

北京城区PM_{2.5}各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期
Vol.43 No.5

目次

北京城区 PM_{2.5} 各组分污染特征及来源分析 安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)

基于时空混合效应模型的京津冀 PM_{2.5} 浓度变化模拟 范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)

2000~2018年京津冀城市群 PM_{2.5} 时空演变及其与城市扩张的关联 赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)

海-陆大气交汇作用下青岛冬季天气 PM_{2.5} 污染特征与来源解析 虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)

硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟 张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)

省会城市不同功能区大气 PM_{2.5} 化学组分季节变化及来源分析 孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)

太原市冬季不同污染程度下 PM_{2.5} 的化学组成、消光特征及氧化潜势 任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)

郑州市冬季大气 PM_{2.5} 金属元素来源及健康风险评估 姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)

淄博市冬季 PM_{2.5} 载体金属元素污染特征、生态风险评估及来源分析 白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)

承德市 PM_{2.5} 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评估 贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)

珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移 付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)

华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源 张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡亮, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)

基于模式过程分析技术天津地区 PM_{2.5} 污染气象成因分析 郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)

基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制 陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)

基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征 菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)

基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测 陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)

基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进 蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)

基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法 石耀鹏, 胡京南, 褚晰晰, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)

重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估 曾景海, 王灿 (2436)

黄河流域水污染风险分区 周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)

黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征 李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)

黄河沉积物重金属时空分布与污染评价 王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)

APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源 沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)

河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系 肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)

太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析 胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)

洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性 胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)

富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹 郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)

基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析 马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)

暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析 张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)

鄱阳湖流域水葫芦 (*Eichhornia crassipes*) 对水体微塑料的吸附截留效应 李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)

太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评估 刘舒娇, 丁剑楠, 石浚哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)

骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量 姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)

太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示 蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)

辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析 李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李元乾, 郑娜 (2586)

面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变 薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)

微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响 李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)

白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)

人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响 高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)

鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征 江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)

负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO₂-Sb-Ni 电极催化氧化双酚 A 符远航, 刘安迪, 黄纬斌, 唐柏彬, 张进忠 (2640)

磁性 Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe₂O₄@SiO₂ 催化 H₂O₂ 降解亚甲基蓝效能及机制 徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)

两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响 蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)

AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素 张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)

三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响 卢英源, 董小琦, 彭星然, 贾晓珊 (2685)

污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析 李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)

基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析 张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)

铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价 陈航, 王颖, 王澍 (2719)

典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响 周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)

两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤 孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)

基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测 王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)

紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征 徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)

不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价 邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)

木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响 申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)

生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响 郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)

戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素 何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)

模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响 王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)

中国主要城市的城市化对局地增温的贡献 李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)

《环境科学》征订启事(2293) 《环境科学》征稿简则(2426) 信息(2585, 2672, 2708)

中国主要城市的城市化对局地增温的贡献

李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠*

(南京信息工程大学应用气象学院, 江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044)

摘要: 快速发展的城市化可极大地加剧全球变暖背景下我国局地和区域的增温效应, 然而有关不同城市的局地增温效应及其空间分布特征的认识相对薄弱. 基于 1981 ~ 2017 年气象观测和 ERA-5 气候再分析数据, 通过城乡对比法 (UMR) 和观测减去再分析方法 (OMR) 对比分析了中国 92 个主要城市的城市化对局地增温的贡献. 结果表明, 过去 37 a, 所有城市的气温均呈显著增加态势, 且最低温度增速整体上明显高于最高温度, 尤其北方城市; OMR 和 UMR 方法所估算的城市化增温效应差异大, UMR 方法整体上可能严重低估城市化对气温升高的影响; OMR 方法结果表明, 大部分城市的城市化对气温升高起促进作用 [平均增温趋势和贡献率分别达 $0.26 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 46.7%], 尤其是最低气温; 不同区域城市化增温效应差异大, 东南地区增温贡献最大, 西北地区最低. 结果强调了城市化增温效应的极大时空异质性以及不同方法估算结果的巨大差异, 未来需加强乡村对比气象站点的建设.

关键词: 城市化; 观测减去再分析方法; 气候变化; 贡献率; 城市热岛效应

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2822-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109081

Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China

LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, ZHANG Liang-xia*

(Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Rapid urbanization can greatly aggravate local and regional warming rates in China under the background of global warming. However, the local warming effects of different cities and their spatial distributions remain poorly understood. Based on the meteorological observations and ERA-5 climate reanalysis data from 1981 to 2017, this study analyzed the contribution of urbanization to local warming in 92 major cities of China using both urban minus rural (UMR) and observation minus reanalysis (OMR) methods. The results showed that the air temperature has increased significantly in all the cities during the past 37 years, and the warming rates were clearly higher for the minimum temperature than those for the maximum temperature, especially in the northern cities. The estimated warming effects of urbanization differed substantially between the OMR and UMR methods, and the UMR method in general may seriously underestimate the impact of urbanization on local warming. The OMR results showed that urbanization in most cities intensified the local warming [with an average warming rate of $0.26 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ and contribution rate of 46.7%], especially the minimum temperature. In addition, the warming effects of urbanization varied greatly by geographic region, with the highest in southeast China and the lowest in northwest China. This research emphasizes the great spatial and temporal heterogeneities of the warming effects of urbanization and the large contrasts of the estimated contributions by using different methods. Future efforts should be tailored to the construction of reference meteorological stations in rural areas.

Key words: urbanization; observation minus reanalysis; climate change; contribution rate; urban heat island

在全球变暖的背景下, 大量证据表明城市化的快速发展影响了城市生态环境^[1,2], 尤其是加速了气候变暖^[3~6]. 虽然以全球尺度看, 城市化相比于气候变暖本身的大势, 其产生的作用很微弱^[7]. 但在局地 and 区域尺度, 城市化的增温效应不可忽略, 部分地区甚至可能超过温室增加的效应. 其中, 中国被认为是全球城市化增温效应最明显的地区之一^[8~10]. 例如, Sun 等^[3]的研究发现 1961 ~ 2013 年中国气温增长中由城市化导致的增温高达三分之一. 然而已有研究大多关注城市化对较大区域尺度 (如特大城市群、中国东部和全国) 城市化对温度变化的整体贡献^[11~14], 有关不同城市的局地增温效应及其空间分布特征的认识相对薄弱. 考虑到我国不同地区气候变化与城市化发展的巨大差异, 量化不同城市的城市化对增温的贡献是准确评估和预测未来我国城市发展对气候影响的前提.

