

DOI: 10.5846/stxb202008272230

孙风云, 邓灵稚, 刘焱焱, 董芊芊, 孟醒, 车越. 基于增强回归树与区域增温敏感性指数的城市升温效应空间分异. 生态学报, 2021, 41(15): 5929-5939.

Sun F Y, Deng L Z, Liu Y Y, Dong Q Q, Meng X, Che Y. Effects of urban warming on surface temperature: Integrating the boosted regression tree approach and regional warming sensitivity index. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15): 5929-5939.

基于增强回归树与区域增温敏感性指数的城市升温效应空间分异

孙风云^{1,2}, 邓灵稚^{1,2}, 刘焱焱^{1,2}, 董芊芊^{1,2}, 孟醒³, 车越^{1,2,*}

1 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241

2 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241

3 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241

摘要: 热岛效应已成为城市化进程中备受关注的城市生态环境问题。有关城市热岛效应的研究对区域在地表升温过程中的空间分异关注尚不足。通过设计区域增温敏感性指数, 借助增强回归树(boosted regression tree, BRT)机器学习算法, 量化城市不同区域在地表升温过程中的敏感性差异。结果表明: (1) 上海市各辖区增温敏感性从高至低依次是: 黄浦区、杨浦区、虹口区、静安区、普陀区、徐汇区、长宁区、宝山区、闵行区、浦东新区、嘉定区、奉贤区、松江区、青浦区、金山区、崇明区; (2) 区域增温敏感性在不同的温度梯度下具有明显差异, 在高温梯度下区域间指数值的差异最大; (3) 地表覆被的增温敏感性存在明显的区域分异特性; (4) 基于 BRT 的增温敏感性指数具有较好的指示意义和较高的灵敏度。在城市热环境持续恶化背景下, 探讨城市异质空间中地表温度变化的敏感性可为城市热环境调控提供科学依据。

关键词: 区域增温敏感性; 增强回归树; 城市热岛效应; 空间分异; 热环境调控

Effects of urban warming on surface temperature: Integrating the boosted regression tree approach and regional warming sensitivity index

SUN Fengyun^{1,2}, DENG Lingzhi^{1,2}, LIU Yaoyi^{1,2}, DONG Qianqian^{1,2}, MENG Xing³, CHE Yue^{1,2,*}

1 School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China

2 Shanghai Key Laboratory for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration, Shanghai 200241, China

3 School of Geographical Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract: The urban heat island effect has become a prominent urban environmental issue in the process of urbanization. However, attempts to differentiate regional sensitivities in the process of surface warming are rare. In this study, we designed the regional warming sensitivity index by adopting the boosted regression tree (BRT) approach. With this index, we quantified regional sensitivity differences in the process of surface warming. The results show that: 1) the warming sensitivities of Shanghai's jurisdictions in descending order are Huangpu District, Yangpu District, Hongkou District, Jing'an District, Putuo District, Xuhui District, Changning District, Baoshan District, Minhang District, Pudong New District, Jiading District, Fengxian District, Songjiang District, Qingpu District, Jinshan District, and Chongming District. 2) The difference of regional warming sensitivity is obvious under different temperature gradients, and the regional variability of temperature changes is large under the highest temperature gradient. 3) The warming sensitivity of land covers has obvious

基金项目: 国家自然科学基金(42007417, 41801314); 中国博士后科学基金(2019M661422)

收稿日期: 2020-08-27; **网络出版日期:** 2021-05-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yche@des.ecnu.edu.cn

regional difference. 4) The regional warming sensitivity index based on the BRT method has a good indicating significance and high sensitivity. The exploration of regional warming sensitivity could provide scientific bases for regulating the urban thermal environment in deteriorating urban thermal environments.

Key Words: regional warming sensitivity; boosted regression tree; urban heat island effect; spatial difference; thermal environment regulation

城市热岛 (Urban Heat Island, UHI) 是指城市区域温度明显高于周边乡村区域的现象。城市热岛效应普遍存在于各城市地区,严重影响城市的宜居性^[1]、生产效率^[2]和环境质量^[3],已成为城市气象学、城市地理学、城市生态学、城市规划学等多学科领域的研究重点和热点问题之一。据预测至 21 世纪中叶,全球城市人口将增加 25 亿^[4],全球平均温度将增加 0.5℃^[5],全球每年遭遇 20 d 以上致命高温天气的人口将增加 10%^[6],随着城市化进程持续推进、全球气温持续变暖以及极端气候不断加剧,势必增加城市热岛的负面效应。因此,探讨城市地表在升温过程中的空间分异具有重要的现实意义。

针对热岛效应时空变化特征与成因机制的研究主要有两方面特点。一方面,对热环境时空变化特征的研究多基于单幅高温影像或者多幅温度条件相似的遥感影像集,探讨同等温度条件下区域间温度变化差异或动态演变。沈中健等利用 2016 年 7 月 Landsat 8 遥感影像分析了厦门市建筑、植被、水体等地表因素与热岛强度间的空间关系与响应规律^[7];于琛等利用 1995、2005、2015 年 3 期 8—10 月 Landsat 遥感影像,探讨近 20 年京津唐主城区地表热场的发展规律、年际变化和区域贡献作用^[8];张伟等基于 1984、1995、2000、2006、2010 年 5 期 Landsat 遥感影像分析了 1984—2010 年杭州市热环境空间演化规律^[9]。当前研究缺乏对城市地表升温过程中的空间分异问题的关注。城市地表温度变化受城市下垫面性质^[10]、三维空间格局^[11]、人类活动^[12]、气候背景^[13]等因素的共同影响,形成复杂的区域升温机制。探讨区域在地表升温过程中的变化特征及敏感性有助于进一步揭示城市热环境的空间分异机制。

另一方面,当前城市热岛效应的空间分异与环境成因研究多采用相关性分析、回归分析、景观指数等方法。曹畅等运用相关性分析方法探讨了中国城市热岛及其影响因子的关系^[14];潘涛等运用回归模型建立了哈尔滨市不透水面与地表温度的函数回归方程,分析了两者的变化关系^[15];邓睿等基于斑块密度、连通性、多样性等景观指数分析了地表温度的空间分布与热力景观格局演变特征^[16]。传统方法能有效表征特定温度状况下热岛效应的空间分异,却难以量化不同温度梯度下地表升温的非线性机制。增强回归树 (boosted regression tree, BRT) 是一种机器学习算法,善于提取复杂非线性问题的因子贡献率与各因子的敏感性变化关系,已成功用于城市热岛^[17]、城市扩展^[18]、流域产水量^[19]、以及非点源污染^[20]等研究领域。本研究将 BRT 方法应用于地表升温的区域分异中,并设计“区域增温敏感性”指数,以量化区域在升温过程中的敏感程度,以为城市热环境空间调控提供科学依据。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域

