

# 城市下垫面对夏季微气候影响的测试研究

刘大龙<sup>1,2,3</sup>, 马 岚<sup>1</sup>, 刘加平<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055;  
3. 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:** 下垫面是形成微气候的关键因素, 为了研究其对夏季城市局地微气候的影响机制, 选择 4 种具有代表性的城市下垫面(沥青路面、混凝土路面、铺面砖地面、草地)作为研究对象, 对下垫面热环境参数进行测量. 分析了不同下垫面微气候特征和地表温度变化特征, 以及下垫面地表温度和气象参数、物理性质的影响关系, 对比研究了不同下垫面的微热环境影响, 结果如下: 不同下垫面地表上方空气温度、太阳辐射、相对湿度和风速共同构成的下垫面微气候环境存在差异, 不同下垫面地表温度的日变化一般呈先上升后下降的单峰形态, 沥青地表温度在全天均高于其他下垫面; 气温、太阳辐射以及空气相对湿度与下垫面地表温度的关联性显著; 材料热物理性质会影响下垫面地表温度表现, 但影响程度不同, 由高至低依次为热扩散率、比热容和反射率; 四种下垫面热环境舒适度从高到低依次是草地、混凝土、铺面砖、沥青. 本研究可为优化城市热环境设计提供科学依据.

**关键词:** 下垫面; 微气候; 热舒适; 热环境; 物理性质

中图分类号: TU111. 1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)01-0107-06

## Test on the impact of urban underground on summer microclimate

LIU Dalong<sup>1,2,3</sup>, MA Lan<sup>1</sup>, LIU Jiaping<sup>1,2</sup>

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

3. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China Univ. of Tech., Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The underlying surface is a key factor in the formation of microclimates. In order to study its effect on the microclimate in summer, four representative urban underlying surfaces (asphalt pavement, concrete pavement, pavement brick floor and grassland) were selected as objects for observation. The thermal environment parameters of the underlying surface were measured by measuring instruments. On this basis, the microclimate characteristics surface temperature variation characteristics of different underlying surfaces are analyzed; so are the relationship between surface temperature and meteorological parameters, physical properties of underlying surfaces. The micro-thermal environmental impacts of different underlying surfaces are compared and studied. Results are as follows: There are differences in the microclimatic environment of the underlying surface composed of air temperature, solar radiation, relative humidity and wind speed above the surface of different underlying surfaces. The diurnal variation of surface temperature of different underlying surfaces generally presents a single peak pattern, which rises first and then decreases. The surface temperature of asphalt is higher than that of other underlying surfaces in the whole day. Temperature, solar radiation and air relative humidity have significant effects on the temperature of underlying surface. The thermal physical properties of materials can affect the surface temperature performance of underlying surface, but the degree of influence is different. From high to low, the order is thermal diffusivity, specific heat capacity and reflectivity; The thermal environment comfort degree of the four kinds of underlying surfaces from high to low is grassland, concrete, paving brick and asphalt in turn. Research results have certain reference significance for understanding the thermal environment of different urban underlying surfaces, and can provide scientific basis for alleviating the urban thermal environment.

**Key words:** underlying surface; microclimate; thermal comfort; thermal environment; physical property

城市气候已经成为影响城市生存环境、城市追求的舒适健康的室外环境的矛盾越来越深. 城市可持续发展的关键问题. 城市气候的恶化与居民城市下垫面是城市地表的构成形式, 也是城市不同

收稿日期: 2019-05-09 修改稿日期: 2020-01-10

基金项目: “十三五”国家重点研发计划子课题基金资助(2018YFC0704505); 国家自然科学基金资助项目(51878536); 亚热带建筑科学国家重点实验室开放基金项目(2018ZB16)

第一作者: 刘大龙(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为建筑热环境. E-mail: coffeercv@xauat.edu.cn

于乡村的显著特征,是城市中最基本的构成要素.硬化、大热容、强反射等一系列城市下垫面的特征,使得城市中的热量交换明显不同于乡村<sup>[1-2]</sup>.研究表明城市微气候的变化与城市下垫面性质有密切关系<sup>[3-5]</sup>,是城市热岛形成的关键因素,是影响城市热环境的重要因素<sup>[6-7]</sup>.因此研究城市组成要素与环境要素之间的互动关系对于营造健康、宜居的城市环境具有重要意义.

