引文格式：邹世锋,顾铭媛,谭文专,等. 多维空间下长沙市热环境影响因素的研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21(12): 77-82. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.12.018

多维空间下长沙市热环境影响因素的研究

邹世锋[1]，顾铭媛[2*]，谭文专[1]，熊忠招[1]，葛孟钰[1]
（1. 湖北省国土测绘院，湖北 武汉 430019；2. 湖北商贸学院经济学院，湖北 武汉 430079）

摘　要：以长沙为研究区域，综合多源遥感数据，引入不同维度空间内的多种参数，从生态景观格局、城市多维空间发展的角度探索了城市热环境的主要影响因素，并提出了相关的建议。结果表明，长沙城市扩张迅速，热环境在多维空间内受多种因素影响，与之相关性最高的是建筑物的相关参数。城市体积的增加、建筑物破碎化下降及裸土地破碎化上升是影响城市热环境的关键参数。因此，控制城市扩张速度，避免建筑大规模集中布局，适当增加绿地、水体斑块，是缓解长沙热环境的重要举措。本研究可为长沙市改善城市热环境提供决策参考，也可为其他自然禀赋相似的城市提供热环境影响分析的案例借鉴。

关键词：遥感；热环境；景观格局；多维空间；RDA 分析
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）12-0077-06

Research on Influencing Factors of Thermal Environment in Changsha Under Multi-dimensional Space

ZOU Shifeng[1], GU Mingyuan[2], TAN Wenzhuan[1], XIONG Zhongzhao[1], GE Mengyu[1]
(1. Hubei Institute of Land Surveying and Mapping, Wuhan 430019, China;
2. School of Economics, Hubei Business College, Wuhan 430079, China)

Abstract: Taking Changsha City as a case study, we integrated multi-source remote sensing data, introduced various parameters in different dimensional spaces, explored the main influencing factors of urban thermal environment from the perspective of ecological landscape pattern and urban multi-dimensional space development, and finally put forward suggestions. The results showed that during the study period, Changsha City expanded rapidly, and the thermal environment was affected by several surface parameters in multi-dimensional space among which the parameters of buildings were the most relevant. The increase of urban volume, the decrease of building fragmentation and the increase of bare land fragmentation were the key parameters affecting the urban thermal environment. Therefore, controlling the speed of urban expansion, avoiding large-scale centralized layout of buildings, and appropriately increasing green spaces and water patches were important measures to alleviate the thermal environment in Changsha. The result can provide a decision-making reference for Changsha to improve the urban thermal environment, and provide a case reference for thermal environment impact analysis in other cities with similar natural conditions.

Key words: remote sensing, thermal environment, landscape pattern, multi-dimensional space, RDA analysis

随着城市的发展，城市空间不仅在二维平面内得到扩张，城市垂直伸展的趋势也越来越明显[1-2]。因此，对热岛效应的影响机制进行分析时不仅要考虑传统的二维景观指标，还要考虑三维信息。

本研究针对多维空间下城市热环境影响因素精细化探索的需求，以热岛效应显著、城市多维空间发展明显的长沙市为研究区域，在多维空间内探索分析城市热环境影响机理，提取关键参数，为改善长沙市城市热环境提出有针对性的意见。

1　数据和方法

1.1　研究区域概况

长沙是湖南的省会，是长江中游地区重要的中心城市。长沙属亚热带季风气候，夏季高温、暑热期长，降水较少，热岛现象明显。进入 21 世纪以来，长沙市发展迅速，除二维平面空间外，城市逐渐纵向延伸，城市紧凑度、集约化程度逐渐提升。

本文研究区域总面积约为 3 905 km^2，包括芙蓉

收稿日期：2023-06-14。
第一作者简介：邹世锋（1978—），高级工程师，研究方向为摄影测量与遥感、工程测绘、测绘地理信息、不动产测绘等，E-mail：865913691@qq.com。
通信作者：顾铭媛（1995—），硕士，研究方向为统计学、金融工程和大数据金融、证券投资分析，E-mail：1174934028@qq.com。