量化城市化增温效应的方法主要包括城乡对比

法 (urban minus rural, UMR) 和观测减去再分析方法 (observation minus reanalysis, OMR). UMR 通过城市站点和乡村站点观测气温趋势差异代表城市化对局地增温的贡献^[15,16]. OMR 方法利用再分析资料在同化和拟合过程中未采用地面观测数据的特点^[17], 通过比较地面观测资料与再分析资料的差异来研究城市化效应, 被广泛用于城市化增温效应的研究^[18]. 无论是 UMR 还是 OMR 法, 均具有一定的局限性. 前者因参考乡村站点选取具有一定的随机性, 使得其结果具有较大不确定性, 后者可能受再分析资料自身精度影响, 进而导致两种方法的估算结果可能存在较大差异^[15, 19]. 因此, 基于两种方法对比研究我国城市化对局地增温的贡献将有助于人们全面认

收稿日期: 2021-09-09; 修订日期: 2021-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42130506); 江苏高校“青蓝工程”项目 (R2019Q02)

作者简介: 李宇 (1997 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土地利用变化的气候效应, E-mail: 852440395@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhanglx@nuist.edu.cn

识城市化增温效应的地理分布特征及其研究结果的不确定性。

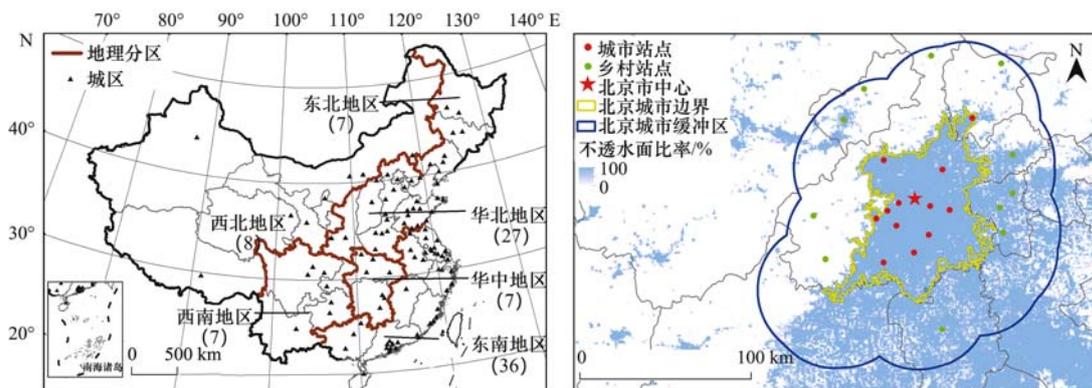
本文基于 1981 ~ 2017 年气象观测数据和最新发布的 ERA-5 再分析数据,通过 UMR 和 OMR 两种方法综合对比中国 92 个主要城市的城市化对局地增温的贡献,通过深化对我国城市化增温效应空间分布特征及其不确定性的认识,以期为局地气候变化评估与预测提供参考,并为城市的发展规划提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据资料

本研究所用的数据资料主要包括气象数据、再分析数据和城市不透水面数据,此外还添加了人口密度数据和国内生产总值(GDP)数据用于影响因子分析。气象数据包括来源于中国气象局 2 419 个地面气象观测站的逐日平均气温(T_{ave})、最高气温(T_{max})、最低气温(T_{min})和日降水量。气候再分析数

据采用 ERA-5 逐月地面 2 m 温度数据^[20, 21],分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,两者的时间跨度均为 1981 年 1 月至 2017 年 12 月。城市不透水面数据利用 Gong 等^[22]研发的 1978 ~ 2017 年中国 30 m 分辨率居民区产品,通过移动窗口法计算获取。人口密度数据来自 worldpop (<https://www.worldpop.org/>),时间尺度为 2000 ~ 2017 年,分辨率为 1 km; GDP 数据^[23]选取了 1990、1995、2000、2005、2010 和 2015 年的格网数据,分辨率为 1 km,本文基于 2015 年联合国发布的城市人口数筛选出城市人口超过百万或省会城市,进而基于 2015 年不透水面比率,以 50% 为阈值提取各城市边界来筛选城市气象站点,50 km 缓冲区内筛选出对应的乡村气象站点^[24]。剔除了观测数据和再分析数据不具备完整时间序列气象数据的站点,并保证每个城市都至少有一个站点,最终选取了中国 92 个城市(不包含中国港澳台地区),共 648 个气象站点(其中城市站点 202 个,乡村站点 446 个),本文将中国划分为 6 个地区(图 1)。



括号内数值表示该地区研究城市的个数

图 1 研究区示意

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

1.2 城市化对气温变化的贡献

首先,根据所选气象站点提取其再分析气象温度,预处理得到平均气温、最高气温和最低气温的月平均值。基于观测温度和再分析温度计算各城市的城市和乡村温度,城市(或乡村)温度由所有城市(或乡村)站点温度的反距离加权平均值表示^[16],进而基于 UMR 和 OMR 方法计算城市化对局地气温变化的影响,对于贡献率,本文中只讨论城市化对升温的贡献率。

1.2.1 基于 UMR 方法贡献率的计算

本文将城市站点平均气温年际变化率(S_U)与乡村站点平均气温年际变化率(S_R)之差定义为 UMR。该值大于或等于 0 时,贡献率(CR)的计算公式为:

$$CR = UMR/S_U \times 100\% \quad (1)$$

1.2.2 基于 OMR 方法贡献率的计算

本文将城市站点的观测气温年际变化率(S_O)与再分析气温年际变化率(S_{Re})之差定义为 OMR。这个值大于或等于 0 时,贡献率的计算公式为:

