

# 海绵住宅区LCZ关键要素实地测量与特性分析

宋余潇, 丁洁, 王锡雯, 秦赛雪, 宋金蕾, 王上\*

烟台大学土木工程学院, 山东 烟台

收稿日期: 2023年10月7日; 录用日期: 2023年11月8日; 发布日期: 2023年11月21日

## 摘要

局地气候区(Local Climate Zone, LCZ)理论是综合考虑空间几何要素和下垫面热物理特性对室外热环境的综合作用的城市热环境区域分类方法, 广泛应用于城市热岛(Urban Heat Island, UHI)等研究。海绵城市工程正在全国各地进行, 海绵住宅区的下垫面发生较为明显的变化, 主要表现为人工渗透性铺装和下沉式绿地等措施的广泛应用, 改造后LCZ关键要素发生较为显著的变化。本研究以青岛李沧区海绵城市试点区为例, 通过实地调研、卫星影像光谱信息等途径获得海绵住宅区的LCZ空间特性指标, 量化分析各海绵住宅区LCZ空间特性参数的分布规律, 同时明确海绵城市工程中采用的各种人工渗透性下垫面材料, 对其实施功能进行分类总结, 将其热物理特性和结构参数进行归纳, 并据此推测海绵住宅区局地气候趋势: 气温日变化与年变化幅度减小, 整体降水减少, 湿度保持稳定, 风力减小, UHI效应明显减弱。本研究可为海绵城市局地气候发展演变过程和海绵城市热环境特性研究提供基础信息。

## 关键词

LCZ理论, 海绵住宅区, 空间特性参数, 局地气候, 城市规划

# A Field Study on the LCZ Properties of Sponge Communities

Yuxiao Song, Jie Ding, Xiwen Wang, Saixue Qin, Jinlei Song, Shang Wang\*

Department of Civil Engineering, Yantai University, Yantai Shandong

Received: Oct. 7<sup>th</sup>, 2023; accepted: Nov. 8<sup>th</sup>, 2023; published: Nov. 21<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

The local Climate Zone (LCZ) scheme is an urban spatial classification method that considers the comprehensive effects of spatial geometric elements and thermophysical properties of the under-

\*通讯作者。

文章引用: 宋余潇, 丁洁, 王锡雯, 秦赛雪, 宋金蕾, 王上. 海绵住宅区 LCZ 关键要素实地测量与特性分析[J]. 可持续发展, 2023, 13(6): 1892-1900. DOI: 10.12677/sd.2023.136217

lying surfaces on the outdoor thermal environment. It is widely used in studying Urban Heat Island (UHI) phenomena. The Sponge City (SPC) project has been being carried out all over China since 2012. Sponge communities have undergone apparent changes, mainly manifested in the widespread application of permeable pavement and green infrastructure, which leads to changes in the LCZ properties. This study takes the SPC pilot area in Licang District, Qingdao as an example. We obtained the LCZ characteristic parameters of sponge communities through field surveys and satellite images. The LCZ parameters are summarized, and accordingly, the local climate trend of the sponge communities is inferred. SPC construction may decrease local air temperature and overall precipitation, which can somewhat alleviate the UHI effect. Moreover, we classify and summarize various artificial permeable materials used in the sponge city, including their thermo-physical and structural properties. This study can provide basic information on the thermal environment characteristics of sponge communities, facilitating the record of local climate development with the evolution of sponge cities.

## Keywords

Local Climate Zone, Spongy Community, Spatial Characteristic Parameters, Local Climates, Urban Planning

