

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8

第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM _{2.5} 污染特征与浓度控制效果	张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析	徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)
合肥市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析	刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析	康宝荣, 刘立忠, 刘煥武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)
长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源	吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)
中国城市扩张及空间特征变化对PM _{2.5} 污染的影响	王桂林, 张炜 (3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM _{2.5} 排放的影响	邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数	徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征	马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征	官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价	宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)
截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征	胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析	邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响	余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应	王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响	李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)
新疆喀什三角洲地下水SO ₄ ²⁻ 化学特征及来源	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析	李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析	王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系	刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测	万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)
汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系	汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析	胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果	彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响	章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制	范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性	焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)
不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响	常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)
3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程	刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制	韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)
缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮	杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响	薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)
FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制	马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)
ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件	董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析	张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比	刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)
异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析	杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)
Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现	高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N ₂ O产生特征	代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响	王一字, 王圣森, 戴九兰 (3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响	周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征	孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析	张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析	张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)
铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果	林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用	周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)
生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响	刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响	汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响	罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响	高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)
不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律	何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)
基于成组生物毒性测试的PM _{2.5} 毒性	江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)
《环境科学》征订启事 (3587)	
《环境科学》征稿简则 (3595)	
信息 (3611, 3705, 3745)	

中国城市扩张及空间特征变化对 $PM_{2.5}$ 污染的影响

王桂林, 张炜*

(上海城建职业学院城市发展研究中心, 上海 200438)

摘要: 为推动绿色生态城区构建, 基于 2000 ~ 2015 年城市分类数据, 研究中国城市扩张以及城市空间特征变化对大气环境的影响。得出中国城市扩张(人口、经济和地域面积扩张)以及城市空间特征[人口密度、城市空间紧凑度(compact index, CI)、不透水覆盖率(imperious surface coverage, ISC)、植被覆盖率(NDVI)和夜间灯光指数]变化与 $PM_{2.5}$ 污染显著相关, 相关强度顺序为夜间灯光指数 > CI > 人口密度 > ISC > 城市地域扩张 $\geq$ 城市人口扩张 > NDVI; 夜间灯光指数与 $PM_{2.5}$ 变化关系最明显, 相关系数 R 为 0.77, 具有强相关性, 表征经济发展对 $PM_{2.5}$ 的影响最大; 城市 CI 和人口密度与 $PM_{2.5}$ 变化的相关系数分别为 0.66 和 0.55, 中强相关。2010 ~ 2015 年期间, 城市扩张、城市空间特征变化、城市空间特征异质性变化对 $PM_{2.5}$ 浓度变化总贡献率为 80.30%。城市空间特征变化的贡献率最高为 55.00%, 城市空间异质性的贡献率为 25.60%, 均大于 2010 年基础城市特征的贡献率 5.70%。2000 ~ 2010 年期间, 城市空间特征变化对 $PM_{2.5}$ 浓度变化贡献率为 39.30%, 城市空间特征异质性的贡献率分别为 14.90%, 均大于 2000 年基础城市特征的贡献率 3.70%。结论表明未来城市转型发展中, 构建绿色生态城区应充分考虑城市空间布局、城市空间特征变化, 把城市建设对生态环境的破坏降到最小, 实现低碳循环绿色发展。

关键词: 城市扩张; 城市空间特征; 城市特征空间异质性; $PM_{2.5}$ 污染; 城市化

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3447-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201812157

Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on $PM_{2.5}$ Pollution in China

WANG Gui-lin, ZHANG Wei*

(City Development Research Center, Shanghai Urban Construction Vocational College, Shanghai 200438, China)

Abstract: Study of the influence of China's rapid urbanization and changing urban characteristics on urban ecology is of profound significance for the sustainable development of cities. The results of this study found that such changes have had a profound effect on $PM_{2.5}$ concentrations. To explore the effects of urbanization on air quality (especially on $PM_{2.5}$) we used indicators of population expansion, economic expansion, and urban geographical to represent levels of urban expansion, and used population density, urban CI, ISC, NDVI, and a night light index to indicate urban space characteristics. The strength of correlations between urban space characteristics and $PM_{2.5}$ pollution were as follows: night light index > CI > population density > ISC > urban geographical expansion $\geq$ population expansion > NDVI. The highest correlation coefficient was between $PM_{2.5}$ and the night light index, which was 0.77. During 2010-2015, the total contribution of urban expansion, urban characteristics, and spatial heterogeneity was 80.30%. The contribution of changes in urban characteristics was 55.00% and the contribution of spatial heterogeneity was 25.60%, both of which were above the contribution of basic urban characteristics in 2010, which was 5.70%. From 2000 to 2010, the contribution of changes in urban spatial characteristics to changes in $PM_{2.5}$ concentrations was 39.30% and the contribution of the heterogeneity of urban spatial characteristics was 14.90%, both of which were higher than the contribution of basic urban characteristics in 2000, which was 3.70%. The results indicated that as urban transformation and development continue, green ecological cities should fully consider urban spatial layouts and the associated changes in urban spatial characteristics, minimize damage to the ecological environment from urban construction, and they should realize low-carbon and green development.

