

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

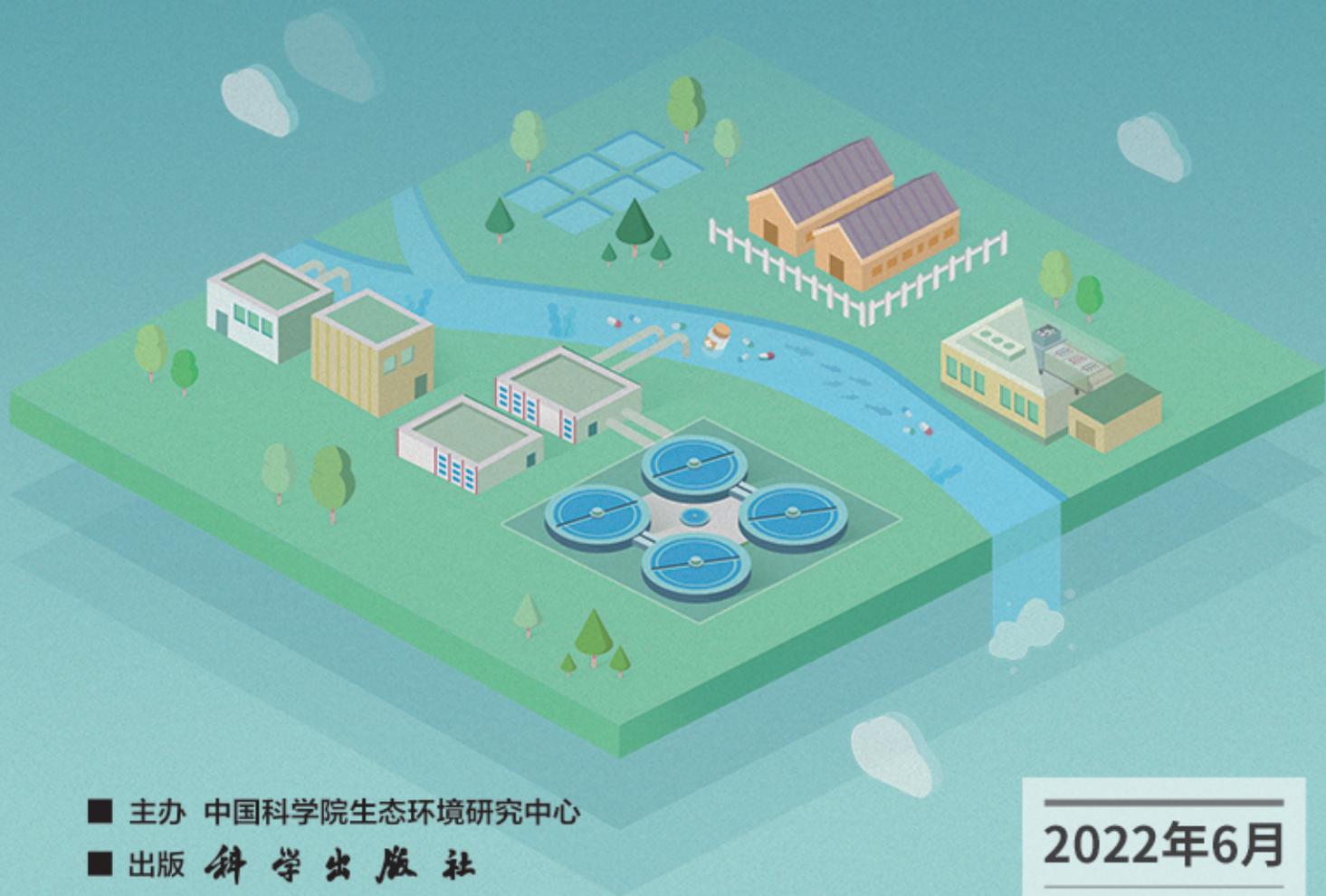
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期

Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM_{2.5} 浓度影响 邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)

新冠疫情管控措施对郑州市 PM_{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响 黄兵, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)

COVID-19 管控期间苏州市 PM_{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析 缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)

2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化 谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)

基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM_{2.5} 来源 彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)

保定市冬季 PM_{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析 吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)

南京江北新区 PM_{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源 关璐, 丁铖, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)

广西十万大山背景点 PM_{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析 邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)

大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例 张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)

基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因 唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)

天津市 PM_{2.5}-O₃ 复合污染特征及气象影响分析 肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)

2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析 周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)

河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化 晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)

热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响 赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)

武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源 苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)

运城市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)

我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁 范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价 武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)

内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险 张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思璐, 孙兴滨, 王山军 (3005)

不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制 宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)

高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素 李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔景阳, 陈安强, 张丹 (3027)

青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析 张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)

东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价 赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)

湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险 刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)

长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价 张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)

香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析 陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)

城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应 陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)

2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子 屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)

嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系 王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)

近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析 葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)

长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制 谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)

高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法 顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋钟钟, 曹引, 赵红莉 (3140)

不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化 陈旭东, 高良敏 (3149)

生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染 石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)

不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响 吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)

北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析 席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐苏士, 荆红卫, 刘保献 (3177)

不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征 章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)

可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制 曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)

4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性 唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)

农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制 龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)

腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析 李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)

2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征 徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)

黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征 孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)

青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析 温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)

西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响 刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴鑫, 刘双燕 (3262)

贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价 张倩, 韩贵琳 (3269)

南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析 董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)

神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价 严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)

石灰海泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复 许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)

水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响 谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)

改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应 罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)

土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应 罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)

小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响 靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)

重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征 廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)

长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征 廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)

基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应 梁建设, 白永平, 杨雪菡, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)

《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)

基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应

梁建设¹, 白永平^{1*}, 杨雪荻², 高祖桥¹, 李玲蔚¹, 张春悦¹, 王倩¹

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘要: 改善城市热环境,提升人居环境质量是创建生态宜居城市的重要前提。目前对城市扩张与热环境关系的研究多基于遥感数据,多源数据应用较薄弱。选取西安都市圈核心区,基于2010年和2020年Landsat遥感影像测定城市扩张及热环境时空演变状况,利用兴趣点和百度热力指数等多源数据,通过地学统计分析方法对城市热环境响应机制进行多方面研究。结果表明:①研究区建设用地共扩张200.84 km²,面积和强度呈现“中心和外围较弱,两者之间较强”特征,扩张模式以边缘式和填充式为主。②2010~2020年间,研究区整体热环境恶化,热岛区面积增加282.65 km²,热岛区蔓延与城市扩张方向一致,分布格局由“东南-西北”向“东北-西南”演变;但城市中心区平均温度下降1.09℃。③城市扩张与城市热环境恶化表现为强正相关;城市空间规模扩大对热环境恶化的贡献率为60.40%;各社会经济因素作用程度较弱,总体贡献率为39.60%,植被水体降温作用明显,多因素共同影响下,地表温度共增加0.241个单位。城市扩张过程中地表参数和城市二维形态变化依然是热环境变化的主要因素,而三维形态和社会经济活动升温作用相比较小,水体和植被降温贡献突出。

关键词: 城市扩张; 城市热岛; 多源大数据; 空间主成分分析; 西安都市圈核心区

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-3365-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109149

Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data

LIANG Jian-she¹, BAI Yong-ping^{1*}, YANG Xue-di², GAO Zu-qiao¹, LI Ling-wei¹, ZHANG Chun-yue¹, WANG Qian¹

