

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

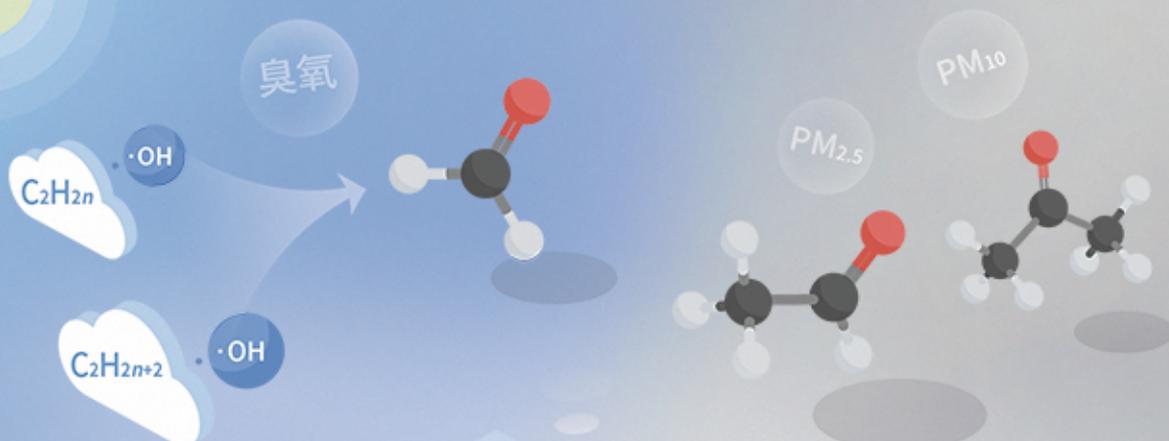
# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于PMF和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析：以南京市观测为例  
胡崑，王鸣，王红丽，景盛翱，陈文泰，卢兴东



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年1月

第42卷 第1期

Vol.42 No.1

目次

2019年国庆节前后北京气态氨和气溶胶铵盐浓度的同步观测 ..... 顾梦娜, 潘月鹏, 宋琳琳, 李萍, 田世丽, 武岳洋, 杨婷婷, 李浩洋, 石生伟, 吐莉尼沙, 吕雪梅, 孙倩, 方运霆 (1)

基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析 ..... 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 史静, 唐颖潇, 姜明, 邱晓滨 (9)

中原城市群典型城市秋冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及溯源 ..... 苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 赵孝因, 齐静文 (19)

沈阳市冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子污染特征及来源解析 ..... 王国祯, 任万辉, 于兴娜, 侯思宇, 张毓秀 (30)

保定地区 PM<sub>2.5</sub> 中重金属元素的污染特征及健康风险评价 ..... 雷文凯, 李杏茹, 张兰, 徐静, 赵文吉, 刘子锐 (38)

基于 PMF 和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析: 以南京市观测为例 ..... 胡崑, 王鸣, 王红丽, 景盛翔, 陈文泰, 卢兴东 (45)

2019年天津市挥发性有机物污染特征及来源 ..... 高璟璇, 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 唐逸, 杨宁, 李源, 毕温凯, 陈魁 (55)

柳州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析 ..... 刘齐, 卢星林, 曾鹏, 于爽 (65)

天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析 ..... 罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 毕晓辉, 张裕芬, 冯银厂 (75)

2017年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区 ..... 谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 李文青, 李浩, 谢轶嵩, 王艳, 刘益和, 王庆九, 胡建林 (88)

2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势 ..... 赵伟, 高博, 卢清, 钟志强, 梁小明, 刘明, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (97)

大型石化企业邻近区域大气沉降中多环芳烃赋存特征及源解析 ..... 李大雁, 齐晓宝, 吴健, 黄沈发, 王敏, 沙晨燕, 沈城 (106)

叶片大气颗粒物滞纳能力评估方法的定量对比 ..... 岳晨, 李广德, 席本野, 曹治国 (114)

东江流域敌敌畏的排放量估算及归趋模拟 ..... 张冰, 张芊芊, 应光国 (127)

松花江哈尔滨段及阿什河抗生素的分布规律与生态风险评估 ..... 杨尚乐, 王旭明, 王伟华, 胡雪莹, 高立伟, 孙兴滨 (136)

东北小兴凯湖沉积物 POPs 污染特征及生态风险评估 ..... 李慧, 李捷, 宋鹏, 程云轩, 焦立新, 杨亚铮 (147)

河南省地表水源中 PPCPs 分布及生态风险评估 ..... 周颖, 吴东海, 陆光华, 姚晶晶, 魏磊, 韩枫 (159)

无锡-常州地下水水中内分泌干扰物的赋存特征和健康风险评估 ..... 王淑婷, 饶竹, 郭峰, 刘成海, 战楠, 王娅南, 彭洁, 杨鸿波 (166)

清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评估 ..... 刘昭, 周宏, 曹文佳, 刘伟, 兰圣涛 (175)

会仙岩溶湿地丰平枯时期地下水金属元素污染与健康风险 ..... 李军, 赵一, 邹胜章, 蓝美宁, 樊连杰, 谢浩, 秦月, 朱丹滢 (184)

三峡库区城镇化影响下河流 DOM 光谱特征季节变化 ..... 陈昭宇, 李思悦 (195)

不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布 ..... 岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 段鑫越, 石洪华, 汪磊, 端正花 (204)

基于宏基因组学探讨东平湖水库的菌群结构、耐药基因谱及其公共健康风险 ..... 张红娜, 崔娜, 申红妙 (211)

分层型水库藻类季相演替的细菌种群驱动机制 ..... 闫苗苗, 张海涵, 黄廷林, 宗容容, 刘凯文, 苗雨甜, 杨尚业, 黄鑫, 王娜 (221)

丹江口库区浮游真菌组成与功能及其影响因素 ..... 郑保海, 王晓宇, 李英军, 陈彦, 李百炼, 李玉英, 陈兆进 (234)

太湖出流河道藻颗粒变化及其水质效应 ..... 郭宇龙, 许海, 陈旭清, 郑建中, 詹旭, 朱广伟, 朱梦圆 (242)

石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量 ..... 邓华, 高明, 龙翼, 黎嘉成, 王盛燕, 王子芳 (251)

前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响 ..... 陈焱, 李欣芮, 郑爽, 刘臻, 余雪花, 程启洪 (263)

浒苔生物炭对雨水径流中氨氮的吸附特性及吸附机制 ..... 陈友媛, 李培强, 李闲驰, 孙萍, 赵新月, 李洁, 李晋, 辛至然 (274)

填料对潮汐流人工湿地中 CANON 作用强化的影响 ..... 刘冰, 郑煜铭, 秦会安, 古励 (283)

FeMnNi-LDHs 对水中 As(III) 的吸附性能与机制 ..... 廖玉梅, 余杰, 魏世强, 蒋珍茂 (293)

硝酸钙添加和铅改性膨润土覆盖联用控制底泥中磷释放的效果及机制 ..... 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 俞阳, 张志斌 (305)

某市污水厂抗生素和抗生素抗性基因的分布特征 ..... 颜亚玮, 於驰晟, 李菲菲, 姚鹏城, 刘宏远 (315)

不同污泥在微波预处理-厌氧消化过程中抗性基因分布及菌群结构演替 ..... 李慧莉, 武彩云, 唐安平, 佟娟, 魏源送 (323)

天然富硒土地划定的富硒阈值 ..... 王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 成晓梦, 彭敏, 孙跃 (333)

融合自然-人为因子改进回归克里格对土壤镉空间分布预测 ..... 高中原, 肖荣波, 王鹏, 邓一荣, 戴俊杰, 刘楚藩 (343)

南方典型水稻土镉(Cd)累积规律模拟 ..... 戴雅婷, 傅开道, 杨阳, 王美娥, 陈卫平 (353)

闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险 ..... 林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 黄华斌 (359)

干湿交替灌溉制度下纳米修复材料对杂交水稻籽粒 Cd 累积及产量的影响 ..... 杨茹, 陈馨睿, 张颖, 崔俊义, 武立权, 马友华, 廖江, 何海兵 (368)

三元复合调理剂对土壤镉赋存形态和糙米镉累积的调控效应 ..... 蒋毅, 刘雅, 辜娇峰, 杨世童, 曾雄, 王轩宇, 周航, 廖柏寒 (378)

风化煤组配改良剂结合水分管理对水稻根际土壤与稻米甲基汞含量的影响 ..... 郑顺安, 吴泽赢, 杜兆林, 倪润祥, 姚启星 (386)

不同施肥措施对水稻土壤微生物抗性的影响 ..... 郑开凯, 马志远, 孙波, 梁玉婷 (394)

氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性 ..... 张涵, 贡璐, 刘旭, 邵康, 李昕竹, 李蕊希 (403)

黄土丘陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征 ..... 钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (411)

生物炭对土壤酶活性和细菌群落的影响及其作用机制 ..... 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 曾强, 陈楠, 李小龙, 任天宝, 姬小明, 刘国顺 (422)

植被恢复对刺萼龙葵根际土壤细菌群落结构与功能的影响 ..... 张瑞海, 宋振, 付卫东, 鄂玲玲, 高金会, 王然, 王忠辉, 张国良 (433)

黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应 ..... 史登林, 王小利, 刘安凯, 侯再芬, 梁国太 (443)

等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物量碳氮的影响 ..... 何甜甜, 王静, 符云鹏, 符新妍, 刘天, 李亚坤, 李建华 (450)

秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响 ..... 孙昭安, 张轩, 胡正江, 王开永, 陈清, 孟凡乔 (459)

生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响 ..... 杨文娜, 邓正昕, 李娇, 郑杰炳, 王子芳, 高明 (467)

氮肥减投条件下膜材料使用对稻田氨挥发排放的影响 ..... 俞映惊, 王梦凡, 杨根, 何世颖, 段婧婧, 杨林章, 薛利红 (477)

微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累 ..... 赵佳, 饶本强, 郭秀梅, 高进勇 (485)

无人机热红外支持下的城市微尺度热环境模拟 ..... 阳少奇, 冯莉, 田慧慧, 刘艳霞 (492)

基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析 ..... 孙艳伟, 王润, 郭青海, 高超 (501)

《环境科学》征订启事(8) 《环境科学》征稿简则(220) 信息(233, 352, 421)

# 基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析

孙艳伟<sup>1,2,3</sup>, 王润<sup>4</sup>, 郭青海<sup>5</sup>, 高超<sup>1</sup>

(1. 宁波大学地理与空间信息技术系, 宁波 315211; 2. 宁波大学陆海国土空间利用与治理研究中心, 宁波 315211; 3. 宁波大学东海研究院, 宁波 315211; 4. 湖北大学资源环境学院, 武汉 430062; 5. 浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