Key words: urban expansion; urban characteristics change; spatial heterogeneity; $PM_{2.5}$ pollution; urbanization

改革开放 40 年, 中国城镇化水平显著提高, 从 1978 年的 18.00% 上升到 2017 年的 57.40%, 预计到 2035 年城镇化水平将达 71.00% ~ 73.00% 之间^[1]。快速粗放型的城镇化导致城市生态环境污染凸显, 尤其是 $PM_{2.5}$ (即动力学直接小于 2.5 μm 的细颗粒物) 污染, 会增加人类心血管系统和呼吸系统的发病率和死亡率, 提高人类死亡风险^[2, 3]。面对日益严峻的生态环境问题, 党的十九大报告明确指出大力推进生态文明建设, 全面贯彻城市绿色发展理念^[4~6]。城市化进程包括人口城市

化、经济城市化和土地城市化三大最显著的特征^[7, 8]。中国城市人口数量已从 1979 年的 1.73 亿增长到 2017 年的 8.13 亿^[9, 10], 增长率为 369.94%。为满足不断涌入城市的人口生活需求,

收稿日期: 2018-12-19; 修订日期: 2019-03-18

基金项目: 教育部博士点专项(20115303110002); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA121402); 上海城建职业学院重点项目(cjkyz201705); 上海城建职业学院青年项目(cjqn201901)

作者简介: 王桂林(1986~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为大气环境污染、地理信息系统, E-mail: kawgl@126.com

* 通信作者, E-mail: zhangwei23e@163.com

中国城市地域扩张比城市人口的增速还快,农用地、湿地等生态用地逐步被吞没,人类活动产生的生态足迹远比城市本身对生态环境的危害要大很多(大约 200 倍),城市化已经成为气候变化的一个主要因素^[11]. Palmer 等^[12]认为在未来的生态环境研究中,人类开发活动应作为地球生态系统的一个重要组成部分来研究人类对生态环境的影响,尤其是城市生态环境.最能表征人类活动强度的是城市扩张以及城市扩张导致的城市空间特征变化,例如城市地域扩张的人工地表-不透水面蔓延对生态系统影响巨大,直接改变城市下垫面结构,破坏生态系统结构,导致生态功能退化^[13, 14].目前,从城市化角度分析城市空气污染主要从社会经济方面来研究^[15~19],从城市扩张以及城市空间特征变化的视角来解析城市化进程中人类活动对城市 PM_{2.5} 污染的影响的研究还没有.如何有效控制和治理空气污染,目前还没有可行方案. PM_{2.5} 重度污染持续在中国暴发,如何有效解决城市化发展带来的生态环境问题迫在眉睫.掌握和理解城市扩张,城市空间特征变化以及城市特征空间异质性对 PM_{2.5} 污染的影响,对改变城市发展方式,提高城市发展质量,实现城市精细化管理对有效控制和治理 PM_{2.5} 污染提供理论基础,以期对未来建设环境友好的新型城市提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 数据来源

采用 PM_{2.5} 质量浓度表征空气质量数据,自 2012 年 12 月中国 PM_{2.5} 污染引起公众关注以来,全国范围开始建立 PM_{2.5} 实时自动监测网,来分析和

监测污染状况.地面监测数据实时、准确,然而地面监测点稀少,且主要部署于城市中心,数据有限,且时间跨度较短,难以长时间序列地分析城市空气质量变化趋势.采用卫星遥感影像与地面监测数据相结合提取的 PM_{2.5} 数据来分析中国 PM_{2.5} 污染变化趋势可以弥补地面监测数据的缺陷.该数据来源于加拿大达尔豪西大学,是由 Van 等^[20]在 2016 年采用时空地理加权模型 (geographically temporal weighted regression, GTWR) 结合遥感卫星数据, GEOS 模拟数据和地面监测数据来估算 PM_{2.5} 浓度值.由于既考虑气溶胶的化学组分和土地利用信息,也充分利用地面稀释的监测站点数据,该模型 PM_{2.5} 的估算精度在空间分辨率上提高了 10 倍.基于交叉验证方法和地面监测值,得出该模型的 PM_{2.5} 估算值精度为 81.00%^[21~26].

中国城市扩张数据、城市特征数据如表 1 所示.城市扩张包括 2000~2015 年的城市人口扩张,城市地域扩张,城市特征包括 CI、ISC、NDVI 和夜间灯光指数.采用 NDVI 来表征城市区域植被覆盖状况,把夜间灯光指数作为一个可量测的空间指标来表征城市经济发展水平^[27].此外,采用城市特征空间异质性来表达城市内部形态对城市空气质量的影响,如人口密度在城郊区与主城区不同即为城市特征空间异质性.

为了更好地分析城市化过程城市扩张以及城市空间特征变化带来的空气污染,把气象条件,地形和秸秆燃烧等因素考虑其中,剔除这些因素的影响,最后得出人类活动对空气污染的贡献率.气象条件包括年均降雨、气温;地形包括高程、坡度、坡向;秸秆燃烧为年均明火数量(表 1).

表 1 2000、2010 和 2015 年的空间变量数据信息

Table 1 Information for the spatial variables in 2000, 2010, and 2015

变量名称	分辨率	来源
PM _{2.5} 质量浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0.01	Atmospheric Composition Analysis Group
城市分类[分类编号(1, 0)]	250 m	World Bank
人口密度/ $\text{人}\cdot\text{km}^{-2}$	1 000 m	NASA SEDAC
NDVI(-1~1)	250 m	NASA LP DAAC
ISC/%	1 km	NOAA NGDC
夜间灯光指数/%	1 km	NOAA NGDC
降雨/mm	0.25	NASA EOC
气温/ $^{\circ}\text{C}$	0.1	NASA EOC
秸秆燃烧数量/火点数量 $\cdot(1\ 000\ \text{km}^2)^{-1}$	0.1	NASA EOC
DEM/m	90 m	USGS

CI 是城市发展形态与模式,在一定程度反映城市空间形态,其直接影响城市交通通勤距离,间接影响工业生产,建筑建设等,加剧城市大气污染.把 CI 作为一个城市空间特征指标,分析 CI 对空气

质量的影响意义重大.基于 2000、2010 和 2015 年的城市足迹计算 2000、2010 和 2015 年各城市的 CI. CI 的计算见式(1):

$$\text{CI} = 2 \sqrt{\pi A} \times P^{-1} \quad (1)$$

式中, CI 为城市空间紧凑度 (compact index), A 为城市区块面积 (m^2), P 为城市块周长 (m).