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

城市化进程不断推进, 导致大量的建筑和不透水面占比逐渐攀升, 同时工业、人口等热源的激增, 导致城市热环境温度不断攀升, 影响生态环境及人居环境质量[1]。传统UHI强度定义采用“城乡二分法”, 无法准确描述对城市内部异构组成与UHI的关系。对此, Stewart与Oke提出了一套城市LCZ体系[2]。LCZ是一套用于城市气温研究的客观的局地热气候分类方法。根据地表覆盖、地表结构、地表材质和人类活动等方面的差异, LCZ体系制定了10个量化指标, 并利用这些指标将城市下垫面划分为17种基本类型, 包括10种建筑类型(LCZ 1~10)和7种自然类型(LCZ A~G)。LCZ体系建议用不同类型LCZ间的温差, 定义并计算UHI强度, 从而奠定了UHI强度区域乃至全球尺度准确对比的理论基础[3]。目前, 国内外学者的研究主要集中在UHI时空特征和变化[4]、驱动机制[5]和缓解策略[6]等方面。研究表明, 城市高温区主要集中在建设用地, 而植被和水体则有明显的“冷岛”效应[7], 这说明下垫面性质改变是造成UHI效应的主要原因。而海绵城市建设主要通过铺设透水路面、建造下沉式绿地等措施来蓄积雨水, 加强蒸腾和蒸发作用, 从而缓解UHI效应。

目前, 海绵城市与UHI效应的关联研究集中在定性的策略建议和缓解效果评估等方面, 对海绵城市建设的热环境改善效应及对海绵城市人工渗透性下垫面类型判断的相关研究相对不足, UHI的缓解仍缺乏有效的理论指导。为此, 探究海绵城市下垫面建设与相对UHI强度的关系, 揭示海绵城市人工渗透性下垫面对UHI的影响, 显得十分必要。本研究将从城市热环境的角度出发, 对海绵城市人工渗透性下垫面材料的特性进行调研并建立其信息库, 以完善LCZ理论, 使“海绵城市”在热环境研究中的定义更加客观明确, 并基于调研结果与所获得的信息库数据, 对海绵住宅区气候变化趋势进行推测, 这将有助于业内交流和形成客观系统化的研究体系, 促进海绵城市跨学科设计与运用。

本文以青岛李沧区的海绵住宅区为例, 进行两方面的研究。首先, 调研获得海绵住宅区的一些物理

特性：小区内街谷形态，包括纵横比、平均建筑高度、地势粗糙度分类、建筑表面比等；不同区域天空视域因子；改造过的下垫面材料的表面反射率。其次，通过实地调研，确认不同种类的人工渗透性材料在海绵住宅区中实际应用区域及其发挥的功能。通过查阅相关资料，对海绵城市下垫面材料的热物理参数和结构参数进行整理与补充，并根据以上两点，对海绵住宅区气候趋势进行推测。

## 2. 研究方法

### 2.1. 研究区域

李沧区是青岛市的中心城区，位于北纬  $36^{\circ}15'$ ，东经  $120^{\circ}43'$  [8]，地处北温带湿润气候区域，主要呈海洋性气候特征，降雨充沛，对河流径流量产生了直接性的影响。青岛市海绵城市建设试点片区位于李沧区中西部，根据青岛市海绵城市建设试点方案，选择改造效果较好的共 10 个点位作为研究区域。

### 2.2. 研究方法

以街区作为基本单元形态，对控制样地均采用圆形调查方法，利用无人机与卫星地图后期绘制街区各个占比形态，街区形态为界定范围，囊括住宅区以及周边环境作为一个研究点位，半径范围根据所研究住宅区范围大小而定，需满足街区气候区、下垫面研究等的最小范围(半径  $\geq 200$  m)，参照现存的 LCZ 理论选取拟定范围的边界。通过实地调查该地的下垫面的物理特征、不同下垫面的范围以及透水性能材料的差异，利用无人机和测距仪进行高度和街道间距的测量并辅助以卫星地图，完成对李沧区关键要素的实地测量的特性分析。

### 2.3. LCZ 常规分类参数

本文现场测量的 LCZ 分类参数包括天空视域因子(SVF)、纵横比(H/W)、平均建筑高度(ZH)、地势粗糙度(T)、建筑表面比( $\lambda_b$ )、非渗透表面比( $\lambda_i$ )、渗透表面比( $\lambda_p$ )。上述参数测量方法参照 Oke 等人建立的 LCZ 分类系统参数定义[2]，SVF 通过鱼眼照片法现场实测获得，其他参数通过卫星地图配合各调研点位的现场实测计算获得。

### 2.4. 海绵城市 LCZ 补充分类参数

本研究在对海绵试点区实地调研的基础上，提出了描述海绵城市下垫面渗透特性的新定义参数，人工渗透性表面比( $\lambda_a$ )。本研究的人工渗透性表面是指：透水砖、透水混凝土等，其特点可归纳为渗透性显著大于常规道路材料的硬化地面。