上海市 (120°52′—122°12′E, 30°40′—31°53′N) 位于中国东海岸长江和黄浦江入海交汇处,总面积 6340.5 km²,总人口数 2428 万。上海市属于副热带季风气候,同时受海陆风环流与城市热岛环流影响,是极端天气多发区域,近年来极端高温天气频现,最高实测气温达 40.9℃ (2017 年 8 月,徐家汇气象站)。本研究覆盖上海市全域 16 个市辖区 (图 1),其中包含 7 个中心城区 (黄浦、徐汇、长宁、静安、普陀、虹口、杨浦),1 个半中心区半郊区 (浦东新区) 和 8 个郊区 (闵行、宝山、嘉定、金山、松江、青浦、奉贤、崇明)。上海市是城市化水平最高的国际化大都市之一,人口、经济与社会资源高度集中,选取上海市作为研究案例,对促进全球气候变化与快速城市化背景下的城市可持续发展具有现实意义。

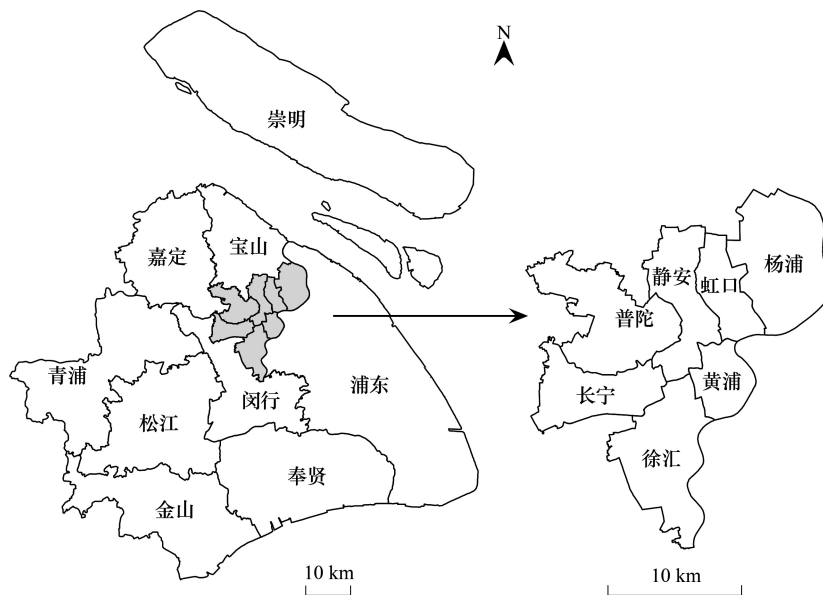


图1 上海行政区划

Fig.1 The administrative districts of Shanghai

1.2 研究数据

研究采取 2016—2018 年间拍摄的 5 期 Landsat 8 遥感影像进行地表温度反演(表 1),为降低天气状况干扰,选取了天气晴朗,无云层遮挡,风速低缓状况下所拍摄 5 期影像,拍摄日期分别为 2016 年 1 月 26 日、2017 年 2 月 13 日、2017 年 4 月 2 日、2018 年 5 月 23 日和 2017 年 8 月 24 日,拍摄日气温分别为 1—6℃、4—13℃、11—21℃、17—26℃、29—36℃,以表征不同温度梯度。2017 年土地覆被数据(图 2)获取于中国科学院地理科学与资源研究所。为研究需要,将原有土地覆被类型重分类为植被、水体、建设用地。

表 1 遥感影像信息

Table 1 Information of selected Landsat images

影像拍摄日期 Shot date	影像命名 Image name	影像平均温度 Mean Landsat temperature/℃	拍摄日气温 Mean air temperature/℃	天气状况 Weather	风速 Wind speed
2016 年 1 月 26 日	影像 0126	6.4	1—6	晴朗	≤微风
2017 年 2 月 13 日	影像 0213	14.1	4—13	晴朗	≤微风
2017 年 4 月 2 日	影像 0402	22.3	11—21	晴朗	≤微风
2018 年 5 月 23 日	影像 0523	28.7	17—26	晴朗	≤微风
2017 年 8 月 24 日	影像 0824	37.9	29—36	晴朗	≤微风

2 研究方法

2.1 区域增温敏感性指数定义及表征意义

城市热环境的影响因素较为复杂,区域间热岛效应的驱动机制存在较大差异^[21]。敏感性分析已广泛应用于生态环境^[22]、水文^[23]、气象^[24]等诸多领域,成为探讨区域间空间分异规律的有效途径,但目前仍缺少对区域温度变化敏感性程度进行定量分析的指数方法。因此,本研究提出区域增温敏感性概念,并设计区域增温敏感性指数,以量化不同区域在温度升高过程中的敏感性程度,为城市热环境变化敏感区域识别与空间调控提供科学根据。区域增温敏感性是指区域对外界温度升高的反应程度,体现区域温度变化的难易程度和可能性大小。区域增温敏感性指数的具体表征意义是:对于一个研究区域,当其平均温度从某一温度升高至另

一较高温度时,用于衡量其内部区域在此过程中温度变化的敏感特性以及区域间温度变化的差异情况。该指数值越高代表区域对温度变化的灵敏度越高,即相同的外界升温条件下,指数值越高的区域升温幅度越大;反之,指数值越低的区域升温幅度也相应越小。

本研究基于三个层次对区域增温敏感性进行分析,分别为区域整体增温敏感性、区域梯度增温敏感性和区域覆盖增温敏感性。区域整体增温敏感性是指区域在所有温度梯度下整体的增温敏感性,是衡量区域升温敏感状况的综合指标;区域梯度增温敏感性表征在特定温度变化梯度下区域增温的敏感性差异;区域覆盖增温敏感性表征特定土地覆被类型在不同区域的增温敏感性差异。