$$CR = OMR/S_O \times 100\% \quad (2)$$

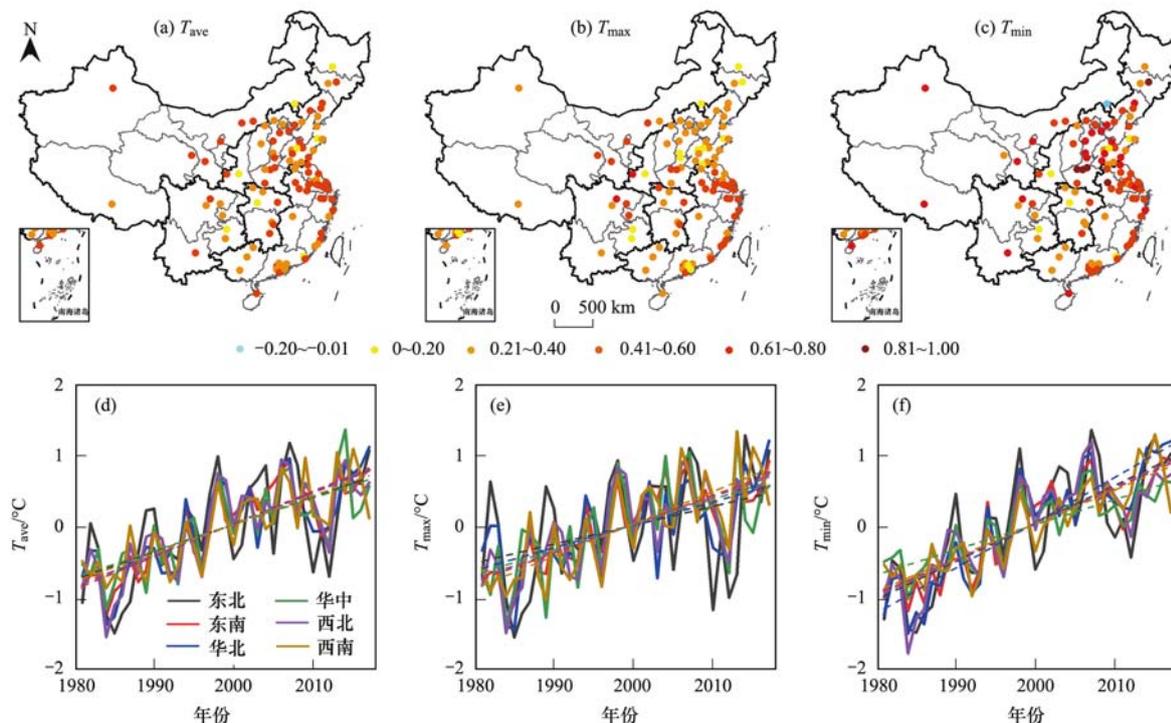
2 结果与分析

2.1 1981 ~ 2017 年中国主要城市的温度变化趋势

1981 ~ 2017 年间各城市的气温均有不同程度的升高,平均气温、最高气温和最低气温的增温速率分别为 (0.38 ± 0.13) 、 (0.34 ± 0.14) 和 $(0.48 \pm 0.20)^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ [图 2(a) ~ 2(c)]。苏州市、淮南市和开封市的平均气温增温速率最高,其中苏州市达到 $0.60^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,赤峰市、烟台市和淄博市的气温升高最缓慢,赤峰市的最低气温甚至表现出

微弱的降温趋势 [$-0.03\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$], 且四分之三的城市最低气温增加速率明显高于最高温度, 尤其北方地区城市. 不同地理分区的平均气温增长差异相对较小, 东南地区气温升高较快, 平均增温速率为 $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 华中地区增温稍慢

[$0.37\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 图 2(d)]; 但不同地区最高和最低气温变化趋势的差异较大, 华北和东北地区最低气温增长速率是最高气温增长率的 1.9 倍, 而华中地区最高温度和最低温度的变化趋势几乎相等.



(a)、(b)和(c)图例单位: $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$; (d)、(e)和(f)中折线表示温度距平变化,虚线表示温度距平变化拟合线,东北、东南、华北、华中、西北和西南地区的平均温度变化率分别为 0.38 、 0.46 、 0.44 、 0.37 、 0.43 和 $0.40\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 最高温度变化率分别为 0.26 、 0.40 、 0.31 、 0.35 、 0.38 和 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 最低温度变化率分别为 0.53 、 0.49 、 0.63 、 0.35 、 0.51 和 $0.47\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$

图 2 中国主要城市 1981~2017 年温度年际变化与增温速率空间分布

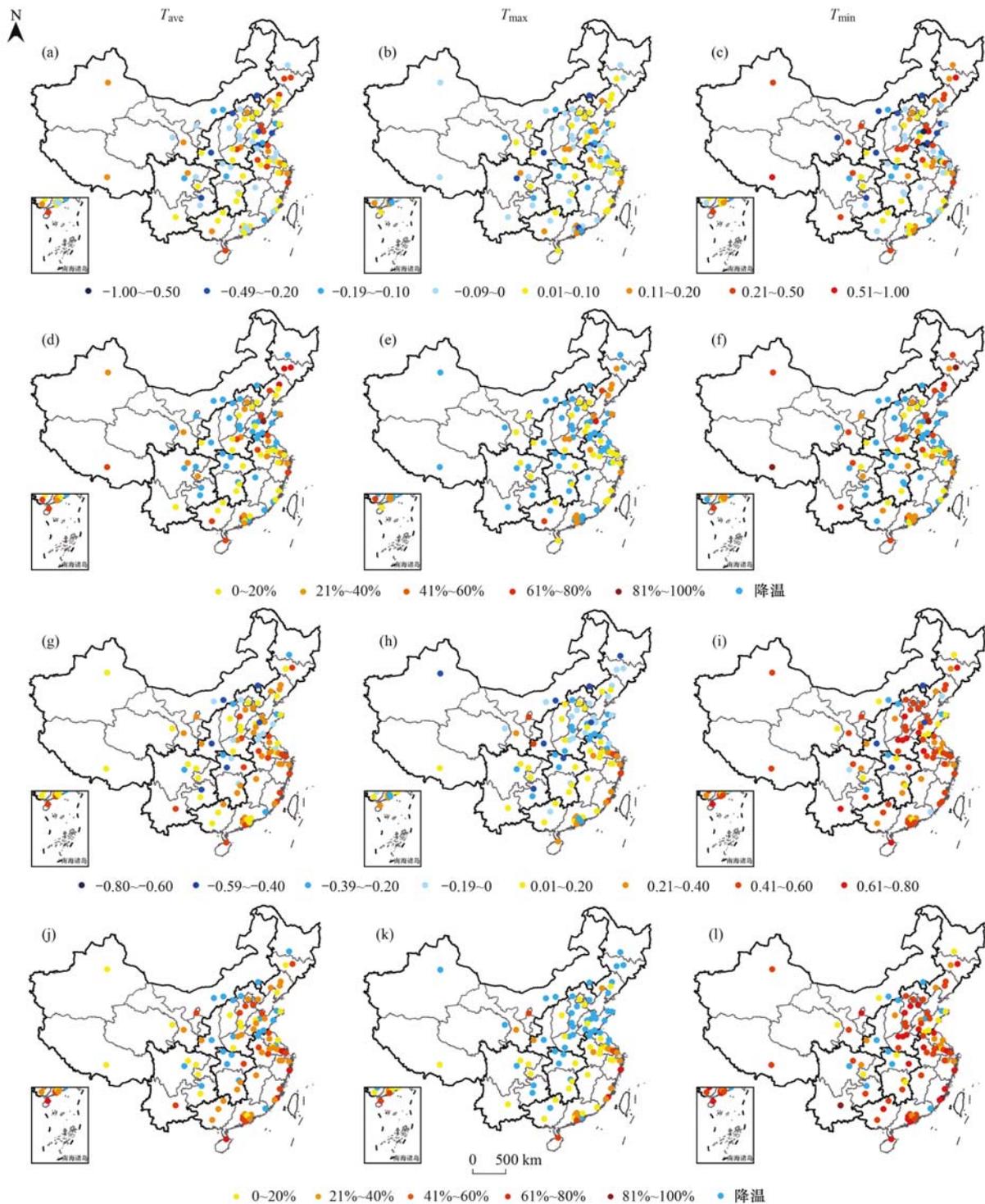
Fig. 2 Spatial distributions of the inter-annual trends of the mean temperature and the warming rates in major cities of China from 1981 to 2017