为探索下垫面对城市微气候环境的影响问题,国内很多学者对此开展了现场测试研究.李伟强等对广州大学生活区某宿舍楼的室外气候特征进行了现场实测,得出单体建筑周围热环境与风速、风向和太阳辐射强度、下垫面性质等的关系<sup>[8]</sup>;张磊等对华南理工大学东湖的测试,获得了水体、乔木、草地和硬地等设计方法对热环境的影响程度<sup>[9]</sup>;李英等对北京三里屯地区城市下垫面热环境研究,发现该地区的绿化方式、铺地材料以及环境设计方面存在许多不利于热环境的地方并提出解决方案<sup>[10]</sup>;杨雅君等在深圳选择6种代表性的城市下垫面,研究得出气温、空气相对湿度以及太阳辐射等气象参数与下垫面温度之间具有显著相关性<sup>[11]</sup>.

梳理上述研究,发现以下问题:(1)对南方湿热气候研究多,对北方干旱气候研究少.(2)更注重下垫面影响下微气候特征的总体分析,缺少下垫面影响城市微气候的机理研究.(3)缺少下垫面对室外人体热感觉影响的研究.针对上述问题,本文以西安气候变化复杂的夏季为研究对象,通过测试建立不同类型下垫面与微气候特征间的量化关系,然后通过分析下垫面的物理性质,探索下垫面对微气候的影响机理,最后分析了下垫面对室外人体热舒适性的影响.期望为城市环境改造,提升户外活动品质提供借鉴.

## 1 测试概况

以西安为测点,选择城市中常见的铺面砖、草坪、沥青、水泥四种下垫面作为测定要素,通过比较研究确定下垫面与城市气象参数的影响关系.

### 1.1 测试仪器及测试方法

实验地点为西安建筑科技大学校园,时间为:2018年7月18日8:00~7月21日8:00,连续测试72 h.测试参数及仪器见表1,总辐射表采集下垫面上方总辐射、散射辐射、直射辐射、南向总辐射强度.

### 1.2 测点布置

西安室外测试地点布置在西安建筑科技大学校园内,布置4组测温装置,选取4种不同的下垫面,测点的具体位置及周边环境如下:沥青地面选择开阔的篮球场,水泥地面周围无遮挡,铺砖地面选择开阔的广场,草坪周围无遮挡.测量下垫面表面温度的做法是将探头用胶带固定在下垫面表面.测量温湿度及风速的做法将仪器挂在三脚架上,距离地面约1 m.各测点位置下垫面性质见图1.

表1 测试仪器及精度  
Tab.1 Testing instruments and accuracy

测量参数	测量仪器	仪器精度	采集频率 /min	采集方式
空气温度	温湿度块	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	10	自动
空气湿度	温湿度块	$\pm 5\%$	10	自动
表面温度	四通道仪	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	10	自动
太阳辐射	总辐射表	$\leq 5\% \text{ W/m}^2$	30	手动
风速	风速仪	$\pm 0.3 \text{ m/s}$	10	自动



图1 现场测点照片

Fig.1 Phototaken of the measuring point

## 2 测试结果与分析

### 2.1 不同下垫面微气候特征分析

图2和图3分别为不同下垫面上方空气温度、太阳辐射、相对湿度和风速的变化特征, 这些因素共同构成了下垫面微气候环境<sup>[12]</sup>. 4种下垫面地表上方空气温度日内变化趋势与太阳辐射基本上一致, 趋势为先上升后下降. 下垫面间的温度差值也会随着时间的不同而不同. 早上8:00, 下垫面间的空气温度差值较小, 13:00~15:00, 空气温度达到峰值, 差值也达到最大. 草地上方的空气温度在全天都是最低, 其余三种硬质下垫面的空气温度在不同时段呈现不同的变化.