区、开福区、天心区、望城区、雨花区、岳麓区和长沙县，除长沙县东北部及岳麓区西南部有小片山区外，大部分以平原和丘陵为主。

1.2 数据预处理

本研究所涉及的数据主要为Landsat数据（用来反演地表温度、分类、计算景观指数）、Google Earth高分辨率影像（用来辅助选取样本）、气象站点实测温度数据（用来验证温度反演结果）、DSM数据和JZM数据（用来计算城市体积及反演坡度和高程结果）。

如表1所示，本研究选用2002、2008、2013、2019年Landsat影像，选择热岛效应明显的夏末秋初季节，同时需要前一周没有出现降雨，当日天气晴朗无云。在ENVI的FLAASH模块下对可见光波段进行大气校正，经过镶嵌、裁剪，得到待分类影像。

表1 Landsat数据基本信息

类型	分辨率/m	轨道号	获取时间	数据来源
Landsat 5	多光谱30，热红外120	123/40；123/41	2002年9月3日上午10点31分 2008年9月19日上午10点41分	USGS
Landsat 8	多光谱30，热红外100		2013年9月17日上午10点59分 2019年8月17日上午10点57分	

结合以往研究及长沙市地物特征的实际[4–5]，本研究确定了5种地物类别：耕地、林地、建筑物、水体和裸土地，如表2所示。结合Google Earth高分辨率影像选取样本，采用支持向量机（SVM）进行监督分类，总体精度均大于90%，Kappa系数大于0.86，符合要求。以上步骤均在ENVI5.3的支持下进行。

表2 遥感影像解译地类及景观编号对应表

地物类别	编号	实际包含地类
耕地	1	旱地、菜地、水浇地
林地	2	亚热带常绿阔叶林
建筑物	3	居民点建设用地、区域公用设施用地、区域交通设施用地以及其他建设用地等
水体	4	湘江、城市内河、坑塘等
裸土地	5	表层为土质且基本没有被植被覆盖的土地

本研究选用辐射传输方程法（RTE）来反演地表温度。辐射传输方程法基本原理是估算大气对地表热辐射的影响，再从卫星传感器所得的总辐射量中减去大气对地表热辐射的影响，得到热辐射强度，进而较为精确地获得地表温度[6–7]。

景观指数是能够反映景观结构组成和空间配置特征的定量指标。如表3所示，本研究在景观破碎化程度、复杂度、聚集度、多样性4个方面，选择了8个指标进行研究。

对于斑块类型景观指数，按照地物类别编号使用后缀加以区分。如，耕地的景观要素面积占比表示为“PLAND1”，建筑物的斑块密度表示为“PD3”，以此类推。

景观指标对空间尺度十分敏感，因此移动窗口大小的选取显得尤为重要。如果窗口过大，会导致细节丢失；如果窗口过小，曲线波动太大不利于分析[8–9]。本研究以2019年为例，选择PD、LSI、AI、SHDI等参数，采用8邻域准则，获得在8个窗口大小下景观指数的空间分布图。以五一广场为中心，计算出连续的方形区域内各项景观指数的均值，这样既避免了出现异常值，又保证了采样点在影像上的连续性，便于准确的选择出最优窗口。

表3 景观指数的选择

Aspects	景观指数	缩写	类别
	景观要素面积占比	PLAND	类型
破碎化程度	斑块密度	PD	类型/景观
	最大斑块指数	LPI	类型/景观
复杂度	景观形状指数	LSI	类型/景观
	聚集度指数	AI	类型/景观
聚集度	蔓延度指数	CONTAG	景观
	斑块结合度	COHESION	类型/景观
多样性指数	香农多样性指数	SHDI	景观