**摘要:** 全球变暖的大背景下城市地表热环境的日趋恶化是全球现代城市共同面临的生态环境问题之一, 对城市地区居民的身心健康、空气质量改善以及植被生长发育等诸多方面造成不利影响。本文利用 2001 ~ 2018 年时间序列 MODIS 地表温度数据产品, 基于一致性方法对我国 1 232 个主要城镇人居斑块 (面积 > 10 km<sup>2</sup>) 的热岛强度及其时空变化模式进行了定量测度, 并应用随机森林回归模型 (RF) 试图揭示人类活动、城市形态、地形、植被以及气象因素对我国城市热岛强度的非线性驱动机制。结果表明, 在人居尺度上, 我国超过 90% 的城镇存在显著的昼夜热岛现象; 昼夜城市热岛强度分别达到 (0.75 ± 0.6) °C 和 (0.81 ± 0.53) °C, 且夏季日间热岛强度显著高于冬季, 冬夏季节夜间热岛强度差异不大。2001 ~ 2018 年间我国白天热岛强度呈现逐年轻微下降趋势, 而冬季夜间热岛显著增加, 在夏季和年均尺度上则无显著变化。在空间分布上, 我国东部沿海省份的白天热岛强度显著高于西北和高原省份, 而夜间热岛分布模式正好与之相反。RF 回归结果表明, 城镇的气候背景 (年均降雨量) 和地理位置 (纬度) 是我国昼夜城市热岛的最为重要的两个主控因子。此外, 缩小城乡绿色植被覆被差异对白天热岛的减缓将起到一定作用, 而优化调控中小型城镇建成区规模与人口密度对缓解我国夜间热岛的持续升高也将起到积极作用。

**关键词:** 城市热岛 (UHI); 人居尺度; 时空变化; 随机森林; 驱动因子

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)01-0501-12 DOI: 10.13227/j.hjks.202006009

## Estimation of the Urban Heat Island Intensity Change and Its Relationships with Driving Factors Across China Based on the Human Settlement Scale

SUN Yan-wei<sup>1,2,3</sup>, WANG Run<sup>4</sup>, GUO Qing-hai<sup>5</sup>, GAO Chao<sup>1</sup>

(1. Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 3. Institute of East China Sea, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 4. School of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan 430062, China; 5. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Considering a background of global warming, the effect of urban heat island (UHI) has become a serious ecological and environmental problem that is commonly faced by modern cities worldwide, posing challenges to the physical and mental health of residents in urban areas, air quality, and the healthy growth of surface vegetation. Using time series MODIS land surface temperature data products from 2001 to 2018, we evaluated the urban heat island intensity (UHII) and its spatiotemporal patterns in 1 232 major urban human settlement patches (area > 10 km<sup>2</sup>) across China based on the consistency method. A random forest regression model (RF) was also used to reveal the driving mechanism of urban heat island intensity in China due to human activities, urban morphology, vegetation, topography, and meteorological factors. The results show that more than 90% of cities and towns in China have exhibited significant diurnal heat island phenomena on the scale of human settlements. The diurnal UHII reaches up to (0.75 ± 0.6) °C and (0.81 ± 0.53) °C, respectively. The daytime UHII in summer was significantly higher than that in winter, while there was little difference in nighttime UHII between summer and winter. During the past 18 years, the daytime UHII in China has shown a slight downward trend, while the nighttime UHII has increased significantly, with no significant change in summer and on mean annual scales. In terms of spatial distribution, the eastern coastal provinces have higher daytime UHII than those of the western or plateau provinces, while the nighttime UHII shows the opposite pattern. The RF regression results show that the average annual rainfall and latitudinal position of cities and towns are the two most important factors controlling the daytime and nighttime UHII in China. Narrowing the differences in vegetation growth between urban and rural environments will have a mitigating effect on the daytime UHII, and controlling the expansion of small and medium-sized towns will also play a positive role in the continuously rising nighttime UHII.

**Key words:** urban heat island (UHI); human settlement scale; spatial-temporal distribution; random forest model; driving factors

城市地区一直是人类的集中居住地, 城市化不仅创造了就业机会, 也是提高人们收入和生活水平的最大经济驱动力。预计到本世纪中叶, 全球城市人口的比例将超过 66%, 也就是届时将有超过三分之

二的人口居住在城市中。改革开放 40 年间, 我国的

收稿日期: 2020-06-01; 修订日期: 2020-07-02

基金项目: 浙江省哲学社科规划项目 (20NDJC077YB)

作者简介: 孙艳伟 (1983 ~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为资源环境经济与管理, E-mail: sunyanwei@nbu.edu.cn

城市化水平从 17.9% 提高到目前的近 60%, 年均增加近 1%<sup>[1]</sup>. 伴随着人口-产业向城市集聚和乡村景观向城市景观转变, 城市化带来的生态环境问题也日益凸显, 其中包括水资源短缺、水污染以及城市热岛效应等诸多问题<sup>[2]</sup>. 城市热岛效应 (urban heat island, UHI) 是指城市区域地表温度显著高于其周围乡村地区的现象, 已成为近年来城市气象气候学领域研究的重点和热点之一<sup>[3]</sup>. 在全球气候变暖和极端天气事件频发的背景下, 城市热岛和热浪天气之间相互协同和相互叠加增强<sup>[4]</sup>, 不断恶化的城市地表热环境对城市发展以及城市居民的生产生活带来了巨大挑战, 因此研究城市热岛效应的时空变化特征以及成因具有重要的现实意义.

城市热岛可划分为 3 类: 冠层热岛、边界层热岛和地表城市热岛<sup>[5]</sup>. 其中, 地表城市热岛 (UHI) 对居民的生产、生活影响最大、联系最为紧密, 因而受到学界的普遍关注. 地表城市热岛强度 (urban heat island intensity, UHII) 是测度衡量地表城市热岛效应强弱的关键指标, 被广泛应用于刻画地表城市热岛效应的时空模式及其驱动机制的研究中. 目前已有众多学者针对全球、国家、区域以及单体城市等不同空间尺度上的城市热岛效应展开定量研究工作<sup>[6,7]</sup>. 国内外学者着重关注于城市热岛的时空特征及其演变规律、驱动力和驱动机制、缓解与适应策略和尺度转换等几个层面. Chakraborty 等<sup>[8]</sup> 利用一个简化的城市范围提取方法, 对全球范围 9 483 个主要城市集簇的热岛强度时空变化进行了定量评价. 在国家尺度上, 学者多选取我国三十几个主要大城市为研究对象, 利用 MODIS 遥感卫星观测数据, 试图揭示我国城市热岛强度的空间变化特征及其关键影响因素<sup>[9~11]</sup>. 此外, 学者针对典型城市的热环境问题也开展了大量实证研究, 如冯章献等<sup>[12]</sup> 结合迎风面指数 (FAI) 和 MODIS 遥感地表温度, 探索城市形态对城市地表温度影响; 乔治等<sup>[13]</sup> 的研究利用时间序列 MODIS 地表温度数据, 分别从数量、形状和结构角度揭示北京市不同季相和昼夜间地表热力景观时空分异特征, 探究热力景观等级转换生态过程. 相关研究表明, 地表城市热岛强度与城市下垫面的组成、三维结构、景观格局、气候背景和人类活动强度等诸多因素密切相关<sup>[14~21]</sup>, 这为城市热环境的调控与预警提供了科学依据.

综上所述, 已有研究主要关注于重点大型城市的热环境时空变化及其驱动机制, 而缺乏从人居尺度上对于我国中小规模城镇地表城市热岛的大尺度分析<sup>[22]</sup>, 特别是对于中小规模城镇热岛强度的驱动机制尤为缺乏. 鉴于此, 本文利用 2001~2018 年时

间序列 MODIS Terra 遥感地表温度数据, 探索我国面积 > 10 km<sup>2</sup> 的城镇人居斑块地表城市热岛强度的时空变化特征, 并应用随机森林回归方法探讨了城市形态、气候背景以及人类活动强度等层面的多维影响因素对城市热岛强度的非线性驱动机制, 以期为我国不同规模尺寸城镇热岛效应的减缓与适应策略的制定提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源与预处理

#### 1.1.1 地表温度数据

本研究选取 Terra/MODIS 8d 合成地表温度数据产品第 6 版 (MOD11A2 V6) 作为表征城市热环境的主要数据源, Terra 卫星过境时间为上午 10:30 左右和夜间 22:30 左右, 空间分辨率为 1 km × 1 km, 该产品的温度误差控制在 1 K 以内, 数据质量可靠<sup>[23]</sup>, 被广泛用于大尺度地表温度时空模式研究中. 本文获取了 2001~2018 年期间覆盖我国全境的 8 d 地表温度数据合成产品, 经过拼接、裁切以及质量控制等预处理后, 分别计算全年、夏季 (6~8 月) 和冬季 (12 月、1~2 月) 这 3 个时间尺度的逐年均值.

#### 1.1.2 土地利用数据与城镇边界提取

2000 年和 2015 年两期中国土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>), 该数据集以美国陆地卫星 Landsat 遥感影像数据作为主信息源, 通过人工目视解译生成. 本文利用一级土地利用分类中的建设用地, 提取全国范围的城镇边界范围 (其中, 卫星城、远离城区的斑块视为独立单元). 为保证与 MODIS 地表温度数据产品相匹配, 研究将面积小于 10 km<sup>2</sup> (约 3 × 3 个像元) 的独立建设用地斑块予以剔除, 最终提取得到全国范围内的 1 232 个主要城镇居民地作为研究对象.

#### 1.1.3 解释变量数据获取

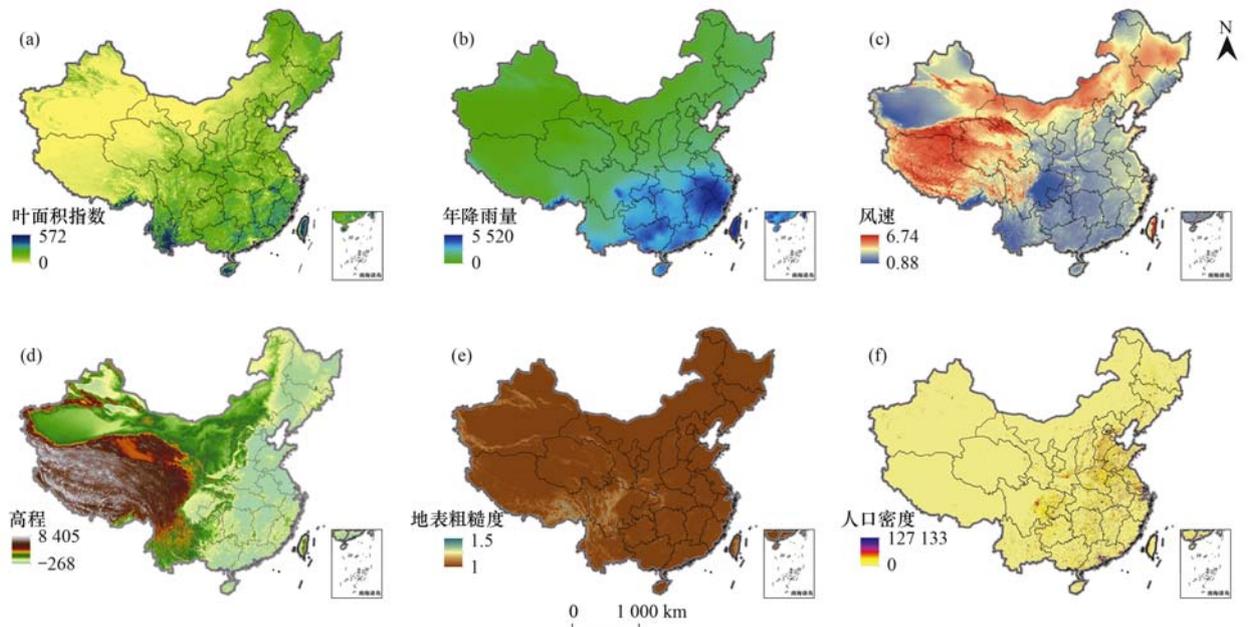
城市热岛强度受到城镇空间形态、下垫面特征、气候背景、地理位置以及社会经济等多个维度驱动因子的共同影响. 考虑到大尺度研究的数据可获得性以及前人的相关研究实践, 本文从城市形态、气候背景、地理位置、地形以及人类活动强度等层面, 选取了城市斑块的总面积、紧凑度指数、叶面积指数、年均降雨与风速、经度与纬度、平均海拔高度、地面粗糙度、平均坡度和人口密度等 11 个代表性解释变量. 城市紧凑度指数 (CI) 用来分析城市用地的集聚与离散程度, 其值越接近 1, 说明地物形态越近似圆, 紧凑度越好, 反之, 则越差. CI 的计算公式为:

$$CI = 2 \sqrt{\pi A} / P \quad (1)$$

式中, CI 为紧凑度指数;  $P$  为城市边界的周长;  $A$  为同期城市用地面积。

叶面积指数(LAI)是表征地表植物群体结构和群落生长状态的一个重要参数, 本文采用 Terra/MODIS LAI 叶面积指数产品第 6 版 (MOD15A2H) 来表征城乡地表植被生长的差异。年均降雨和年均风速格网数据来源于日本气象厅研发的 JRA-55 逐月再分析数据集 (空间分辨率约为  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ )<sup>[24]</sup>, 作为影响城市热岛强度的气象背景因子。此外, 全国 1 km 数字高程模型 (DEM) 数据来源于于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>), 运

用 ArcGIS 软件的区域统计模块计算每个城镇斑块的平均海拔高度, 并应用坡度分析和栅格计算器分别计算每个城镇斑块的平均坡度以及地表粗糙度; 地表粗糙度 (地表微地形) 定义为地表单元的曲面面积与其在水平面上的投影面积之比, 用来定量描述地形的起伏程度, 是表征地表物理性状的重要指标 (图 1)。城市斑块质心的经度和纬度用来表征不同城市之间地理空间区位的差异。城市区域平均人口密度可以反映人类活动强度的强弱, 2015 年全国人口空间分布公里网格数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心。由于部分解释变量空间数据覆盖缺失, 本文所有分析过程不包含澳门地区。



(a) 叶面积指数 ( $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ); (b) 年均降雨量 (mm); (c) 年均风速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); (d) 高程 (m);  
(e) 地表粗糙度; (f) 人口密度 ( $\text{人} \cdot \text{km}^{-2}$ ); 澳门地区缺失 JRA-55 风速数据

图 1 解释变量空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of the principle explanatory variables

## 1.2 城市热岛强度测度方法

目前学界对于城市热岛强度的评估方法尚未形成统一标准。根据城乡像元选取策略的不同, 城市热岛强度的测度方法可分为参考像元法和缓冲区法等两大类。例如, 曹畅等<sup>[11]</sup>和 Zhao 等<sup>[25]</sup>以土地利用分类数据为依据, 选取一定数量代表性的城市和周围乡村参考像元, 作为计算城乡温差的典型样区, 此为“参考像元法”。缓冲区法也是当前估算城市热岛强度的一种主流方法; 其具体思路为: 在刻画城市边界范围的基础上, 向外做等积缓冲区<sup>[18,26]</sup>或 20 ~ 25 km 的等距缓冲区<sup>[10]</sup>作为乡村地域, 并以此计算城乡温差。为避免参考像元选取的主观性以及城市热岛强度时空可比性的考量, 本文采用等积缓冲区法估算我国各城镇居民地的热岛强度。具体做法可

分解为 4 个步骤: ①以 2000 年和 2015 年两期建设用地的不变像元, 作为城市核心区; ②城市核心区边界至 2015 年建成区边界, 定义为城市扩张区, 即城市区域划分为城市核心区和城市扩张区; ③城市区域向外做等积缓冲区, 作为乡村地域; ④以城市核心区与其周围乡村地域的平均地表温度差值, 作为各城镇斑块的热岛强度 (见图 2)。该方法的优势在于计算得到的不同时期城市热岛强度数值具有横向可比性, 一致性好, 可用于大尺度城市热岛效应对比。

为了验证本文城市热岛强度测算方法的可靠性, 将估算结果与 Yao 等<sup>[10]</sup>的结果相比较。结果显示, 除了冬季白天本文高于文献<sup>[10]</sup>的结果, 其他时点本文均低于其结果约 1/3 (表 1)。造成结果差

异的主要原因是缓冲区建立方法的不同,本文为等积缓冲区,而文献[10]则采用20 km等距缓冲区作为参考乡村区域.由此可见,本文所采取的测算方法具有合理性.

表1 本文估算结果与文献[10]对比验证

Table 1 Summary of UHII of current study compared to the results from reference [10]

季节	时间	文献[10]	本文估算结果	差值百分比/%
夏季	白天	4.09	2.72	0.33
	夜间	2.48	1.67	0.33
冬季	白天	0.16	0.32	-1.01
	夜间	2.96	1.92	0.35

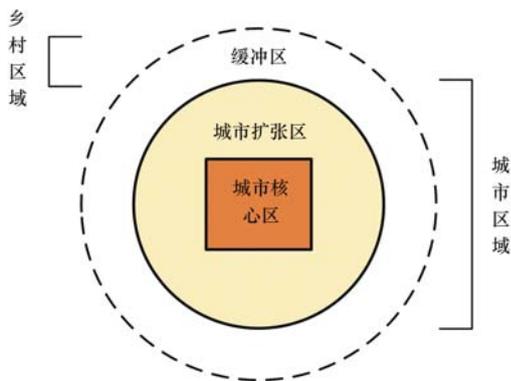


图2 城乡梯度带划分示意

Fig. 2 Diagram of urban-rural gradient zones

### 1.3 随机森林回归模型

随机森林(RF)模型是由Breiman在2001年提出的一种基于分类树的机器学习算法,其基本思想是构造一定数量的决策树并按照一定准则对决策树进行组合生成随机森林<sup>[26]</sup>.与其他“黑箱”机器学习算法相比较,RF回归模型对噪声数据集容忍度较高、简单易实现、计算开销小和模型可解释性强,而且可有效防止变量共线性现象、避免模型过拟合问

题,对高维数据集具有良好的预测能力<sup>[27]</sup>.本研究通过R语言环境下的RandomForest程序包进行昼夜城市热岛强度的预测模型构建,并输出预测变量的重要性指数,揭示城市形态、气候背景以及人类活动强度等各影响因素对城市热岛强度的驱动机制.

RF建模过程中需要对回归树的分枝节点数(mtry)和决策树数量(ntree)等2个重要参数进行参数优化.据前人的研究<sup>[28]</sup>,mtry一般设置为特征参数总数的1/3,而ntree通常设置500为宜,即mtry=3,ntree=500.本研究采用十折交叉验证方法对昼夜城市热岛强度预测模型的精度差异与稳定性进行了检验,评价指标包括拟合优度( $R^2$ )、平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)这3个指标. $R^2$ 值越大,MAE和RMSE值越小,表明模型解释精度越高.

## 2 结果与分析

### 2.1 城市热岛强度时间变化特征

表2给出了我国1232个城镇居民地的热岛强度描述统计结果.总体而言,我国城市热岛强度呈现出显著的昼夜、季节等时间上的变异特征.对于绝大部分城镇,全年夜间热岛略高于白天热岛,而夏季(6~8月)白天热岛则显著高于夜间,冬季(12月、1月和2月)夜间热岛显著高于白天热岛.在白天,夏季热岛远高于冬季热岛,季节差异显著;而夜间,夏冬季热岛差异较小.图3给出了我国年均昼夜城市热岛强度的概率分布.可以看到,昼夜城市热岛强度都符合正态分布,频率分布趋于集中( $0\sim 2^\circ\text{C}$ );在UHII $<0.4^\circ\text{C}$ 的范围内,白天热岛普遍高于夜间热岛,而UHII $\geq 0.4^\circ\text{C}$ 的范围,白天热岛普遍低于夜间热岛.

表2 中国城市热岛强度描述统计/ $^\circ\text{C}$

Table 2 Summary of surface UHII characteristics across China/ $^\circ\text{C}$

项目	时间	均值 $\pm$ 标准差	最小值	第25分位	第50分位	第75分位	最大值
年均	白天	0.75 $\pm$ 0.6	-1.53	0.37	0.74	1.11	3.14
	夜间	0.81 $\pm$ 0.53	-1.11	0.47	0.78	1.11	2.98
夏季	白天	1.63 $\pm$ 0.83	-1.67	1.14	1.64	2.17	4.84
	夜间	0.85 $\pm$ 0.46	-0.96	0.54	0.83	1.13	2.84
冬季	白天	0.02 $\pm$ 0.50	-1.94	-0.29	0.02	0.31	1.92
	夜间	0.85 $\pm$ 0.69	-1.80	0.39	0.77	1.26	4.34

图4为2001~2018年我国城市热岛强度总体时间序列变化特征.城市热岛强度( $y$ )与年份( $x$ )的线性趋势分析表明:年均白天热岛强度呈现显著下降趋势( $\text{slope} = -0.014, P < 0.001$ );年均夜间热岛强度无显著变化趋势( $\text{slope} = 0.0035, P > 0.1$ );夏季白天热岛强度呈现显著下降趋势( $\text{slope} =$

$-0.0195, P < 0.001$ );夏季夜间热岛强度无显著变化趋势( $\text{slope} = 0.0005, P > 0.1$ );冬季白天热岛强度呈现显著下降趋势( $\text{slope} = -0.0081, P < 0.001$ );冬季夜间热岛强度呈现显著增加趋势( $\text{slope} = 0.0092, P < 0.001$ ).总体而言,过去的18年间我国白天热岛强度逐年轻微下降[0.14

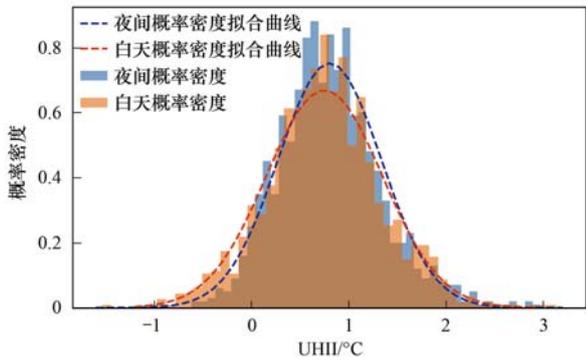


图3 中国年均城市热岛强度概率分布

Fig. 3 Frequency distribution of the annual UHII across China

$^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ],且冬季热岛 $[0.08\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}]$ 下降幅度高于夏季 $[0.005\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}]$ ;对于夜间热岛,冬季显著增加 $[0.09\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}]$ ,而在夏季和年均尺度上则无显著变化。