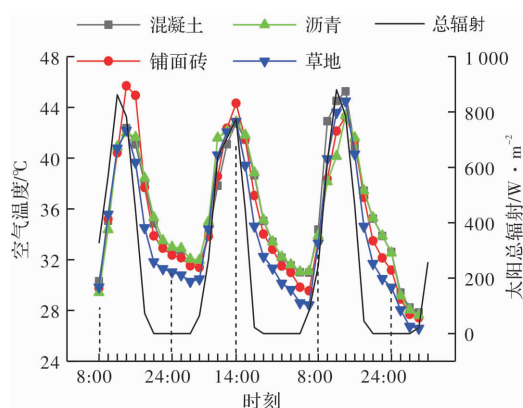


图2 下垫面上方空气温度和太阳总辐射变化特征

Fig. 2 Air temperature, solar radiation and their variation characteristics of different underlying surfaces

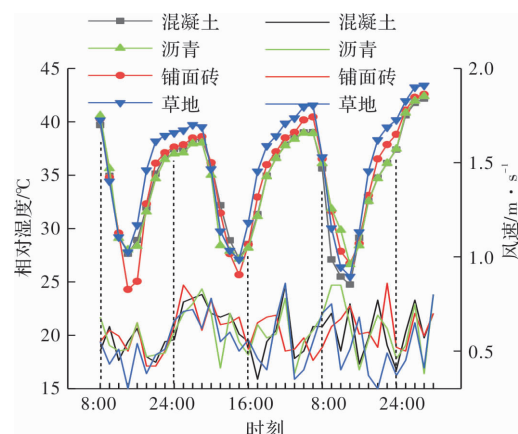


图3 下垫面上方相对湿度和风速变化特征

Fig. 3 Characteristics of relative humidity and wind speed above the surface of different underlying surfaces

4种下垫面地表上方相对湿度日内变化趋势与空气温度基本相反, 总体上都呈现先下降后上升的变化趋势. 草地上方的相对湿度在全天都是最高, 接下来是铺面砖, 混凝土和沥青的全天相对湿度较低. 4种下垫面的风速总体趋势呈波状上下浮动, 规律性不是很明显.

为了综合研究不同下垫面构成的微气候环境差异, 将4种下垫面的气象参数数值中的最小值定为基准值, 其余下垫面的对应气象参数的数值与基准值的比值定为相对变化率, 以此来研究4种下垫面构成的微气候环境的差异与优劣. 表2为下垫面平均空气温度、平均湿度和平均风速以及与基准值对应的相对变化率. 图4是不同下垫面微气候气象参数相对值. 由图4可知, 4种下垫面构成的微气候环境具有明显差异, 平均空气温度是沥青>混凝土>铺面砖>草地的特征, 平均湿度是草地>铺面砖>沥青>混凝土的特征, 平均风速是铺面砖>混凝土>沥青>草地的特征. 综上, 同一种气象参数在不同下垫面环境下呈现不同的数值与优劣表现. 说明气象参数与下垫面之间的影响关系因为下垫面的不同而有所差异.

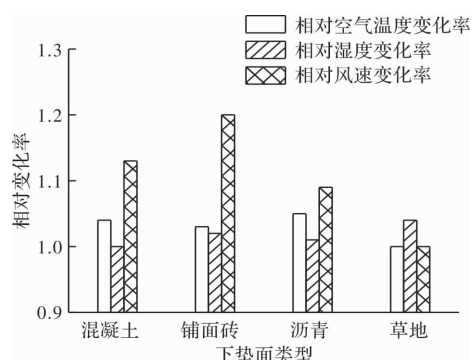


图4 不同下垫面微气候特征相对值

Fig. 4 Relative values of microclimate characteristics of different underlying surfaces

### 2.2 不同下垫面地表温度日变化特征

地表温度是下垫面热特征的重要表征, 是分析下垫面与微气候关系的纽带. 图5为下垫面地表温度的变化特征. 由图5可知, 从温度变化形态上看, 4种下垫面地表温度日内变化趋势与气温基本上一致, 总体上都呈现先上升后下降的变化趋势. 地表温度从早上8:00开始上升, 由于空气温度升高以及太阳辐射增强, 地表吸收热量而温度随之升高, 至13:00~15:00达到一天温度的峰值, 之后逐渐下降. 下垫面间的温度差值在一天内的不同时间段也有所不同. 早上8:00, 下垫面间的地表温度差值较小, 13:00~15:00, 地表温度达到峰值, 差值也达到最大. 因此, 不同下垫面的地表温度变化幅度与地表温度峰值不同, 同时也受到空气温度的影响.