当窗口小于720 m时，曲线整体的波动较大，细节和异质性较多；当窗口大于720 m时，各曲线整体平稳，且波动幅度接近。考虑到窗口越大计算量也越大，同时结果越粗糙，极值往往被压缩，不能表现景观指数的空间细节差异，因此720 m为移动窗口的最优尺度。这也与先前对长沙、武汉等研究选择的窗口大小接近[10–11]。

数字表面模型（digital surface model，DSM）主要是用来反映城市垂直方向扩张程度，数据源为2019年的ZY–3号，经过区域网平差、DSM生产（包括DSM匹配、编辑、接边与镶嵌）得到高精度DSM。与DEM

（digital elevation model）数据不同的是，DSM包括了建筑、植被等地表信息的高度[12]。

本研究采用的建筑物底部高程数据JZM是由ALOS（advanced land observing satellite）卫星相控阵型L波段合成孔径雷达（PALSAR）采集。DSM和JZM高程基准一致，均为大地高。

体积等于面积乘以高程，因此在面积相同（即分辨率）的前提下，本研究引入高程参数，计算得到研究区域内的城市体积变化情况。

选用具有代表性的体积均值（VM）和体积标准差（VSD）来表征城市体积指标[23-24]。

VM用来表达区域内城市体积的大小。VM越高，该区域内城市体积越大，土地利用效率和城市化水平越高。VSD用来反映一定区域内单个建筑体积与该区域内城市体积均值的差异程度，不同城市区域的土地开发对土地价格和市场资源配置的敏感度不同，并直接导致了土地开发容量和城市体积的差异化发展[5-6]。高程和坡度数据由JZM数据计算得来。

1.3　统计分析

影响因素分析主要采用了皮尔森相关分析、逐步多元线性回归（stepwise linear regression，SLR）和冗余度分析（redundancy analysis，RDA）。

皮尔森相关分析被用来研究单一因子与地表温度之间的关系，选择决定系数最高的模型，明确与地表温度相关性较高的因子。

改善城市热环境需要做到针对性和有效性，本研究涉及的参数较多，因此通过SLR来选出对地表温度敏感的因子，再通过RDA分析对这些因子进行排序。具体步骤为：以景观指数、城市体积、高程、坡度参数为解释变量，以地表温度为被解释变量，进行SLR分析，并通过方差膨胀因子VIF（VIF < 10）和容忍度Tolerance（Tolerance > 0.1）来检验模型中解释变量间的多重共线性，删除共线性高的解释变量，SLR在SPSS 26上处理；利用RDA对地表温度较为敏感的参数进行排序，选取解释度最高的3个因子[7-8]。RDA在CANOCO 5.0上处理。受制于现有数据的收集情况，SLR和RDA仅对2019年的数据进行分析。

2　结　果

2.1　地物分类和温度反演结果

2002—2019年，研究区内城市扩张迅速，特别是2013年前，长沙市建成区面积增加了2.82倍；2013年后，城市扩张速度相对放缓，这在裸土地的面积变化趋势上也能反映出来，与此相对应的是，耕地面积锐减，从2002年的1 755.07 km^2锐减至1 087.76 km^2。林地面积经历过短暂的下降后，于2019年重新增长。水体在2008年有所下降，但整体面积基本稳定。

目前主要有4种温度反演结果的验证方式：温度直接对比法、基于辐射能的验证法、交叉验证法、时间序列分析法等。其中温度直接对比法被认为是参考验证方法，目前已广泛运用于验证地表温度产品结果。考虑到气象站经纬度可能存在的位置偏差，本研究以气象站为中心，120 m为半径做缓冲区，将缓冲区内温度均值与站点实际温度比较。如表4所示。反演误差在±1℃左右，可以满足大多数应用精度的需求。