1.2 研究区域与研究对象

与大多采用行政区划^[28]研究城市化对大气环境污染的影响不同,采用世界银行 2015、2010 和 2000 年的东亚城市分类数据^[29]来划分城区与非城区(图 1),具体借鉴 Larkin 等^[19]的城市区域界定方法见式(2).

$$\text{城市区域} = \begin{cases} 1 & \text{世界银行城市分类数据} \\ 1 & \text{城市区域面积在缓冲区 1 km} \\ & \text{内} \geq 20\% \text{ 的区域} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中,编码 1 为城市区,0 为非城市区.选取 2015 年人口总数大于 10 万人的城市区域作为研究对象,共有 364 个城区.其中城市人口总数为城市区域面

积与城市人口网格密度均值乘积^[30].把城市人口总数大于 10 万人的城市区域作为典型代表区域来分析中国城市扩张以及城市空间特征变化带来的城市环境效应.

1.3 PM_{2.5}质量浓度与城市特征变化

1.3.1 城市扩张以及空间特征变化

城市扩张以及城市空间特征变化趋势是采用 2015 年城市区域的均值减去 2000 年的城市区域的均值.

$$\Delta \overline{D}_{ij} = \overline{D}_{ij2015} - \overline{D}_{ij2000} \quad (3)$$

式中, $\Delta \overline{D}_{ij}$ 表达变量 i 在城市区域 j 从 2000 ~ 2015 年的变化值. $\overline{D}_{ij2000}$ 表达变量 i 在 2000 年在城市区域 j 的均值. $\overline{D}_{ij2015}$ 是变量 i 在 2015 年在城市区域 j 的均值.同理,2010 ~ 2015 年和 2000 ~ 2010 年的变化也采用同样的方法.

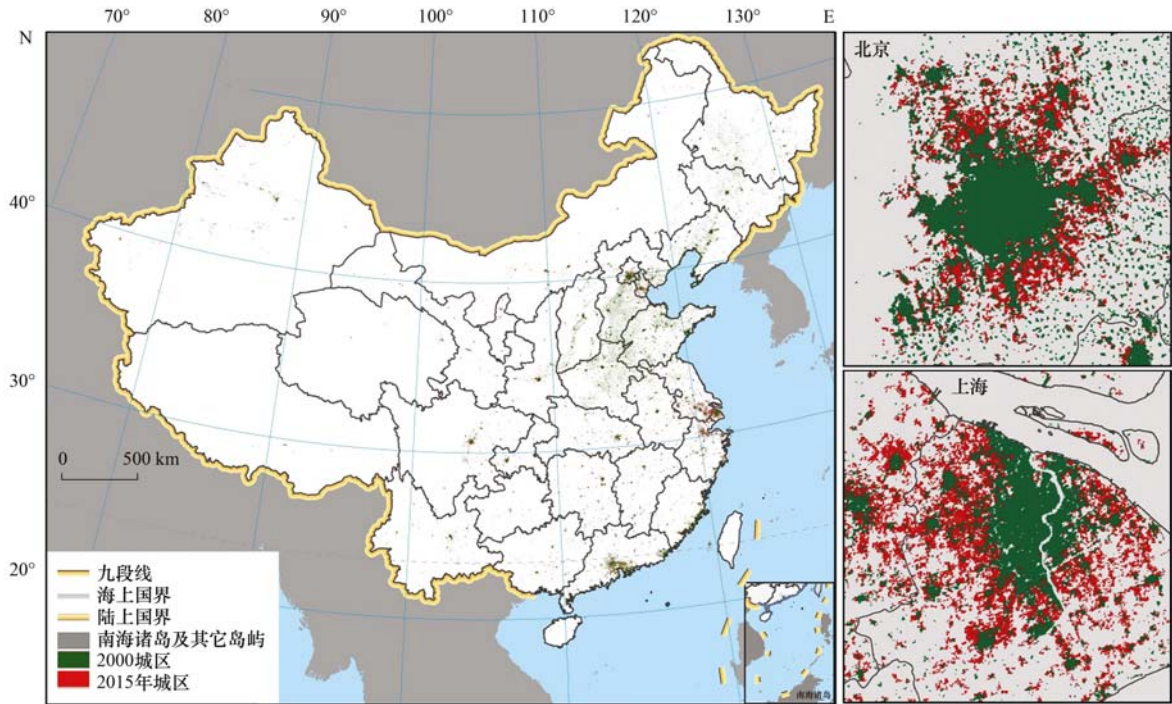


图 1 研究区域示意

Fig. 1 Map of the study area

1.3.2 城市特征空间异质性变化

采用城市特征变量在城市区域内的标准差来表达城市形态空间异质性.那么 2000 ~ 2015 年间城市区域的城市形态空间异质性变化趋势:

$$\Delta \overline{SD}_{ij} = \overline{SD}_{ij2015} - \overline{SD}_{ij2000} \quad (4)$$

式中, $\Delta \overline{SD}_{ij}$ 表示变量 i 在城市区域 j 上的标准差的变化. $\overline{SD}_{ij2000}$ 表示 2000 年变量 i 在城市区域 j 内的标准差.其中由于 PM_{2.5} 数据空间分辨率为 1 km × 1 km,因此当城市区域面积小于 1 km² 时,其城市空间形态变化设为 0.

由于城市扩张,2000、2010 与 2015 年城市区

域在空间上没有完全重叠,是不连续的.研究区 2015 年是 364 个城市区块,在 2010 年是 405 个城市区块,而在 2000 年包括 1 434 个城市区块,由于城市扩张导致其存在一对多的关系,即在 2015 年的城市区域 j 领域内,其在 2010 和 2000 年的时候包括多个相对较小的城市区域.采用面积加权的方法计算 2000 年各城市区域的变量均值及标准差,公式如下:

$$\Delta \overline{D}_{ij} = \overline{D}_{ij2015} - \frac{\sum_{l=1}^t \overline{D}_{il2000} \times \text{AREA}_{l2000}}{\sum_{l=1}^t \text{AREA}_{l2000} \times t} \quad (5)$$

式中, $\Delta \bar{D}_{ij}$ 为变量 i 在城区 j 从 2000 ~ 2015 年的面积权重均值变化值. $\bar{D}_{ij2000}$ 为变量 i 在 2000 年的城区 l 上的均值, $AREA_{l2000}$ 为 2000 年的城区 l 内的城市总面积. t 为 2015 年的城区 j 在 2000 年所包含的城市区域总数量.