## 3 下垫面对城市微气候的影响机理

对下垫面物理性质的分析可以解释因为下垫

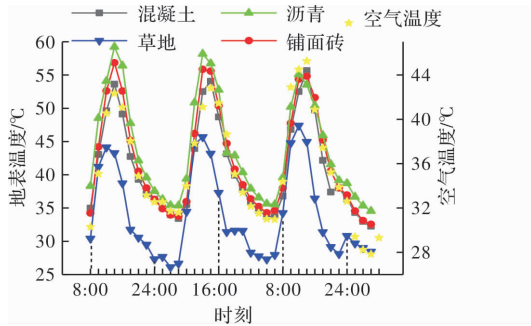


图5 下垫面地表温度变化特征

Fig. 5 Surface temperature variation characteristics of the underlying surface

面差异导致的气象参数和地表温度变化程度和数值不同的原因。材料的热物理性参数包括材料的密度、比热容、导热系数、反射率等，而热扩散率是导热系数与比热容和密度的乘积之比，公式如下：

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (1)$$

式中： $\alpha$ 为热扩散率， $\text{m}^2/\text{s}$ ； $\lambda$ 为导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ； $\rho$ 为密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $c$ 为比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

以上参数不同，升高相同的温度所吸收的热量不同，传递转移热量的快慢不同，因而室外空间常见的下垫面材料在太阳辐射作用下吸收的热量多少和传递热量的快慢不同。

图6为下垫面地表温度和物理性质的相关系数。材料热性能均会影响下垫面地表温度表现，但影响程度不同。综合来讲，材料的热扩散率与下垫面地表温度的相关性最高，影响最大，材料的反射率和比热容对于下垫面地表温度的影响不如热扩散率。

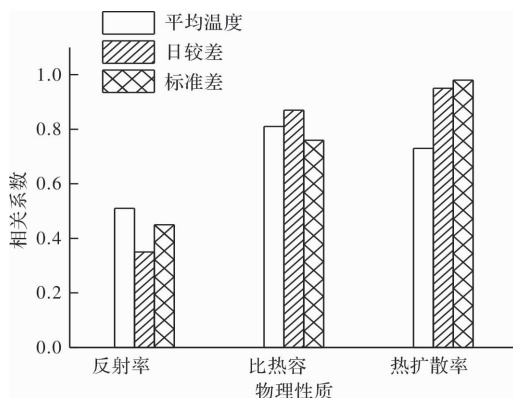


图6 地表温度和下垫面物理性质相关系数

Fig. 6 Correlation coefficient between surface temperature and underlying surface physical properties

单独分析下垫面地表温度的变化规律可知，下垫面平均地表温度受到材料反射率影响最大，下垫面地表温度日较差受材料比热容影响最大，下垫面

地表温度标准差受到材料热扩散率影响最大。

因为反射率决定了能进入下垫面太阳辐射的多少，会直接影响到下垫面的温度场，而反射率与下垫面的颜色、光滑程度和使用情况有关，混凝土、铺面砖和沥青三者的光滑程度依次降低，颜色依次加深，决定了颜色越浅光滑程度越高的下垫面反射率越高，下垫面反射的太阳辐射越多。而草地并不依据这一关系，主要是由于草地的温度不仅受到太阳辐射的影响，也受到植被蒸腾、植物气孔调节和草坪与下层土壤热交换等因素影响，变化情况较复杂。

图7为下垫面地表温度日较差和材料比热容的变化趋势。由图7可知，随着比热容的降低，下垫面地表温度的日较差越大，说明下垫面地表温度升温越快，升高的温度也越多。在四种下垫面里，草地是日较差最小的，而沥青是日较差最大的，说明草地的地表吸收的热量最少。