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Improving the urban thermal environment and improving the quality of human settlements are important prerequisites for creating ecologically livable cities. The current research on the relationship between urban expansion and the thermal environment is mostly based on remote sensing data, and the application of multi-source data is weak. Here, we selected the Xi'an metropolitan core area, measured the urban expansion and temporal and spatial evolution of the thermal environment based on Landsat remote sensing images in 2010 and 2020, and used multi-source data, such as interest points and the Baidu thermal index, to study the response mechanism of the urban thermal environment through geoscience statistical analysis methods. The results showed that: ① the construction land in the study area had expanded by 200.84 km², and the area and intensity showed that “the center and the periphery are weaker, and the difference between the two” characteristics, and the expansion mode was mainly edge type and infill type. ② Between 2010 and 2020, the overall thermal environment in the study area deteriorated, and the area of the heat island area increased by 282.65 km². The spread of the heat island area was in the same direction as the urban expansion, and the distribution pattern evolved from “southeast-northwest” to “northeast-southwest;” however, the average temperature in the central area of the city decreased 1.09℃. ③ Urban expansion was strongly positively correlated with the deterioration of the urban thermal environment. The expansion of urban space had a contribution rate of 60.40% to the deterioration of the thermal environment, and various socio-economic factors had a weaker effect, with an overall contribution rate of 39.60%. The vegetation water body had an obvious cooling effect; under the influence of multiple factors, the surface temperature increased by 0.241 units. In the process of urban expansion, changes in surface parameters and two-dimensional urban morphology were still the main factors for thermal environment changes, whereas three-dimensional morphology had a small effect on the warming of social and economic activities, and the contribution of water bodies and vegetation to cooling was prominent.

Key words: urban sprawl; urban thermal environment; multi-source data; spatial principal component analysis; Xi'an metropolitan core area

联合国2018年《世界城镇化展望报告》指出,世界城市化率在2050年将达到68%,中国作为主要新兴经济体之一,城镇化率在2010~2020年间增长14.21%,城市化导致建设用地扩张进而使城市热环境恶化^[1~3]。热环境问题加剧不仅使城市人居环境质量变差,还给城市能源和生态环境造成较大压力^[4~6]。研究城市扩张进程中城市热环境的演变和响应对打造生态和宜居城市具有重要意义。因此,目前城市热环境成为城市气候和环境研究热点之

一^[7,8]。

当前已有大量基于星载遥感和统计数据的城市扩张与热环境关系研究,结果表明城市扩张的表现

为城市建设用地增多,建筑物密度和高度增加,城市人口和产业增多,生态用地面积减少^[9~11]。上述情况导致不透水面和人为热排放增多,城市表面粗糙度增加,降温区域面积减少,从而提高了地表温度(land surface temperature, LST)^[12~14],进而造成城市热环境恶化。综合目前研究来看,城市形态、社会经济活动对城市热环境的影响强烈^[15~17]。但星载遥感

收稿日期: 2021-09-16; 修订日期: 2021-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(40771054); 甘肃省重点研发计划项目(18YF1FA052); 高等学校博士学科点专项科研基金联合项目(20106203110002)

作者简介: 梁建设(1998~),男,硕士研究生,主要研究方向为城市扩张与热环境, E-mail: dm_ljs_qixi@163.com

* 通信作者, E-mail: baiyp@nwnu.edu.cn

和统计数据目前无法精确对社会经济和城市三维形态等因素进行空间化表征^[18~22]. 近年来, 部分学者尝试利用网络大数据解决这一问题, 证明网络大数据在社会经济和城市三维形态因素表征方面具有可空间化、精细化和实时性强的优势^[23~25]. 但目前研究对于网络大数据应用多局限于兴趣点 (points of interest, POI) 与星载遥感数据^[26~28], 还可继续综合其他数据源进行多因素综合研究. 因此, 本文在前人研究的基础上, 利用百度热力指数、POI 数据表征社会经济因素, 网络地图建筑轮廓数据表征城市三维形态, 构建一个由城市自然状况、城市空间规模和社会经济这 3 个方面综合的城市扩张表现体系, 研究城市热环境对城市扩张的响应.

另外, 西安作为西北地区唯一的国家中心城市, 经济发展程度较高, 热环境问题突出. 当前研究多以西安市域或建成区为研究对象^[29~32], 对西安都市圈核心区研究较少. 随着西咸接合片区成为 11 个国家城乡融合发展实验区之一, 西安都市圈核心区城市化水平不断提升, 热环境迎来严峻挑战. 在此背景下, 平衡好都市圈发展与热环境效应之间的关系, 是西安都市圈核心区生态文明建设的重要组成部分.

本文以西安都市圈核心区为研究对象, 识别 2010~2020 年城市扩张及热环境时空演变状况, 利用百度热力指数、建筑轮廓数据、遥感数据和 POI 数据等多源数据, 在社会经济活动精确表征, 城市三维形态与其他因素综合研究两方面进行创新, 对城市热环境与城市扩张的关系进行研究, 通过科学全面地揭示研究区城市扩张中热环境演变规律, 以期改善城市热环境提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域

西安都市圈核心区位于关中平原中部和泾渭两河交汇处^[33,34], 包括西安市、咸阳市城区、西咸新区和兴平市 (图 1), 总面积约 6 453 km², 占陕西省总面积的 3.1%. 2010~2020 年常住人口增加 392.89 万人, 2020 年总人口已突破 1 000 万人, GDP 增长 4 714.48 亿元, 占陕西省 GDP 增长的 18%, 近年来城市建设用地扩张迅速, 城市热环境逐渐恶化.

1.2 数据来源

本文选取 Landsat 数据, 利用 ENVI 5.3 软件中 Radiometric Calibration 和 FLAASH Atmospheric Correction 工具对其进行辐射定标和大气校正, 基于多尺度分割的多影像局部填充模型^[35]以 2019 年 8 月 29 日影像为填充影像 (两日平均气温相差 1.5℃), 进行去云处理. 使用最大似然监督分类方

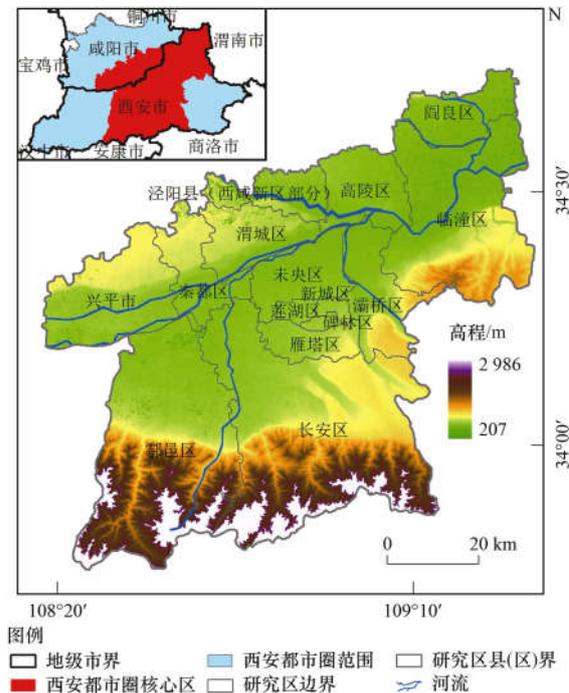


图 1 研究区域示意

Fig. 1 Study area schematic

法解译土地利用类型, 根据各地类占比通过 Google Earth 高分辨率影像目视解译和部分区域现场调查随机选取各地类共 164 个验证样区对遥感解译准确度进行评估, 结果整体准确度为 90.12%, Kappa 系数 0.85, 结果符合研究需求.

2020 年研究区网络大数据包括: POI、百度热力指数和建筑轮廓数据. 其中 POI 数据剔除重复、无效、公园绿地和风景名胜点共 8 698 个点后, 剩余 824 333 个; 建筑轮廓数据共 133 723 个建筑面. 其他数据还包括夜间灯光和 DEM 数据. 为便于计算, 将数据空间分辨率统一至 30 m × 30 m, 并统一空间参考 (表 1).

