强度表		
参数	高密度区	中密度区	低密度区
建筑物高度/m	30	18	9
街谷宽度/m	21	18	12
屋顶宽度/m	20	12	7.8
人为热/(W/m <sup>2</sup> )	90	50	20

最终生成了南北高密度扩张(以下记做 SN\_高, 见图 8)、南北中密度扩张(以下记做 SN\_中,图 9) 和南北低密度扩张(以下记做 SN\_低,图 10)3 个城 市扩张情景。



图 8 SN\_高



图 10 SN\_低

#### 1.4 数值模拟实验设计

对 UCM\_12 工况和 3 个南北方向上以不同建设 强度扩张的 SN\_高、SN\_中和 SN\_低工况共四个工况 进行模拟。对比 UCM\_12 模拟结果与观测数据分析 了本文提出的 WRF/UCM 方法的可靠性; 3 个城市 扩张情景与 UCM\_12 工况的模拟结果对比可以分析 得到城市在南北方向扩张对城市热环境的影响。

4 个模拟工况均采用三重网格嵌套,第三级区 域是所研究的城市区域,网格为1 km×1 km,垂直 方向为不等距的43 层,其中1km以下14 层。模拟 初始时间为2012 年 8 月01 日0:00 开始 8 月 4 日 23:00 结束,共96 h。初始条件和边界条件采用 WRF 默认的6 h 间隔的 NCEP 1°×1°再分析资料 (FNL)。采用的 WRF 的物理过程模式包括:WDM-6D 微物理过程模式(Microphysics scheme),Dudhia 短波辐射模式(Shortwave radiation scheme),RRTM 长波辐射模式(Longwave radiation scheme),Kain Fritch 积云对流模式(Cumulus scheme),Noah 陆面 模式(Land-surface model)并调用城市冠层模型, YSU 边界层模式(Boundary scheme)。

# 2 模拟结果分析

# 2.1 UCM\_12 模拟结果验证及分析

图 11 和图 12 是番禺气象站(城区)和帽峰山 (郊区)气象站 2 m 高空气温度观测值与 UCM\_12 工况模拟值的对比。结果显示郊区和城区的模拟结 果均较好地再现了温度的日变化特征,但不同的时 刻的模拟精度有差异。在4 d 的模拟期间,高温晴 朗天气的1日和2日的模拟值与实测值吻合度较 高,而阴天及阵雨天气的3日与4日有相对较大差 距,特别是最高温时刻偏差较大,模拟值大于实测 值。因此,晴朗高温天气下模拟可以准确再现最高 温度观测值。夜间模拟值高于观测值,尤其是在城 区测点。



综合对比结果说明本文提出的 WRF/UCM 方 法可以较为准确地模拟城市的热气候,尤其在高温 晴朗天气下。

2.2 城市扩张工况 2 m 高温度场分布及对比分析

图 13~图 16 是 4 种不同工况在 8 月 1 日 14: 00 时刻近地面 2 m 高温度场分布。从图 13 中发现,该时刻 UCM\_12 工况最高温主要位于广州西侧 及西南侧靠近佛山一带,最高约 37.5℃左右。受海 洋调节作用影响和低水平城市化的原因,广州南部 与中山地区温度较低。此外,广州东南部与东莞一 带的高温明显,深圳市有较明显的高温。UCM\_12 工况的温度场空间分布模拟结果与前人研究的珠三 角高温时空的分布特征一致<sup>[14]</sup>。



图 13 UCM\_12 温度分布



图 14 SN\_高情景温度分布

3 种不同的城市发展情景下城市温度空间分布 呈现不同特征。SN\_高情景和 SN\_中情景在广州南 部和中山市东部的新增城市区域形成新的高温中 心 广州北部新增城市区域的高温区域变大。SN\_