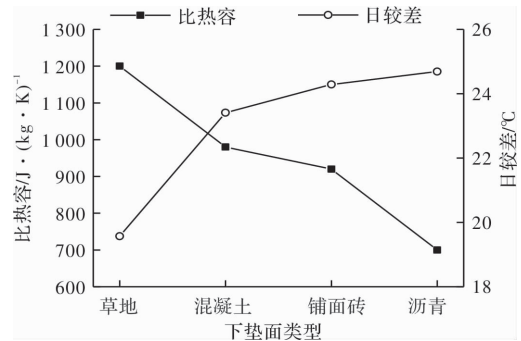


图7 下垫面地表温度日较差和比热容

Fig. 7 Undersurface temperature difference and specific heat capacity of the underlying surface

图8为下垫面地表温度标准差和材料热扩散率的变化趋势。材料热扩散率代表材料温度趋于一致的能力，热扩散率越大，说明材料的温度变化越稳定。由图8可知，下垫面地表温度的标准差随热扩散率降低而升高，地表温度的变化越不稳定，地表温度变化越明显。四种下垫面，草地是温度变化最稳定的，而沥青是温度变化最不稳定的。

#### 4 下垫面对城市微热环境的影响分析

上述研究表明，不同下垫面具有显著不同的微气候特征，而这些不同的微气候哪些让人舒适，哪些需要改造？这些问题直接决定着不同下垫面的应用和城市热环境的改造优化。要解决该问题，首先需要明确对于室外热环境的评价问题。

在室外热环境的评价研究中，国内外部分学者认为对于复杂多变的室外热环境，理想实用的



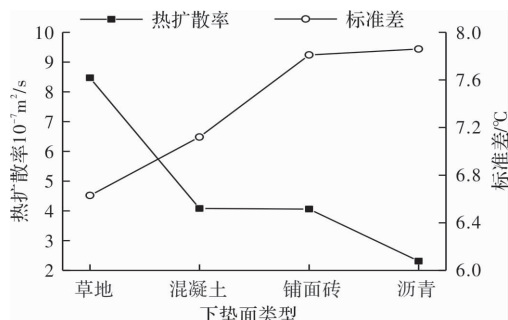


图8 下垫面地表温度标准差和热扩散率

Fig. 8 Surface standard deviation and thermal diffusivity of the underlying surface

热指标应将物理变量与个人变量分开。指标仅描述环境的“冷热”程度,而不包含进个人因素的影响。湿球黑球温度 WBGT (Wet-Bulb Globe Temperature) 是纯物理的简单的热应力指标,不涉及个人变量,符合这一要求<sup>[13-15]</sup>。WBGT 指标的计算式为

$$WBGT = 0.7T_s + 0.2T_g + 0.1T_a \quad (2)$$

式中:  $T_a$  为空气干球温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_s$  为空气自然湿球温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_g$  为黑球温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

在国际上, WBGT 指标已被 ISO7243 标准体系认证,在我国,已经有相关的评价体系和标准将 WBGT 作为室外热安全的评价指标。自然湿球温度和黑球温度为复合环境参数,不易测量,因此采取 WBGT 指标的简化计算公式<sup>[16-18]</sup>,即

$$WBGT = 1.157T_a + 17.425RH + 2.407 \times 10^{-3}SR - 20.550 \quad (3)$$

式中:  $T_a$  为空气干球温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $RH$  为相对湿度, %;  $SR$  为总太阳辐射照度,  $\text{W}/\text{m}^2$ 。

由于采用空气温度、相对湿度和太阳辐射等常规气象参数计算 WBGT, 与 WBGT 的定义式相比, 简化关联式使用方便。WBGT 是纯环境因素指标, 它与个人主观因素的关系已经建立, 即假设人体身着夏装, 在不同的活动状态推荐有不同的 WBGT 安全极限值。例如在休闲状态, 人体的新陈代谢率  $M < 117 \text{ W}/\text{m}^2$ , 此时对人体安全的最高 WBGT 值为  $32 \sim 33^{\circ}\text{C}$ , 当环境的 WBGT 值较长时间的超过该值, 应当采取安全保护措施避免人体受到热损伤。