1.3 研究方法

1.3.1 城市扩张指数计算

选取城市扩张强度和景观扩张指数表征城市扩张状况. 城市扩张强度指数用以表达单位时间内城市扩张强弱:

$$UEI = (At_2 - At_1) / (At_1 \times \Delta t) \quad (1)$$

式中, UEI 为城镇建设用地扩张强度指数; At_1 和 At_2 分别为 t_1 和 t_2 时间段研究区城镇建设用地面积; Δt 为 $t_1 \sim t_2$ 的间隔年份.

景观扩张指数^[36]用以识别城市扩张模式, 包括飞地式、填充式和边缘式. 其中, 填充式指在建成区内部扩张的模式; 边缘式指沿已有建设用地边缘向外扩张的模式; 飞地式指新扩张用地空间上不与既有用地接触的扩张模式:

$$LEI = L_{com} / P_{new} \quad (2)$$

表 1 数据类型及获取途径

Table 1 Data type and access method

数据系列	数据名称	数据来源	用途	日期
	Landsat 5 TM	地理空间数据云	反演 LST 和提取地表信息	2010 年 7 月 24 日; 2020 年 7 月 30 日
	Landsat 8 OLI			
栅格数据	VIIRS/NPP 夜光数据	美国国家海洋大气管理局 NOAA	反映经济活动强度	2020 年 8 月
	DEM 数据	地理空间数据云	获取地形信息	2016 年
	百度热力指数	百度地图	反映人口密度	2020 年 8 月
矢量数据	POI 数据	高德地图	反映人为活动强度	2020 年 8 月
	建筑轮廓数据	百度地图	反映城市三维形态	2020 年 8 月

式中, LEI 为景观扩张指数, L_{com} 为新增城市用地与现有城市用地的共同边界长度; P_{new} 为新增城市用地的周长; 飞地式 $LEI = 0$, 边缘式 $0 < LEI \leq 0.5$, 填充式 $0.5 < LEI \leq 1$.

1.3.2 LST 反演

参照文献 [37], 利用辐射传输方程法通过 Landsat 数据进行 LST 反演. 从 NASA 官网 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>) 获取透过率和大气上辐射亮度. 地表比辐射率计算采用混合像元分解法将遥感影像分为水体、城镇和自然表面这 3 种类型.

$$\varepsilon_{surface} = 0.9625 - 0.0614F_V - 0.0461F_V^2 \quad (3)$$

$$\varepsilon_{building} = 0.9589 - 0.086F_V - 0.0671F_V^2 \quad (4)$$

式中, $\varepsilon_{surface}$ 和 $\varepsilon_{building}$ 为自然表面和城镇的比辐射率; F_V 为植被覆盖度, 依据归一化植被指数值 (NDVI) 确定.

$$F_V = \left[\frac{NDVI - NDVI_V}{NDVI_V + NDVI_S} \right]^2 \quad (5)$$

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) \quad (6)$$

式中, $NDVI_V = 0.70$, $NDVI_S = 0$. 当某个像元 $NDVI > 0.70$ 时, F_V 取值为 1; $NDVI < 0$ 时, F_V 取值为 0.

热红外辐射亮度值为:

$$L_\lambda = [\varepsilon \times B(T_s) + (1 - \varepsilon) \times L_\downarrow] \times \tau + L_\uparrow \quad (7)$$

$$B(T_s) = [L_\lambda - L_\uparrow - \tau(1 - \varepsilon)L_\downarrow] / \tau \times \varepsilon \quad (8)$$

式中, L_λ 为地表辐射率, T_s 为地表真实温度, $B(T_s)$ 为通过普朗克定律推出的黑体热辐射亮度, τ 为大气在热红外波段的透过率, L_\uparrow 为大气上辐射亮度, L_\downarrow 为地面真实辐射亮度经过大气层后传达到卫星传感器的能量. 参照普朗克公式的反函数, 得出地表真实温度 T_s , 单位为 $^\circ\text{C}$.

$$T_s = K_2 / \ln[K_1 / B(T_s) + 1] \quad (9)$$

式中, K_1 和 K_2 为 Landsat5 TM 参数时, 分别为 $666.09 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})^{-1}$ 和 1282.7 K ; 为 Landsat8 OLI 参数时, 为 $774.8853 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})^{-1}$ 和 $K_2 = 1321.0789 \text{ K}$.

通过标准差法将 LST 分为极低温区、低温区、较低温区、中温区、较高温区、高温区和极高温区这 7 个等级. 根据 2020 年统计反演结果得 LST 主要分布在 $32 \sim 40^\circ\text{C}$ 之间. 由于较高温区、高温区和极高温区 LST 值高于平均值, 因此本文将这些区域视为城市热岛区.

1.3.3 因子计算和统计分析方法

本研究根据以往研究并结合研究区区位特征选取 11 个因素分析响应机制 (表 2), 部分指数计算方法如下.

改进的归一化差值水体指数 (MNDWI) 用来表征水体信息 [38].

$$MNDWI = (Green - SWIR1) / (Green + SWIR1) \quad (10)$$

归一化差值不透水面指数 (NDISI) 为城市下垫面主要组成部分 [39].

$$NDISI = \frac{TIRS1 - (MNDWI + NIR + SWIR1) / 3}{TIRS1 + (MNDWI + NIR + SWIR1) / 3} \quad (11)$$

归一化差值裸地与建筑指数 (NDBBI) 反映裸地和建筑用地信息.

$$NDBBI = \frac{1.5SWIR2 - (NIR + Green) / 2}{1.5SWIR2 + (NIR + Green) / 2} \quad (12)$$

式中, Green、SWIR1、TIRS1、NIR 和 SWIR2 分别对应 Landsat5 TM 第 2、5、6、4 和 7 波段, Landsat8 OLI 第 3、6、10、5 和 7 波段.

地表反照率 (Albedo) 为决定地表吸收太阳辐射和地表能量收支的重要参数.

$$Albedo = [(0.356a_2 + 0.13a_4 + 0.373a_5 + 0.085a_6 + 0.072a_7) / 225] - 0.0018 \quad (13)$$

式中, a_i 为 Landsat8 OLI 第 i 波段灰度值.

其他因子还包括: DEM 和坡度指数反映地形; 通过 ArcGIS 10.7 平台将网络建筑轮廓数据栅格化, 形成建筑高度数据, 反映城市三维形态; 利用经过矫正处理的 2010 年和 2020 年夜间灯光数据表现

人为活动强度;利用重采样的百度热力数据反映人口分布;POI 数据核密度分析结果表征产业集聚情况.

本文利用空间主成分分析方法^[40]来去除冗余信息,克服多因子共线性问题,方便进行城市热环境

响应分析.空间主成分分析方法中一般将特征值大于1,累计方差贡献率超过80%作为因子选取标准.

本文还利用 Pearson 相关性分析检验城市扩张各因子与 LST 之间相关性大小;通过标准差线性回归模型探究 LST 对各城市扩张因子响应.

表 2 城市热环境影响因素

Table 2 Influencing factors of urban thermal environment

一级指标	二级指标	三级指标	表征指数
自然因素	植被水体	植被	植被覆盖度
		水体	改进的归一化差值水体指数
	地形地貌	海拔高度	高程
		坡度	坡度指数
人文因素	城市空间规模	不透水面	归一化差值不透水面指数
		裸地和建筑用地	归一化差值裸地与建筑指数
		地表能量收支	地表反照率指数
	社会经济活动	建筑高度	建筑高度指数
		人为活动强度	夜间灯光指数
		人口密度	百度热力指数
		产业活动密度	POI 核密度指数

2 结果与分析

2.1 城市扩张时空演变特征

2010~2020 年研究区城镇建设用地共扩张 200.84 km²,扩张面积及强度呈现“中心和外围较弱,两者之间较强”特征,不同区县表现出较大差异(表 3).其中,长安区、雁塔区、未央区和灞桥区建设用地扩张面积分别为 50.55、37.62、36.96 和

21.60 km²,共占总体扩张面积的 73.06%,扩张强度分别为 0.024 5、0.039 2、0.025 9 和 0.020 9.阎良区、新城区、碑林区和莲湖区建设用地面积变化不明显,扩张强度均在 0.001 以下,其中阎良区和新城区建设用地面积出现下降趋势.究其原因,新城区土地利用率高,已经步入城市更新阶段;而阎良主城区外围部分乡镇建设用地恢复为耕地,导致总量建设用地减少,但阎良主城区呈扩张趋势.