2.2 区域增温敏感性指数计算原理

当前敏感性计算方法有很多,包括变化率比值^[24]、线性回归模型^[23]、神经网络^[25]等,本研究采用在生态环境领域应用日益广泛的 BRT 机器学习算法进行敏感性分析。BRT 算法结合了“回归树”与“增强”两大算法的优势^[26];回归树算法通过递归将数据集切割成多组易于建模的子数据集,再利用线性回归方法对子数据集进行建模;增强算法首先构造预测函数系列,然后按照一定规律将各函数序列组合成预测函数以提高弱分类算法的准确度。BRT 算法原理如下^[27-29]:

首先,用 $f(x)$ 函数表征因变量 y 与自变量 x 之间的关系,将其初始化为 0,

$$f_0(x) = 0 \quad (1)$$

设 m 为拟合序列值,拟合回归树的总数为 n 棵,当 $m=1:n$ 时,首先计算所有观测数据的残差 r ,

$$r = - \left[\frac{\partial L(y, f(x))}{\partial f(x)} \right]_{f(x)=f_{m-1}(x)} \quad (2)$$

其次,利用最小二乘回归树对残差 r 进行拟合,以估算 $\beta b(x; \gamma_m)$ 的值, $\beta b(x; \gamma_m)$ 代表单独一棵树的信息, b 的值与所选计算方法有关,可选方法有多项式与回归树等, β 是所选计算方法估计参数集, γ_m 代表分割变量、树节点值和预测值。再通过计算损失方程 L 最小值求取 β_m , β_m 代表每棵树节点的权重,并决定着各棵树之间的组合方式,

$$L(y, f_{m-1}(x) + \beta b(x; \gamma_m)) \quad (3)$$

最后,根据迭代结果对函数进行更新,

$$f_m(x) = f_{m-1}(x) + \beta_m b(x; \gamma_m) \quad (4)$$

当所有的树循环遍历更新后,计算最终函数关系式,

$$f(x) = \sum_m f_m(x) \quad (5)$$

2.3 区域增温敏感性指数计算流程

本研究基于 BRT 算法计算区域增温敏感性指数,包括区域整体增温敏感性、区域梯度增温敏感性和区域覆盖增温敏感性。计算流程涉及数据收集、遥感处理、指数计算、结果提取 4 个方面(图 3)。

其中,关键计算步骤详述如下:

- (1) 地表温度反演。采用辐射传输方程法对 Landsat 8 TIRS 10 波段进行温度反演^[17]。
- (2) 影像温度差值求取。基于 5 期遥感影像的地表温度反演结果,求取相邻月份影像的差值,如“差值影

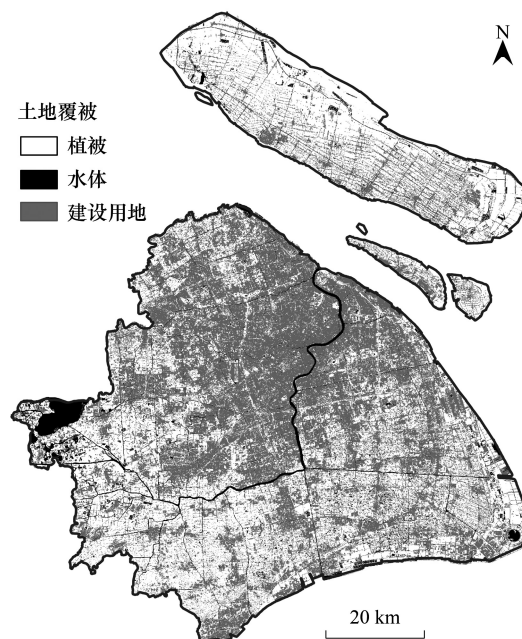


图2 研究区土地覆被信息

Fig.2 Land covers of Shanghai

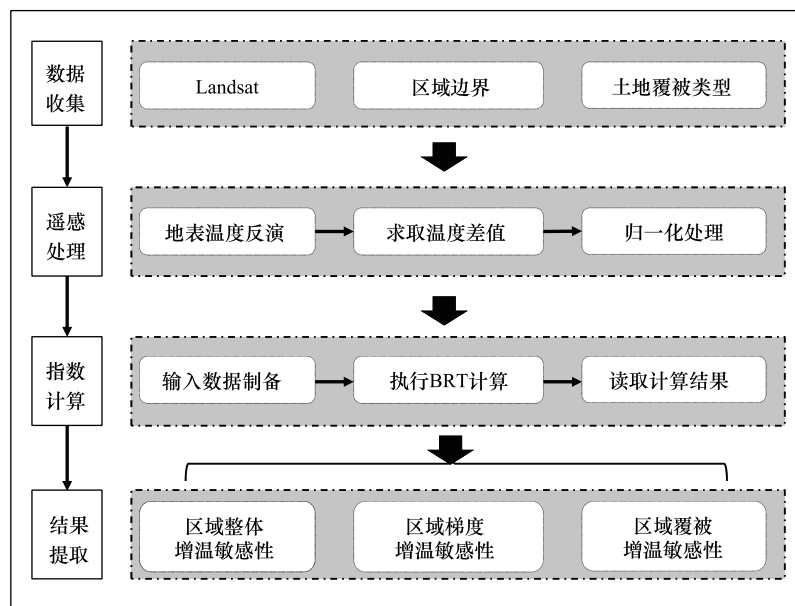


图3 区域增温敏感性指数计算流程

Fig.3 The overall methodology for calculating the regional warming sensitivity index

像1=影像0213-影像0126”。

(3) 差值归一化处理。为消除差值影像间温度变化幅度不同引起的差异,对所有差值影像进行归一化处理,即通过除以栅格平均值的方式将各差值影像的平均温度变为 1°C 。

(4) BRT模型输入数据制备。首先计算区域整体增温敏感性指数,将4期差值影像中所有栅格像元值作为因变量,将“市辖区”作为自变量,仅需要执行1次BRT计算。其次计算各市辖区的梯度增温敏感性指数,分别提取4个温度梯度的栅格像元值作为因变量,将“市辖区”作为自变量,共需要执行4次BRT计算。最后求取区域覆盖增温敏感性指数,分别提取植被、水体、建设用地的栅格像元值作为因变量,将“市辖区”作为自变量,共需要执行3次BRT计算。