2.2 城市化对局地增温的贡献

基于 UMR 方法的结果表明,城市化对平均气温具有增温贡献的城市仅 54 个 (59%), 平均增温幅度和平均增温贡献率分别为 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 和 26.8% [图 3(a)和 3(d)], 其它城市均表现出明显的降温作用. 城市化对最低气温增温的城市个数 (53 个)、平均增温幅度 [$0.20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$] 和平均贡献率 (31.4%) [图 3(b)和 3(e)] 均明显高于对最高气温的增温作用 [44 个、 $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 和 19.1%, 图 3(c)和 3(f)]. 吉林市最低气温增温趋势高达 $0.83\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 城市化贡献率也占到了 95.8%. 从地理区域来看 [图 4(a1)和 4(a2)], 城市化对东北地区 and 西北地区的影响更大, 东北和西北地区平均增温趋势分别为 $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 和 $0.20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 城市化贡献率分别为 44.1% 和 34.0%; 华中地区增温趋势最弱, 平均增温趋势为 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 城市化贡献率分别为 11.6%. 其他城市的城市化影响表现为降温效应, 特别是最高

气温. 整体上, 枣庄市、淄博市的降温趋势最明显, 枣庄市最低气温降温趋势达到了 $-0.69\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$. 基于 UMR 法计算城市化影响, 表现为降温趋势的城市占比接近一半, 严重低估了城市化对气温升高的影响. 同时, 城市化对最低气温的影响出现两极化, 不同城市间城市化影响差异达到了 $1.52\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 而平均气温和最高气温的差异仅为 $0.80\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 和 $0.61\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$.

基于 OMR 方法的结果表明, 绝大部分城市 (79%) 的城市化对平均温度具有明显的增温效应, 平均增温幅度和对局地增温的贡献率分别达 $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 和 31.1% [图 3(g)]. 和 UMR 方法结果类似, 城市化对最低温度增温的作用明显高于对最高气温的影响, 81 个城市的城市化对最低气温具有增温效应, 平均增温幅度为 $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 平均贡献率达 46.5%; 吉林市、洛阳市和昆明市最低气温增温趋势均大于 $0.60\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 昆明市城市化贡献率甚至高达 82.5%. 对比之下, 仅 48



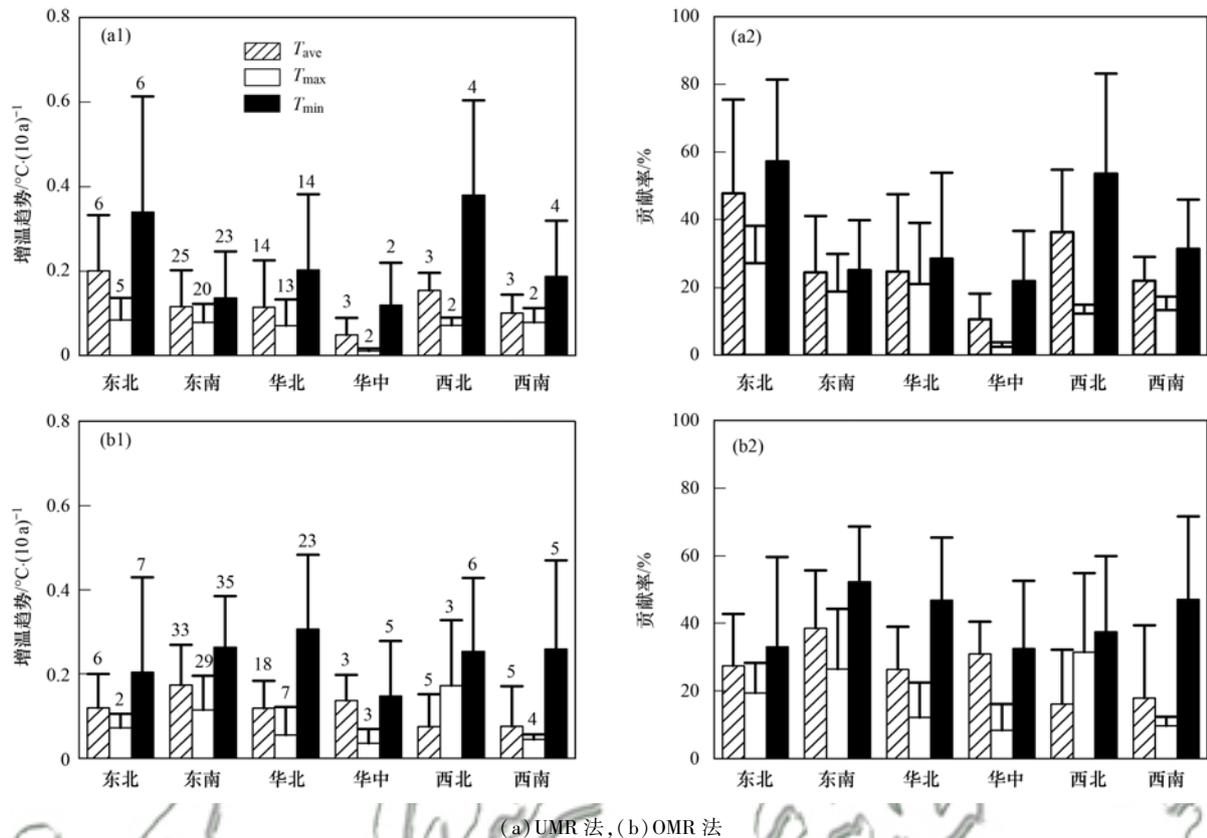
(a)、(b)和(c)为基于 UMR 法城市化影响,图例单位: $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$; (d)、(e)和(f)为 UMR 法城市化贡献率, 单位%; (g)、(h)和(i)为基于 OMR 法城市化影响,图例单位: $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$; (j)、(k)和(l)为 OMR 法城市化贡献率, 单位%

图 3 中国主要城市基于 UMR 和 OMR 法 1981 ~ 2017 年城市化影响及其贡献率分布

Fig. 3 Distribution of urbanization effects and contribution rates in major cities of China from 1981 to 2017 based on UMR and OMR methods