表 3 2010~2020 年研究区城市扩张数量特征

Table 3 Quantitative characteristics of urban expansion in the study area from 2010 to 2020

县区	扩张面积/km ²	扩张强度	县区	扩张面积/km ²	扩张强度
总体	200.84	0.015 0	阎良区	-0.23	-0.000 4
碑林区	0.08	0.000 4	临潼区	3.84	0.002 8
新城区	-0.39	-0.001 4	高陵区	11.54	0.013 9
莲湖区	0.87	0.001 9	鄠邑区	10.74	0.009 5
灞桥区	21.60	0.020 9	秦都区	11.86	0.014 1
雁塔区	37.62	0.039 2	渭城区	8.01	0.011 4
长安区	50.55	0.024 5	兴平市	1.87	0.001 8
未央区	36.96	0.025 9	泾阳县 ¹⁾	5.92	0.011 6

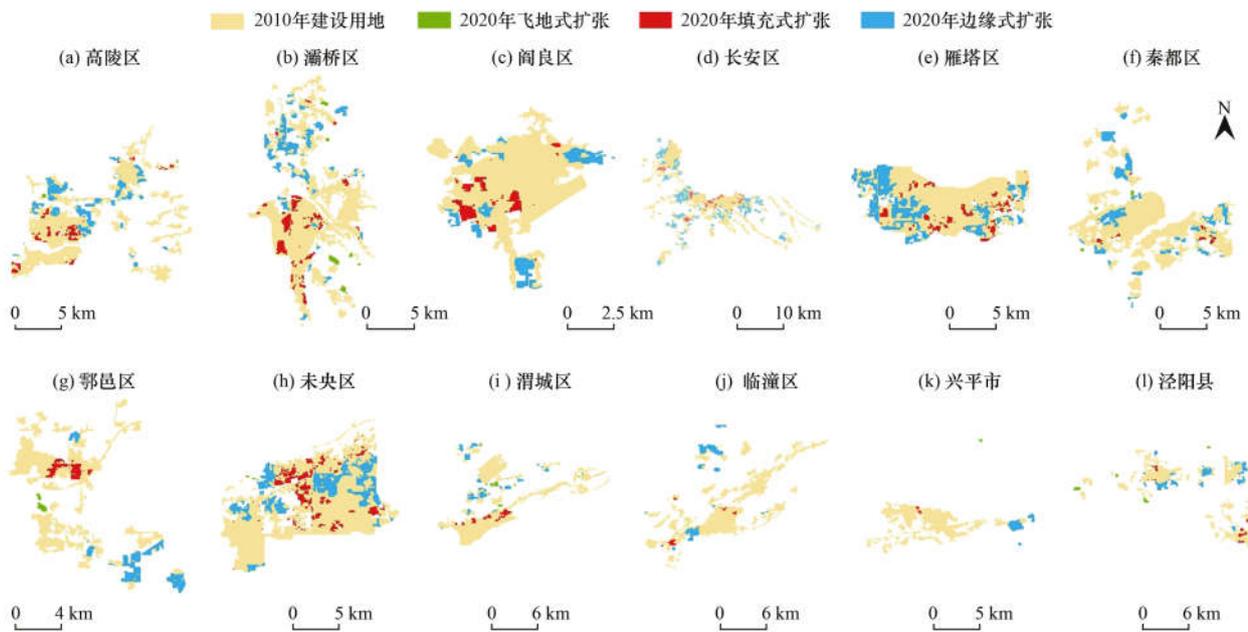
1)泾阳县仅包括县域内西咸新区部分,下同

为排除其他建设用地干扰,本文根据各区县城乡总体规划提取城市建设用地范围并进行景观扩张模式识别,各区县扩张模式以边缘式和填充式为主,飞地式扩张较少,3 种扩张模式面积分别为 169.28、49.64 和 6.09 km²,扩张斑块数量分别为 386、640 和 37 个.边缘式扩张面积占比较大,各区县边缘式扩张面积占比均高于 50%,其中兴平市[图 2(k)]和秦都区[图 2(f)]边缘式扩张面积占比均超过 85%;填充式扩张面积占比均较小,但扩张斑块数量占比较大,大部分区县呈与边缘式扩张斑

块数量占比相近的情况,均为 40%左右,但雁塔区、灞桥区、阎良区和未央区填充式斑块数量占比超过 60%;飞地式扩张斑块面积及数量占比均较小,大部分区县占比均在 5%左右,其中渭城区[图 2(i)]和泾阳县(西咸新区部分)[图 2(1)]斑块数量及面积占比在 10%左右.

2.2 城市热环境时空演变特征

由表 4 可知,2010~2020 年研究区热岛面积共增加 282.65 km²,增长 16.28%,最高温差为 1.35℃.从温度分区来看,2010~2020 年中温区面



由于莲湖区、碑林区和新城区城市空间扩张特征不明显,不予表现

图 2 2010 ~ 2020 年城镇建设用地扩张类型空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of expansion types of urban construction land from 2010 to 2020

表 4 2010 年和 2020 年地表温度面积及占比

Table 4 Surface temperature area and proportion in 2010 and 2020

年份	极低温区		低温区		较低温区		中温区		较高温区		高温区		极高温区	
	面积 /km ²	占比 /%												
2010	93.98	1.46	483.05	7.49	660.95	10.25	3 475.36	53.88	1 423.84	22.08	256.17	3.97	56.46	0.88
2020	120.34	1.86	619.93	9.61	734.73	11.39	2 959.15	45.86	1 831.70	28.38	174.41	2.70	13.01	0.20

积下降 516.21 km², 占比分别为 53.88% 和 45.86%, 降幅接近 8%, 并有向较高温区转变的态势; 较高温区面积增加 407.86 km², 占比分别为 22.08% 和 28.38%, 增幅为 6.3%; 高温区和极高温区面积分别减少 81.76 和 43.45 km², 降幅分别为 1.27% 和 0.68%.

2010 年和 2020 年各区县热环境变化存在较大差异(表 5). 其中, 碑林区、莲湖区和新城区热岛面积变化较小, 研究期内均被热岛区覆盖, 占比下降 2% 左右, 最高温度分别下降 1.04、1.89 和 1.74℃, 表明三区热岛效应减弱, 热环境改善明显. 但其余区县热岛面积均呈上升趋势, 城市热环境趋于恶化, 未

表 5 2010 年和 2020 年各区县地表温度等级面积/km²

Table 5 Surface temperature grade area of each district and county in 2010 and 2020/km²