1.4 统计分析

首先, 采用多元配对 T -检验方法对各自变量在 2000 ~ 2010 年和 2010 ~ 2015 年的变量值进行差异检验. 第二, 对因变量($PM_{2.5}$)和各自变量进行单变量线性回归分析, 分析各单变量与 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化的相关关系. 第三, 采用多元回归分析方法构建多自变量与因变量的回归分析, 其中模型结构包括: 包含所有自变量和相互独立的精选自变量的多元回归模型, 气象条件, 地形和秸秆燃烧作为调整变量以排除这些重要因素对 $PM_{2.5}$ 的影响, 最终得出城市扩张, 城市特征变化以及城市特征空间异质性变化对城市空气污染的影响程度.

2 结果与讨论

2.1 中国城市扩张与空气污染变化趋势

2.1.1 近 20 年来中国 $PM_{2.5}$ 质量浓度时空分布特征

中国近几年来, 雾-霾频发, $PM_{2.5}$ 污染严重. 中国 $PM_{2.5}$ 年均值变化趋势为(图 2): 1999 ~ 2003 年间处于第一个跃升期, 从 $29.89 \mu g \cdot m^{-3}$ 飙升到 39.49

$\mu g \cdot m^{-3}$, 4 a 间增长 $9.60 \mu g \cdot m^{-3}$, 增长率为 32.12%, 年均增长率为 8.03%; 第二个污染加剧期为 2004 ~ 2006 年间, 从 $34.76 \mu g \cdot m^{-3}$ 增长到 $38.82 \mu g \cdot m^{-3}$, 增长了 $4.06 \mu g \cdot m^{-3}$, 年均增长率 5.84%; 2006 ~ 2012 年间进入减缓期, 从 $38.82 \mu g \cdot m^{-3}$ 减缓到 $33.02 \mu g \cdot m^{-3}$, 6a 间减缓了 $5.8 \mu g \cdot m^{-3}$, 减缓率为 14.94%. 2012 ~ 2015 年间再一次迈入污染加剧期, 从 $33.02 \mu g \cdot m^{-3}$ 增长到 $38.49 \mu g \cdot m^{-3}$, 3 a 增长了 $5.47 \mu g \cdot m^{-3}$, 年均增长率 16.57%. 面对持续高污染事件发展, 国家自 2013 年起出台了相关空气污染防治、减排政策, $PM_{2.5}$ 质量浓度又进入减缓阶段, 从 2013 年 $38.49 \mu g \cdot m^{-3}$ 减缓到 2014 年 $35.99 \mu g \cdot m^{-3}$. 虽然到 2015 年又开始增长, 但增长速度(4.03%)是 1999 ~ 2003 年间增长速度(8.30%)的一半. 表明相关空气污染控制政策虽然没能控制住 $PM_{2.5}$ 污染暴发, 但对 $PM_{2.5}$ 的增长速度具有一定的抑制作用, 对于治理空气污染还是有效的.

图 3 展示中国 2000 ~ 2015 年间 $PM_{2.5}$ 质量浓度时空变化趋势, 呈显著加剧态势. 2000、2010 和 2015 年的 $PM_{2.5}$ 污染成倒“T”型的空间分布格局, 形成“东北三省-华北平原-中东部-川渝-湖南-广西”纵向污染带(东南区域)和“华北平原-山西-甘肃-宁夏-西宁-新疆塔克拉玛干沙漠”横向污染带(西北区

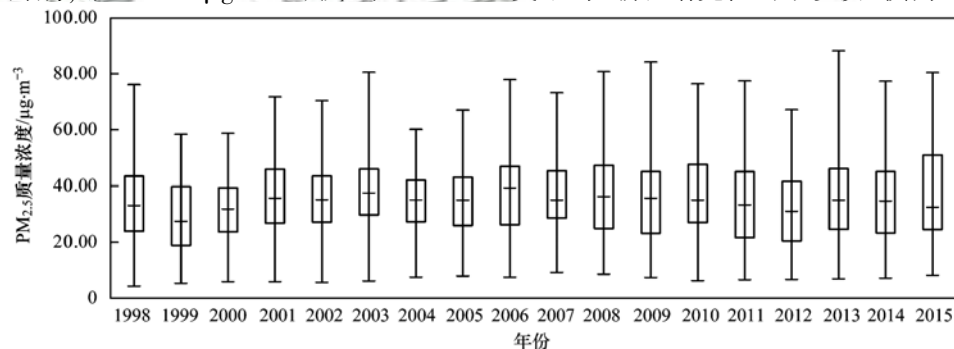


图 2 中国 $PM_{2.5}$ 质量浓度中位数以及上下四分位变化趋势

Fig. 2 Mean and upper and lower quartiles of $PM_{2.5}$ changes between 1998-2015 in China

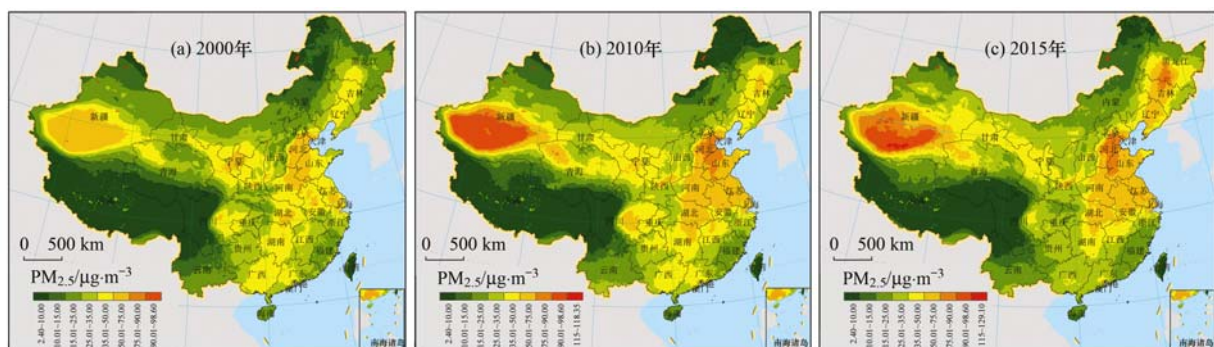


图 3 2000 ~ 2015 年中国 $PM_{2.5}$ 质量浓度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of $PM_{2.5}$ concentrations in China in 2000 and 2015