个城市对最高温度具有增温效应,且其增温趋势和平均增温贡献率仅 $0.10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 和 21.9% . 从地理区域来看,城市化影响与贡献率的大小稍有差异[图 4(b1)和 4(b2)]:城市化对东南地区的影响最大,东南地区平均增温趋势 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,城市化贡献率为 39.1% ,其最低气温的增温趋势为最

高气温的 2.3 倍,华北地区更是达到了 5.5 倍;华中地区增温趋势最弱,平均增温趋势为 $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,城市化贡献率分别为 28.7% . 其他城市的城市化影响表现为降温效应,主要是最高气温的降低.呼和浩特市和西安市的降温趋势比较明显,平均降温趋势分别为 $-0.23\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 和 -0.32



(a) UMR 法, (b) OMR 法
误差棒上的数字表示该地区城市化影响为升温的城市个数

图4 中国不同地区基于 UMR 和 OMR 法 1981 ~ 2017 年城市化对增温影响及其贡献率

Fig. 4 Effect of urbanization on warming and its contribution rate in different regions of China from 1981 to 2017 based on UMR and OMR methods

$^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 呼和浩特市最高气温降温趋势达到了 $-0.33 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$. 降温趋势主要集中在华北地区和东北地区, 这些地区最高气温降低的城市多但降温幅度不大, 降温最明显的地区是西北地区.

2.3 基于 UMR 和 OMR 方法的城市化影响差异

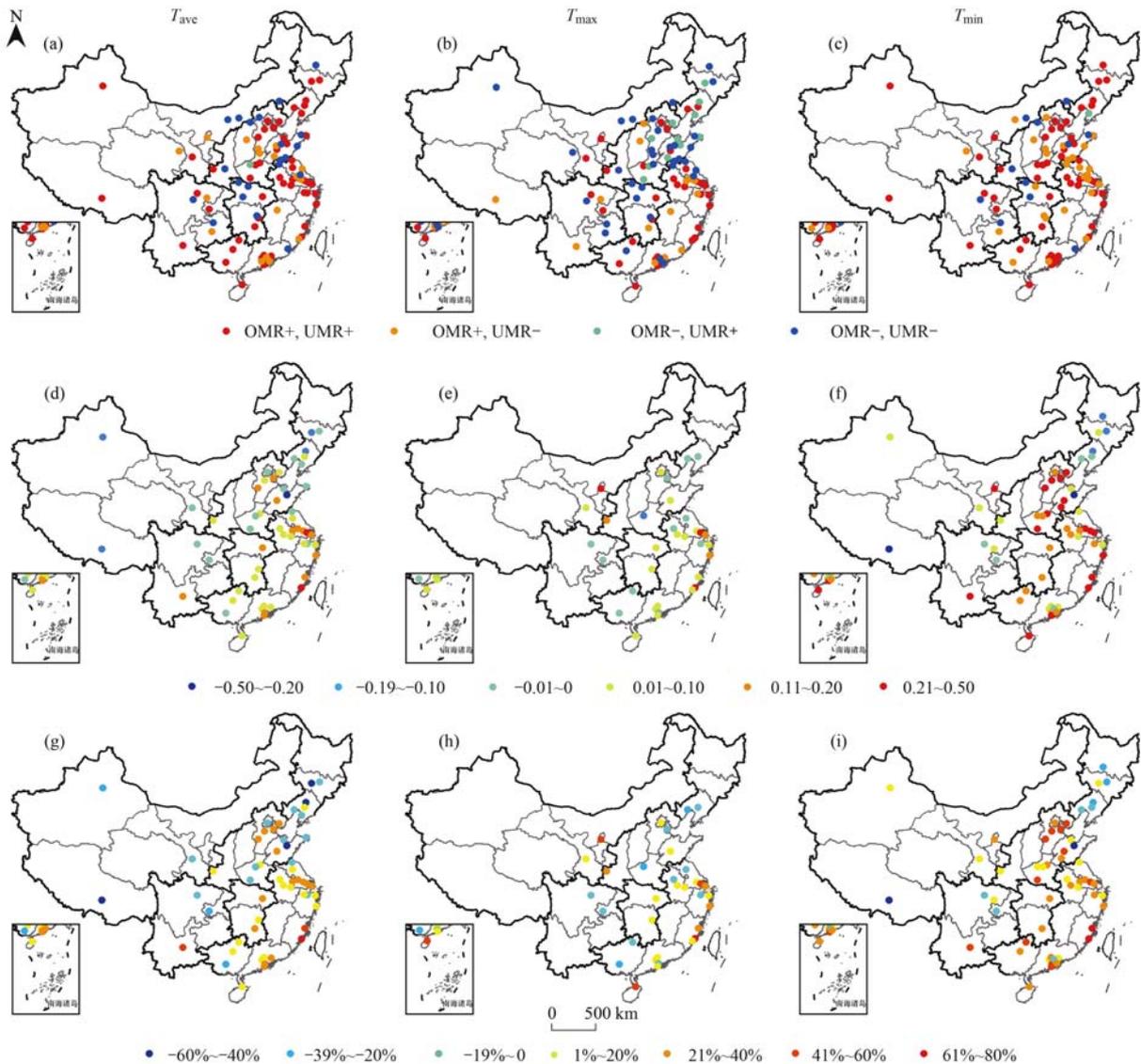
对比上述两个方法得出的结果, 发现 OMR 方法计算出的城市化对增温的影响明显大于 UMR 法, 特别是对最低气温增温的贡献. OMR 计算结果显示城市化对大多数城市的平均气温和最低气温升温起到了促进作用, 而 UMR 法的结果表明城市化对超 40% 城市的平均气温和最低气温造成了降温影响 [图 5(a) ~ 5(c)]. 值得注意的是, 对于平均和最低温度, 除洛阳市和营口市外, UMR 显示增温的城市, OMR 方法也表现出增温效应; 类似地, 几乎所有 OMR 显示降温的城市, UMR 方法也表现出降温效应. 这说明 UMR 与 OMR 方法对于城市化增温效应的估算结果在空间分布上具有较高的一致性, 二者的差异主要体现在部分 OMR 显示增温的城市, UMR 方法表现出降温作用. 对于两种方法估算结果方向一致的城市, OMR 和 UMR 所估算的对平均气温和最高气温增温幅度差异较小, 分别为 $0.04 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $0.05 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 贡献率差异小于

10%, 而对最低气温的影响幅度差异较大, 达 $0.12 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, OMR 法估算的贡献率比 UMR 平均高 21% [图 5(d) ~ 5(i)].