为进一步明晰城市热岛强度的时间变化特征的空间分布,本文逐个计算各城镇斑块的热岛强度( $y$ )与年份( $x$ )的线性关系,并以 $P$ 统计值 $<0.05$ 为显著性判断依据,将所有城镇斑块划分为显著降低、不显著降低、不显著增加和显著增加等4个类

型.表3和图5给出了各类型占比及空间分布情况.年均尺度上,白天城镇热岛现象以降低趋势为主,有接近30%的城镇显著降低,主要分布于华北、中原以及长江沿线城市群;而夜间热岛则以增加趋势为主,有16%的城镇表现为热岛效应显著增加,广泛分布于长江以北地区.从季节差异来看,夏冬季节白天的热岛均以下降趋势为主,而夜间以增加趋势为主,昼夜热岛变化的空间展布呈现相反的态势;白天热岛效应呈显著下降的城镇比例夏季高于冬季,而夜间热岛效应呈显著增加的城镇比例则冬季高于夏季,空间分布上也存在一定季节性差异(见图5)。

表3 中国城市热岛强度变化趋势占比统计<sup>1)</sup>/%

Table 3 Summary of surface UHII change trends across China/%

项目	时间	显著降低占比	不显著降低占比	不显著增加占比	显著增加占比
年均	白天	30	37	25	8
	夜间	8	33	43	16
夏季	白天	36	28	23	12
	夜间	11	35	41	12
冬季	白天	19	42	33	7
	夜间	5	30	42	24