通过卫星地图和现场调研研究范围内人工渗透性表面面积与调研街区总占地面积之比。

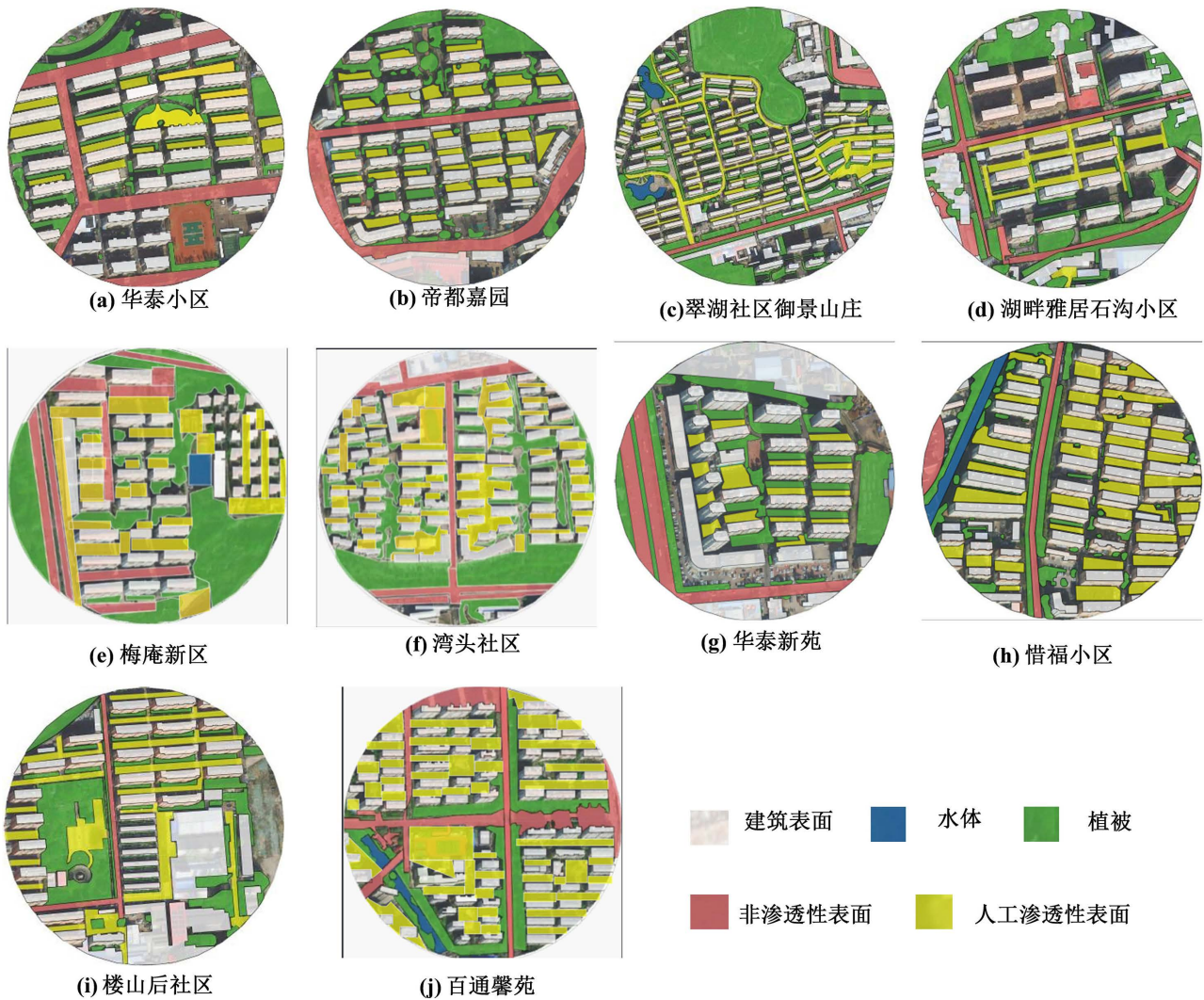
## 3. 结果与讨论

### 3.1. 海绵城市住宅区 LCZ 关键要素特征分析

将无人机拍摄(辅之以卫星地图)的十个点位范围内按特性不同，划分为不同类型并用 LCZ 详图进行测绘，更直观的展示各下垫面以及改造后人工渗透下垫面的占比情况，实现数据可视化。为追求不同下垫面精确性，实地调研后进一步绘制 LCZ 详图。