域)。 $\text{PM}_{2.5}$ 污染主要沿倒“T”格局向外扩散和加剧, 人类活动最聚集的华北平原处于纵横污染带的交汇处, 污染最为严重。东南区域 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的加剧主要是因为远超环境承载力的污染物高强度排放引起。西北区域污染带, 尤其是新疆塔克拉玛干沙漠污染主要是由沙尘暴等气象因素引起的。东部城市中福建省空气质量相对较好, 符合国家二级年均标准 ($25.00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[31]。由于地形地貌不利于空气污染扩散, 导致处于西南的川渝盆地的污染严重。总而言之, 中国 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度最高值, 从 2000 年 $98.60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增长到 2010 年 $118.70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 增长 $20.10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 到 2015 年, 增长到 $129.10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 同比 2010 年增长了 $10.40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其主要是由城市化过程所导致。

2.1.2 2000~2015 年中国城市扩张和特征时空变化

中国城市扩张(人口、地域和经济扩张)均呈现“胡焕庸线”分布格局, 也就是以黑龙江黑河市到云南省腾冲市为界限, 以东区域城市扩张速度显著高于以西的区域, 京津冀、长江三角洲、珠江三角洲、川渝等城市群是城市扩张的主要区域(图 1), 长江三角洲位居第一。以建成区面积增长为例, 东部地区增长值占 90% 以上, 呈东高西低的分布格局。2000 年, 364 个典型城市区域的建成区面积为 $59\,210.24 \text{ km}^2$, 占全国总面积 59.92%, 到 2010 年, 占比增长到 67.09%, 同比 2000 年增长面积为 $25\,763.20 \text{ km}^2$, 占全国建成区增长面积 92.54%, 增长率为 43.51%, 是全国平均水平 1.54 倍, 到 2015 年, 建成区面积为 $100\,346.34 \text{ km}^2$ (占 2015 年全国总面积的 80.92%), 同比 2010 年增长面积为 $15\,362.90 \text{ km}^2$ 。2000~2010 年, 研究区域人口总量从 0.75 亿人增长到 3.37 亿人, 以 347.98% 的增长率增长了 2.62 亿人。到 2015 年增长到 6.12 亿人, 同比 2010 年增长率为 81.60%。15 a 间, 从 364 个典型城市和全国维度来看, 人口增长和空间格局都发生巨大变化, 城市人口从乡村或小城市流入到 364 个典型大城市区域中。中国人口城市化、地域面积扩张、经济快速发展的过程中, 伴随着城市空间特征剧烈变化, 包括夜间灯光指数、人口密度、CI、ISC 和 NDVI 等。作为衡量经济发展水平的一个宏观空间指标——夜间灯光指数, 2000~2010 年间, 从 7.49% 增长到 11.05%, 增长率为 47.53%, 到 2015 年, 增长到 15.34%, 同比 2010 年增长率为 38.82%。2000、2010 和 2015 年 364 个典型城市区域的夜间灯光指数分别为 22.48%、48.11% 和 64.56%, 分别是同期全国水平的 3.01、4.35 和 4.21 倍, 得出大型城市区域的夜间灯光指数显著高

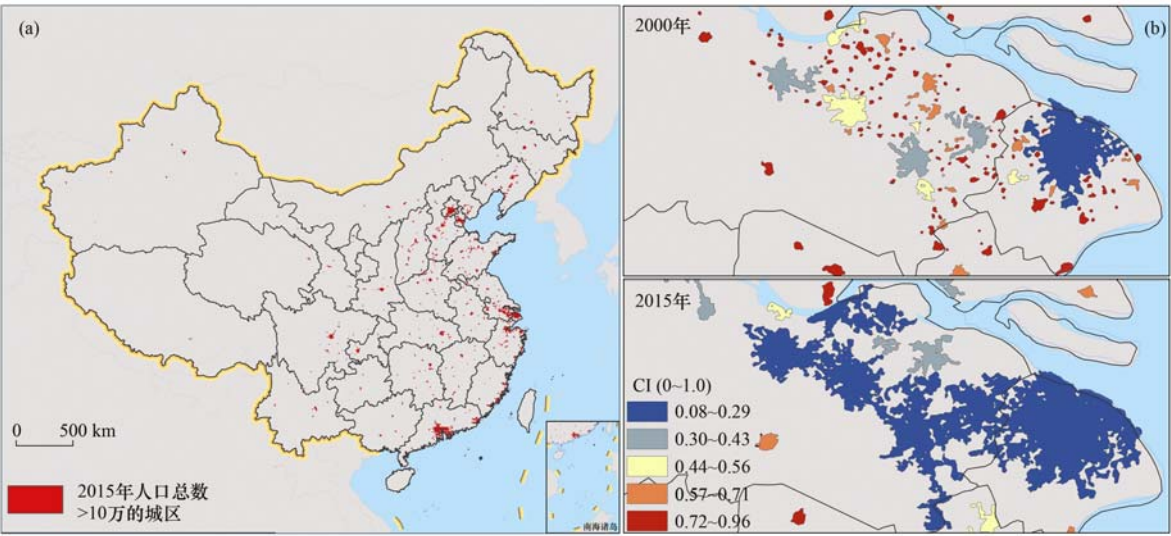
于非典型城市区域。中国在 2000、2010 和 2015 年的 ISC 分别为 2.44%、3.23% 和 3.89%, 2010~2015 年间增长率 (4.09%) 大于 2000~2010 年间 (3.24%)。364 个城市区域的 ISC 在 2000、2010 和 2015 年分别为 10.26%、21.28% 和 28.67%, 分别是全国平均水平的 4.20、6.59 和 7.37 倍。全国人口密度在 2000~2010 年间从 $503.74 \text{ 人}\cdot\text{km}^{-2}$ 增长到 $583.52 \text{ 人}\cdot\text{km}^{-2}$, 增长了 $79.78 \text{ 人}\cdot\text{km}^{-2}$, 年均增长率为 1.58%。从 364 个城市区域维度, 人口密度从 2000 年 $2\,785.60 \text{ 人}\cdot\text{km}^{-2}$ 增长到 2010 年 $3\,754.60 \text{ 人}\cdot\text{km}^{-2}$, 增长了 $969 \text{ 人}\cdot\text{km}^{-2}$, 年均增长率为 3.48%, 是全国平均水平的 2.20 倍, 增长到 2015 年的 $4\,562.30 \text{ 人}\cdot\text{km}^{-2}$ 。2000~2010 年, 我国 NDVI 指数从 0.19 增长为 0.33, 364 个城区的 NDVI 指数从 2000 年 0.07 增长到 2010 年 0.21, 到 2015 年, NDVI 指数为 0.24, 全国平均 NDVI 大于 364 个典型城市区域。