(5) 执行BRT计算。在R语言中分别加载模型输入表,多次调用“dismo”软件包执行敏感性计算。模型学习速率设置为0.005,每次抽取50%数据用于分析,50%用于训练,进行10次交叉验证。

(6) 提取指数结果。各自变量边际效应的计算结果即为敏感性指数的计算结果。

3 结果与分析

3.1 地表温度的空间分异

Landsat 8 遥感影像地表温度反演结果显示,5期遥感影像地表温度格局存在明显空间分异(图4)。影像0126、影像0213、影像0402、影像0523、影像0824的平均温度及温度范围依次为 6.4°C (-16.7°C — 22.6°C)、 14.1°C (-12.7°C — 29.3°C)、 22.3°C (-3.8°C — 38.8°C)、 28.7°C (10.3°C — 51.2°C)以及 37.9°C (24.7°C — 63.0°C),具有梯度升高的特征。相邻影像平均温度差分别为 7.7°C (影像0213—影像0126)、 8.2°C (影像0402—影像0213)、 6.4°C (影像0523—影像0402)和 9.2°C (影像0824—影像0523)。总体而言,在同一温度梯度下,空间上形成了多个热岛强度相对较高的区域;而在城市升温历程中,热岛强度相对较高的区域在空间上存在扩散和转移。

3.2 区域整体增温敏感性

由图5可以看出,上海市的区域增温敏感性指数具有明显的区域差异。16个市辖区的区域增温敏感性由高至低排序依次为:黄浦区(1.09)>杨浦区(1.09)>虹口区(1.08)>静安区(1.08)>普陀区(1.08)>徐汇区(1.07)>长宁区(1.07)>宝山区(1.06)>闵行区(1.05)>浦东新区(1.03)>嘉定区(1.03)>奉贤区(1.00)>松江

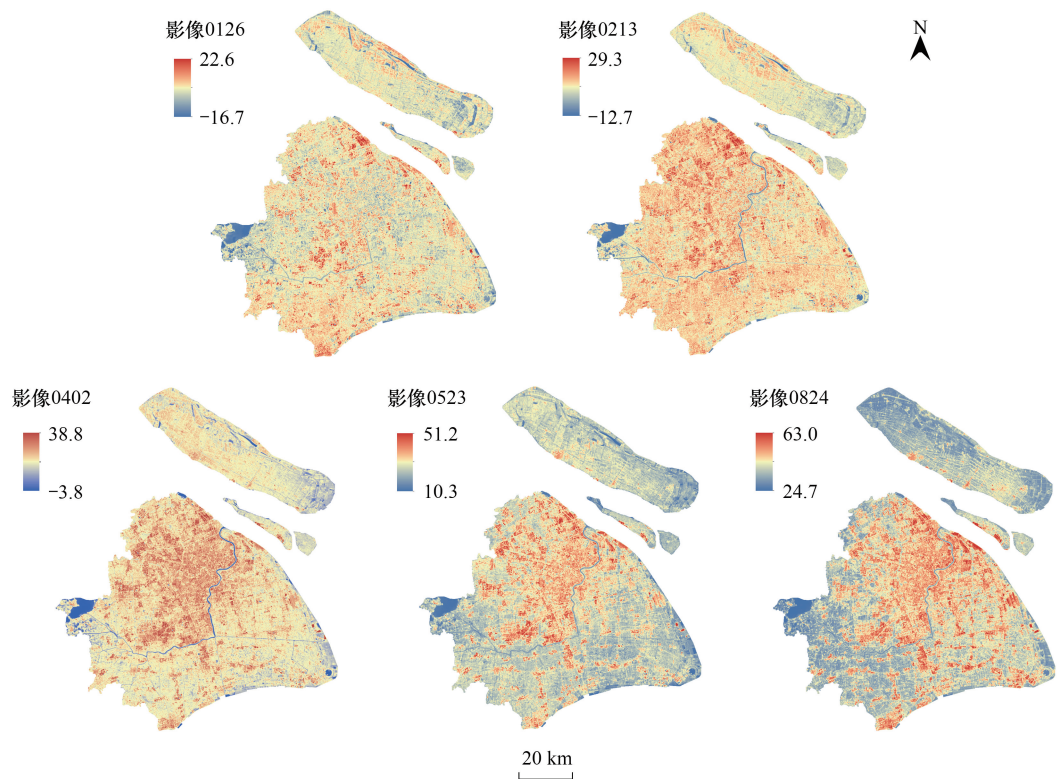


图 4 上海市地表温度反演结果

Fig.4 LST derived for Shanghai under five temperature gradients

区(0.98)>青浦区(0.97)>金山区(0.97)>崇明区(0.96)。区域敏感性的高低与上海市各区的开发强度具有一定相关性,开发强度较高的黄浦、杨浦、虹口、静安等中心城区整体增温敏感性值较高,而开发强度相对较低的青浦、金山和崇明等郊区增温敏感性值较低。本结果与大量的观测证据及研究结论相符^[30-31],表明区域增温敏感性结果能较好地体现区域间差异,基于 BRT 算法的区域增温敏感性指数具有较高的灵敏性。