1) 以 $P$ 统计值 $<0.05$ 为显著性判断依据

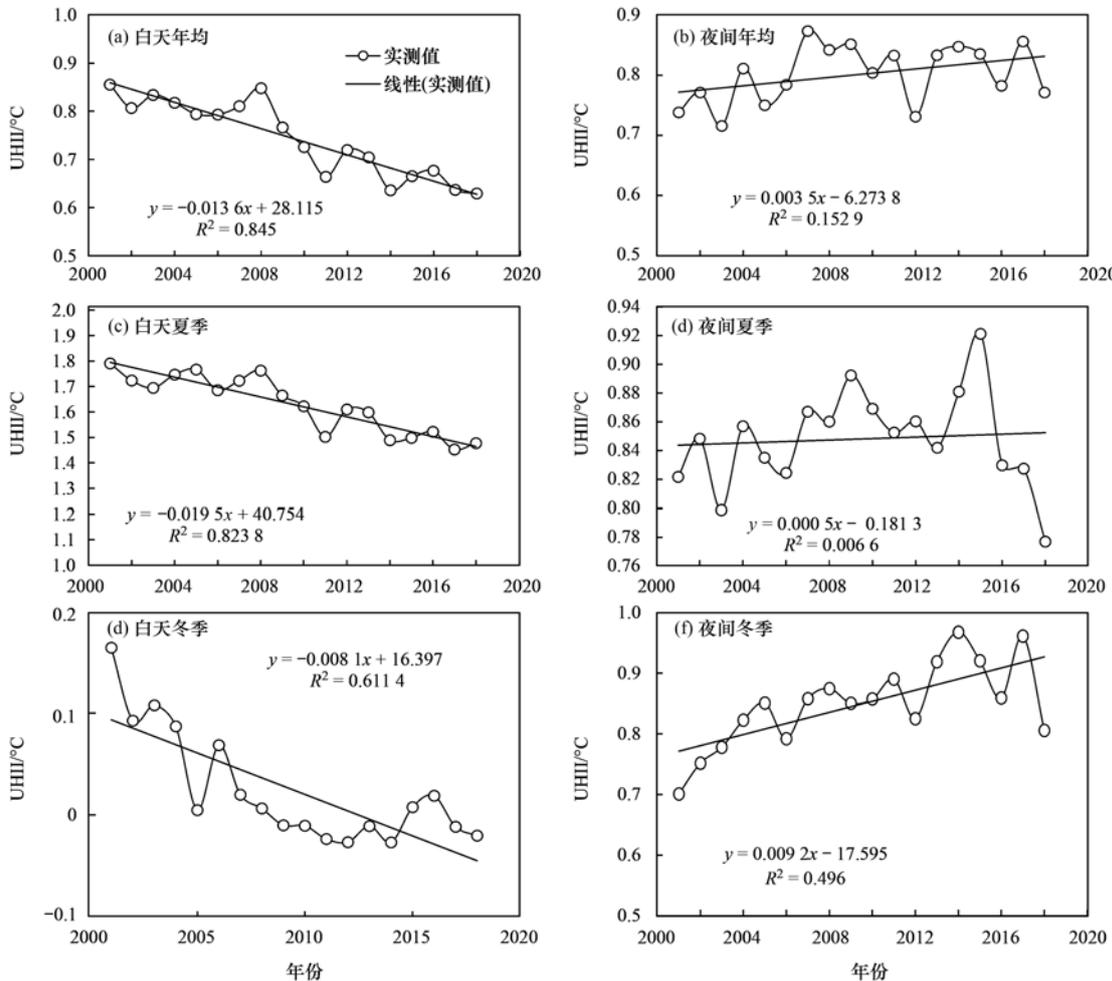


图4 2001~2018年中国城市热岛强度整体时间变化线性趋势分析

Fig. 4 Temporal variability trends of surface UHII during 2001 and 2018

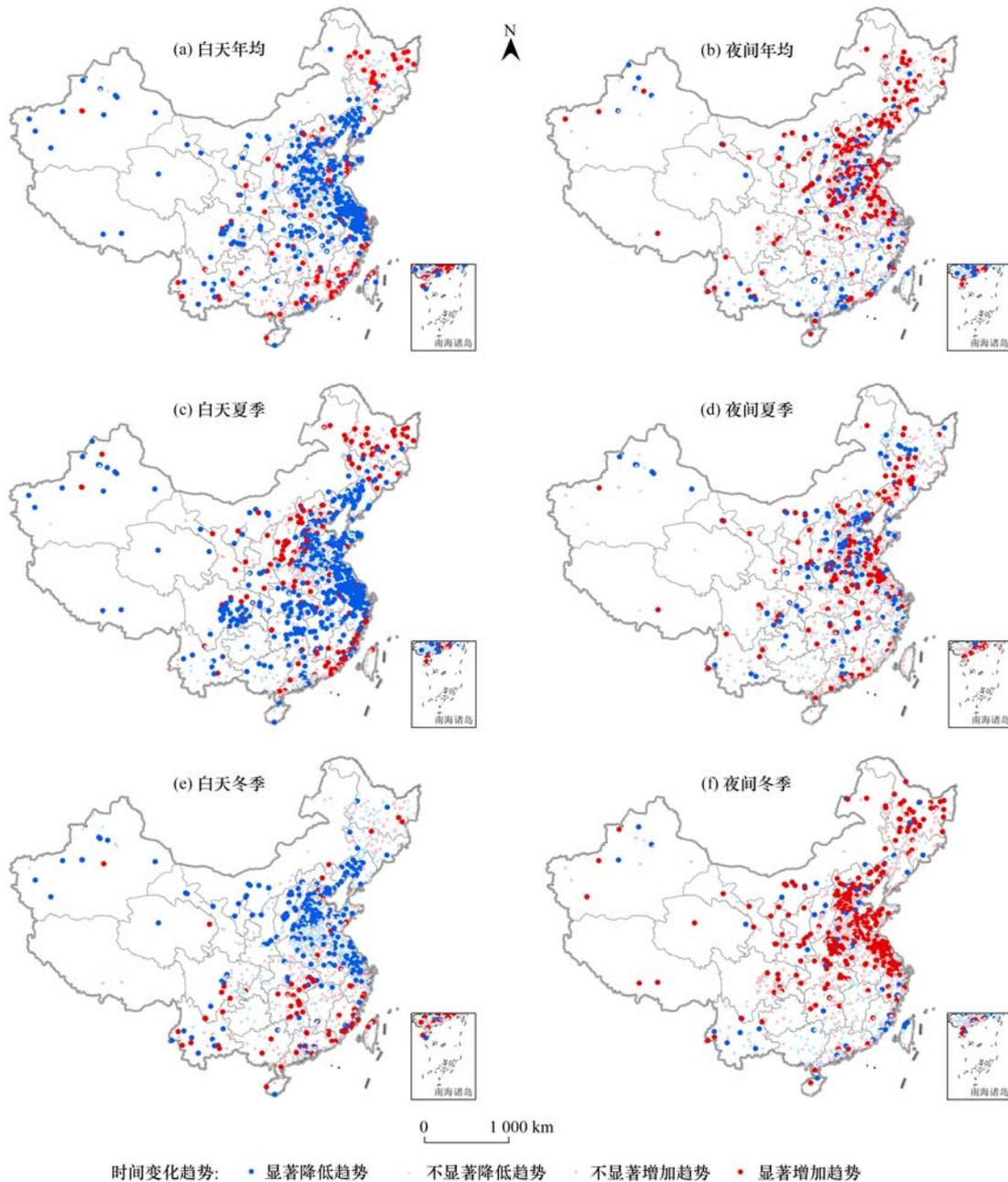


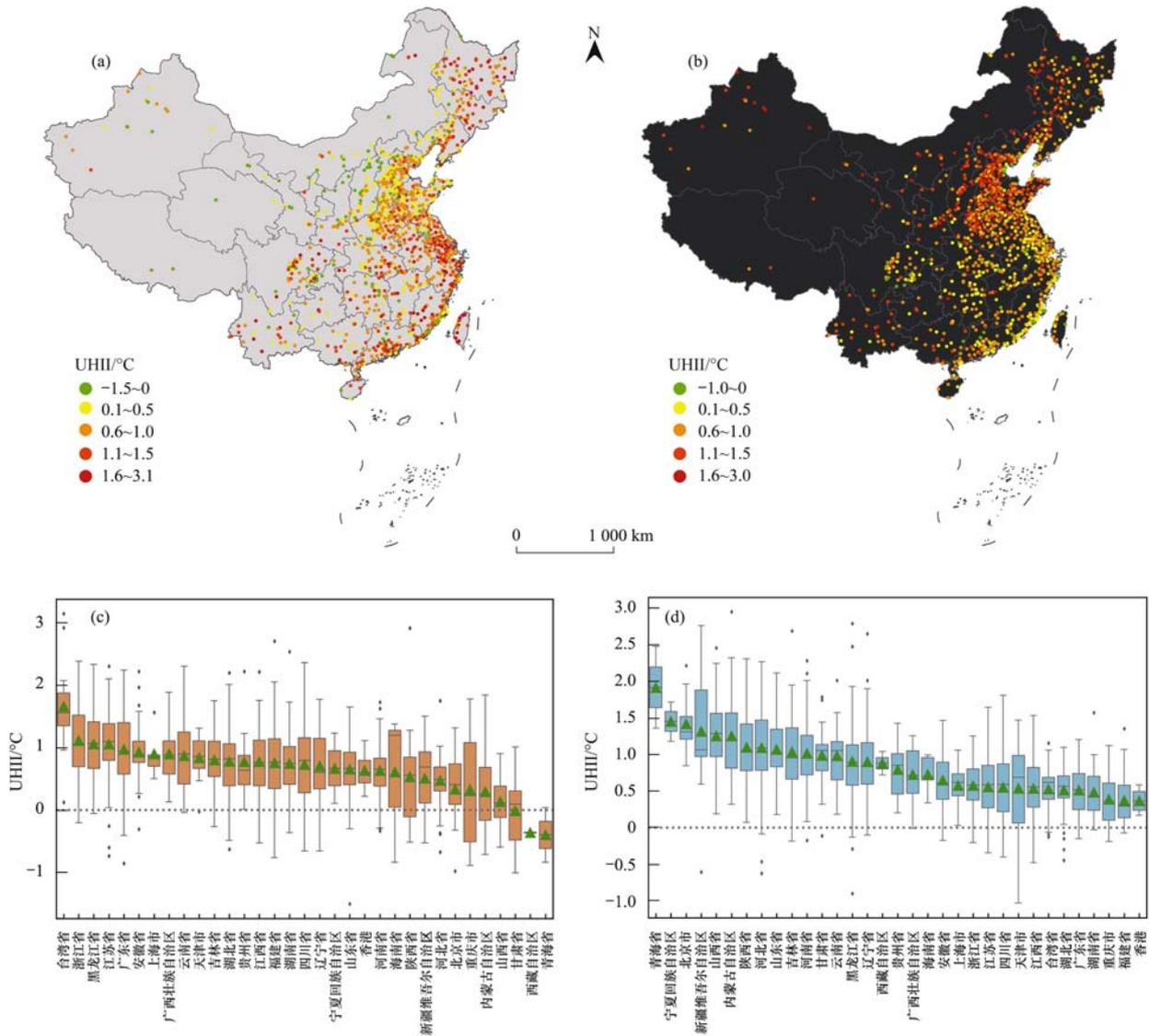
图5 2001~2018年中国城市热岛强度的时间变化线性趋势分析  
Fig. 5 Temporal variability trends of surface UHI during 2001 and 2018

## 2.2 城市热岛强度空间变化特征

图6展示了我国主要城镇昼夜热岛强度的空间分异特征.从不同省份的对比来看,我国的台湾、浙江、黑龙江、江苏以及广东等东部或沿海省份的平均热岛强度较高(大于 $1^{\circ}\text{C}$ ),而陕西、甘肃、西藏和青海等西北内陆或高原省份的平均热岛强度较低;而夜间热岛则与白天热岛的空间分布相反,表现为青海、宁夏、北京和新疆等地平均热岛强度较高,而福建和香港等地区较低.图7给出了我国主要城镇昼夜热岛强度的纬向分布特征.我国白天热岛在北纬 $40^{\circ}\text{N}$ 附近出现了最低值,长三角和珠三角城市群出

现峰值;而夜间热岛则以“秦岭-淮河”一线为界(北纬 $32^{\circ}\sim 34^{\circ}$ 附近),北方热岛强度均值维持在 $1^{\circ}\text{C}$ 左右,南方则维持在 $0.6^{\circ}\text{C}$ 左右.

图8为我国不同气候带和干湿带城市热岛强度的对比.可以看出,我国不同气候分区昼夜城市热岛存在明显差异.在温带地区,夜间热岛显著高于白天热岛;而在亚热带和热带地区,则夜间热岛显著低于白天热岛;在高原温带,白天热岛强度均值甚至为负[图8(a)].对于干湿分带,除湿润区白天热岛高于夜间热岛外,其他干湿分带内均表现为白天热岛低于夜间热岛,在半干旱区,白天热岛强度均值为负[图8(b)].



(a)和(c)为白天,(b)和(d)为夜间

图6 中国不同省份昼夜城市热岛强度对比

Fig. 6 Comparison of surface UHII among different provinces across China

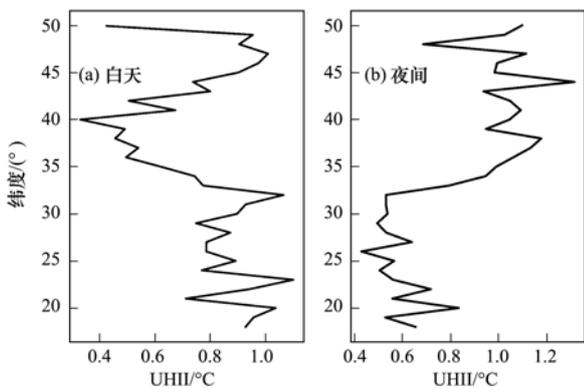


图7 中国纬向城市热岛强度变化

Fig. 7 Latitudinal variation in surface UHII across China

### 2.3 城市热岛强度驱动力分析

为验证随机森林回归模型的预测精度,绘制了实测城市热岛强度与RF模型预测热岛强度的散点图(图9).如图9所示,年均昼夜城市热岛强

度的拟合优度( $R^2$ )分别达到0.932和0.937,均方根误差(RMSE)分别为0.24和0.18,说明RF模型预测精度较好,可用于城市热岛强度的模拟与预测.模型误差评估结果也表明,冬季热岛预测精度优于夏季,这可能与夏季大气湍流环境复杂、影响因素多样有关.

为进一步揭示各影响因子对城市热岛强度的贡献及其相互依赖关系,本文输出了RF模型中预测变量重要性评价指标(IncMSE)(图10),并绘制了偏依赖关系(图11).由图10可知,气候背景因子(年均降雨量)以及地理位置因子(纬度)是昼夜城市热岛的最为重要的两个影响因素;对于白天热岛而言,经度和叶面积指数对模型也存在一定程度的影响,分别位于第3位和第4位;在夜间,城市建成区规模(总面积)和人口密度对热岛强度也存在明

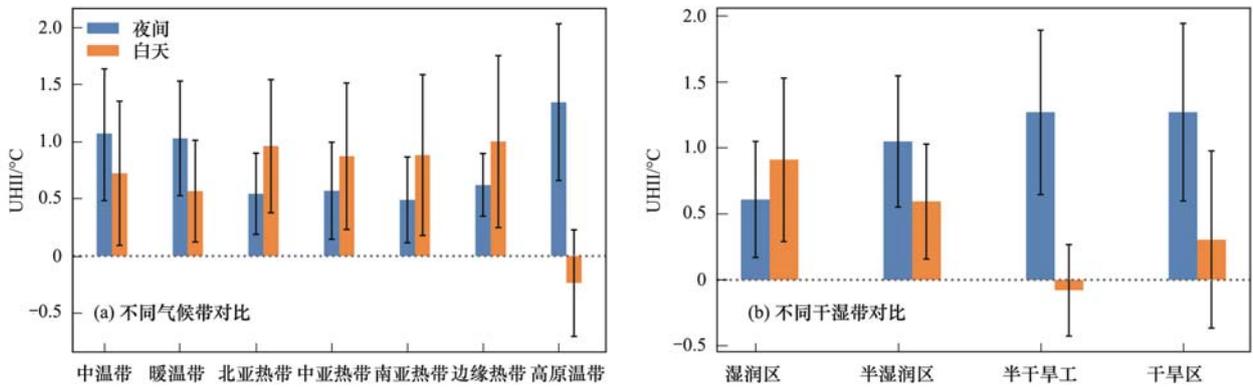


图 8 中国不同气候区城市热岛强度对比

Fig. 8 Changes in daytime and nighttime surface UHII for each climate zone across China

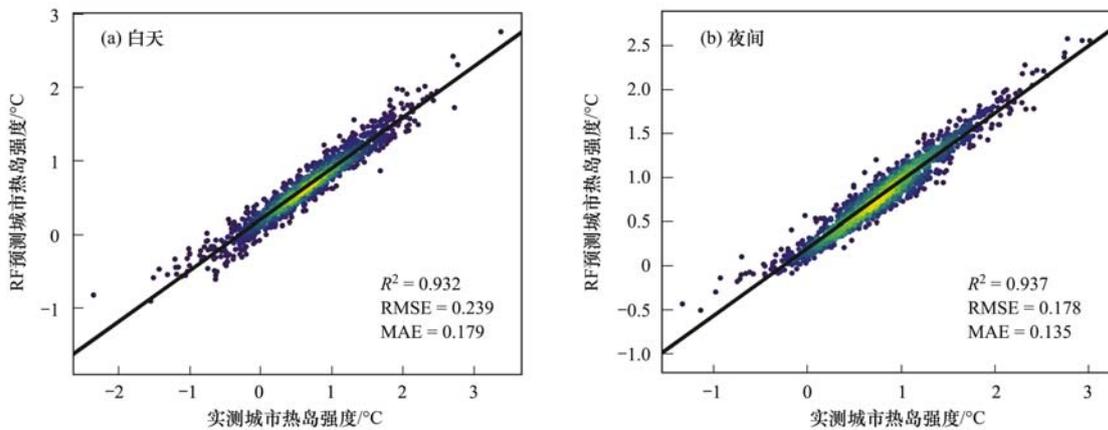


图 9 随机森林回归模型城市热岛强度验证散点图

Fig. 9 Scatter plot of surface UHII derived from the random forest regression model

显影响,特别是城镇的建成区总面积( $\text{km}^2$ )对热岛强度影响较大(位于第3位).其他要素,如城市紧凑度、地形特征和年均风速等对于昼夜热岛强度变化的影响较为微弱.因此,城市的气候背景和地理区位因素是控制我国热岛强度变化的关键特征,其他包括城市形态以及人类活动因素对热岛的影响较弱.

基于 RF 模型的偏依赖关系图可进一步揭示各关键特征变量对昼夜城市热岛影响表现出的非线性、复杂性以及时空尺度依赖特征.图 11 给出了重要性排序前 4 的解释变量与昼夜城市热岛强度的偏依赖关系.当控制其他变量不变的情况下,年均降雨量是我国昼夜城市热岛的最重要影响因素.在白天,热岛强度与降雨量呈现正相关关系,即热岛随着降雨量的增加而增加[图 11(a)];在夜间,热岛强度整体上与降雨量呈现负相关关系,当年均降雨量  $< 1\,200\text{ mm}$ 时,热岛随着降雨量的增加而迅速较小,当年均降雨量  $> 1\,200\text{ mm}$ 时,热岛则趋于稳定[图 11(e)].城镇居民地所处地理位置(如纬度和经度位置)是我国昼夜城市热岛的另一重要影响因素.从纬向分布来看,图 11(b)和图 11(f)与图 7 相似,显

示出我国白天热岛表现为“南北高,中部低”,而夜间热岛则表现为“北高,南低”的地域差异特征.从经向分布来看,图 11(c)和图 11(h)显示我国白天热岛随着距离东部海岸线越近强度逐渐增加,而夜间热岛则随着距离东部海岸线越近强度逐渐减弱.