行政区	极低温区		低温区		较低温区		中温区		较高温区		高温区		极高温区	
	2010 年	2020 年												
碑林区	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.38	0.71	3.73	18.05	15.50	4.16	3.36	0.06
新城区	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.18	0.41	4.05	18.78	16.37	10.11	9.34	0.64
莲湖区	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	1.24	5.95	27.25	23.63	9.03	8.57	0.86
灞桥区	0.03	0.05	1.86	0.43	11.86	8.81	143.40	142.73	145.89	150.77	19.48	20.73	2.45	1.46
雁塔区	0.00	0.00	0.00	0.00	0.34	0.07	30.57	45.54	67.90	95.41	44.08	10.85	9.47	0.48
长安区	62.95	71.34	269.71	331.92	283.89	318.78	598.23	607.64	338.64	249.31	34.92	11.10	3.49	1.75
未央区	0.01	0.00	1.16	0.03	11.55	1.90	113.64	46.72	92.62	172.23	34.26	39.99	10.04	2.40
阎良区	0.00	0.00	0.23	0.02	15.21	0.02	207.08	144.64	16.44	90.02	2.14	6.46	0.59	0.88
临潼区	0.00	0.78	3.88	2.59	64.45	63.51	592.99	666.12	235.13	180.28	19.87	4.77	1.27	0.06
高陵区	0.00	0.20	1.01	0.29	4.61	1.24	205.60	135.46	72.92	135.34	2.82	13.48	0.25	1.39
鄂邑区	30.98	47.72	200.04	283.73	254.72	333.03	665.60	384.39	117.04	224.46	11.38	7.36	1.48	0.68
秦都区	0.00	0.07	1.29	0.19	6.01	3.38	172.76	127.25	64.50	113.63	12.58	13.99	2.42	1.19
渭城区	0.02	0.13	2.62	0.24	3.87	2.07	124.02	136.75	124.30	115.85	10.73	12.29	2.12	0.36
兴平市	0.00	0.00	0.75	0.00	4.01	1.72	414.17	355.37	79.87	143.98	7.17	6.09	1.53	0.67
泾阳县	0.00	0.00	0.00	0.01	0.45	0.05	206.51	163.10	54.87	96.19	1.23	3.98	0.08	0.12

央区、阎良区和高陵区最为明显,面积增长分别为 77.7、78.19 和 74.22 km², 分别增加 30%、32% 和 26%, 三区最高温度分别上升 1.02、0.03 和 0.9℃, 西安经济技术开发区和沣东新城为明显高温集聚区, LST 最高值达到 52.62℃. 其余区县热岛均呈现以建成区为中心的不规则环状扩展, 表明城市扩张与热环境恶化存在一定相关性.

2010 年和 2020 年研究区热岛空间分布特征相

似(图 3):热岛集中分布于建筑、人口集聚的城市建成区和城市交通道路沿线; 中温区则主要分布在江河、公园绿地、内湖和未建设用地等区域; 而较低温区、低温区、极低温区分布于南部山地, 表现出明显的冷岛效应. 两期时序图对比发现, 热岛区域沿着城市建成区不断扩展, 研究区北部及西部热岛扩张明显, 热岛分布格局由“东南-西北”向“东北-西南”转变.

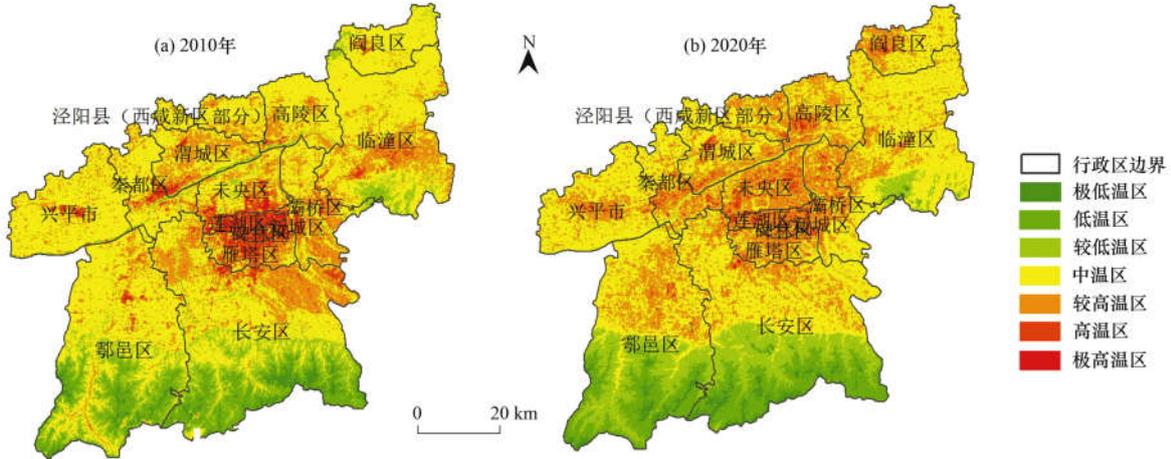


图 3 2010 年和 2020 年研究区热环境空间格局

Fig. 3 Spatial pattern of thermal environment in the study area in 2010 and 2020

2.3 城市热环境响应分析

2.3.1 相关性分析

本文以 2010 年和 2020 年各区县城市建设用地占比为自变量, 城市主要热岛面积占比为因变量, 建立城市建设用地扩张与热岛变化的回归模型(图

4), 探究城市扩张与 LST 的相关性. 回归结果 R^2 分别为 0.937 和 0.984, 显著性水平 $P < 0.01$, 呈现明显的线性正相关. 且 2010 ~ 2020 年间, 散点图中各点呈现向右上方移动的现象, 表明建设用地扩张会导致热岛面积增加.

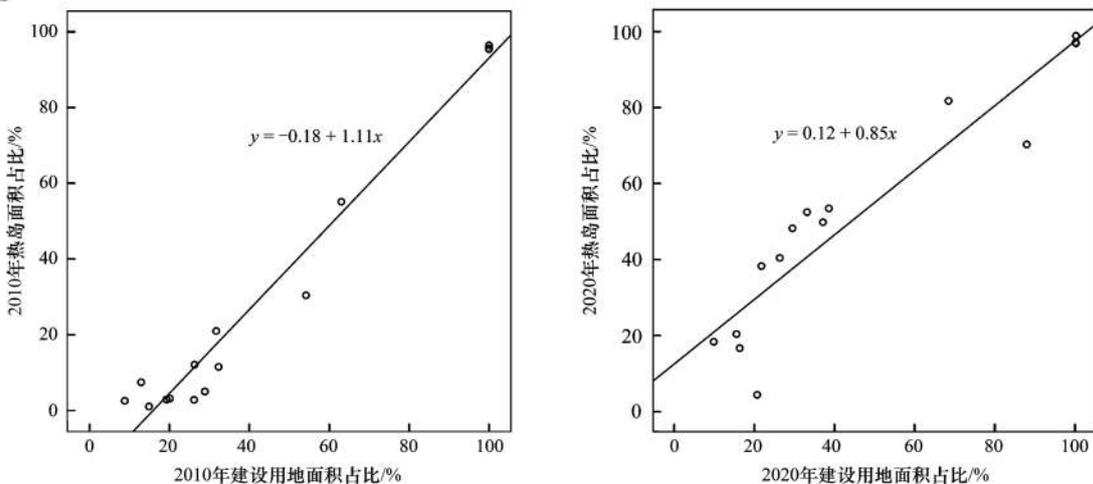


图 4 各区(县)建设用地面积和热岛面积占比相关性

Fig. 4 Correlation of the area of construction land and the proportion of heat island area in each district and county

综上, 城市建设用地扩张与热环境演变存在相关性. 由于 2020 年热岛效应相较 2010 年明显, 同时考虑研究时效性问题, 本文以 2020 年为基础进行相关性分析及后续响应分析. 随机选取 500 个样本点, 经多次尝试后, 建立 500 m 半径缓冲区形成样区, 并

获取各个样区位置处指数平均值和 LST 平均值, 最终通过 Pearson 分析识别各因素与城市热环境效应的相关性大小(表 6). 自然因素中 F_v 和 MNDWI 等与 LST 之间呈显著负相关性, 表明植被、水体具有缓解城市热岛效应的作用. NDISI、POI 密度指数和

表 6 影响因子与地表温度 Pearson 分析¹⁾

Table 6 Pearson analysis of impact factors and surface temperature

	NDISI	F_V	MNDWI	NDBBI	POI	Albedo	热力指数	建筑高度	DEM	夜间灯光指数	坡度
相关系数	0.712 **	-0.451 **	-0.307 **	0.618 **	0.335 **	0.358 **	0.324 **	0.303 *	-0.893 **	0.315 **	-0.766 **