研究区域温度反演结果为：2002年高温区域仅集中在天心区、雨花区北部、开福区南部及芙蓉区，但随后，热岛效应逐渐加剧，且随着时间的推移热岛范围逐渐增大。到2019年，长沙的高温区域已蔓延至北部的望城区，东部的长沙县，高温区域沿着湘江两岸呈现梯度型分布，并逐渐向远城区侵蚀。从时间序列和空间格局上来看，热岛范围逐渐扩大，与城市扩张模式相呼应。

表4　地表温度反演精度验证

时间	站点名称	站点编号	经度/（°′）	纬度/（°′）	实测温度/℃	反演温度/℃	误差/℃
2019年8月17日上午10:57	长沙	57687	11 255	2 813	33.60	33.26	−0.34
	马坡岭	57679	11 247	2 807	34.20	34.66	0.46
2013年9月17日上午10:59	长沙	57687	11 255	2 813	33.20	32.03	−1.17

2.2　二维景观指数对地表温度的影响

在长沙市，与地表温度相关性最高的是建筑物，以pearson系数相关强度的取值划分，LPI3、PLAND3与地表温度在部分年份呈现极强的正相关（pearson ∈ (0.8,1)），斑块聚集度AI3、COHESION3与地表温度呈现强正相关（pearson ∈ (0.6,0.8)），PD3、LSI3仅在部分年份与地表温度呈现中等程度的负相关（pearson ∈ (0.4,0.6)）。对于建成区而言，斑块面积

越大，单位面积内占比越高，连通度越大，越易引发局部高温。裸土地对地表温度也有较大影响。斑块聚集度AI5、COHESION5与地表温度呈现中等程度相关，但整体上来看，其拟合优度处于逐年减弱的态势。林地的各项指数与地表温度均呈现负相关，从2002年几乎没有相关性，到2019年部分指标（AI2、COHESION2、LPI2、PLAND2）呈现中等程度负相关，相关性逐年增强。耕地仅有LPI1与PLAND1与地表温度呈现中等程度的负相关。水体与地表温度的相关性较小，这可能是因为研究区内水体主要为湘江、捞刀河等线状水体，对温度的影响力度有限。

2.3 三维空间对地表温度的影响

如表5所示，地表温度与VM、VSD均呈现强相关性，与高程、坡度呈现弱负相关性。

表5 地表温度与城市体积、高程、坡度回归效果

指标	拟合公式	Pearson
VM	$y=31.39x^2-1\,769.4x+24\,373$	0.77
VSD	$y=582.15x-18\,209$	0.73
高程	$y=1.51x^2-115.36x+2\,245.9$	−0.34
坡度	$y=0.13x^2-9.9x+193.69$	−0.34

2.4 影响热环境关键参数

由表6可知，SLR结果显示，研究范围内与地表温度相关性较高的指标有13个，分别是坡度、PLAND5、VM、VSD、AI2、COHESION、高程、PD3、PD5、PD2、LSI1、LPI4、COHESION4，其中景观指数有9个，城市体积参数有2个，以及高程和坡度。RDA的结果如图1所示。

表6 研究区域SLR结果

编号	景观指标	标准化系数	Tolerance	VIF
1	坡度	−0.189 **	0.189	5.293
2	PLAND5	0.147 **	0.573	1.745
3	VM	0.146 **	0.108	9.229
4	VSD	−0.138 **	0.134	7.464
5	AI2	0.071 **	0.186	5.369
6	COHESION	−0.056 **	0.15	6.652
7	高程	−0.091 **	0.223	4.475
8	PD3	0.173 **	0.108	9.225
9	PD5	0.088 **	0.516	1.937
10	PD2	0.06 **	0.296	3.382
11	LSI1	−0.057 **	0.177	5.64
12	LPI4	−0.076 **	0.309	3.239
13	COHESION4	0.054 **	0.12	8.343
拟合优度 R^2		0.896		