相较于气候背景和地理位置因素,城市下垫面以及城市形态特征对热岛的影响同样存在明显的昼夜差异.城乡叶面积指数的差值对白天热岛的重要性排在第 4 位,热岛强度随着城乡叶面积指数差值的扩大而不断增加[图 11(d)].城市建成区的总面积以及人口密度对夜间热岛的重要性排分列在第 3 位和第 4 位,对于建成区规模  $< 300\text{ km}^2$  人口密度低于  $8\,000\text{ 人}\cdot\text{km}^{-2}$  的中小型城镇,夜间热岛随着数值的增加而迅速增加;而对于建成区规模  $> 300\text{ km}^2$  的城镇而言,热岛强度趋于稳定[图 11(g)和 11(h)];说明建成区用地规模以及人口密度对夜间热岛的影响存在“阈值效应”,因而合理规划城市规模、控制人口密度对于夜间热岛的减缓可能具有一定效用.

上述分析表明,整合气候背景、城市形态、地理位置以及人类活动强度等层面的多源地理特征参数

可有效预测我国城镇热岛强度,同时应用 RF 回归模型给出的变量重要性分析和偏依赖图等可解释的

机器学习结果,能够展示各影响因素与昼夜城市热岛的非线性交互关系,从而揭示各自然、社会经济因子对我国城市热岛强度的驱动机制.

### 2.4 城市热岛强度与降水之间的相关关系

由 RF 回归模型结果可知,降雨是影响我国城市热岛强度的主要气候因子.为定量明晰城市热岛强度对降雨的响应特征,本文逐个城镇计算了 2001~2018 年间城市热岛强度与降水之间的 Spearman 相关系数.结果显示,夏季城市热岛强度与降水之间存在正相关关系的城镇占比达到 54% (白天)和 78% (夜间),表明城镇热岛强度与降水存在同步变化的特征,即昼夜城镇热岛强度随着年降雨量的增加而增加;而冬季二者存在正负相关关系的城镇占比接近.在年均的尺度上,城市热岛强度与降水之间存在正相关关系的城镇占比略高于负相关,介于 52%~64% 之间.总体上,全国仅有不到 10% 的城镇相关系数通过了显著性水平为 0.05 的检验,且呈现显著负相关的城镇比例略高于显著正相关.空间上,在城镇斑块密集的东部地区,正负相关关系的城镇斑块呈现空间集聚特征,尤其在我国华北和华东城市群地区(图 12).综上,我国城市热岛强度与降水之间的相关关系存在显著的季节性和空间异质性.

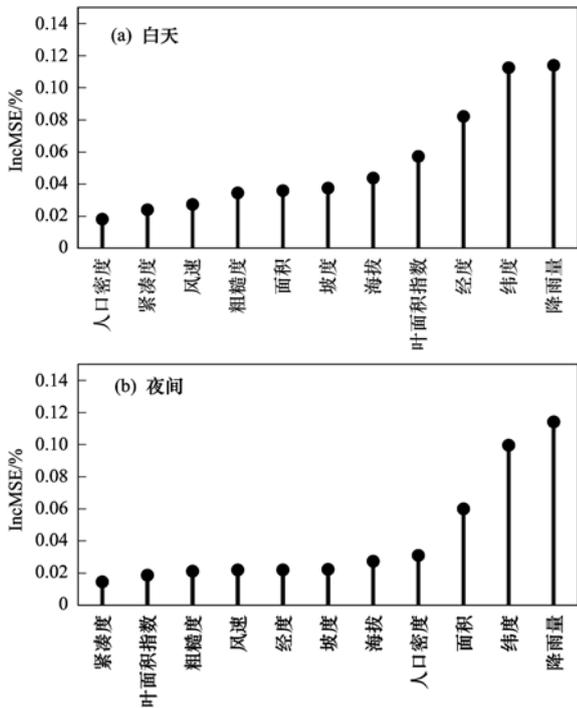
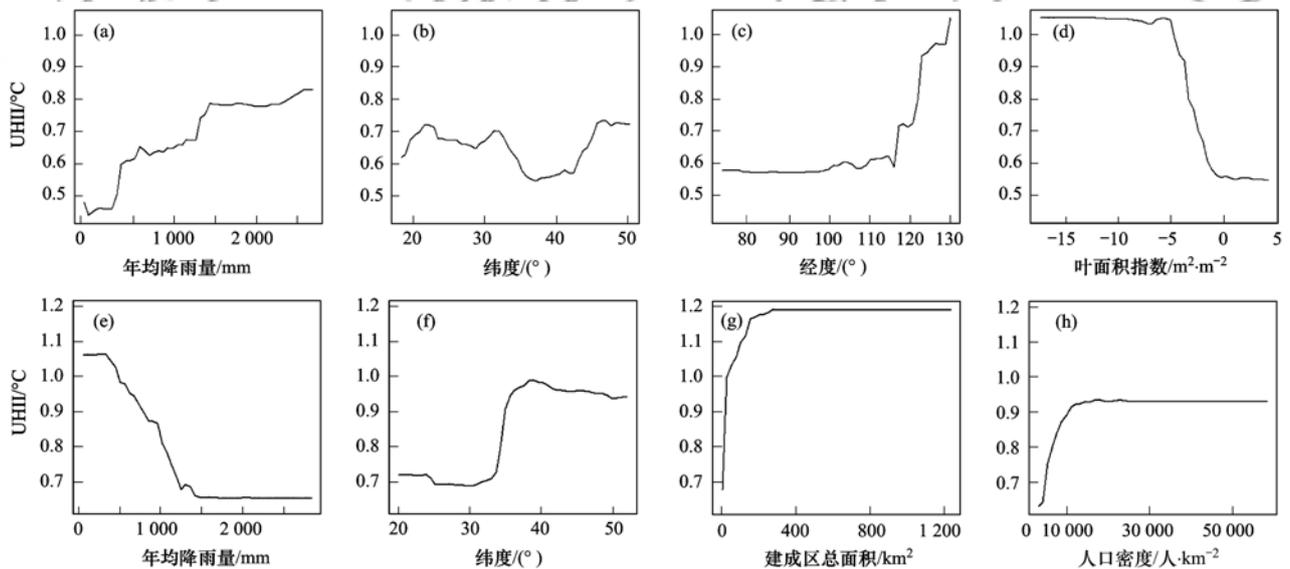


图 10 城市热岛强度解释变量重要性排序

Fig. 10 Variable importance analysis of surface UHI derived from the random forest regression model



(a)、(b)、(c)和(d)为白天,(e)、(f)、(g)和(h)为夜间

图 11 关键解释变量与城市热岛强度的偏依赖关系

Fig. 11 Partial dependency plot between surface UHI and the principle explanatory variables derived from the random forest regression model

### 3 讨论

本文首先采用一致性的方法重新认识了我国城市热岛的时空变化特征,进而运用机器学习模型探索自然、社会人文因素对城市热岛的非线性驱动机制,在研究方法和思路上具有一定新颖性.由于我国疆域广大、气候类型多样且社会经济发展状态迥异,

导致城市热岛在昼夜、季节以及不同地理区位上表现出明显的时空分异特征.本研究与其他学者研究得出相类似的结论,如我国重要节点城市的热岛昼夜、季节以及空间分布规律<sup>[8, 9, 11, 29]</sup>;然而,由于城市热岛强度测度方法的差异,时间演变趋势的研究结论不尽相同,例如,Zhou 等<sup>[9]</sup>的研究发现我国绝大部分省会城市核心区的白天热岛强度呈现逐年增

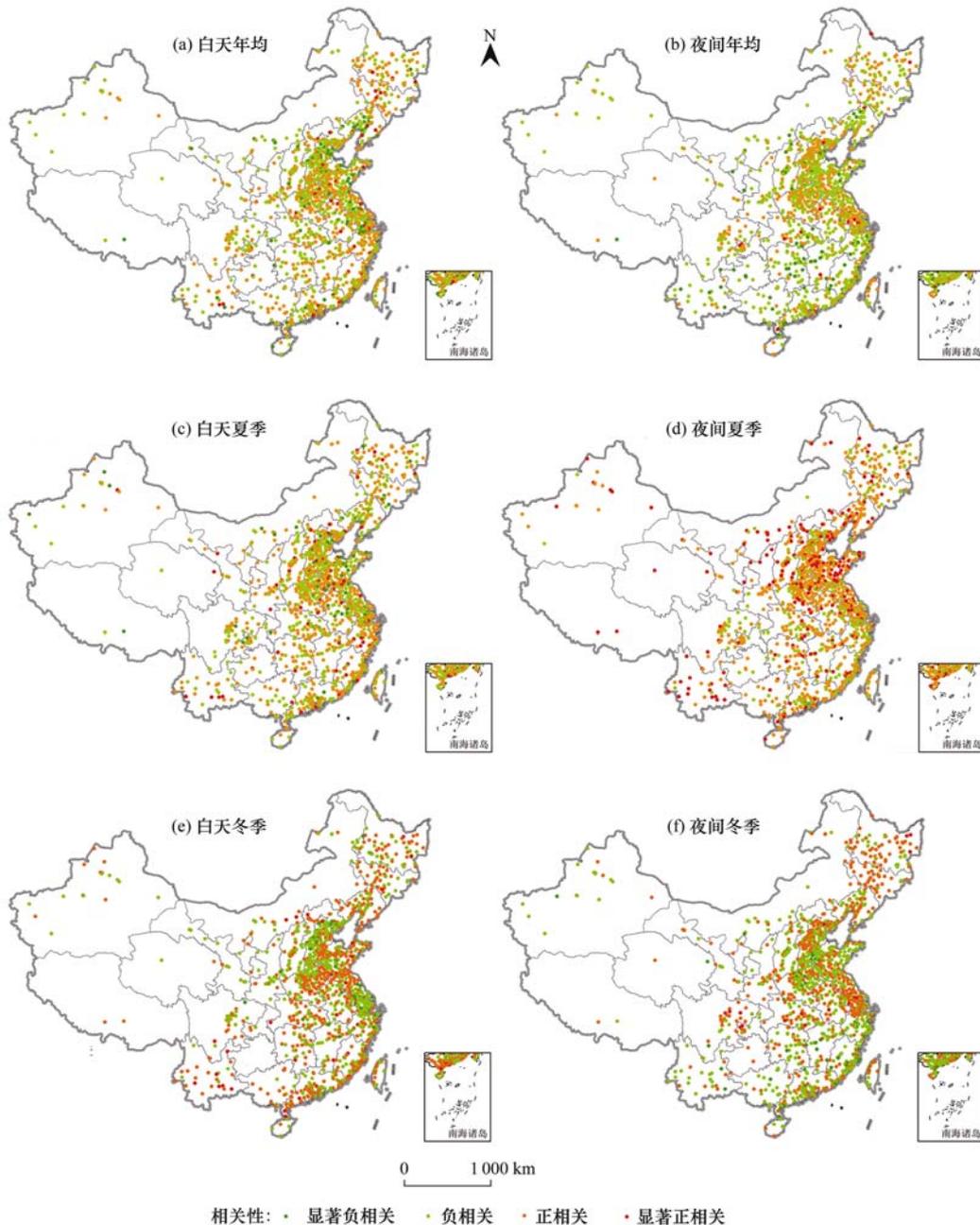


图 12 城市热岛强度与降水之间的相关关系

Fig. 12 Correlations between surface UHII and precipitation

加的趋势. Li 等<sup>[29]</sup>利用 2010 年 MODIS/Aqua 数据发现在湿冷的东北地区 and 湿热的南方地区年均城市热岛强度较高,且热岛气候区雨季的热岛强度高于干季,这些结论与本文一致. 在全球尺度上,白天平均城市热岛强度高于夜间热岛近  $0.3^{\circ}\text{C}$ <sup>[8]</sup>,可见城市热岛研究的尺度效应同样存在.