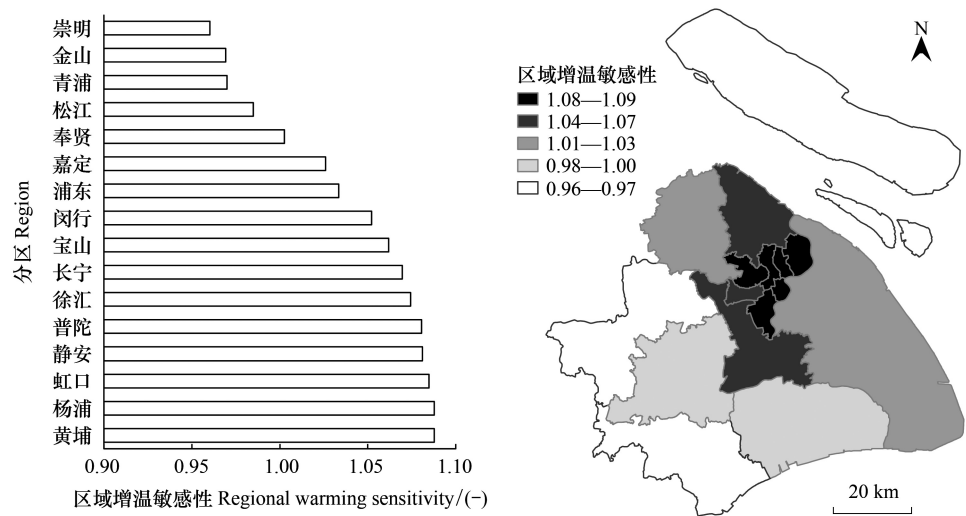


图 5 上海市辖区整体增温敏感性

Fig.5 The regional warming sensitivity of Shanghai districts

3.3 区域梯度增温敏感性

由图 6 可以看出,地表温度由 6.4℃ (影像 0126) 升高至 37.9℃ (影像 0824) 的四个增温阶段各辖区的区域梯度增温敏感性存在明显差异。例如,浦东新区和奉贤区随温度变化的敏感性在增温 0126—0213、增温 0213—0402 和增温 0402—0523 历程中均处于较低水平(0.96—1.00),而增温敏感性在增温 0523—0824 阶段却处于较高水平(1.12—1.14)。该现象可能是地表温度变化和影像拍摄季节共同作用的结果,一方面地表温度变化本身具有显著的非线性变化特征,这种特征可能存在拐点,导致拐点前后的响应关系发生改变^[21];另一方面,研究影像源于不同季节,Landsat 8 重访周期较长(16 d),在植被覆盖率^[32-33]、地表反照率^[34-35]、太阳辐射强度^[36]、昼夜温差^[37]、人为热排放^[38]等方面具有一定差异,从而对城市地表升温变化产生重要影响。

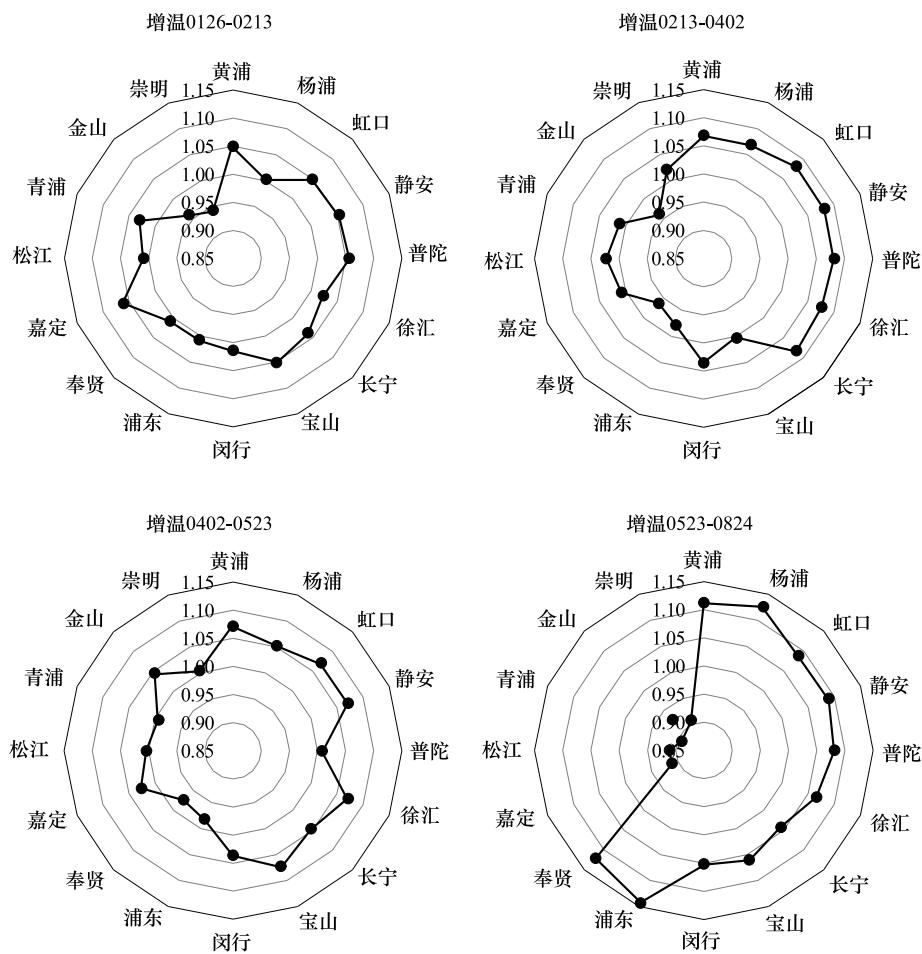


图 6 区域梯度增温敏感性

Fig.6 Regional warming sensitivity under varying temperature gradients

3.4 区域覆被增温敏感性

由图 7 可以看出,各覆被类型的增温敏感性从中心城区至郊区均呈下降的趋势,且建设用地的增温敏感性始终高于植被与水体的增温敏感性。

从建设用地增温敏感性来看,其随开发强度递减而呈现阶梯性下降趋势,表现出明显的城市建设发展区域性差异。通常植被与水体的降温效应受建设用地布局的影响^[39],而建设用地的增温效应同样受周围环境影响,所以高开发强度区域内建设用地的增温效应比低开发强度区域内建设用地的增温效应更加显著。Zheng 等^[40]研究表明当研究区域不透水面比率高于 50%时,空间自相关程度与城市地表温度的相关性更加显著,与本研究结果相符。以水泥建筑材料为主的不透水面具有较高的热辐射能力,其与地表温度间并非简

单的线性关系^[10],且不透水面越集中,对公园冷岛效应的抑制作用就越强^[41]。

从植被增温敏感性来看,其增温敏感性同样受城市建设发展程度影响。植被增温敏感性的衰减比率高于建设用地的衰减比率,且城市建设发展程度越低,植被增温敏感性与建筑增温敏感性的差异越显著。市中心的长宁、杨浦和普陀区植被的增温敏感性较低,由于该三个区内均有大片绿地,其中长宁区的上海动物园(74 万 m²)、杨浦区的共青国家森林公园(131 万 m²)、普陀区的桃浦中央绿地(100 万 m²)等。大面积绿地能够改善城市下垫面的热力学性质,促进空气冷却及循环流动,从而对控制热岛效应的扩散起到促进作用^[41]。此外大片绿地的降温效应受城市硬化铺装侵蚀程度较低,所以体现在区域的增温敏感性也相应较低。崇明区为上海开发强度最低的辖区,建设用地占比低,植被覆盖率高,大片绿地的降温效应得以充分体现,故其植被的增温敏感性也最低。该结果表明,基于 BRT 的区域增温敏感性指数对植被的冷岛效应具有较好的捕捉能力。