说明：** 意味着现在0.01水平上显著相关（2−tailed）

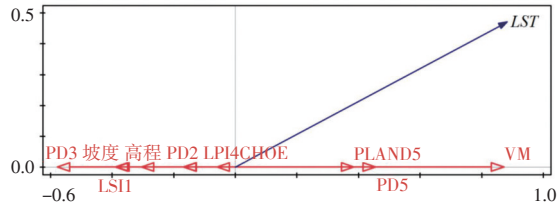


图1 RDA分析结果

为了便于绘图，COHESION简写为COHE。在图1中，红色箭头表示环境因子，其长度表示与地表温度相关性的大小，长度越长，相关性越大，反之越小；同时，红色箭头连线和地表温度之间的夹角表示正负相关性，锐角为正相关、钝角为负相关。

上述参数对地表温度的总解释力度达到77.8%。由图1可知，VM、PD5、PD3对地表温度的贡献率最大。其中VM的解释程度最高（59.2%），PD5其次（8.0%），PD3（1.8%）。地表温度与VM、PD5呈现显著正相关，与PD3为负相关。具体表现为，城市体积均值（VM）和裸土地破碎化程度（PD5）的升高、建筑物破碎化程度（PD3）的降低，会导致地表温度上升。

3 分析与讨论

3.1 二维方向单一因子影响

就整体景观而言，景观级别的景观指数对地表温度的影响均较小。就各地物类别而言，人类活动对地表影响最大的为城市建成区。与一般城市开发过程中原有景观逐渐破碎的模式不同，本研究区域聚焦长沙市主城区，城市开发强度大，建筑物密度逐渐升高，出现大规模紧凑布局，同质斑块之间的连通度加强，形成集群效应，加之建筑材质以比热容较大的水泥为主，建筑区域温度上升是必然[9]。此外，建成区景观指数与地表温度的拟合优度随着时间的推移逐渐升高，说明城市化对温度变化的影响逐年攀升。

城市扩张不可避免地出现了裸土地这一形态，主要表现为待开发的建筑工地。裸土地破碎化程度高，意味着人类对该区域的改造程度大，值得注意的是，裸土地的破碎化程度在2008年与地表温度的相关性最强，呈现强正相关，这可能是2008年长沙市大规模建设工程上马，建筑工地大量出现而引起的。

林地的各项景观指数与地表温度的拟合优度逐年升高，且均呈现负相关，查阅相关政策文献及过往研究可知，这与2003年湖南省委省政府正式提出与长株潭三市交汇地区建设“绿心”有关，有关部门号召社会力量大量种植林木，提升长沙市的“绿度”，增加了林地的规模，对热岛效应造成减缓作用。此外，林地斑块的聚合度越高，占地面积越大，对地表温度的缓和作用越强，这在相关研究的成果中得到印证[20]。

3.2　三维方向单一因子影响

以中国目前城市化进程来看，VM越大，即城市化水平越高，意味着土地硬化率越大、人为热量排放越强，越易导致温度上升。VSD较大的区域，越来越多的建筑物经历了改建或者扩建的方式，虽然在二维平面上其面积变化不大，但在三维角度来看其高度增加，与周围其他建筑形成对比，带来城市化和垂直空间差异化的提升，不利于形成规整的街道峡谷，容易导致温度升高。

同时，不可否认的是，VSD与VM的相关性较大，R^2分别达到了0.85，对于城市体积而言，VM的高值区域不仅是建筑物垂向发展的核心区域，更是建筑差异化特征最明显的区域。

3.3　关键参数分析

VM对地表温度有着极强的解释力度，是导致温度变化的最主要原因。相较于郊区，市区以高密度的高大建筑景观为主，对地表温度有明显的增温效果。因此，建筑物越多、越高、越密集，势必会造成该区域地表温度的升高[21]。同时，由长沙市近年来的产业政策调研可知，在市区周边分布了越来越多工业厂房，这类建筑以钢、铁与水泥等现代建筑材料为主，有着极差的显热储存能力，对城区形成包围态势，大量的人工热及工业污染的排放，导致出现了局地气温的上升。