改革开放 40 年来, 中国城市蔓延式、摊大饼式的扩张导致城市 CI 越来越小, 城市交通通勤距离增长, 机动车尾气排放增加, 城市空气污染加剧。2000 和 2015 年中国城市 CI 时空分布如图 4 所示。

2000~2015 年, 上海市城区面积剧烈增长, 城市 CI 随之降低。另外, 城市化显著特征的城市人口密度、ISC、NDVI 和夜间灯光指数于 2000~2015 年在空间范围和空间分布格局均呈“胡焕庸线”分布规律(图 5)。

依据城市空间单元以及城市空间特征分布, 计算各城市在 2000、2010 和 2015 年城市扩张、城市空间特征变化、城市特征空间异质性变化。表 2 总结了 $\text{PM}_{2.5}$ 变化、城市扩张和城市空间特征变化。2000~2010 年间 $\text{PM}_{2.5}$ 城均变化 $24.52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 城市扩张包括人口扩张和地域扩张都很大, 城均人口扩张为 64.58 万人, 城均地域面积扩张为 63.61 km^2 。另外, 随着城市扩张过程, 城市 CI、人口密度、ISC、夜间灯光指数和 NDVI 也相应变化。2010~2015 年间 $\text{PM}_{2.5}$ 城均变化 $36.89 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 城均人口扩张为 45.87 万人, 城均地域面积扩张为 45.69 km^2 , 城市空间形态的空间异质性随着城市扩张也变得越来越复杂。

中国城市特征指标表明, 2000~2010 年间中国城市 CI 城均增长 0.12, 中国城市 CI 总体是越来越好。405 个典型区域城均 ISC 变化为 11.03%, 人工地表急剧扩张。夜间灯光指数以平均 25.64% 增长率增长, 中国经济快速增长。2010~2015 年, 按 364 个城市区域的 ISC 变化为 10.45%, 夜间灯光指数平均增长 22.78%, 人口密度变化为 1 090.89



(a)2015 年人口总量 >10 万的典型城市区域的空间范围与分布, (b) 中国上海 2000 年与 2015 年的空间紧凑度对比

图 4 城市空间紧凑度变化

Fig. 4 Compact index of the urban changes in cities in China

表 2 2000 ~ 2010 年和 2010 ~ 2015 年的 $PM_{2.5}$ 和城市扩张、城市特征变化和城市空间异质性变化¹⁾

Table 2 Changes in $PM_{2.5}$, urban expansion, city characteristics, and urban spatial heterogeneity in 2000-2010 and 2010-2015

项目	变量	2000 ~ 2010 变化 (N = 405 个城区)		2010 ~ 2015 变化 (N = 364 个城区)	
		均值	标准差	均值	标准差
空气质量变化	$PM_{2.5}/\mu g \cdot m^{-3}$	24.52	19.95	36.89	18.89
城市扩张	人口扩张/万人	64.57	270.97	45.87	380.9
	城市地域扩张/ km^2	63.61	237.67	45.69	230.78
	CI (0 ~ 1.00)	0.12	0.16	0.18	0.13
城市特征变化	人口密度/ $人 \cdot km^{-2}$	969.00	2 028.87	1 090.89	3 034.98
	NDVI (-1 ~ 1)	0.14	0.15	0.09	0.18
	ISC/%	11.03	9.51	10.45	10.98
城市特征空间异质性变化	夜间灯光指数/%	25.64	14.23	22.78	15.65
	人口密度/ $人 \cdot (km^2)^{-1}$	1 832.13	2 724.21	1 223.16	2 902.56
	NDVI (-1 ~ 1)	0.04	0.05	0.09	0.09
气象条件	ISC/%	18.61	7.79	16.98	7.67
	夜间灯光指数/%	3.42	5.31	2.45	6.89
	降雨/mm	50.52	50.31	34.52	67.31
城市地形	气温/ $^{\circ}C$	51.48	60.50	52.58	23.50
	明火数量/ $个 \cdot (1\ 000\ km^2)^{-1}$	35.45	57.31	38.90	54.11
	高程/m	270.02	462.44	269.02	398.04
	坡度/ $^{\circ}$	1.34	1.40	1.21	1.90
	坡向/ $^{\circ}$	172.94	21.33	178.47	22.45

1) N 为城市区域总数, 气象条件为相对值

人 $\cdot km^{-2}$. 2010 ~ 2015 年间, 城市化速度快于 2000 ~ 2010 年间, 同时 2010 ~ 2015 年的 $PM_{2.5}$ 污染增长值为 $36.89\ \mu g \cdot m^{-3}$, 大于 2000 ~ 2010 年的变化值 $24.52\ \mu g \cdot m^{-3}$. 另外, 从中国城市特征空间异质性得出在城市内部, 城市特征存在显著差异, 城郊与主城区差异巨大.