由图 9 可知, 草地是四类下垫面中最符合人体热舒适的下垫面, 但是草地也有超过  $32^{\circ}\text{C}$  的时间段, 因此正午不宜在草地久留。而其他三类下垫面, 白天大部分时间段都处于人体不舒适范围内, 不适合停留, 综合比较三类硬质下垫面, 沥青最不宜。热环境代表性下垫面能够在一定程度上反映城市用地, 对于进一步研究城市区域热环境具有一定的现实意义。

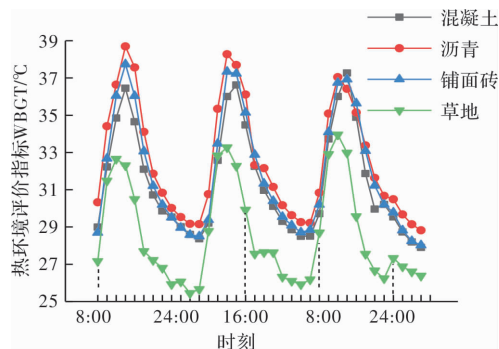


图9 不同下垫面室外微热环境影响

Fig. 9 Effect of outdoor micro-thermal environment on different underlying surfaces

## 5 结论

以西安为测点, 以夏季气候条件为背景, 选取 4 种典型城市下垫面类型(草地、沥青路面、混凝土路面、铺面砖路面)作为观测对象, 通过测试系统分析了不同下垫面的温度变化特征和气象参数、物理性质的影响关系, 对比研究了不同下垫面的微热环境影响, 主要结论如下:

(1) 不同下垫面地表上方空气温度、太阳辐射、相对湿度和风速共同构成的下垫面微气候环境存在差异。下垫面不同会产生差异明显的微气候。

(2) 材料热物理性质均会影响下垫面地表温度表现, 但影响程度不同。材料的热扩散率与下垫面地表温度的相关性最高, 影响最大, 而材料的反射率和比热容对于下垫面地表温度的影响不如热扩散率。下垫面地表温度日较差受到材料比热容影响最大, 随着比热容的降低, 下垫面地表温度的日较差越大。下垫面地表温度标准差受到材料热扩散率影响最大, 随着材料热扩散率的降低, 下垫面地表温度的标准差越高。

(3) 选用湿球黑球温度作为室外热环境评价标准。计算表明: 草地是四类下垫面中最符合人体热舒适的下垫面。而其他三类下垫面, 白天大部分时间段都处于人体不舒适范围内, 不适合停留, 综合比较三类硬质下垫面, 沥青最不宜。

## 参考文献 References

- [1] 闫晓逢. 临街建筑底部架空通风的设计方法[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.  
YAN Xiaofeng. Design method of overhead ventilation at the bottom of street buildings [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [2] 高国栋, 陆渝蓉. 中国地面辐射平衡与热量平衡[M].