从水体增温敏感性来看,其区域间变化方差明显高于建设用地与植被。中心城区静安、普陀、长宁三区水体增温敏感性异常偏高。由于此 3 区不与黄浦江接壤,且区域内无大规模水体,而其他细小缓慢水体的控温效应有限,极易受周围硬化材质蚕食。青浦区水体的增温敏感性最低(0.91),表明其水体温度变化惰性最高,可能是因为青浦区水系发达、湖荡群集,是上海市河湖水面率最高的辖区(2017 年水面率为 18.56%)。水的比热容大,且大片连通水体的抗干扰能力强、控温效果好^[42],故温度升高缓慢。该结果亦表明,基于 BRT 的区域增温敏感性指数对水体降温效应具有较高的灵敏度。

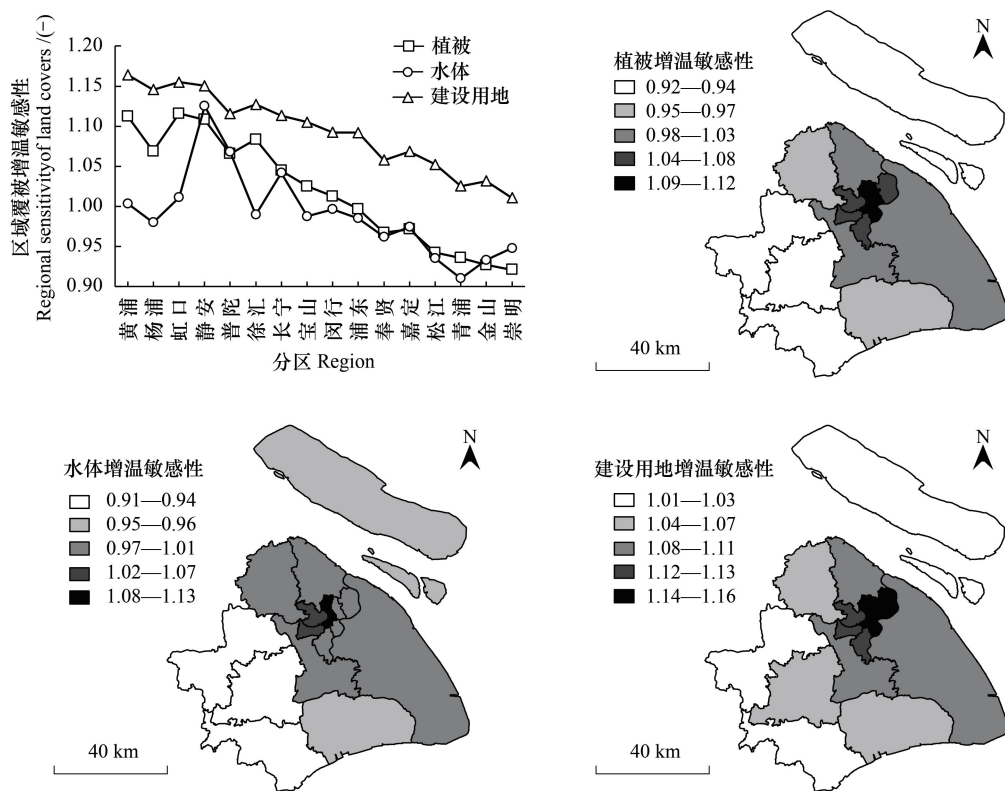


图 7 上海各行政区植被覆盖的区域增温敏感性

Fig.7 The regional warming sensitivity of land covers in Shanghai

4 讨论

4.1 区域敏感性差异的研究启示

分析地表温度动态演变规律是当前热岛效应研究的重要内容之一,不同时期所拍摄的遥感影像数据是分

析动态演变规律的基础^[7,43]。但是,目前对如何选取遥感影像,以及如何控制影像质量以减少外界干扰因素等问题仍缺乏系统探讨。季节差异和局地天气扰动对城市热力状况具有不容忽视的影响^[44]。此外,在城市下垫面、经济发展、天气状况相似的情况下,区域间的升温变化机制是较为复杂的,且存在的干扰因素较多,可能会对计算结果产生一定偏差。因此,关于地表温度动态演变研究中影像的选取标准及质量控制值得进一步探讨。

地表升温过程中各区域温度变化速率不同,可能导致温度梯度发生改变时,各因素对地表温度的影响程度及阈值也随之发生变化。Li 等基于 2001 年 3 月 13 日和 2001 年 7 月 3 日两期遥感影像,分析了 NDVI 指数、植被覆盖率和不透水面率 3 个因子与地表温度间的变化关系,结果表明高温梯度下因子对地表温度的影响程度更加剧烈^[45]。此外,研究发现最高升温梯度(28.7—37.9℃)的区域敏感性反差明显高于其它升温梯度,表明区域升温速率在极端高温情况下存在急剧变化的可能。总体而言,地表温度与影响因子的相互关系应在特定温度梯度下探讨,而当温度梯度发生改变时,原有的响应关系不一定仍然成立。响应关系的改变会影响地表热量分配,可能对地表热量扩散传输、人类健康以及植被生长造成负面影响^[46]。据预测,未来极端天气事件和极端气候事件的发生概率有增加的风险,温度变化范围及幅度出现极端波动的可能性也将变大。因此,极端高温情况下的地表升温机制应引起重视。

4.2 区域敏感性指数的规划启示

改善城市热环境是城市规划与管理的重要工作内容之一。国家住房和城乡建设部分别于 2013 年 9 月和 2015 年 11 月发布的《城市居住区热环境设计标准(JGJ286—2013)》和《城市生态建设环境评估导则(试行)》,将城市热环境质量列为我国城市建设发展的评估考核指标。区域敏感性指数具有明确的指示意义和评估效能,可定位在特定温度梯度下需调控的城市区域,与评估考核与规划管理实践有效对接。值得注意的是本研究采用行政分区作为研究单元,而非热岛效应研究常关注的功能单元或者小尺度研究单元,其目的是让研究结果更直观、更清晰。区域敏感性指数的计算可根据研究或规划需要,灵活选取研究尺度及分割单元,以便更准确定位需调控的区域。对于升温敏感性异常的区域,尤其是在较高温度梯度下升温敏感的区域,热环境规划设计与管理工作者应给予重视。