1) ** 表示在 0.01 水平显著(双侧检测), * 表示在 0.05 水平显著(双侧检测)

热力指数与 LST 之间呈显著正相关性,表明建成区人类活动所产生的热量,难以较快散热,易引起城市热环境恶化。

2.3.2 城市热环境响应分析

为研究热环境响应差异,对各因子归一化处理

后进行空间主成分分析,得出前 2 个主成分特征值大于 1,因子贡献率超过 85%。第 1 主成分主要包括 NDBBI 和 F_V 等,可以概括为城市空间规模和自然因素影响;第 2 主成分主要为 POI 密度指数和热力指数,可以概括为社会经济活动影响(表 7)。

表 7 主成分得分载荷矩阵

Table 7 Principal component score loading matrix

项目	夜间灯光指数	坡度	NDBBI	NDISI	建筑高度	POI	F_V	DEM	Albedo	MNDWI	热力指数
第 1 主成分	0.764	-0.789	0.837	0.574	0.629	0.677	-0.918	-0.745	0.365	-0.816	0.711
第 2 主成分	0.398	0.478	-0.295	-0.564	0.635	0.631	-0.044	0.526	-0.104	-0.093	0.612

为继续分析主成分因子对城市热环境的影响程度,对随机选取的 500 个样区进行数值提取,将各主成分模拟指数样区平均值与归一化 LST 平均值在 SPSS 21.0 软件中进行线性回归分析。结果显著性系数均小于 1%,且方差膨胀因子小于 10。采用标准化回归模型比较各主成分不同量纲指标间的作用程度。结果表明 11 个影响因子(表 7)每变化 1 个单位,研究区 LST 将分别变化 0.475、-0.822、0.793、0.678、0.277、0.318、-0.733、-0.804、0.337、-0.631 和 0.353 个单位,人文活动作用较自然因素强,共同作用下地表共升温 0.241 个单位。

自然因素中, F_V 对热环境改善有较大作用,贡献率为 24.52%,表明植被对于城市热岛降温作用较强;水体降温作用较小,贡献率为 21.10%,研究区内河流宽度和人工湿地面积较小,其冷岛辐射较弱,故降温作用较差。城市空间规模因素中 NDBBI 和 NDISI 正向影响较为突出,贡献率分别为 45% 和 39%。表明随着城市建设,裸地及建设用地面积增多,LST 升高明显。建筑高度增温效果相对其他因素较低,贡献率为 16%。社会经济增加方面 POI 密度指数、热力指数和夜间灯光指数这 3 个指标贡献率分别为 28%、31% 和 41%。

3 讨论

3.1 城市扩张模式与 LST 的动态关系

本文发现 LST 对各城市扩张模式响应不同,而已有研究鲜见对这一方面的探讨,有必要对其进行研究。经统计,边缘式、飞地式和填充式分别增温 3.10、1.10 和 1.98℃,增温后 LST 最高值排序为:填充式 > 边缘式 > 飞地式。为探究造成这种差异的原因,经过

反复实验,选定 100 m 网格,取各网格内部 LST 和 3 方面贡献率最大因子两年差值的平均值进行回归分析,结果显示 F_V 和 NDBBI 通过 1% 显著性检验,夜间灯光指数通过 5% 显著性检验(图 5)。

填充式扩张 NDBBI 增长系数最强,标准化系数为 0.497,其次是边缘式(0.479),最后是飞地式(0.345); F_V 下降系数排序依次为飞地式(-0.604)、边缘式(-0.502)和填充式(-0.484)。表明 NDBBI 的上升是填充式和边缘式扩张中的主要升温因素,可解释 25% 和 23% 的增温,而 F_V 降温作用较弱,飞地式扩张 LST 对 F_V 响应速度最快,可解释其 37% 的增温,NDBBI 虽起到较大作用,但响应较小。3 种扩张模式中夜间灯光指数相关性不明显,但仍存在差异,响应程度依次为:飞地式 > 边缘式 > 填充式。3 种模式对夜间灯光响应差异表明,飞地式 LST 对人为热排放最敏感,也表现出 LST 对人为热排放响应大小随着与城市建成区距离增加出现增强趋势。计算 3 项指标总体增温效果后,飞地式扩张城市 LST 增温最低,填充式和边缘式扩张相似,这与之前统计结果相互印证。LST 对飞地式扩张的 F_V 响应在各模式和因素中最强,反映其增温效率最高,而填充式在增温效率方面比边缘式扩张稍小。

3.2 热环境变化机制探讨

城市扩张包含城市空间规模扩大和社会经济活动增强两个主要方面。一方面,城市空间规模扩大破坏地表植被,导致蒸散发作用减弱,不透水面面积和地块平均高度增加,改变下垫面属性和地表粗糙度,同时伴随地表反射率变化,导致地表比热、地表能量收支和近地面风环境发生变化,LST 升高。相关研