图 1 是基于街区划分的局部气候区绘制的 LCZ 详图，海绵住宅区地表多为可渗透表面与硬化表面，内部主干道多为非渗透路面。部分住宅区有大量植被体，多为社区花园廊道以及建筑附近绿化带。主干道道路两侧，普遍呈低矮的植被和草地，少有绿化面积广而建筑稀疏的情况，如图 i、c、e；部分小区存在水体，如图 j、e 以及 c，水体、植被和建筑面积占比对区域特征参数有着显著的影响，故本次研究所

涉及的区域均有代表性, 这使下垫面区域特征参数的归纳与总结更加严谨。由于楼层高度参差, 植被、水体和沙地等特性的差异与其分布位置不同, 以及社区特殊的人文环境, 使其形成了独特的空间特性参数指标, 以现有的十个建成环境型(LCZ 1~10)和七个自然环境型(LCZ A~G)无法准确概括海绵城市改造后的地域的形态类型, 并且李沧区对原 LCZ 区域进行渗透性改造, 使该地区参数性质发生改变, 通过 SVF、H/W、Hz、粗糙度、建筑表面比、非渗透表面比、渗透表面比、人工渗透表面比等进行综合测量与分析, 获得更准确的区域下垫面特征与空间分布特点。



**Figure 1.** Underlying surface structure of sponge residential area  
**图 1.** 海绵住宅区下垫面结构

根据实验数据, 该地建筑类型以开敞中层建筑为主, 建筑密度较低且地面覆盖 15% 以上的自然可渗透性地面和 13% 以上的人工可渗透性地面。这与调查区域为对老旧小区进行海绵城市改造后的情况是相符的。这些小区楼层大部分为 7 层, 楼间距较大, 有较大的改造空间。




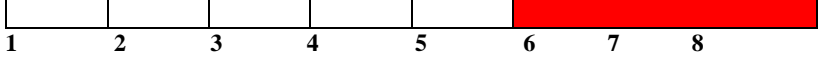
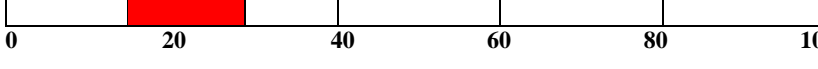
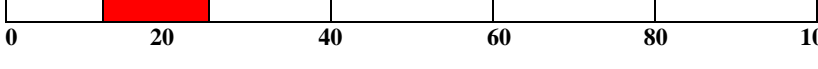
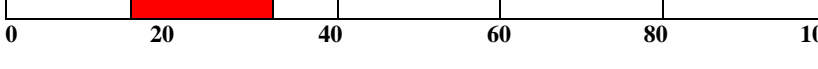
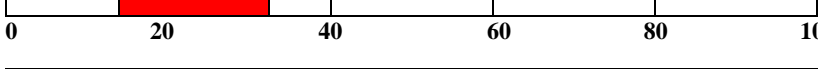
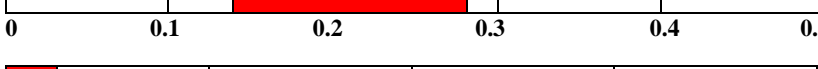
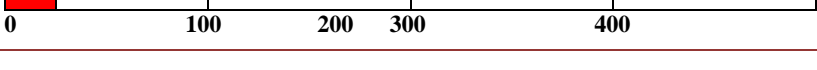
通过实地调研我们发现海绵住宅区的 LCZ 参数具有一定共性: 非渗透表面以大理石地面和沥青路面为主, 渗透表面以树木等绿化和水体为主, 人工渗透表面以透水砖为主。大部分改造小区以增加绿化和