3 讨论

3.1 与过去研究结果的对比分析

本文结果强调了我国城市化对局地气温升高的贡献, 但由于参考站点选取和研究时段的不同, 本文基于 UMR 方法的计算结果与过去类似研究的结果存在一定偏差. 虽然本文所估算的 92 个主要城市的平均气温增温效应与张爱英等^[25]所估算的城市化对我国国家基本气象站 1961 ~ 2004 年的平均气温增温效应 [增温幅度和贡献率分别为 $0.076 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 27.3%] 和 Liao 等^[26]估算的城市化对我国东部地区 1971 ~ 2010 年的平均气温增长趋势 [增温趋势和贡献率分别为 $0.085 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 22.4%] 较一致. 然而, 本文所估算的城市化对北京、广州和深圳等特大城市的增温效应明显低于其他研究结果. 例如, 何佳骏等^[27]的研究发现 1958 ~ 2018 年北京城市化的增温幅度和贡献率分别达 $0.24 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 70.2%, 超过本文估算结果的两倍多 [$0.11 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 29.2%]; Chao 等^[15]



(a)、(b)和(c)为基于 OMR 和 UMR 法城市化影响的正负性,“+”表示城市化影响为增温,“-”表示城市化影响为降温;(d)、(e)和(f)为 OMR 与 UMR 相同正负性的差值,图例单位: $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$;(g)、(h)和(i)为城市化影响为增温时 OMR 与 UMR 贡献率的差值

图 5 中国主要城市 1981 ~ 2017 年 UMR 与 OMR 城市化影响差异对比

Fig. 5 Comparison of the estimated impacts of urbanization from UMR and OMR methods in major cities of China from 1981 to 2017

的研究估算深圳市 1979 ~ 2018 年城市化增温幅度为 $0.109\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,而本文估算结果显示深圳市的城市化表现为微弱的降温趋势 [$-0.02\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$]; Bian 等^[28]的研究则得出城市化导致 1965 ~ 2012 年间增温趋势为 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$. 整体上,UMR 方法可能严重低估城市化的增温效应^[29]. 首先,UMR 方法依赖于参考乡村站点的选取,由于缺少高密度的气候数据集,许多研究选择周围个别乡村站点作为参考站点,可能不能有效反映乡村参考温度的变化趋势;其次,随着城市的快速发展,乡村气象站点温度受城市热岛效应的影响日益加剧,将直接导致城市化增温效应的低估;另外,由于我国长期气候观测资料序列存在着一定的非均一性,也可能影响城市化增温效应的估算精度^[30].

本研究基于 OMR 法计算结果与前人的研究结果较一致^[31]. 例如,敖雪等^[29]的研究对辽宁省 1961 ~ 2018 年的估算结果显示,城市化对平均气温的影响为 $0.130\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,且对最低温度的影响明显高于最高温度,这与本文得出的结果 [$0.11\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$]和昼夜变化规律类似;官雨洁等^[32]的研究发现福州市 1961 ~ 2013 年城市化的增温幅度和贡献率达 $0.125\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 和 53.2%,与本文的估算结果较接近 [$0.21\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 和 52.2%]; Chao 等^[15]的研究基于 OMR 方法估算城市化对广州市和深圳市 1979 ~ 2018 年增温幅度 [$0.203\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 和 $0.077\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$]和贡献率 (49.5% 和 24.8%),均与本文结果比较接近 [$0.128\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 和 $0.063\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 40.0% 和 21.4%]. 整体上,城市化对

最低气温的增温效应明显高于最高气温,这可能主要是由于夜晚风速小,空气稳定度高,有利于城市热岛效应的形成,进而加剧最低温度的增温趋势^[33].而部分城市出现的城市化导致的降温也可能与城市干岛效应的增强有关,Du 等^[34]的研究也发现 1995 年之后城市化效应开始减弱.

3.2 城市化增温效应与城市不透水面、社会经济和气候背景的关系

城市不透水面增长被认为是城市化增温效应的重要原因之一.然而,本文结果显示,研究时段内城市站点和乡村站点下垫面的不透水面比率均有不同程度地增加,且约 60% 的城市乡村气象站点不透水面增长幅度高于城市气象站点(图 6),这可能是导

致 UMR 方法估算结果中近半数城市出现降温效应的主要原因之一.

通过进一步分析基于 OMR 方法城市化增温效应(不受城乡气象站不透水面比率差异的影响)与城市的不透水面变化、降水量、人口和 GDP 的关系发现,城市化增温效应与城市不透水面变化和多年平均降雨量显著相关,但与城市人口和 GDP 的关系均不显著(表 1).其中,多年平均降水量与城市化增温效应的正相关关系最为显著,这说明城市化的增温效应除受城市化发展强度影响外,还将受气候背景等因素的控制^[35].另外,其他未考虑的因子如云量和气溶胶浓度显著影响城市化的增温效应^[34].

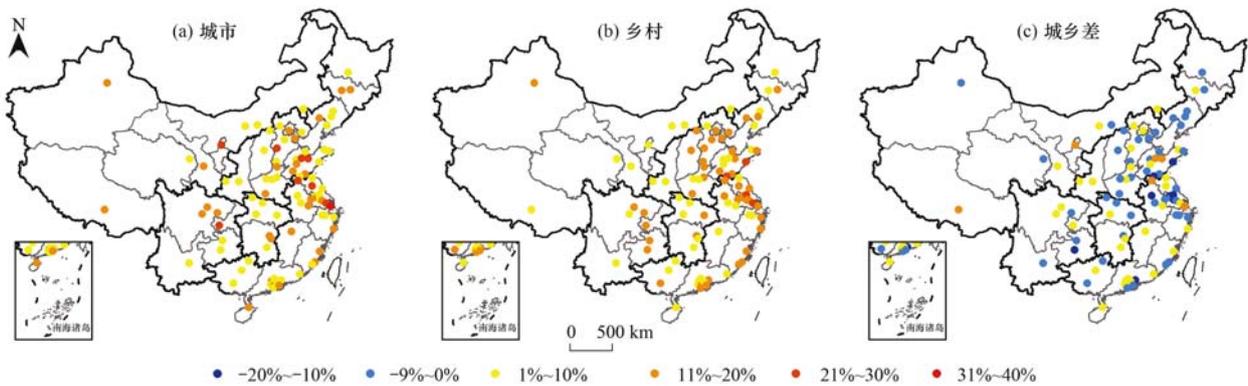


图 6 中国主要城市 1981~2017 年城乡不透水面比率绝对变化率分布

Fig. 6 Spatial distributions of the absolute changes in the urban and rural impervious surface area percentages in major cities of China from 1981 to 2017

表 1 中国主要城市城市化增温效应与各因子的皮尔逊相关系数¹⁾

Table 1 Pearson's correlation coefficients between the warming effects of urbanization and various factors in major cities in China