从城市开发流程的角度来看，裸土地一般率先出现于现有建筑物四周，主要以零星的形态出现，破碎化程度较高，这也是导致城市温度升高的“热点”区域。但其周围建筑往往呈现密集态势，这也是造成了裸土地的破碎化程度（PD5）与地表温度呈现正相关，而建筑物的破碎化程度（PD3）呈现负相关的态势。

3.4　综合分析及降温策略

在城市愈发紧凑的现实情况下，建筑物对地表温度的影响是多维度的。相较于以往研究仅对二维平面进行的探索，本研究发现三维方向上城市体积的增加是影响热环境最重要的因素。同时，自然地物与地表温度的相关性较弱，这可能是在建筑物占主导地位的区域，植被对地温的影响十分有限[22]。

从整体角度出发，虽然建筑集中布局有利于发展优势产业，展示城市形象，推动经济发展，但是从改善城市热环境、优化区域生态环境的角度出发，长沙应适当放缓城市扩张速率、控制建筑密度，避免更多区域性的“热点”出现，减少热岛效应的辐射强度与范围，这对于长沙市可持续发展有着重要意义。对湘江沿岸主城区、长沙县与主城区交界处有更合理的布局，避免出现大量建筑聚集在某一个小区域内，既造成了该区域温度的显著升高，也阻碍了城市内部空气流通及市区与郊区冷气交换。此外，建筑聚集的区域也是人为热的主要源地，相关研究显示，人为热的引入使得城区温度增加明显，在长株潭城市群，这种增温效果达到了0.7℃。就增温效果而言，工业/商业区 > 高密度住宅区 > 低密度住宅区。除了植被的降温作用在上述区域受限外；另一方面也是因为建筑密度大，通风廊道狭短，风场降温作用被削弱[33]。因此，在城市规划布局时，应当避免将新建工业园区、大体量居民区、商业区规划于城市上风向，进而导致大体量建筑的人为热吹向城区，加重热岛效应。

虽然RDA分析未提取到自然地物因子参数，但事实上，自然地物对降低热岛效应也有着显著作用。相关研究显示，在降低建成区斑块连通度的同时，可以考虑在建成区内部和外围提升植被覆盖度，增加绿地斑块，如行道树等，对于降低热岛效应并控制微气候有重要意义[24-25]。此外，湘江穿长沙而过，但与湘江以“W”字型流经株洲和湘潭，水体的降温效果在这两座城市存在一定程度的重叠，对温度的影响远比长沙的“1”字型要大。因此，在市内增强水体连通性，增加水体的踏脚石斑块，如市内人工湖泊，这对减轻热岛效应也有着重大意义[26]。

4　总　结

本研究以长沙市为研究区域，综合多源遥感数据，借助多种分析方法，分析了多维空间内城市热环境的影响机制，结合参数的实际意义，提出针对性意见，为政府未来改善区域热环境、提升可持续发展质量提供决策支持。

参考文献

[1] Ge M, Fang S, Gong Y et al. Understanding the Correlation Between Landscape Pattern and Vertical Urban Volume by Time-series Remote Sensing Data: A Case Study of Melbourne[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, 10(1):14-43

[2] 虞思逸. 城市三维空间形态对人居环境影响的测度与评价研究[D]. 上海:华东师范大学, 2020

[3] Tian Y Y, Zhou W Q, Qian Y G, et al. The Effect of Urban 2D and 3D Morphology on Air Temperature in Residential Neighborhoods[J]. Landscape Ecology, 2019, 34(5): 1 161-1 178

[4] 刘冰冰, 曾永年. 基于Landsat8数据的城市群热岛效应分析:长株潭城市群为例[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2018, 49(4):591-597

[5] 徐双. 近十年长沙热环境空间格局演变研究[D]. 南京:南京大学, 2015

[6] 段四波, 茹晨, 李召良, 等. Landsat卫星热红外数据地表温度遥感反演研究进展[J]. 遥感学报, 2021, 25(8):1 591-1 617