- 北京:科学出版社,1982.
- GAO Guodong, LU Yurong. Ground radiation and heat balance in China [M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [3] 刘霞,王春林,景元书,等. 4种城市下垫面地表温度年变化特征及其模拟分析[J]. 热带气象学报, 2011, 27(3): 373-378.
- LIU Xia, WANG Chunlin, JING Yuanshu, et al. Annual variation characteristics and simulation analysis of surface temperature of four urban underlying surfaces[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2011, 27 (3): 373-378.
- [4] 林其标,林燕,赵维稚. 住宅人居环境设计[M]. 广州:华南理工大学出版社. 2000.
- LIN Qibiao, LIN Yan, ZHAO Weizhi. Residential environment design [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press. 2000.
- [5] 涂逢祥. 建筑节能[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.
- TU Fengxiang. Building energy conservation [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2001.
- [6] 刑永杰,沈天行,刘芳. 太阳辐射下不同地表覆盖物的热反应及对城市热环境的影响[J]. 太阳能学报, 2002, 23(6): 717. 719.
- XING Yongjie, SHEN Tianhang, LIU Fang. Thermal response of different surface coverings under solar radiation and its impact on urban thermal environment [J]. Journal of Solar Energy, 2002, 23 (6): 717. 719.
- [7] GAITANI N. On the use of bioclimatic architecture principles in order to improvethermal comfort conditions in outdoor spaces[J]. Building and Environment, 2007(1): 317-324.
- [8] 李伟强,周孝清. 广州市单体建筑室外微气候热环境研究[J]. 建筑科学, 2009, 25(6): 58-60.
- LI Weiqiang, ZHOU Xiaoqing. Study on outdoor microclimate thermal environment of single building in Guangzhou [J]. Architectural Science, 2009, 25 (6): 58-60.
- [9] 张磊,孟庆林. 湿热地区大学校园夏季热环境测试与分析[J]. 建筑科学, 2011, 27(2): 48-51.
- ZHANG Lei, MENG Qinglin. Measurement and analysis of summer thermal environment of university campus in hot and humid area [J]. Architectural Science, 2011, 27 (2): 48-51.
- [10] 李英,周杨娜. 北京三里屯地区城市下垫面热环境研究[J]. 低温建筑设计, 2010, 32(7): 10-112.
- LI Ying, ZHOU Yangna. Study on thermal environment of urban underlay in Sanlitun area, Beijing [J]. Low Temperature Architectural Design, 2010, 32 (7): 10-112.
- [11] 杨雅君,邹振东,赵文利,等. 6种城市下垫面热环境效应对比研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2017, 53(5): 881-889.
- YANG Yajun, ZOU Zhendong, ZHAO Wenli, et al. Comparative study on thermal environmental effects of six urban underlying surfaces [J]. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 2017, 53 (5): 881-889.
- [12] 李娟娟,周孝清. 不同下垫面温度分布的对比观测与分析[J]. 建筑科学, 2017(10): 35-39, 55.
- LI Juanjuan, ZHOU Xiaoqing. Comparative observation and analysis of temperature distribution of different underlying surfaces [J]. Architectural Science, 2017 (10): 35-39, 55.
- [13] 董靓,陈启高. 户外热环境质量评价[J]. 环境科学研究. 1995, 8(6): 42-44.
- DONG Liang, CHEN Qigao. Evaluation of outdoor thermal environment quality [J]. Environmental Science Research. 1995, 8 (6): 42-44.
- [14] 唐鸣放,钱炜. 太阳辐射影响下的城市户外热环境评价指标[J]. 太阳能学报, 2003, 24(1): 106-110.
- TANG Mingfang, QIAN Wei. Evaluation index of urban outdoor thermal environment under the influence of solar radiation [J]. Journal of Solar Energy, 2003, 24 (1): 106-110.
- [15] 于付涛,狄育慧. 城市户外热环境指标评价[J]. 洁净与空调技术, 2011(4): 30-34.
- YU Futao, DI Yuhui. Evaluation of urban outdoor thermal environment index [J]. Clean and Air Conditioning Technology, 2011(4): 30-34.
- [16] 张磊,孟庆林,赵立华,等. 室外热环境评价指标湿球黑球温度简化计算模型[J]. 热带建筑. 2007 (6): 16-20.
- ZHANG Lei, MENG Qinglin, ZHAO Lihua, et al. Simplified calculation model of outdoor thermal environment evaluation index wet sphere black sphere temperature [J]. Tropical Architecture. 2007 (6): 16-20.
- [17] 张磊,孟庆林,赵立华,等. 室外热环境评价指标湿球黑球温度简化计算方法[J]. 重庆建筑大学学报. 2008, 30(5): 108-117.
- ZHANG Lei, MENG Qinglin, ZHAO Lihua, et al. Simplified calculation method of outdoor thermal environment evaluation index wet sphere black sphere temperature [J]. Journal of Chongqing University of Architecture. 2008, 30 (5): 108-117.
- [18] 张磊,孟庆林,赵立华. 室外热环境评价指标湿球黑球温度简化计算模型[C]//2007 全国建筑环境与建筑节能学术会议论文集. 重庆:重庆建筑大学 2007: 11-18.
- ZHANG Lei, MENG Qinglin, ZHAO Lihua. Simplified calculation model of outdoor thermal environment evaluation index wet bulb black bulb temperature [C]//2007 proceedings of National Conference on building environment and building energy conservation. Chongqing: Chongqing University of Architecture 2007: 11-18.