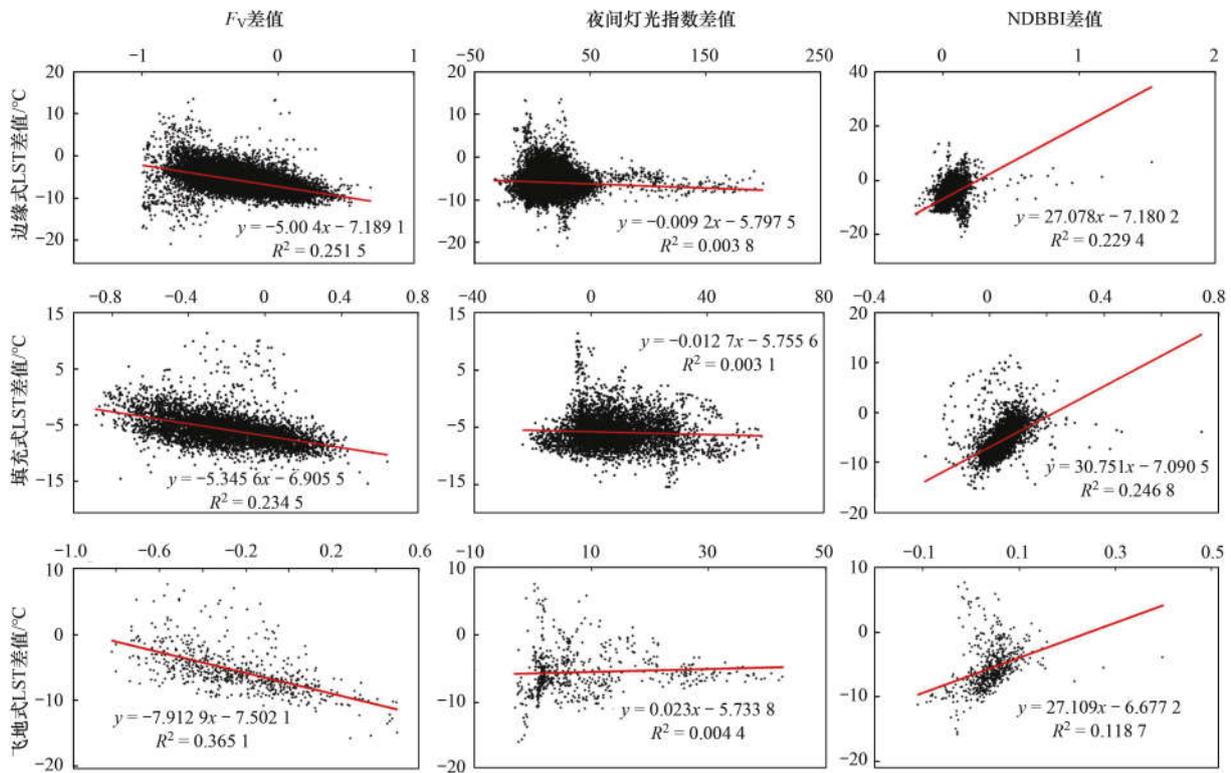


图5 LST 对各个不同模式城市扩张主要因素的响应结果

Fig. 5 Response of LST to the main factors of urban expansion in different modes

究发现植被和水体减少^[41,42],不透水面面积增多^[43,44],建筑高度增加^[45]与LST上升表现出较强正相关性,与本研究结果一致.此外,本研究发现LST对城市二维扩张响应更为强烈,对三维扩张响应则较小.这可能由于城市三维扩张主要通过影响城市风环境阻碍城市与周边低温地区空气对流使高温难以扩散,但大气运动具有不稳定性,且随着建筑高度增加,阴影面积也随之增大,LST可能出现部分地区降低的现象,这与Sun等^[46]的研究结果相似.另一方面,随着城市空间规模扩大,社会经济活动增加导致人为活动强度增加和人口、产业增多与集聚,城市的能源需求、交通需求^[47]和因集聚产生的热量逐渐增加,导致LST上升.但不同于单方面研究人为热排放与LST关系的文章^[48~50],本研究发现社会经济活动增温作用明显弱于城市空间规模,这与Singh等^[51]的研究结果相似.表明进行城市扩张与热环境关系研究时需要利用多源数据对多方面因素进行考虑.

在综合考虑LST响应程度后,为减缓城市热环境恶化,城市空间规模扩大过程中应注意提高三维扩张强度,摒弃“摊大饼”模式,扩张模式要以边缘式扩张为主.同时,城市社会经济活动增加要注重分散人口,完善功能区布局,工业区多以边缘式或距离城区较近的飞地式布局.针对植被降温规划,应主要对城市现有主要廊道进行绿化,减少在城市中进行填充式公园

绿地修建.依据不同因素与LST的关系,进行城市有序扩张是改善城市热环境的重要举措.

本研究对于指导西安都市圈核心区城市层面国土空间规划以及考虑热岛缓解的规划方案制定具有理论和现实意义.但研究受制于Landsat数据的时间分辨率,尚未对夜晚热环境进行研究,缺乏各因素对夜间热环境的影响认识,后续研究需加强Landsat遥感影像与MODIS影像的融合,产出高空间高时相分辨率热红外影像,配合现有大数据进行多时相的城市热环境研究.

4 结论

(1) 2010~2020年研究区城市扩张迅速,城市扩张强度大,呈现“中心和外围较弱,两者之间较强”的特征.城市扩张形式以边缘和填充式为主,且更倾向于以原有建设用地为基础扩张.

(2) 研究区整体热环境趋于恶化,但中心区热环境改善明显,分布格局由“东南-西北”向“东北-西南”演变.

(3) 城市热岛主要集中在工商业和人口密集区域,冷岛则分布于非建设用地、水体和山体等地区;热岛蔓延与城市扩张方向一致,建设用地与热岛面积呈强正相关关系.

(4) 响应分析结果显示,城市地表参数和二维形态变化依然是热环境变化的主要因素,三维形态

和社会经济活动升温作用相比较小,各因素综合将会导致地面升温 0.241 个单位。

参考文献:

- [1] 刘勇洪, 徐永明, 张方敏, 等. 北京城市空间形态对热岛分布影响研究[J]. 地理学报, 2021, **76**(7): 1662-1679.
Liu Y H, Xu Y M, Zhang F M, *et al.* Influence of Beijing spatial morphology on the distribution of urban heat island[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(7): 1662-1679.
- [2] 李宇, 周德成, 闫章美. 中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因子[J]. 环境科学, 2021, **42**(10): 5037-5045.
Li Y, Zhou D C, Yan Z M. Spatiotemporal variations in atmospheric urban heat island effects and their driving factors in 84 major Chinese cities[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 5037-5045.
- [3] Halder B, Bandyopadhyay J, Banik P. Monitoring the effect of urban development on urban heat island based on remote sensing and geo-spatial approach in Kolkata and adjacent areas, India [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, **74**, doi: 10.1016/j.scs.2021.103186.
- [4] Ma W J, Zeng W L, Zhou M G, *et al.* The short-term effect of heat waves on mortality and its modifiers in China: an analysis from 66 communities[J]. *Environment International*, 2015, **75**: 103-109.
- [5] Song J, Pan R B, Yi W Z, *et al.* Ambient high temperature exposure and global disease burden during 1990-2019: an analysis of the global burden of disease study 2019[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **787**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147540.
- [6] Sedaghat A, Sharif M. Mitigation of the impacts of heat islands on energy consumption in buildings: a case study of the city of Tehran, Iran [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, **76**, doi: 10.1016/j.scs.2021.103435.
- [7] Zhou D C, Xiao J F, Bonafoni S, *et al.* Satellite remote sensing of surface urban heat islands: progress, challenges, and perspectives[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(1), doi: 10.3390/rs11010048.
- [8] 姚远, 陈曦, 钱静. 城市地表热环境研究进展[J]. 生态学报, 2018, **38**(3): 1134-1147.
Yao Y, Chen X, Qian J. Research progress on the thermal environment of the urban surfaces[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(3): 1134-1147.
- [9] Wang J T, Qu S Y, Peng K, *et al.* Quantifying urban sprawl and its driving forces in China[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2019, **2019**, doi: 10.1155/2019/2606950.
- [10] Zhang C, Miao C H, Zhang W Z, *et al.* Spatiotemporal patterns of urban sprawl and its relationship with economic development in China during 1990-2010[J]. *Habitat International*, 2018, **79**: 51-60.
- [11] 黄木易, 岳文泽, 何翔. 长江经济带城市扩张与经济增长脱钩关系及其空间异质性[J]. 自然资源学报, 2018, **33**(2): 219-232.
Huang M Y, Yue W Z, He X. Decoupling relationship between urban expansion and economic growth and its spatial heterogeneity in the Yangtze economic belt[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, **33**(2): 219-232.
- [12] 周玄德, 郭华东, 孜比布拉·司马义. 城市扩张过程中不透水面空间格局演变及其对地表温度的影响——以乌鲁木齐市为例[J]. 生态学报, 2018, **38**(20): 7336-7347.
Zhou X D, Guo H D, Zhibibula · Simayi. Spatial pattern evolution of impervious surfaces and its influence on surface temperature in the process of urban expansion: a case study of Urumqi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(20): 7336-7347.
- [13] 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[J]. 生态学报, 2017, **37**(12): 3991-3997.
Sun R H, Wang Y N, Chen T T. Impacts of anthropogenic heat emissions on urban thermal environment: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(12): 3991-3997.
- [14] Tian P, Li J L, Cao L D, *et al.* Assessing spatiotemporal characteristics of urban heat islands from the perspective of an urban expansion and green infrastructure[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, **74**, doi: 10.1016/j.scs.2021.103208.
- [15] Liu Y, Li Q, Yang L, *et al.* Urban heat island effects of various urban morphologies under regional climate conditions [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **743**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140589.
- [16] Guo A D, Yang J, Xiao X M, *et al.* Influences of urban spatial form on urban heat island effects at the community level in China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, **53**, doi: 10.1016/j.scs.2019.101972.
- [17] 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): 1625-1637.
Chen Y P, Zheng B H. Study on the impact of human heat emission on the urban thermal environment of Changsha Zhuzhou Xiangtan urban agglomeration [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, **30**(7): 1625-1637.
- [18] Li X M, Zhou Y Y, Asrar G R, *et al.* The surface urban heat island response to urban expansion: a panel analysis for the conterminous United States [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **605-606**: 426-435.
- [19] Yao R, Wang L C, Huang X, *et al.* Interannual variations in surface urban heat island intensity and associated drivers in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **222**: 86-94.
- [20] 杨智威, 陈颖彪, 吴志峰, 等. 粤港澳大湾区城市热岛空间格局及影响因子多元建模[J]. 资源科学, 2019, **41**(6): 1154-1166.
Yang Z W, Chen Y B, Wu Z F, *et al.* Spatial pattern of urban heat island and multivariate modeling of impact factors in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area [J]. *Resources Science*, 2019, **41**(6): 1154-1166.
- [21] 曹畅, 李旭辉, 张弥, 等. 中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 3987-3997.
Cao C, Li X H, Zhang M, *et al.* Correlation analysis of the urban heat island effect and its impact factors in China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 3987-3997.
- [22] 刘宇峰, 原志华, 孔伟, 等. 1993-2012 年西安城区城市热岛效应强度变化趋势及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2015, **30**(6): 974-985.
Liu Y F, Yuan Z H, Kong W, *et al.* The changing trend of heat island intensity and main influencing factors during 1993-2012 in Xi'an city [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(6): 974-985.
- [23] Song J C, Chen W, Zhang J J, *et al.* Effects of building density on land surface temperature in China: spatial patterns and determinants[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2020, **198**, doi: 10.1016/j.landurbplan.2020.103794.
- [24] 栾夏丽, 韦胜, 韩善锐, 等. 基于城市大数据的热场格局形成机制及主导因素的多尺度研究[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(9): 2861-2868.
Luan X L, Wei S, Han S R, *et al.* A multi-scale study on the formation mechanism and main controlling factors of urban thermal field based on urban big data [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(9): 2861-2868.