图 15 SN\_中情景温度分布



图 16 SN\_低情景温度分布

低情景在南部则无明显的高温区域形成,北部的温度分布和 UCM\_12 工况差别亦较小。

2.3 城市扩张工况与 UCM\_12 工况 2 m 高温差特 点分析

3 个城市扩张工况与 UCM\_12 工况在 8 月 1 日 14:00 的温度差别见图 17。SN\_高情景下,广州 南部及相邻的中山市东部的新增城市区域温度升 高明显,部分区域可达 0.5 ~ 1 ℃,但升温区域面 积比新增城市面积小,见图 17a。SN\_中情景和 SN \_高情景有相似的升温区域空间分布,但升温水平 低于 SN\_高情景,大约为 0 ~ 0.5 ℃,基本没有 0.5 ~ 1 ℃区域。见图 17b,SN\_低情景虽然在大面积 的城市扩张,但是却无明显的升温区域,见图 17c。 在广州北部的城市增长区域也有同样的温度升高 特征,SN\_高情景和 SN\_中情景下广州北部的高温 区域变大,且广州西部和西南侧的高温中心佛山, 温度进一步升高,SN\_低情景相对 UCM\_12 温度升 高并不明显。



图 17 城市扩张工况与 UCM\_12 工况的温度分布差

## 3 总 结

利用遥感影像提取 2012 年土地利用数据并再 分类 2012 年土地利用模型,通过建立修正的马尔科 夫链一元胞自动机模型建立广州南北方向高、中、低 密度扩张的3 个城市扩张模型。基于 WRF/UCM 对 4 个工况进行热环境模拟分析,其主要结论如下: 1)通过遥感影像数据提取和进一步分类土地 利用数据建立的模型,应用 WRF/UCM 可以较为准 确地模拟出研究区域内2m高空气温度的时间、空 间分布特征。

2) 广州城市在南北方向扩张时,南部和北部新 增城市区域的温度会随着建筑密度和人为热的升高 而升高,且南部明显生成新的高温中心。高密度扩 张情景温度升高约0.5~1 ℃,中密度温度升高约0 ~0.5 ℃,低密度升温幅度不明显。

3)通过马尔科夫链一元胞自动机模型可以建 立更多基于不同扩张准则的城市扩张模型,进而使 用 WRF/UCM 模拟不同扩张模式下的热环境水平, 该方法可用于城市热环境预测,其模拟结果为城市 规划方案提供参考。

#### [参考文献]

- [1] FOLEY J A, DEFRIES R, ASNER G P, et al. Global consequences of land use [J]. Science, 2005, 309 (5734): 570-574
- [2] 黄燕燕,万齐林,袁金南,等.城市冠层过程的研究与进展[J].热带气象学报,2006,22(3):290-296
- [3] LI Y, OKAZE T, MOCHIDA A. Prediction of the impacts of urbanization using a new assessment system combining an urban expansion model and WRF-Case study for Guangzhou in China [J]. Journal of Heat Island Institute International ,2014,9(2): 133-137
- [4] KHAN S M, SIMPSON R W. Effect of a heat island on the meteorology of a complex urban airshed [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2001, 100(3): 487-506
- [5] 佟华,刘辉志,李延明,等.北京夏季城市热岛现状及楔形 绿地规划对缓解城市热岛的作用[J].应用气象学报,2005, 16(3):357-366
- [6] 陈卓伦,赵立华,孟庆林,等.广州典型住宅小区微气候实 测与分析[J].建筑学报,2009,(11):24-27
- [7] 李晓莉,何金海,毕宝贵,等. MM5 模式中城市冠层参数化 方案的设计及其数值试验[J]. 气象学报,2003(05):526-539
- [8] KUSAKA H, KIMURA F. Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island: Numerical experiment using a mesoscale model coupled with an urban canopy model [J]. Journal of applied meteorology ,2004 ,43(12): 1899-1910
- [9] Li Y, Song Y H, Mochida A, et al. WRF Environment Assessment in Guangzhou City with an Extracted Land-use Map from the Remote Sensing Data in 2000 as an Example [J]. Journal of Harbin Institute of Technology , 2014 , 21(5):26-32
- [10] LU D, TIAN H, ZHOU G, et al. Regional mapping of human settlements in southeastern China with multisensor remotely

sensed data [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112
(9): 3668-3679

- [11] ELVIDGE C D , BAUGH K E , KIHN E A , et al. Mapping city lights with nighttime data from the DMSP Operational Linescan System[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing , 1997, 63(6): 727-734
- [12] LI X, YEH A G-O. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS [J].