	不透水面 变化率	多年平均 降水量	多年平均 人口密度	人口密度 变化率	多年平均 GDP	GDP 变化率
T_{ave}	0.253 *	0.331 **	-0.061	0.122	0.036	-0.059
T_{max}	0.369 **	0.376 **	-0.090	0.071	0.154	0.078
T_{min}	0.209 *	0.050	0	-0.114	-0.059	-0.126

1) * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

3.3 与城市热岛效应的差异分析

值得注意的是,城市化对局地的增温效应与城市热岛相关但并不相同^[36-38].城市热岛强调的是城乡温度差异,而城市化对增温的贡献关注的是城市化对局地温度长期变化趋势的影响^[39].根据作者上一项研究结果^[24],我国平均热岛强度为 $(0.9 \pm 1.1)^\circ\text{C}$,夜间(最低气温)热岛效应强,白天(最高气温)热岛效应弱,与城市化对增温影响的规律一致,城市热岛效应可能促进了气温日较差的降低;同时,西北和华北地区最高温度较多表现出冷岛效应,与本文所观测的城市化降温效应基本吻合;空间分布上,城市热岛整体表现为北强南弱,华北地区城市热岛强度最大,城市化对增温的贡献则表现出东强

西弱的格局.从长期变化趋势来看,城市热岛(1990~2017 年)增强的程度虽与城市化升温趋势有差异,但增强的地区相同;城市热岛强度的增强趋势为 $0.04^\circ\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$,城市化对平均气温的升温趋势却达到了 $0.14^\circ\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$,城市化贡献率为 31.1%.

3.4 不确定性分析

本研究尚存在较大的不确定性.首先,本文研究的时间尺度为 37 a,选择城市站点时只考虑了 2015 年的不透水面情况,不同城市的乡村站差异较大,所估算的城乡温度差异可能受到气象站点位置和局部气候的影响;其次,城市化对增温的贡献可能受空间尺度的影响较大.例如 Chao 等^[15]在粤港澳地区

的研究发现,空间尺度越大城市化导致的变暖往往更小. 本文主要关注城市化对局地尺度增温的贡献,进一步研究需要加强不同时空尺度的对比研究. 第三,虽然 OMR 法相较于 UMR 法能更加准确反映城市化对增温的贡献,但再分析气候数据的质量会受到观测系统的影响,早期的再分析资料可能存在虚假的变化^[40]. 最后,多个研究证明我国近年的城市绿化建设对城市增温起到了不可忽视的减缓作用,因此早期和近期的城市化对增温影响可能存在着差异,本研究仅分析了城市化影响与城市不透水面的关系,且相关性并不显著,而与气象背景的相关性更强,其它因子对城市热岛的影响有待进一步探究.

4 结论

(1) 1981 ~ 2017 年,除赤峰市的最低气温表现出微弱地降温趋势外,中国 92 个主要城市的气温均呈显著增加态势,且最低温度增速整体上明显高于最高温度.

(2) OMR 和 UMR 两种方法差异明显,受参考站点以及乡村城市化加快的影响,UMR 方法严重低估了我国城市化对气温升高造成的影响.

(3) OMR 方法结果表明我国城市化对大多数城市的气温升高起到促进作用,尤其是对最低气温升高的影响最大,达到 $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 平均贡献率达 46.7%,其次是对平均气温 [$0.14\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$] 和最高气温 [$0.10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$] 的影响; 不同区域城市化增温效应差异大,东南地区增温贡献最大,西北地区最低.

参考文献:

- [1] Wu X J, Wang L C, Yao R, *et al.* Quantitatively evaluating the effect of urbanization on heat waves in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **731**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138857.
- [2] Liao W L, Li D, Liu X P. Examination and projection of urbanization effect on summertime hot extremes in China[A]. In: EGU General Assembly Conference Abstracts[C]. 2020.
- [3] Sun Y, Zhang X B, Ren G Y, *et al.* Contribution of urbanization to warming in China[J]. *Nature Climate Change*, 2016, **6**(7): 706-709.
- [4] 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.
- [5] Goddard I L M, Tett S F B. How much has urbanisation affected United Kingdom temperatures? [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2019, **20**(5), doi: 10.1002/asl.896.
- [6] Lin L J, Gao T, Luo M, *et al.* Contribution of urbanization to the changes in extreme climate events in urban agglomerations across China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **744**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140264.
- [7] 严中伟, 丁一汇, 翟盘茂, 等. 近百年中国气候变暖趋势之再评估[J]. *气象学报*, 2020, **78**(3): 370-378.
Yan Z W, Ding Y H, Zhai P M, *et al.* Re-assessing climatic warming in China since the last century[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, **78**(3): 370-378.
- [8] Shi Z T, Jia G S, Hu Y H, *et al.* The contribution of intensified urbanization effects on surface warming trends in China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, **138**(1-2): 1125-1137.
- [9] Ren G Y, Ding Y H, Tang G L. An overview of mainland China temperature change research [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2017, **31**(1): 3-16.
- [10] Guan X L, Wei H K, Lu S S, *et al.* Assessment on the urbanization strategy in China: achievements, challenges and reflections[J]. *Habitat International*, 2018, **71**: 97-109.
- [11] 焦毅蒙, 赵娜, 岳天祥, 等. 城市化对北京市极端气候的影响研究[J]. *地理研究*, 2020, **39**(2): 461-472.
Jiao Y M, Zhao N, Yue T X, *et al.* The effect of urbanization on extreme climate events in Beijing[J]. *Geographical Research*, 2020, **39**(2): 461-472.
- [12] Yu Z W, Yao Y W, Yang G Y, *et al.* Strong contribution of rapid urbanization and urban agglomeration development to regional thermal environment dynamics and evolution[J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, **446**: 214-225.
- [13] 俞文政, 刘海涛. 近 35 年深圳市气候变化与城市化发展的关联性[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2018, **50**(1): 85-91.
Yu W Z, Liu H T. Correlation between urbanization and climate change of Shenzhen in nearly 35 years [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, **50**(1): 85-91.
- [14] Shen X J, Liu Y, Liu B H. Urbanization effect on the observed changes of surface air temperature in Northeast China [J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2020, **31**(3): 325-335.
- [15] Chao L Y, Huang B Y, Yang Y J, *et al.* A new evaluation of the role of urbanization to warming at various spatial scales: evidence from the Guangdong - Hong Kong - Macau region, China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(20), doi: 10.1029/2020GL089152.
- [16] 任国玉, 张雷, 卞韬, 等. 城市化对石家庄站日气温变化的影响[J]. *地球物理学报*, 2015, **58**(2): 398-410.
Ren G Y, Zhang L, Bian T, *et al.* Urbanization effect on change of daily temperature at Shijiazhuang weather station[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, **58**(2): 398-410.
- [17] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate[J]. *Nature*, 2003, **423**(6939): 528-531.
- [18] Jia W Q, Ren G Y, Suonan K Z, *et al.* Urban heat island effect and its contribution to observed temperature increase at Wuhan station, Central China [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2019, **25**(1): 1-12.
- [19] Li Q X, Dong W J, Jones P. Continental scale surface air temperature variations: experience derived from the Chinese region[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, **200**, doi: 10.1016/j.earscirev.2019.102998.
- [20] Ren G Y, Li J, Ren Y Y, *et al.* An integrated procedure to determine a reference station network for evaluating and adjusting urban bias in surface air temperature data[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2015, **54**(6): 1248-1266.
- [21] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, *et al.* The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological*