铺设透水砖为主要改造方式。

通过实验数据计算分析，得到如下海绵住宅区 LCZ 特征参数：

**Table 1.** Definition parameters of sponge residential area LCZ

**表 1.** 海绵住宅区 LCZ 定义参数

区域特征参数	
天空角系数 $\psi_{sky}$ 0.32~0.58	
纵横比 $H/W$ 0.7~1.7	
平均建筑高度 $Z_H$ 11.3~22.8	
地势粗糙度分类 $T$ 6~8	
建筑表面比 $\lambda_b$ 15.2%~29.6%	
非渗透表面比 $\lambda_i$ 12.2%~25.5%	
渗透表面比 $\lambda_v$ 16.9%~35.7%	
人工渗透表面比 $\lambda_a$ 13.9%~34.9%	
表面反射率 $\alpha$ 0.142~0.286	
人为热强度 $Q_F$ <25 W/m <sup>2</sup>	

由表 1 可知，建筑材料以混凝土、钢筋、石头为主，绿地树木较多，地面为可透水性地表，日温差较小。LCZ2、4、5 的天空角系数分别为 0.3~0.6、0.5~0.7、0.5~0.8；纵横比分别为 0.75~2、0.75~1.25、0.3~0.7；平均建筑高度分别为 10~25 m、大于 25 m、10~25 m；地势粗糙度分类分别为 6~7、7~8、5~6；建筑表面比分别为 40%~70%、20%~40%、20%~40%；非渗透表面比分别为 30%~50%、30%~40%、30%~50%；渗透表面比分别为小于 20%、30%~40%、20%~40%。

根据实验数据对比 LCZ 参数中天空角系数和街谷空间形态指标范围可知，调研区域总体上所属 LCZ2、5，局部调研区域的高层区属于 LCZ4。但是实验数据与 LCZ2、4、5 类型中的部分参考范围[2]有差异。海绵住宅区与常规住宅区相比最显著的变化是渗透性表面、相对渗透性表面占比明显增大，绝对非渗透性表面占比显著减少。调研区域中的非渗透表面比低于 30%，渗透表面比和人工渗透表面比之和大于 50%。这两项参数为海绵城市改造的影响对象之二。其原因可以归结于海绵城市改造中增加植被面积、增设水体、控制建筑群密度、渗透性铺装替代非渗透性铺装。此外，在所调研区域内建筑表面比介于 15~30% 左右，调研区域建筑表面明显小于 LCZ2 的参考范围，其原因为：海绵住宅区中有大量空地规划为广场、水体和绿地等空旷地带，减少建筑物面积在调研区域的占比。小区中渗透性表面比增加，其吸收与排除降水的能力提高，水分蒸发量减少，吸收热量也会减少，使得温度变化幅度降低，缓解热岛效应。

### 3.2. 人工渗透性表面材料特征参数数据集

渗透性铺装是指一种材料的表面能够通过自然渗透的方式使水进入地下，这种材料包括透水砖、植草砖、透水塑胶等。这些铺装的主要作用是防止城市的地表面积水。透水砖一般用于城市的人行道。透水砖的设计可以让水流经过砖缝和表面的孔洞，从而使雨水渗透到地下。植草砖适用于停车区域，还可以美化停车场。植草砖的表面采用特殊设计，一般是由石块、沙子和其他物质混合而成，存在细小的空隙，可以让水流过去，而植草砖边角还可以种植花草。透水塑胶适用于健步道、公园、广场等区域，其表面设计可以促进水流畅通，避免水流滞留，在增强路面的耐磨性和耐久性的同时，也能保护路面的良好状态。因此，渗透性铺装在城市道路、绿地、停车场等区域的使用面积较大。通过阅读文献，实验测量，搜集资料，走访调查和联系部分材料生产厂家，得到了海绵城市改造中使用的材料的密度、防滑性、孔隙率等相关参数。总结了九种海绵城市人工渗透性下垫面材料的特性，各材料具体特征见表 2。