上海中心城区增温敏感性高,这与多位学者的研究结果相似^[30, 42, 47]。研究指出,开发强度、能源消耗和人口密度是上海中心城区热岛效应形成的主要因素:(1)开发强度高的区域不透水面比率相对较高,不透水铺装与自然植被相比具有反射率小、热容量大、蒸散发作用微弱等特性,使得相同外界升温条件下不透水铺装的升温幅度明显高于自然植被^[10];(2)排序高的中心城区与郊区相比具有楼房密度高、建筑高耸,楼间距小等特征,这些特征导致这些区域在白天集聚吸收大量的太阳辐射,且在建筑立面间反复拦截吸收,集聚热量,而在夜晚却阻挡地面长波辐射的散发,地表热量滞留,导致地表增温敏感性较高^[31];(3)开发强度较高的地区人口紧密,交通拥挤,人为热排放和碳排放的强度也相应较高,导致区域热环境进一步恶化^[12,37]。这些因素之间相互叠加耦合,导致区域间的温度变化敏感特性差异显著。上海市中心城区土地利用率高,重新规划成本高且难度大,所以优化景观格局可作为热环境调控的主要手段^[36],如使用绿色屋顶可提升城市绿地的立体空间。另外,人类活动每产生 60W/m²的热量可使室外气温增加 0.8℃,商业区 190 W/m²的热量可使室外气温增加 2.8℃^[48]。因此,减少人为热排放、提高节能意识也可作为上海市中心城区热环境调控的手段。

5 结论

本研究以上海 16 个市辖区为研究对象,基于 landsat 8 遥感影像数据集,结合 BRT 机器学习算法,提出了区域增温敏感性指数。从区域整体增温敏感性、区域梯度增温敏感性、区域覆被增温敏感性三个视角对不同区域的温度敏感性特征进行了探讨,得出以下结论:

(1)上海市各辖区增温敏感性随城市建设发展水平不同而具有明显差异。区域增温敏感性由高至低排序为:黄浦区>杨浦区>虹口区>静安区>普陀区>徐汇区>长宁区>宝山区>闵行区>浦东新区>嘉定区>奉贤区

>松江区>青浦区>金山区>崇明区,具有中心城区排序靠前,郊区排序靠后的规律,与区域发展强度相关。且具有城市建设发展程度越低,植被增温敏感性与建筑增温敏感性的差异越显著的规律。

(2)区域增温敏感性具有明显的温度梯度差异。增温敏感性在最高温梯度(28.7—37.9℃)的区域变异性最大,其它三个相对较低的温度梯度内区域差异均较平稳。表明区域增温具有非线性变化特征,且异常高温天气的区域热力不平等性加剧,所以高温梯度下的热力格局特征及区域增温敏感性尤其值得关注。该问题的探讨有助于防范极端气候变化下的高温风险。

(3)不同地表覆盖的控温效应具有明显区域异质性。当地表升温时,覆被升温状况不仅受自身性质的控制,同时还受环境影响,具有明显的区域差异特性。在各区域中,建设用地增温敏感性始终高于植被与水体的增温敏感性。这是因为,大片绿地及水体抗干扰能力强,易形成良好的控温效应,而高度城市化区域内的细小河流水体及绿地的控温能力较差,易受硬质铺装蚕食。

(4)基于 BRT 的增温敏感性指数具有较好的指示意义和较高的灵敏度。区域增温敏感性指数是一个综合指数,可表征区域受多重因素共同影响的集成增温效应。该指数指示意义明确,灵敏度高,使用灵活,可与城市规划有效对接,加强区域间温度敏感性的横向比较。

参考文献(References):

- [1] Jones B, O'Neill B C, McDaniel L, McGinnis S, Mearns L O, Tebaldi C. Future population exposure to US heat extremes. *Nature Climate Change*, 2015, 5(7): 652-655.
- [2] Zander K K, Botzen W J W, Oppermann E, Kjellstrom T, Garnett S T. Heat stress causes substantial labour productivity loss in Australia. *Nature Climate Change*, 2015, 5(7): 647-651.
- [3] Fallmann J, Forkel R, Emeis S. Secondary effects of urban heat island mitigation measures on air quality. *Atmospheric Environment*, 2016, 125: 199-211.
- [4] United Nations. The world's cities in 2018. [2020-11-23]. https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/urbanization/the_worlds_cities_in_2016_data_booklet.pdf.
- [5] IPCC. Special report: global warming of 1.5 oC. [2020-11-23]. <https://www.ipccch/sr15/chapter/spm/>.
- [6] Mora C, Dousset B, Caldwell I R, Powell F E, Geronimo R C, Bielecki C R, Counsell C W W, Dietrich B S, Johnston E T, Louis L V, Lucas M P, McKenzie M M, Shea A G, Tseng H, Giambelluca T W, Leon L R, Hawkins E, Trauernicht C. Global risk of deadly heat. *Nature Climate Change*, 2017, 7(7): 501-506.
- [7] 沈中健, 曾坚. 厦门市热岛强度与相关地表因素的空间关系研究. *地理科学*, 2020, 40(5): 842-852.
- [8] 于琛, 胡德勇, 张阳, 曹诗颂, 段欣, 张亚妮. 近 20 年京津唐主体城区地表热场空间特征变化分析. *地理科学*, 2019, 39(6): 1016-1024.
- [9] 张伟, 蒋锦刚, 朱玉碧. 基于空间统计特征的城市热环境时空演化. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1840-1846.
- [10] 徐涵秋. 基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析. *生态学报*, 2011, 31(14): 3890-3901.
- [11] 周伟奇, 田韞钰. 城市三维空间形态的热环境效应研究进展. *生态学报*, 2020, 40(2): 416-427.
- [12] 邱国玉, 张晓楠. 21 世纪中国的城市化特点及其生态环境挑战. *地球科学进展*, 2019, 34(6): 640-649.
- [13] 苗世光, 蒋维楣, 梁萍, 刘红年, 王雪梅, 谈建国, 张宁, 李炬, 杜昊鹏, 裴琳. 城市气象研究进展. *气象学报*, 2020, 78(3): 477-499.
- [14] 曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平. 中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析. *环境科学*, 2017, 38(10): 3987-3997.
- [15] 潘涛, 张弛, 杜国明, 董金玮, 迟文峰. 城乡不透水面增长格局及地表温度的响应特征研究. *地球信息科学学报*, 2017, 19(1): 134-142.
- [16] 邓睿, 刘亮, 徐二丽. 基于 Landsat 时间序列数据的重庆市热力景观格局演变分析. *生态环境学报*, 2017, 26(8): 1349-1357.
- [17] Sun F Y, Liu M, Wang Y C, Wang H, Che Y. The effects of 3D architectural patterns on the urban surface temperature at a neighborhood scale: relative contributions and marginal effects. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 258: 120706.
- [18] 李春林, 刘森, 胡远满, 徐岩岩, 孙风云. 基于增强回归树和 Logistic 回归的城市扩展驱动力分析. *生态学报*, 2014, 34(3): 727-737.
- [19] Sun F Y, Mejia A, Che Y. Disentangling the contributions of climate and basin characteristics to water yield across spatial and temporal scales in the Yangtze River Basin: a combined hydrological model and boosted regression approach. *Water Resources Management*, 2019, 33(10): 3449-3468.
- [20] 尹才, 刘森, 孙风云, 李春林, 象伟宁. 基于增强回归树的流域非点源污染影响因子分析. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 911-919.
- [21] 刘焱序, 彭建, 王仰麟. 城市热岛效应与景观格局的关联: 从城市规模、景观组分到空间构型. *生态学报*, 2017, 37(23): 7769-7780.
- [22] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究. *生态学报*, 2000, 20(1): 9-12.