- Society, 2020, **146**(730): 1999-2049.
- [22] Gong P, Li X C, Zhang W. 40-Year (1978-2017) human settlement changes in China reflected by impervious surfaces from satellite remote sensing[J]. Science Bulletin, 2019, **64**(11): 756-763.
- [23] Kummu M, Taka M, Guillaume J H A. Gridded global datasets for gross domestic product and human development index over 1990-2015[J]. Scientific Data, 2018, **5**, doi: 10.1038/sdata.2018.4.
- [24] 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.
- [25] 张爱英, 任国玉, 周江兴, 等. 中国地面气温变化趋势中的城市化影响偏差[J]. 气象学报, 2010, **68**(6): 957-966.
Zhang A Y, Ren G Y, Zhou J X, et al. On the urbanization effect on surface air temperature trends over China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2010, **68**(6): 957-966.
- [26] Liao W L, Wang D G, Liu X P, et al. Estimated influence of urbanization on surface warming in Eastern China using time-varying land use data[J]. International Journal of Climatology, 2017, **37**(7): 3197-3208.
- [27] 何佳骏, 任国玉, 张盼峰. 资料均一化对气温变化趋势及其城市化偏差估计的影响: 以北京地区为例[J]. 气候变化研究进展, 2021, **17**(5): 503-513.
- [28] Bian T, Ren G Y, Yue Y X. Effect of urbanization on land-surface temperature at an urban climate station in North China[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2017, **165**(3): 553-567.
- [29] 敖雪, 翟晴飞, 崔妍, 等. 基于 OMR 方法的城市化进程对辽宁省气温变化的影响分析[J]. 气象与环境学报, 2020, **36**(4): 28-35.
Ao X, Zhai Q F, Cui Y, et al. Analysis of the influence of urbanization process on the temperature change in Liaoning province based on the OMR method[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2020, **36**(4): 28-35.
- [30] 司鹏, 李庆祥, 李伟, 等. 城市化对深圳气温变化的贡献[J]. 大气科学学报, 2010, **33**(1): 110-116.
Si P, Li Q X, Li W, et al. Urbanization-induced surface air temperature change in Shenzhen [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2010, **33**(1): 110-116.
- [31] Tysa S K, Ren G Y, Qin Y, et al. Urbanization effect in regional temperature series based on a remote sensing classification scheme of stations [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, **124**(20): 10646-10661.
- [32] 官雨洁, 刘寿东, 曹畅. 不同城市化程度的城市气温变化研究——以福州和漳州为例[J]. 热带气象学报, 2018, **34**(4): 554-560.
Guan Y J, Liu S D, Cao C. Different urbanization degree of urban temperature change—a case study of Fuzhou and Zhangzhou[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2018, **34**(4): 554-560.
- [33] Jiang S J, Wang K C, Mao Y N. Rapid local urbanization around most meteorological stations explains the observed daily asymmetric warming rates across China from 1985 to 2017 [J]. Journal of Climate, 2020, **33**(20): 9045-9061.
- [34] Du J Z, Wang K C, Jiang S J, et al. Urban dry island effect mitigated urbanization effect on observed warming in China[J]. Journal of Climate, 2019, **32**(18): 5705-5723.
- [35] 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展[J]. 气候与环境研究, 2005, **10**(4): 701-716.
Ren G Y, Chu Z Y, Zhou Y Q, et al. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China [J]. Climatic and Environmental Research, 2005, **10**(4): 701-716.
- [36] 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.
- [37] Wang W, Shu J. Urban renewal can mitigate urban heat islands [J]. Geophysical Research Letters, 2020, **47**(6), doi: 10.1029/2019GL085948.
- [38] Lin Y, Jim C Y, Deng J S, et al. Urbanization effect on spatiotemporal thermal patterns and changes in Hangzhou (China) [J]. Building and Environment, 2018, **145**: 166-176.
- [39] Chapman S, Watson J E M, Salazar A, et al. The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review [J]. Landscape Ecology, 2017, **32**(10): 1921-1935.
- [40] 赵天保, 符淙斌, 柯宗建, 等. 全球大气再分析资料的研究现状与进展[J]. 地球科学进展, 2010, **25**(3): 242-254.
Zhao T B, Fu C B, Ke Z J, et al. Global atmosphere reanalysis datasets: current status and recent advances [J]. Advances in Earth Science, 2010, **25**(3): 242-254.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Urban Area of Beijing	AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251)
Modeling of PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model	FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262)
Spatio-temporal Evolution Patterns of PM _{2.5} and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018	ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274)
Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence	TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284)
Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem	ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294)
Source Apportionment and Seasonal Changes in PM _{2.5} Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City	SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304)
Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM _{2.5} Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan	REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM _{2.5} in the Winter of Zhengzhou	YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Zibo City	BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336)
Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343)
Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China	FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355)
Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain	ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)
Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology	HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)
Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity	CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)
Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China	YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395)
Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030	CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403)
Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation	CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415)
Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis	SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427)
Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert	ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)
Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin	ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448)
Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin	LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)
Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River	WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467)
APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen	SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476)
Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments	XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)
Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City	HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500)
Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake	HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)
Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication	ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518)
Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology	MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527)
Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm	ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537)
Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin	LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)
Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake	LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)
Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake	YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)
Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment	CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575)
Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River	LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586)
Non-point Source Pollution (NPS) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River	XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595)
Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments	LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606)
Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period	ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614)
Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir	GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake	JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633)
Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO ₂ -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes	FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640)
Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H ₂ O ₂ Catalyzed by Magnetic Mn _{0.6} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ @SiO ₂	XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)
Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite	JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)
Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material	ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673)
Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates	LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685)
Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors	LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)
Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions	ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)
Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area	CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)
Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732)
Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils	MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)
Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem	WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)
Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field	XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758)
Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers	XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770)
Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil	SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779)
Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain	GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788)
Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain	HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812)
Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)