**Table 2.** Sponge city artificial permeability underlying surface material characteristics

**表 2.** 海绵城市人工渗透性下垫面材料特性表

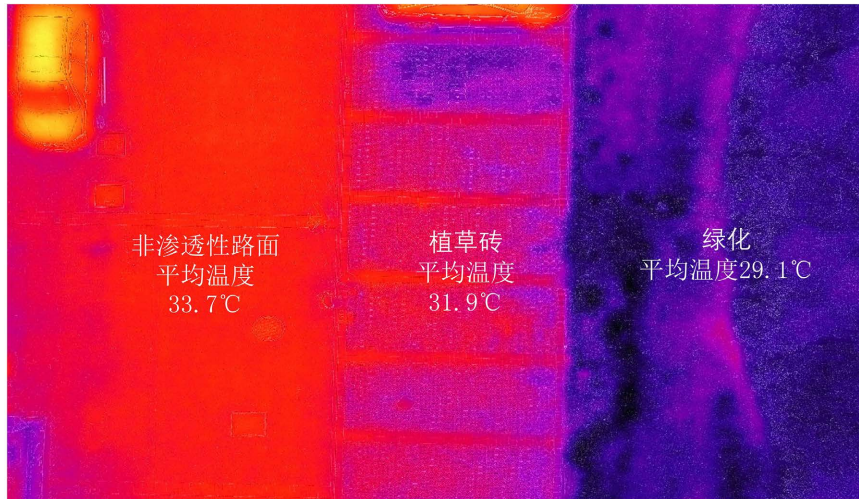
	密度	孔隙率	弹性模量	泊松比	透水性	吸水性	耐磨性	抗冻性	抗压强度等级	抗压强度抗折强度等级		抗折强度		防滑性
					透水速率 $\geq$	吸水率 $\leq$	磨坑长度 $\leq$	强度损失 $\leq$	平均值 $\geq$	单块最小值 $\geq$	平均值 $\geq$	单块最小值 $\geq$		
	kg/m <sup>3</sup>	%	Gpa		ml/(min·cm <sup>3</sup> )	%	mm	%	MPa	MPa	MPa	MPa	BPN	
透水混凝土	1700~2200 [9]	15~25 [10]	15~34 [11]	0.23~0.27 [12]	0.5~0.86 [10]		35 [10]	20 [10]	C20~C25 [10]	20.0~25.0 [10]			50~60 [10]	
胶粘石透水地坪		15~25 [13]	2~5 [14]	0.23~0.32 [14]	1.116~1.872 [15]				C20~C25 [15]					
陶瓷透水砖	1650~1800 [16]	20~30 [10]			1.0 [10]	35 [10]		20 [10]	C35.0 [10]	35 [10]				
透水砖									C30.0 C35.0 C40.0 C50.0 C60.0 [18]	30.0 35.0 40.0 50.0 60.0 [18]			60~85 [10]	
非陶瓷透水砖	2000 [17]				1.5 [18]	35 [18]		20 [18]		3.5 [10]				
植草砖						8.0 (A) 10.0 (B) 12.0 (C) [19]	28.0 (A) 32.0 (B) 35.0 (C) [19]	20 [19]	MU 5.0 MU 7.5 MU 10.0 MU 15.0 MU 20.0 MU 25.0 MU 30.0 [19]	5.0 7.5 10.0 15.0 20.0 25.0 30.0 [19]	4.0 6.0 8.0 12.0 16.0 20.0 25.0 [19]	3.0 4.0 5.0 6.0 8.0 10.0 [18]	2.4 3.2 4.0 4.8 6.4 8.0 [18]	$\geq 70$ [18]
透水沥青		13~25 [20]			0.1 [10]		35 [10]		C20~C25 [10]	20.0~25.0 [10]			50~60 [10]	

由于各种海绵城市人工渗透性下垫面材料的生产厂家繁多，加之不同生产厂家生产技术、原料配比等的差异，并且相关资料较少，对数据库的补充带来了很大的限制，导致当前部分数据还存在缺失。

### 3.3. 海绵住宅区局地气候趋势分析

表 2 中，各种材料的力学参数对于气候的影响较小。而其孔隙率、透水性、保水性及吸水性会对气候产生一定的影响。材料孔隙率高，透水速率快，其透水性就好。如果突发强降雨天气，对比于传统的非渗透性材料，这些新型渗透材料会将雨水快速排除，因此，地表积水将会减少，相应的积水蒸发消耗的热量也会减少，这样会使得降雨前后的气温变化幅度降低。而且被排除的降水会渗透到地面以下，当天气放晴，气温升高，地面的温度在太阳辐射的作用下随之升高，渗透到地面之下的水分会在温度及毛细现象的作用下不断透过渗透性材料的孔隙蒸发，在这个过程中，蒸发会不断地吸收渗透性材料表面的