此外,学界对于城市热岛驱动机制的研究表现出浓厚的兴趣,特别在关键因子识别方面呈现多样化趋势. 本文结果显示气候背景和地理位置是我国昼夜城市热岛变化的主控因子,城乡植被差异以及建设用地规模是次要因子,这与曹畅等<sup>[11]</sup>的研究结论基本相同. 但热岛的主控因子可能存在地域差异,

如 Manoli 等<sup>[30]</sup>在全球尺度上的研究结果发现,城市热岛强度受到年均降雨量和人口规模的非线性调节,当地的气候、植被特征会直接影响不同降温策略的效率. Yao 等<sup>[10]</sup>以我国 31 个省会城市为研究对象,也发现城乡植被覆盖的差异与夏季热岛强度呈负相关关系. 此外,城镇建设用地斑块的空间结构(比如面积、形状复杂度和分离度等)对夏季城市热岛强度也起到一定调控作用<sup>[31]</sup>. 因此,城市规划人员与决策者在设计城市热岛减缓策略时,应充分考虑当地气候背景和地理位置状况,缩小城乡绿色植被覆盖差异对白天热岛的减缓将起到一定作用,而优化调控中小型城镇建成区规模和人口密度对缓解

我国夜间热岛的持续升高也将起到积极作用。

总体来看,城市热岛强度仍是表征地表城市热环境的重要指示性量化指标,对于指导未来气候敏感性城市规划以及面向热岛减缓的创新解决方案设计都具有理论和现实意义。受制于时序空间数据可获得性的局限,本文未对我国城市热岛的驱动机制开展多时相研究,对各影响因子对热岛解释力的时空变化仍缺乏清晰认识。因此,整合时空大数据开展我国城市热岛驱动力的多时相分析,是值得今后深入研究的方向。

#### 4 结论

(1)在时间维度上,我国城市热岛强度呈现出明显的昼夜、季节变异特征。总体上,全年夜间热岛略高于白天热岛,而夏季白天热岛则显著高于夜间。过去的 18 年间,我国白天热岛强度逐年下降 [ $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ],且冬季热岛下降幅度高于夏季;华北、中原以及长江沿线城市群在白天以下降趋势为主,而夜间则以增加趋势为主,表现为昼夜相反的空间分布模式。

(2)在空间维度上,我国的台湾、浙江、黑龙江、江苏以及广东等东部或沿海省份的平均白天热岛强度较高(大于 $1^{\circ}\text{C}$ ),而陕西、甘肃、西藏和青海等西北内陆或高原省份的平均热岛强度较低;而夜间热岛则与白天热岛的空间分布相反。在气候区对比上,温带、半湿润、半干旱和干旱区等气候区的热岛表现为“夜间高,白天低”的模式,而在亚热带、热带和湿润区的热岛则表现为“夜间低,白天高”的相反模式。

(3)在模拟预测上,RF 模型预测精度较好,且冬季预测精度略优于夏季(均方根误差分别为 0.24 和 0.18),说明机器学习模型可有效预测我国城镇热岛强度。变量重要性分析表明气候背景和纬度位置是我国城市热岛效应的主要控制因子,其他人类活动、地形特征和城市形态因子对城市热岛的影响不大。降雨是我国城市热岛的主控气候因子,相关分析表明夏季城市热岛强度与降水变异存在“同步”特征。

(4)在驱动机制上,各关键特征变量对昼夜城市热岛的影响表现出非线性、复杂性以及时空尺度依赖特征。当控制其他变量不变的情况下,白天热岛强度与降雨量呈现正相关关系;而夜间热岛强度整体上与降雨量呈现负相关关系,且阈值出现在年均降雨量 $1\ 200\text{ mm}$ 处。城乡叶面积指数的差值对白天热岛的提升起到显著作用,而中小型城镇建成区规模的扩张对夜间热岛的抬升起到积极影响。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 年度数据[DB/OL]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>, 2019-01-20.
- [2] 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[J]. 地球科学进展, 2019, **34**(6): 640-649.  
Qiu G Y, Zhang X N. China's urbanization and its ecological environment challenges in the 21st century[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, **34**(6): 640-649.
- [3] Oke T R. City size and the urban heat island[J]. *Atmospheric Environment*, 1973, **7**(8): 769-779.
- [4] 敖翔宇, 谈建国, 支星, 等. 上海城市热岛与热浪协同作用及其影响因子[J]. 地理学报, 2019, **74**(9): 1789-1802.  
Ao X Y, Tan J G, Zhi X, *et al.* Synergistic interaction between urban heat island and heat waves and its impact factors in Shanghai[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(9): 1789-1802.
- [5] 雷金睿, 陈宗铸, 吴庭天, 等. 1989~2015 年海口城市热环境与景观格局的时空演变及其相互关系[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(4): 1734-1743.  
Lei J R, Chen Z Z, Wu T T, *et al.* Spatio-temporal evolution and interrelationship between thermal environment and landscape patterns of Haikou City, 1989~2015[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(4): 1734-1743.
- [6] 匡文慧. 城市土地利用/覆盖变化与热环境生态调控研究进展与展望[J]. 地理科学, 2018, **38**(10): 1643-1652.  
Kuang W H. Advance and future prospects of urban land use/cover change and ecological regulation of thermal environment[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, **38**(10): 1643-1652.
- [7] 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.
- [8] Chakraborty T, Lee X. A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, **74**: 269-280.
- [9] Zhou D C, Zhang L X, Hao L, *et al.* Spatiotemporal trends of urban heat island effect along the urban development intensity gradient in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **544**: 617-626.
- [10] Yao R, Wang L C, Huang X, *et al.* Temporal trends of surface urban heat islands and associated determinants in major Chinese cities[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **609**: 742-754.
- [11] 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.
- [12] 冯章献, 王士君, 金珊合, 等. 长春市城市形态及风环境对地表温度的影响[J]. 地理学报, 2019, **74**(5): 902-911.  
Feng Z X, Wang S J, Jin S H, *et al.* Effects of urban morphology and wind conditions on land surface temperature in Changchun[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(5): 902-911.
- [13] 乔治, 黄宁钰, 徐新良, 等. 2003-2017 年北京市地表热力景观时空分异特征及演变规律[J]. 地理学报, 2019, **74**(3): 475-489.  
Qiao Z, Huang N Y, Xu X L, *et al.* Spatio-temporal pattern and

- evolution of the urban thermal landscape in metropolitan Beijing between 2003 and 2017[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(3): 475-489.
- [14] 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*, 2019, **53**: 101972, doi. 10.1016/j.scs.2019.101972.
- [15] 陈利顶, 孙然好, 刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展[J]. *生态学报*, 2013, **33**(4): 1042-1050.  
Chen L D, Sun R H, Liu H L. Eco-environmental effects of urban landscape pattern changes: Progresses, problems, and perspectives[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(4): 1042-1050.
- [16] Yang J, Jin S H, Xiao X M, *et al.* Local climate zone ventilation and urban land surface temperatures: Towards a performance-based and wind-sensitive planning proposal in megacities [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, **47**, doi. 10.1016/j.scs.2019.101487.
- [17] Sun Y W, Gao C, Li J L, *et al.* Quantifying the effects of urban form on land surface temperature in subtropical high-density urban areas using machine Learning[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(8), doi. 10.3390/rs11080959.
- [18] Sun Y W, Gao C, Li J L, *et al.* Evaluating urban heat island intensity and its associated determinants of towns and cities continuum in the Yangtze River Delta Urban Agglomerations[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, **50**, doi. 10.1016/j.scs.2019.101659.
- [19] Sun Y W, Gao C, Li J L, *et al.* Examining urban thermal environment dynamics and relations to biophysical composition and configuration and socio-economic factors: A case study of the Shanghai metropolitan region[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, **40**: 284-295.
- [20] 袁振, 吴相利, 臧淑英, 等. 基于 TM 影像的哈尔滨市主城区绿地降温作用研究[J]. *地理科学*, 2017, **37**(10): 1600-1608.  
Yuan Z, Wu X L, Zang S Y, *et al.* Cooling effect of green patches based on TM image in Harbin downtown city[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, **37**(10): 1600-1608.
- [21] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 基于景观格局的城市热岛研究进展[J]. *生态学报*, 2012, **32**(14): 4553-4565.  
Chen A L, Sun R H, Chen L D. Studies on urban heat island from a landscape pattern view: A review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(14): 4553-4565.
- [22] 李元征, 尹科, 周宏轩, 等. 基于遥感监测的城市热岛研究进展[J]. *地理科学进展*, 2016, **35**(9): 1062-1074.  
Li Y Z, Yin K, Zhou H X, *et al.* Progress in urban heat island monitoring by remote sensing[J]. *Progress in Geography*, 2016, **35**(9): 1062-1074.
- [23] Wan Z M. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **140**: 36-45.
- [24] Abatzoglou J T, Dobrowski S Z, Parks S A, *et al.* TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015 [J]. *Scientific Data*, 2018, **5**, doi. 10.1038/sdata.2017.191.
- [25] Zhao L, Lee X, Smith R B, *et al.* Strong contributions of local background climate to urban heat islands [J]. *Nature*, 2014, **511**(7508): 216-219.
- [26] Breiman L. Random forest[J]. *Machine Learning*, 2001, **45**: 5-32.
- [27] 游介文, 邹滨, 赵秀阁, 等. 基于随机森林模型的中国近地面 NO<sub>2</sub> 浓度估算[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(3): 969-979.  
You J W, Zou B, Zhao X G, *et al.* Estimating ground-level NO<sub>2</sub> concentrations across mainland China using random forests regression modeling [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(3): 969-979.
- [28] 胡梦璐, 王佳, 张亚云, 等. 基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1838-1846.  
Hu M J, Wang J, Zhang Y Y, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in surface dust of Lanzhou schools based on random forests[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1838-1846.
- [29] Li Y Z, Wang L, Zhang L P, *et al.* Monitoring intra-annual spatiotemporal changes in urban heat islands in 1449 cities in China based on remote sensing [J]. *Chinese Geographical Science*, 2019, **29**(6): 905-916.
- [30] Manoli G, Fatichi S, Schläpfer M, *et al.* Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population [J]. *Nature*, 2019, **573**(7772): 55-60.
- [31] Yue W Z, Liu X, Zhou Y Y, *et al.* Impacts of urban configuration on urban heat island: An empirical study in China mega-cities[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **671**: 1036-1046.