(上接第28页)

低于国家规范的要求。主观问卷调查结果表明,当 地居民对室内热环境的可接受程度较高,但仍有半 数以上的受试者期望热环境有所改善。

2) 虽然生土民居外墙采用 400 mm 厚的土坯 墙,但客厅南北方向均有与室外互通的门,北向为临 街道路,人员出入频繁,卧室仅南向开窗,故室内温 湿度与客厅相比较为稳定。但单层、北向开门和一 字型设计是导致生土建筑室内热环境整体较差的原 因之一。

3) 砖混民居外墙采用 240 mm 的砖墙,但其主要活动空间客厅和卧室仅有一面外墙,故围绕主要活动空间的"向心性"设计使得其整体热环境要优于生土民居。在新建民居的设计中,建议围绕主要使用空间,如客厅、卧室,布置其它功能性房间,如楼梯间、厨房等。在做好围护结构保温设计的同时,优化民居的空间设计更加有利于室内热环境的改善。

4) 新建民居顶层热环境较差是其利用率较低的主要原因,应加强顶层的保温设计,冬季利用阳光间引进更多的日照,同时加强门窗和屋顶的保温设计。

# [参考文献]

- [1] 林波荣,谭刚,王鹏,等.皖南民居夏季热环境实测分析
   [J].清华大学学报(自然科学版),2002,42(8):1071-1074
- [2] 何文芳,白卉,刘加平.吐鲁番地区民居夏季热舒适测试研究[J].太阳能学报,2014,35(6):1092-1097
- [3] 金玲,赵立华,张宇峰,等.潮汕传统农村住宅热环境实测研究及其现代启示[J].建筑科学,2014,30(6):27-33
- [4] 王登甲,刘艳峰,王怡,等.拉萨市住宅建筑冬季室内热环 境测试评价[J].建筑科学,2011 27(12): 20-24

International Journal of Geographical Information Science , 2000 , 14(2): 131-152

- [13] GUAN D , LI H , INOHAE T , et al. Modeling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov model [J]. Ecological Modelling , 2011 , 222(20): 3761-3772
- [14] 蒙伟光,张艳霞,李江南.WRF/UCM 在广州高温天气及城 市热岛模拟研究中的应用 [J].热带气象学报,2010 (03): 273-282
- [5] 高翔翔,胡冗冗,刘加平,等.北方炕民居冬季室内热环境 研究[J].建筑科学,2010,26(2):37-40
- [6] 李少颖. 晋南传统民居的生态特性研究及新型民居构建 [D]. 太原:太原理工大学,2013
- [7] 雷亚平,林忠平.四川盆地地区农村住宅冬季热环境实测与 评价[J].建筑科学,2009 25(12):39-44
- [8] 刘大龙,刘加平,何泉,等.银川典型季节传统民居热环境 测试研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2010,42(1):83-86
- [9] 胡冗冗,李万鹏,何文芳,等.秦岭山区民居冬季室内热环 境测试[J].太阳能学报,2011,32(2):171-174
- [10] 赵西平,刘元,刘加平.秦岭山地传统民居冬季热工能分析 [J].太原理工大学学报 2006 37 (5):565-567
- [11] 冯涛,王鹏,何文芳,等. 乡村居住建筑生态节能性对比分 析研究——以关中乡村民居建筑夏季热工性能对比分析研 究为例[J].建筑科学,2012 28(4): 29-33
- [12] 中国建筑科学研究院. GB 50176-2012 民用建筑热工设计规范[S].北京:中国计划出版社,1993
- [13] 闫增峰. 生土建筑室内热湿环境研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学 2003
- [14] 中华人民共和国住房与城乡建设部.GB/T 50824—2013,农 村居住建筑节能设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社, 2014
- [15] 中华人民共和国住房与城乡建设部. GB/T 50785-2012 民 用建筑室内热湿环境评价标准[S]. 北京:中国建筑工业出 版社,2012
- [16] 闫海燕,杨柳,周书兵,等. 焦作市冬季居住建筑室内人体 热舒适现场研究[J]. 暖通空调 2011 41(11): 119-125
- [17] LIU Jiaping, WANG Lijuan, YASUKO Yoshino, et al. The thermal mechanism of warm in winter and cool in summer in China traditional vernacular dwellings [J]. Building and Environment, 2011 46(2): 1709–1715
- [18] 刘大龙,刘加平,杨柳,等.西北地区生态民居及室内热环 境[J].工业建筑,2012,42 (2):19-22