热量,使得地面温度保持在一个较低水平上,这是比较于非渗透性材料而言。图 2 为无人机拍摄两个调研区域内的某点的热成像图,如所示,图中颜色亮度越高,其对应的热辐射越强。图 2 中为调研区域 j 某调研点位热成像图,由图 2 可知,植草砖的热辐射要低于非渗透性路面的热辐射,通过测量,植草砖区域平均温度为 31.9℃,非渗透性路面区域平均温度为 33.7℃,故而植草砖的表面温度要低于非渗透性路面,可以降低 UHI 效应。同时,持续的蒸发也会相应的提高空气湿度,给人以更加舒适的体感。此外,某些材料具有较高的粗糙度,例如植草砖,相比于传统水泥路面,植草砖能够在一定程度上削减风力,降低风速,其内部的青草也可以起到保持水土的作用,由此可以达到减轻沙尘天气效果。



(图中自左向右依次为非渗透性路面,植草砖和植被)

**Figure 2.** Thermal imaging map of a certain survey point in survey area j  
**图 2.** 调研区域 j 某调研点位点热成像图

海绵住宅区会对局地气候产生一定影响,产生显著变化的气候因素是气温。绿化改造面积增大,使到达地面的太阳辐射量减少,降低气温,并且渗透性铺装可以将降水储蓄,延长蒸发时间,保持比较稳定的空气湿度,也可以达到降温的效果。总体来看,相较于未改造之前,改造后的海绵住宅区内部气温年变化幅度降低,冬暖夏凉,同时说明海绵住宅区对于 UHI 效应一定的缓解作用。另一方面,海绵住宅区对于降水也会产生影响。植被覆盖率提高,其对水的吸收与截留作用增加,渗透性铺装的使用提高了降水的下渗速度,并且植被与渗透性铺装粗糙度较大,降低风力,此外,海绵住宅区又能够降低气温,在这些影响的综合作用下,降水的频率降低。此次调研的海绵住宅区面积仅仅占据研究区域的 5%左右,海绵住宅区并没有完全推广。由此推测,如果住宅区全部实现海绵建设与改造,研究区域整体的热岛效应会显著缓解,气温日变化与年变化幅度减小,整体降水减少,湿度保持稳定,风力减小。

#### 4. 结论

海绵城市的建设是将自然环境和人工设施相结合,遵循生态优先的原则,改变城市大部分的水环境,包括地表径流、下渗、地下径流等方面,而此项目是研究海绵城市的建设对城市局部热环境的影响,包括城市的地表温度、空气温度和热强度等方面,是将海绵城市的水环境与热环境结合,形成了不同学科之间的交叉,并进行结合探究。

本文通过实地调研以及数据测定,对海绵住宅区下垫面物理性质进行归纳总结,并对海绵城市下垫面材料的相关参数进行搜集、汇总,建立海绵城市下垫面材料数据库。在海绵住宅区下垫面物理性质与

下垫面材料参数的基础上, 我们推测海绵住宅区气候变化趋势为气温变化幅度降低, 降水量降低, 湿度保持稳定, 对 UHI 效应有一定的缓解作用。

## 5. 局限与展望

本文仅对夏季的青岛李沧区改造后的部分区域进行了 LCZ 参数测量, 没有选择其他区域进行对比参照, 也没有对同一区域进行多次且不同时间的调研, 对于数据分析存在一定局限性。调研过程中未进行对 LCZ 中热导纳参数的测定, LCZ 参数缺乏相关数据。部分下垫面材料参数可通过实验测得, 但由于没有下垫面材料样品, 无法测得相关数据, 导致下垫面材料数据库部分数据缺失。搜集下垫面材料的相关参数时, 各种资料内容参差不齐, 且不同生产厂家对同一种材料给出的参数也不同, 虽然经过筛选, 但还是存在一定的局限性。