- [23] Luce C, Staab B, Kramer M, Wenger S, Isaak D, McConnell C. Sensitivity of summer stream temperatures to climate variability in the Pacific Northwest. *Water Resources Research*, 2014, 50(4): 3428-3443.
- [24] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析. *地理学报*, 2011, 66(5): 579-588.
- [25] 夏元友, 熊海丰. 边坡稳定性影响因素敏感性人工神经网络分析. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(16): 2703-2707.
- [26] Elith J, Leathwick J R, Hastie T. A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77(4): 802-813.
- [27] Friedman J H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *The Annals of Statistics*, 2001, 29(5): 1189-1232.
- [28] De'ath G. Boosted trees for ecological modeling and prediction. *Ecology*, 2007, 88(1): 243-251.
- [29] Elith J, Leathwick J. Boosted Regression Trees for ecological modeling. [2020-11-23]. https://rspatial.org/raster/sdm/9_sdm_brt.html.
- [30] 戴晓燕, 张利权, 过仲阳, 吴健平, 栗小东, 朱燕玲. 上海城市热岛效应形成机制及空间格局. *生态学报*, 2009, 29(7): 3995-4004.
- [31] 徐伟, 杨涵涓, 张仕鹏, 茅懋, 陈琛, 梁萍, 夏立. 上海城市热岛的变化特征. *热带气象学报*, 2018, 34(2): 228-238.
- [32] 王刚, 管东生. 植被覆盖度和归一化湿度指数对热力景观格局的影响——以广州为例. *应用生态学报*, 2012, 23(9): 2429-2436.
- [33] 王夏青, 孙思远, 杨萍, 邹小燕, 易巧梅, 彭保发, 许建伟. 海绵城市建设下的生态效应分析——以常德市穿紫河流域为例. *地理学报*, 2019, 74(10): 2123-2135.
- [34] 覃志豪, 高懋芳, 秦晓敏, 李文娟, 徐斌. 农业旱灾监测中的地表温度遥感反演方法——以 MODIS 数据为例. *自然灾害学报*, 2005, 14(4): 64-71.
- [35] 吴骅, 李彤. TM 热红外波段等效比辐射率估算. *应用技术*, 2006, (3): 26-28.
- [36] 李佳燕, 孙然好, 陈利顶. 城市热环境适应性对策研究综述. *环境生态学*, 2020, 2(5): 11-19.
- [37] 姚远, 陈曦, 钱静. 城市地表热环境研究进展. *生态学报*, 2018, 38(3): 1134-1147.
- [38] 孙然好, 王业宁, 陈婷婷. 人为热排放对城市热环境的影响研究展望. *生态学报*, 2017, 37(12): 3991-3997.
- [39] Kuang W H, Dou Y Y, Zhang C, Chi W F, Liu A L, Liu Y, Zhang R H, Liu J Y. Quantifying the heat flux regulation of metropolitan land use/land cover components by coupling remote sensing modeling with in situ measurement. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2015, 120(1): 113-130.
- [40] Zheng B J, Myint S W, Fan C. Spatial configuration of anthropogenic land cover impacts on urban warming. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 130: 104-111.
- [41] 赵芮, 申鑫杰, 田国行, 郭煜琛, 何瑞珍. 郑州市公园绿地景观特征对公园冷岛效应的影响. *生态学报*, 2020, 40(9): 2886-2894.
- [42] 彭保发, 石忆邵, 王贺封, 王亚力. 城市热岛效应的影响机理及其作用规律——以上海市为例. *地理学报*, 2013, 68(11): 1461-1471.
- [43] 唐泽, 郑海峰, 任志彬, 崔明星, 何兴元. 城市地表热力景观格局时空演变——以长春市为例. *生态学报*, 2017, 37(10): 3264-3273.
- [44] 徐伟, 张蕾, 漆梁波, 刘冬韡, 张仕鹏, 曹丹萍. 地面风对上海城市热岛影响的观测分析. *气象*, 2019, 45(9): 1262-1277.
- [45] Li J X, Song C H, Cao L, Zhu F G, Meng X L, Wu J G. Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: a case study of Shanghai, China. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3249-3263.
- [46] Lisi P J, Schindler D E, Cline T J, Scheuerell M D, Walsh P B. Watershed geomorphology and snowmelt control stream thermal sensitivity to air temperature. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(9): 3380-3388.
- [47] 敖翔宇, 谈建国, 支星, 过霁冰, 陆一闻, 刘冬韡. 上海城市热岛与热浪协同作用及其影响因子. *地理学报*, 2019, 74(9): 1789-1802.
- [48] Bueno B, Norford L, Pigeon G, Britter R. Combining a detailed building energy model with a physically-based urban canopy model. *Boundary-Layer Meteorology*, 2011, 140(3): 471-489.