[7] 侯宇初, 张冬有. 基于Landsat8遥感影像的地表温度反演方法对比研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35(10):142-147

[8] Chen A L, Yao X A, Sun R H, et al. Effect of Urban Green Patterns on Surface Urban Cool is Lands and Its Seasonal Variations[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2014, 13(4):646-654

[9] Fan C, Myint S. A Comparison of Spatial Autocorre Lation Indices and landscape Metrics in Measuring Urban Landscape Fragmentation[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 121:117-128

[10] 李博, 张韵成, 甘恬静. 长株潭城市群景观格局时空变化分析[J]. 中外建筑, 2018(11):57-61

[11] Wang J, Zhan Q M, Guo H G, et al. Characterizing the Spatial Dynamics of land Surface Temperature-impervious Surface Fraction Relationship[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016(45): 55-65

[12] 王汉英, 孙绍河, 王保庆, 等. 关于DEM和DSM数据在生产与应用中的异同分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(3):156-158

[13] Liu M, Hu Y M, Li C L. Landscape Metrics for Three-dimensional Urban Building Pattern Recognition[J]. Applied Geography, 2017(87):66-72

[14] Sun F Y, Liu M, Wang Y C, et al. The Effects of 3D Architectural Patterns on the Urban Surface Temperature at a Neighborhood Scale: Relative Contributions and Marginal Effects[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 258: 120 706

[15] 曲冰, 冷嘉伟, 马婕. 城市商务核心区街道空间形态量化描述与评价方法研究[J]. 新建筑, 2019, 36(1):11-16

[16] 杨俊宴, 宜史. 总体城市设计中的高度形态控制方法与途径[J]. 城市规划学刊, 2015(6):90-98

[17] Song Y, Song X D, Shao G F, et al. Effects of Land Use on Stream Water Quality in the Rapidly Urbanized Areas: A Multiscale Analysis[J]. Water, 2020, 12(4):1 123-1 142

[18] 李祖政, 尤海梅, 王梓懿. 徐州城市景观格局对绿地植物多样性的多尺度影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(6): 1 813-1 821

[19] Wang Y Y, Du H Y, Xu Y Q, et al. Temporal and Spatial Variation Relationship and Influence Factors on Durface Urban Heat Island and Ozone Pollution in the Yangtze River Delta, China[J]. Science of The Total Environment, 2018, 631-632

[20] Wu Q, Li Z Y, Yang C B, et al. On the Scale Effect of Relationship Identification Between Land Surface Temperature and 3D Landscape Pattern: The Application of Random Forest[J]. Remote Sensing, 2022, 14(2):279

[21] Connors J P, Galletti C S, Chow W T L. Landscape Configuration and Urban Heat Island Effects: Assessing the Relationship Between Landscape Characteristics and Land Surface Temperature in Phoenix, Arizona[J]. Landscape Ecology, 2013, 28(2):271-283

[22] Kawashima S. Relation Between Vegetation, Surface Temperature, and Durface Composition in the Tokyo Region During Winter[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 50(1):52-60

[23] 陈一溥, 郑伯红. 长株潭城市群人为热排放对城市热环境影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(7):1 625-1 637

[24] Bonan G B. The Microclimates of a Suburban Colorado (USA) landscape and Implications for Planning and Design[J]. Landscape and Urban planning, 2000, 49(3-4): 97-114

[25] Zhou W, Cao F L, Wang G B. Effects of Spatial Pattern of Forest Vegetation on Urban Cooling in a Compact Megacity[J]. Forests, 2019, 10(3):282-296

[26] Xue Z S, Hou G L, Zhang Z S, et al. Quantifying the Cooling-effects of Urban and Peri-urban Wetlands Using Remote Sensing Data: Case Study of Cities of Northeast China[J]. Landscape and Urban Planning, 2019, 182:92-100