2.2 中国城市扩张、特征变化与 $PM_{2.5}$ 变化相关关系

分析城市扩张, 城市空间特征变化, 城市特征空间异质性各变量与 $PM_{2.5}$ 变化的相关关系, 得出

各变量与 $PM_{2.5}$ 变化的关系显著, 且都在 $P < 0.01$ 水平显著 (表 3).

本研究表明城市 CI、NDVI 与 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化呈显著负相关, 对 $PM_{2.5}$ 污染具有抑制和减缓作用. 夜间灯光指数、人口密度、ISC 与 $PM_{2.5}$ 污染变化呈显著正相关. 总之, 2000 ~ 2010 年间城市扩张和空间特征变化与 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化的关系显著强度如下: 夜间灯光指数 > CI > 人口密度 > ISC $\geq$ 城市地域扩张 > 城市人口扩张 > NDVI; 夜间灯光指

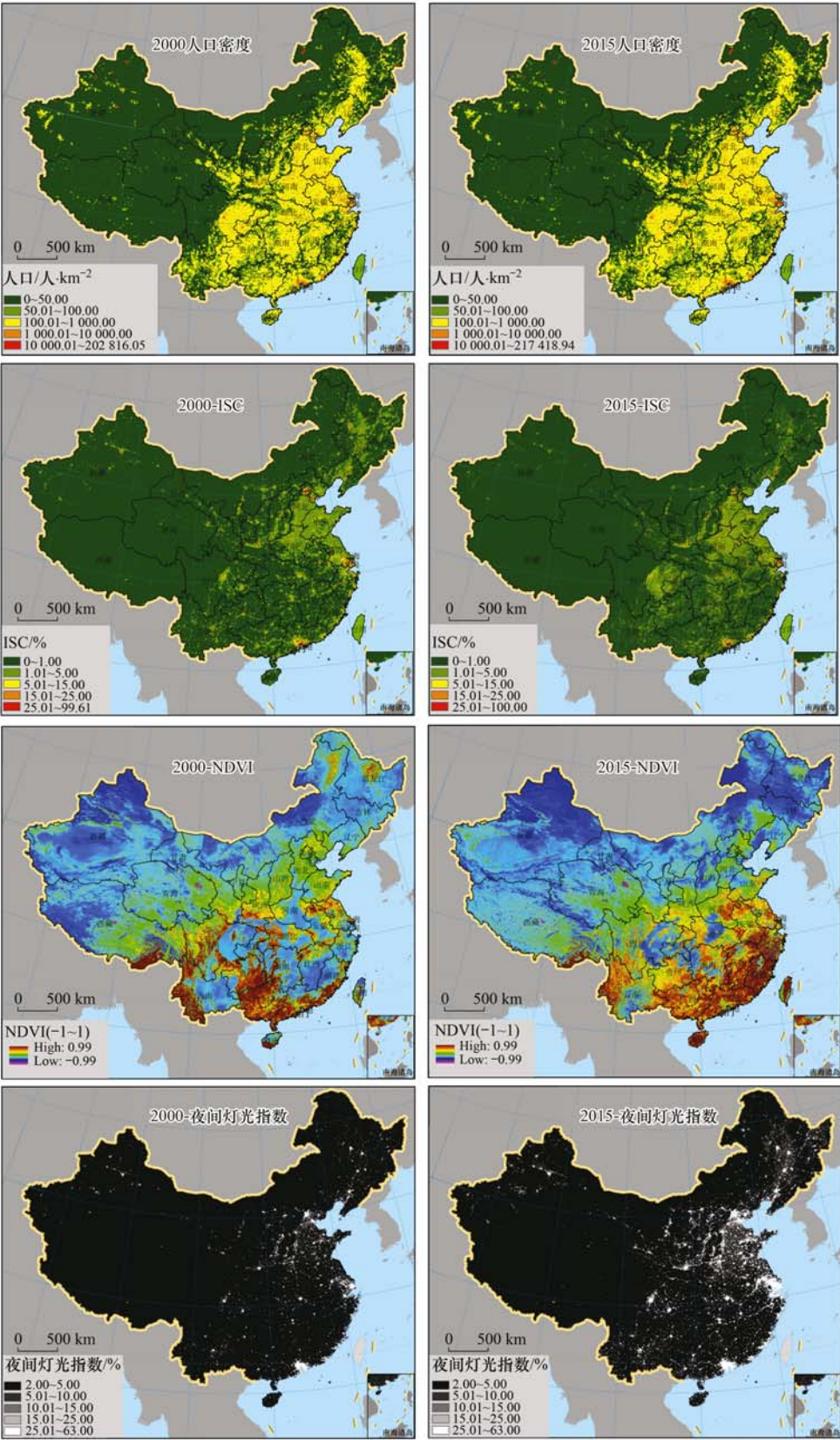


图5 中国 2000 ~ 2015 年的城市特征分布

Fig. 5 Distribution map of urban characteristics in China in 2000-2015

数与 $\text{PM}_{2.5}$ 变化的相关关系最为明显(相关系数 $R = 0.76$), 强相关性; 表征中国经济发展对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度带来的影响最为显著; 其次, 城市人口密度和 CI 变化与 $\text{PM}_{2.5}$ 变化相关系数分别为 0.54 和 0.65,

中强相关性; 城市地域扩张、ISC 增长和城市人口扩张与 $\text{PM}_{2.5}$ 变化相关系数分别为 0.37、0.38 和 0.28, 为中相关性; NDVI 与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的相关性较小($R = 0.16$) 如图 6 所示. 2010 ~ 2015 年间,