- [25] Xu D, Zhou D, Wang Y P, *et al.* Temporal and spatial heterogeneity research of urban anthropogenic heat emissions based on multi-source spatial big data fusion for Xi'an, China [J]. *Energy and Buildings*, 2021, **240**, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110884.
- [26] Min M, Lin C, Duan X J, *et al.* Spatial distribution and driving force analysis of urban heat island effect based on raster data: a case study of the Nanjing metropolitan area, China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, **50**, doi: 10.1016/j.scs.2019.101637.
- [27] 熊鹰, 章芳. 基于多源数据的长沙市人居热环境效应及其影响因素分析[J]. *地理学报*, 2020, **75**(11): 2443-2458.
Xiong Y, Zhang F. Thermal environment effects of urban human settlements and influencing factors based on multi-source data: a case study of Changsha city[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, **75**(11): 2443-2458.
- [28] 武蓉蓉, 谢苗苗, 刘琦, 等. 大都市功能区块视角下的热岛影响因素空间分异[J]. *资源科学*, 2020, **42**(12): 2463-2474.
Wu R R, Xie M M, Liu Q, *et al.* Spatial variability of causative factors of heat islands from the perspective of metropolitan functional blocks[J]. *Resources Science*, 2020, **42**(12): 2463-2474.
- [29] Xu Y S, Zhou D, Li Z. Research on characteristic analysis of urban heat island in multi-scales and urban planning strategies [J]. *Procedia Engineering*, 2016, **169**: 175-182.
- [30] 祝新明, 王旭红, 周永芳, 等. 建成区扩张下的西安市热环境空间分异性[J]. *生态学杂志*, 2017, **36**(12): 3574-3583.
Zhu X M, Wang X H, Zhou Y F, *et al.* Spatial variability of thermal environment in Xi'an under the build-up area expansion [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(12): 3574-3583.
- [31] Liu S H, Zang Z F, Wang W C, *et al.* Spatial-temporal evolution of urban heat island in Xi'an from 2006 to 2016[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2019, **110**: 185-194.
- [32] Mao W T, Wang X H, Cai J, *et al.* Multi-dimensional histogram-based information capacity analysis of urban heat island effect using Landsat 8 data[J]. *Remote Sensing Letters*, 2016, **7**(10): 925-934.
- [33] 国家发展改革委, 住房城乡建设部. 国家发展改革委 住房城乡建设部关于印发 关中平原城市群发展规划的通知 [EB/OL]. <http://www.xa.gov.cn/gk/gjh/fzgh/5d4907dcf99d6572b764aaca.html>, 2021-05-18.
- [34] 陕西省人民政府. 陕西省城镇体系规划(2006-2020年) [EB/OL]. <https://max.book118.com/html/2018/1011/7060153054001152.shtm>, 2021-05-18.
- [35] 周毅. 基于多源数据的成都市城市热岛时空格局演变研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
Zhou Y. Analysis the spatio-temporal pattern evolution of urban heat island in Chengdu based on multi-source data [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [36] 刘小平, 黎夏, 陈逸敏, 等. 景观扩张指数及其在城市扩展分析中的应用[J]. *地理学报*, 2009, **64**(12): 1430-1438.
Liu X P, Li X, Chen Y M, *et al.* Landscape expansion index and its applications to quantitative analysis of urban expansion [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, **64**(12): 1430-1438.
- [37] 罗红霞, 邵景安, 张雪清. 基于辐射传导方程的三峡库区腹地地表温度的遥感反演[J]. *资源科学*, 2012, **34**(2): 256-264.
Luo H X, Shao J A, Zhang X Q. Retrieving land surface temperature based on the radioactive transfer equation in the middle reaches of the Three Gorges reservoir area[J]. *Resources Science*, 2012, **34**(2): 256-264.
- [38] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005, **9**(5): 589-595.
Xu H Q. A Study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI) [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, **9**(5): 589-595.
- [39] 徐涵秋. 一种快速提取不透水面的新型遥感指数[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2008, **33**(11): 1150-1153.
Xu H Q. A new Remote sensing index for fastly extracting impervious surface information [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, **33**(11): 1150-1153.
- [40] 谢启姣. 武汉城市热岛特征及其影响因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, **25**(3): 462-469.
Xie Q J. Analysis on characteristics and influencing factors of urban heat island effect in Wuhan [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, **25**(3): 462-469.
- [41] Al-Saadi L M, Jaber S H, Al-Jiboori M H. Variation of urban vegetation cover and its impact on minimum and maximum heat islands[J]. *Urban Climate*, 2020, **34**, doi: 10.1016/j.uclim.2020.100707.
- [42] Lin Y, Wang Z F, Jim C Y, *et al.* Water as an urban heat sink: blue infrastructure alleviates urban heat island effect in mega-city agglomeration[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121411.
- [43] Sekertekin A, Zadbagher E. Simulation of future land surface temperature distribution and evaluating surface urban heat island based on impervious surface area [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **122**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107230.
- [44] Khamchianga D, Dhakal S. Physical and non-physical factors driving urban heat island: case of Bangkok Metropolitan Administration, Thailand [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **248**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109285.
- [45] Huang X J, Song J Y, Wang C H, *et al.* The synergistic effect of urban heat and moisture islands in a compact high-rise city [J]. *Building and Environment*, 2021, **205**, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108274.
- [46] 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**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120706.
- [47] Su H Y, Han G F, Li L, *et al.* The impact of macro-scale urban form on land surface temperature: an empirical study based on climate zone, urban size and industrial structure in China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, **74**, doi: 10.1016/j.scs.2021.103217.
- [48] He C, Zhou L G, Yao Y R, *et al.* Estimating spatial effects of anthropogenic heat emissions upon the urban thermal environment in an urban agglomeration area in East China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, **57**, doi: 10.1016/j.scs.2020.102046.
- [49] Adelia A S, Yuan C, Liu L, *et al.* Effects of urban morphology on anthropogenic heat dispersion in tropical high-density residential areas [J]. *Energy and Buildings*, 2019, **186**: 368-383.
- [50] 于玲玲, 潘蔚娟, 肖志祥, 等. 人为热对广州高温天气影响的数值模拟个例分析[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(9): 3721-3730.
Yu L L, Pan W J, Xiao Z X, *et al.* Case studies of impacts of anthropogenic heat emissions on heat wave events in Guangzhou [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(9): 3721-3730.
- [51] Singh V K, Mughal M O, Martilli A, *et al.* Numerical analysis of the impact of anthropogenic emissions on the urban environment of Singapore [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150534.

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transport and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-ji, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Autochthonic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)