在本文的基础上, 研究组的后续研究考虑在不同年限的各个时间段到多个已经过海绵城市改造的区域进行调研和数据的采集, 消除地域及时间的影响, 使得到的数据更可靠, 得出的结论更接近于客观事实, 并对海绵城市改造后的 UHI 强度趋势进行记录。尤其是设计测量实地热导纳的方法, 并对其进行核验, 以补充海绵城市 LCZ 参数群。其他缺失的结构参数和热物理参数可以进一步与各个生产海绵城市下垫面材料的厂商取得联系, 由厂家提供样品, 完成相关参数的测定, 并将结果反馈到厂家, 实现双赢的目标。此外, 在调研过程中, 我们发现已经过海绵城市改造的小区、社区, 其基础设施都有不同程度的损坏, 包括透水砖、胶黏石透水地坪、植草砖等等, 后续研究组将对渗透性下垫面材料的耐久性开展追踪调查, 并试图提出增强大空隙下垫面材料牢固度的可行方法。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(52008362); 烟台大学大学生创新创业训练计划(X202211066100)。

## 参考文献

- [1] 陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 等. 城市空间格局与热环境响应关系: 以合肥市为例[J]. 环境科学, 2023, 44(6): 3043-3053.
- [2] Stewart, I.D. and Oke, T.R. (2012) Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **93**, 1879-1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- [3] 江斯达, 占文凤, 杨俊, 等. 局地气候分区框架下城市热岛时空分异特征研究进展[J]. 地理学报, 2020, 75(9): 1860-1878.
- [4] 彭文甫, 周介铭, 罗怀良, 等. 城市土地利用与地面热效应时空变化特征的关系——以成都市为例[J]. 自然资源学报, 2011, 26(10): 1738-1749.
- [5] 贾宝全, 仇宽彪. 北京市平原百万亩大造林工程降温效应及其价值的遥感分析[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 726-735.
- [6] 牟雪洁, 赵昕奕. 珠三角地区土地利用类型与地表温度关系研究[C]//中国地理学会. 中国地理学会 2011 年学术年会论文集. 北京: 出版社不详, 2011: 211-211.
- [7] 林林. 城市下垫面变化对城市热环境演化的数学模型研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [8] 学网查询. 山东省青岛市经纬度查询——经纬度定位转换[Z]. <https://jingweidu.xuenb.com/>
- [9] 中国城市科学研究会. 中国绿色建筑[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [10] 梁义婕, 任霞, 李莉. 海绵城市建设——透水铺装材料研究应用现状[J]. 四川建筑, 2022, 42(2): 300-302.
- [11] 付培江. 透水混凝土强度相关性试验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北方工业大学, 2009.
- [12] Chandrappa, A.K. and Biligiri, K.P. (2016) Influence of Mix Parameters on Pore Properties and Modulus of Pervious Concrete: An Application of Ultrasonic Pulse Velocity. *Materials and Structures*, **49**, 5255-5271. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0858-9>



- [13] 蕴泽矿产. 透水胶粘石[Z]. 2021-08-05. <https://www.miningvalleys.cn/toushuijiaonianshi/>
- [14] 豆丁网. 各种岩石及土的弹性模量及泊松比[Z]. 2013-11-29. <https://www.docin.com/p-732542963.html>
- [15] 东莞市水坪面地坪科技. 什么是透水胶粘石地坪[Z]. 2021-07-26. <http://www.spmddpq.com/news/311.html>
- [16] 龙驹陶瓷. 陶瓷透水砖[Z]. <http://www.longju.com.cn/tsz.htm>
- [17] 王海燕, 刘华章. 混凝土透水砖的配合比设计、生产与施工[J]. 新型建筑材料, 2007, 34(7): 27-29.
- [18] 秦升益, 胡云林, 等. JG/T 376-2012 沙基透水砖[S]. 行业标准, 2012.
- [19] 吴广声, 路晓斌, 等. NY/T 1253-2006 植草砖[S]. 行业标准, 2006.
- [20] 沙爱民, 裴建中, 等. CJJ/T 190-2012 透水沥青路面技术规程[S]. 行业标准, 2012.