## CONTENTS

Concurrent Collection of Ammonia Gas and Aerosol Ammonium in Urban Beijing During National Celebration Days Utilizing an Acid-Coated Honeycomb Denuder in Combination with a Filter System .....	GU Meng-na, PAN Yue-peng, SONG Lin-lin, <i>et al.</i> ( 1 )
Heavy Pollution Episode in Tianjin Based on UAV Meteorological Sounding and Numerical Model .....	YANG Xu, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> ( 9 )
Characteristics and Sources of PM <sub>2.5</sub> Pollution in Typical Cities of the Central Plains Urban Agglomeration in Autumn and Winter .....	MIAO Qing-qing, JIANG Nan, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i> ( 19 )
Characteristics and Sources of Water-soluble Ion Pollution in PM <sub>2.5</sub> in Winter in Shenyang .....	WANG Guo-zhen, REN Wan-hui, YU Xing-na, <i>et al.</i> ( 30 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> Collected in Baoding .....	LEI Wen-kai, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> ( 38 )
Source Apportionment of Ambient Carbonyl Compounds Based on a PMF and Source Tracer Ratio Method: A Case Based on Observations in Nanjing .....	HU Kun, WANG Ming, WANG Hong-li, <i>et al.</i> ( 45 )
Characterization and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Tianjin in 2019 .....	GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, XU Hong, <i>et al.</i> ( 55 )
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Liuzhou .....	LIU Qi, LU Xing-lin, ZENG Peng, <i>et al.</i> ( 65 )
Characteristics of Ozone and Source Apportionment of the Precursor VOCs in Tianjin Suburbs in Summer .....	LUO Rui-xue, LIU Bao-shuang, LIANG Dan-ni, <i>et al.</i> ( 75 )
Transport Influence and Potential Sources of Ozone Pollution for Nanjing During Spring and Summer in 2017 .....	XIE Fang-jian, LU Xiao-bo, YANG Feng, <i>et al.</i> ( 88 )
Ozone Pollution Trend in the Pearl River Delta Region During 2006-2019 .....	ZHAO Wei, GAO Bo, LU Qing, <i>et al.</i> ( 97 )
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Deposition in Areas Adjacent to a Large Petrochemical Enterprise .....	LI Da-yan, QI Xiao-bao, WU Jian, <i>et al.</i> ( 106 )
Quantitative Comparison of Methods to Assess the Airborne Particulate Matter Retention Capacity of Leaves .....	YUE Chen, LI Guang-de, XI Ben-ye, <i>et al.</i> ( 114 )
Emission Estimation and Fate Simulation of Dichlorvos in the Dongjiang River Watershed .....	ZHANG Bing, ZHANG Qian-qian, YING Guang-guo ( 127 )
Distribution and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Songhua River Basin of the Harbin Section and Ashe River .....	YANG Shang-le, WANG Xu-ming, WANG Wei-hua, <i>et al.</i> ( 136 )
Characteristics and Ecological Risk Assessment of POPs Pollution in Sediments of Xiaoxingkai Lake in the Northeast China .....	LI Hui, LI Jie, SONG Peng, <i>et al.</i> ( 147 )
Distribution and Ecological Risk Assessment of PPCPs in Drinking Water Sources of Henan Province .....	ZHOU Ying, WU Dong-hai, LU Guang-hua, <i>et al.</i> ( 159 )
Occurrence Characteristics and Health Risk Assessment of Endocrine Disrupting Chemicals in Groundwater in Wuxi-Changzhou .....	WANG Shu-ting, RAO Zhu, GUO Feng, <i>et al.</i> ( 166 )
Seasonal Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Qingjiang River .....	LIU Zhao, ZHOU Hong, CAO Wen-jia, <i>et al.</i> ( 175 )
Metal Pollutions and Human Health Risks in Groundwater from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China .....	LI Jun, ZHAO Yi, ZOU Sheng-zhang, <i>et al.</i> ( 184 )
Seasonal Variation of DOM Spectral Characteristics of Rivers with Different Urbanization Levels in the Three Gorges Reservoir Area .....	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue ( 195 )
Distribution of Micro-plastics in the Soil Covered by Different Vegetation in Yellow River Delta Wetland .....	YUE Jun-jie, ZHAO Shuang, CHENG Hao-dong, <i>et al.</i> ( 204 )
Metagenomic Analysis Provides Insights into Bacterial Communities, Antibiotic Resistomes, and Public Health Risks in the Dongping Lake Reservoir .....	ZHANG Hong-na, CUI Na, SHEN Hong-miao ( 211 )
Mechanism of Algal Community Dynamics Driven by the Seasonal Water Bacterial Community in a Stratified Drinking Water Reservoir .....	YAN Miao-miao, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> ( 221 )
Community Structure, Function, and Influencing Factors of Planktonic Fungi in the Danjiangkou Reservoir .....	ZHENG Bao-hai, WANG Xiao-yu, LI Ying-jun, <i>et al.</i> ( 234 )
Changes in Algal Particles and Their Water Quality Effects in the Outflow River of Taihu Lake .....	GUO Yu-long, XU Hai, CHEN Xu-qing, <i>et al.</i> ( 242 )
Characteristics of Soil Nitrogen and Phosphorus Losses Under Different Land-use Schemes in the Shipanqiu Watershed .....	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> ( 251 )
Influence of Antecedent Dry Days on Nitrogen Removal in Bioretention Systems .....	CHEN Yao, LI Xin-rui, ZHENG Shuang, <i>et al.</i> ( 263 )
Effect of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar on the Adsorption Characteristics and Adsorption Mechanisms of Ammonia Nitrogen in Rainfall Runoff .....	CHEN You-yuan, LI Pei-qiang, LI Xian-chi, <i>et al.</i> ( 274 )
Effect of Filter Medium on the Enhancement of Complete Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Process in a Tidal Flow Constructed Wetland .....	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, QIN Hui-an, <i>et al.</i> ( 283 )
Adsorption Effect and Mechanism of Aqueous Arsenic on FeMnNi-LDHs .....	LIAO Yu-mei, YU Jie, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> ( 293 )
Combined Use of Zirconium-Modified Bentonite Capping and Calcium Nitrate Addition to Control the Release of Phosphorus from Sediments .....	ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> ( 305 )
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants .....	XIE Ya-wei, YU Chi-sheng, LI Fei-fei, <i>et al.</i> ( 315 )
Occurrence of Antibiotic Resistance Genes and Bacterial Community Structure of Different Sludge Samples During Microwave Pretreatment-Anaerobic Digestion .....	LI Hui-li, WU Cai-yun, TANG An-ping, <i>et al.</i> ( 323 )
Selenium Threshold for the Delimitation of Natural Selenium-Enriched Land .....	WANG Hui-yan, ZENG Dao-ming, GUO Zhi-juan, <i>et al.</i> ( 333 )
Improved Regression Kriging Prediction of the Spatial Distribution of the Soil Cadmium by Integrating Natural and Human Factors .....	GAO Zhong-yuan, XIAO Rong-bo, WANG Peng, <i>et al.</i> ( 343 )
Simulation Cadmium (Cd) Accumulation in Typical Paddy Soils in South China .....	DAI Ya-ting, FU Kai-dao, YANG Yang, <i>et al.</i> ( 353 )
Bioaccessibility and Health Risks of the Heavy Metals in Soil-Rice System of Southwest Fujian Province .....	LIN Cheng-qi, CAI Yu-hao, HU Gong-ren, <i>et al.</i> ( 359 )
Effects of Nano Material on Cadmium Accumulation Capacity and Grain Yield of Indica Hybrid Rice Under Wetting-drying Alternation Irrigation .....	YANG Ru, CHEN Xin-rui, ZHANG Ying, <i>et al.</i> ( 368 )
Regulation Control of a Tribasic Amendment on the Chemical Fractions of Cd and As in Paddy Soil and Their Accumulation in Rice .....	JIANG Yi, LIU Ya, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> ( 378 )
Combined Effect of Weathered Coal Based Amendments and Soil Water Management on Methylmercury Accumulation in Paddy Soil and Rice Grains .....	ZHENG Shun-an, WU Ze-ying, DU Zhao-ling, <i>et al.</i> ( 386 )
Effects of Fertilization Strategies on the Cadmium Resistance of Paddy Soil Microorganisms .....	ZHENG Kai-kai, MA Zhi-yuan, SUN Bo, <i>et al.</i> ( 394 )
Soil Enzyme Activity in <i>Picea schrenkiana</i> and Its Relationship with Environmental Factors in the Tianshan Mountains, Xinjiang .....	ZHANG Han, GONG Lu, LIU Xu, <i>et al.</i> ( 403 )
Effects of Farmland Abandonment on Soil Enzymatic Activity and Enzymatic Stoichiometry in the Loess Hilly Region, China .....	ZHONG Ze-kun, YANG Gai-he, REN Cheng-jie, <i>et al.</i> ( 411 )
Effect of Biochar on Soil Enzyme Activity & the Bacterial Community and Its Mechanism .....	FENG Hui-lin, XU Chen-sheng, HE Huan-hui, <i>et al.</i> ( 422 )
Effects of Vegetation Restoration on the Structure and Function of the Rhizosphere Soil Bacterial Community of <i>Solanum rostratum</i> .....	ZHANG Rui-hai, SONG Zhen, FU We-dong, <i>et al.</i> ( 433 )
Response of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Rice Quality in a Yellow Soil Paddy Field to Biochar Combined with Nitrogen Fertilizer .....	SHI Deng-lin, WANG Xiao-li, LIU An-kai, <i>et al.</i> ( 443 )
Effects of Adding Straw and Biochar with Equal Carbon Content on Soil Respiration and Microbial Biomass Carbon and Nitrogen .....	HE Tian-tian, WANG Jing, FU Yun-peng, <i>et al.</i> ( 450 )
How Different Ratios of Straw Incorporation to Nitrogen Fertilization Influence Endogenous and Exogenous Carbon Release from Agricultural Soils .....	SUN Zhao-an, ZHANG Xuan, HU Zheng-jiang, <i>et al.</i> ( 459 )
Effect of Biochar and Chemical Fertilizer Mixture on Ammonia Volatilization and Phosphorus Fixation .....	YANG Wen-na, DENG Zhen-xin, LI Jiao, <i>et al.</i> ( 467 )
Effects of Film Materials on Ammonia Volatilization Emissions from a Paddy System After Reducing Nitrogen Fertilizer Application .....	YU Ying-liang, WANG Meng-fan, YANG Bei, <i>et al.</i> ( 477 )
Effects of Microplastics on Embryo Hatching and Intestinal Accumulation in Larval Zebrafish <i>Danio rerio</i> .....	ZHAO Jia, RAO Ben-qiang, GUO Xiu-mei, <i>et al.</i> ( 485 )
Urban Micro-Scale Thermal Environment Simulation Supported by UAV Thermal Infrared Data .....	YANG Shao-qi, FENG Li, TIAN Hui-hui, <i>et al.</i> ( 492 )
Estimation of the Urban Heat Island Intensity Change and Its Relationships with Driving Factors Across China Based on the Human Settlement Scale .....	SUN Yan-wei, WANG Run, GUO Qing-hai, <i>et al.</i> ( 501 )