表 3 城市扩张、城市空间特征变化以及异质性与 PM_{2.5} 的相关性¹⁾

Table 3 Relationships between urban expansion and PM_{2.5} pollution

项目	变量	2000 ~ 2010 年间 (N = 405)			2010 ~ 2015 年间 (N = 364)		
		相关系数	标准误差	R ²	相关系数	标准误差	R ²
城市扩张	人口扩张	1.969×10^{-6}	0.00 ***	0.072	9.564×10^{-7}	0.00 ***	0.083
	城市地域扩张	2.031×10^{-8}	0.00 ***	0.059	5.0121×10^{-7}	0.00 ***	0.071
城市特征变化	CI	-83.069	4.859 ***	0.421	-59.782	3.529 ***	0.432
	人口密度	0.005	0.00 ***	0.270	0.015	0.00 ***	0.30
	NDVI	-0.174	6.383 ***	0.027	-0.234	4.564 ***	0.031
	ISC	0.711	0.098 ***	0.115	0.677	0.012 ***	0.235
	夜间灯光指数	1.068	0.045 ***	0.581	2.123	0.457 ***	0.598
城市特征空间异质性变化	人口密度	0.004	0.00 ***	0.264	0.104	0.00 ***	0.279
	NDVI	-106.56	20.223 ***	0.064	-311.76	12.266 ***	0.074
	ISC	0.571	0.124 ***	0.05	0.345	3.543 ***	0.09
	夜间灯光指数	2.026	0.157 ***	0.292	3.602	0.658 ***	0.390

1) N 为城市区域总数; * * * 表示 P < 0.001

表 4 城市扩张, 城市特征变化, 城市空间异质性与 PM_{2.5} 污染影响¹⁾

Table 4 Impact of urban expansion, changes in urban characteristics and urban spatial heterogeneity on PM_{2.5} pollution

项目	变量	2000 ~ 2010 年间 (N = 405)			2010 ~ 2015 年间 (N = 364)		
		相关系数	标准误差	R ²	相关系数	标准误差	R ²
城市扩张	人口扩张	1.461×10^{-6}	0.00	0.04	2.341×10^{-6}	0.00	0.05
	城市地域扩张	-6.866×10^{-9}	0.00	0.01	-5.670×10^{-9}	0.00	0.02
	R ²		0.05			0.07	
城市特征变化	紧凑度	-4.927	6.137	0.102	-5.712	5.913	0.135
	人口密度	0.001	0.001	0.012	0.020	0.022	0.021
	NDVI	-24.787	5.818	0.036	-22.656	6.123	0.045
	ISC	0.330	0.142	0.025	0.456	0.564	0.111
	灯光覆盖率	0.482	0.093	0.218	0.654	0.432	0.238
	R ²		0.393			0.55	
城市特征空间异质性变化	人口密度	-0.001	0.00	0.006	0.034	0.321	0.005
	NDVI	39.823	18.978	0.009	43.412	16.741	0.007
	ISC	-0.378	0.123	0.122	-0.452	0.102	0.132
	夜间灯光指数	0.640	0.201	0.012	1.650	0.303	0.112
	R ²		0.149			0.256	
2000 年城市基础特征	城市面积	-7.743×10^{-9}	0.00	0.024	-4.733×10^{-9}	0.012	0.036
	人口数量	3.647×10^{-6}	0.00	0.002	1.417×10^{-6}	0.410	0.012
	NDVI	1.044	6.944	<0.001	3.012	4.102	0.002
	ISC	0.094	0.142	0.002	1.149	0.152	0.002
	夜间灯光指数	0.121	0.119	0.008	1.431	3.221	0.005
	R ²		0.037			0.057	
气象条件变化	明火数量	0.024	0.010	0.005	0.189	0.124	0.007
	降雨量	-0.143	0.025	0.230	-4.152	0.963	0.281
	气温	0.270	0.030	0.274	0.362	0.047	0.295
	R ²		0.509			0.583	
城市地形	高程均值	-0.010	0.001	0.059	-0.123	0.142	0.009
	坡度均值	-1.646	0.416	0.013	-2.310	1.045	0.015
	坡向均值	-0.038	0.024	0.002	-0.125	0.852	0.005
	R ²		0.074			0.029	
模型总体 R ²			0.778			0.803	

1) N 为城市区域总数

各要素与 PM_{2.5} 变化相关程度 [图 6(b)] 与 2000 ~ 2010 年大体一致 [图 6(a)]。

2.3 中国城市扩张以及特征变化对 PM_{2.5} 污染变化的贡献分析

通过回归模型分析城市扩张、城市空间特征变

化对 PM_{2.5} 变化的贡献率。为了更好地理解和掌握城市扩张、城市特征变化、城市空间异质性与 PM_{2.5} 变化的贡献, 把 2000 年基础城市特征数据、气象条件 (降雨、气温)、城市地形地貌 (高程、坡度、坡向) 和秸秆燃烧 (明火数量) 作为调整参数加

入到模型中,构建了包括所有变量的多元回归模型.同理,2010~2015年间的模型是把2010的基础城市特征数据除去,构建多元回归模型(表4).

城市扩张以及城市空间特征变化对 $PM_{2.5}$ 污染影响显著.城市扩张,城市特征变化,城市空间特征异质性变化对2000~2010年中国 $PM_{2.5}$ 浓度总贡献率为77.80%,对2010~2015年期间的 $PM_{2.5}$ 变化贡献率为82.30%.与以往研究相符,气象条件对 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化影响最大^[21, 32].除了气象因素,城市空间特征变化对 $PM_{2.5}$ 加剧贡献率最高,在2000~2010年期间贡献率为39.30%,在2010~2015年期间贡献率为55.00%;其次为城市空间特征异质性,其对2000~2010年间 $PM_{2.5}$ 变化的贡献率为14.90%,对2010~2015年期间污染加剧贡献率为25.60%;均大于2000、2010年基础城市特征对 $PM_{2.5}$ 变化的贡献率3.70%和5.70%.总而言之,未来城市转型发展中,构建绿色生态城区过程中,应充分考虑城市空间布局、城市空间特征变化,尽可能实现城市建设对生态环境破坏最小,甚至增强城市生态功能,实现生态环境友好的可持续发展的新型城市建设.

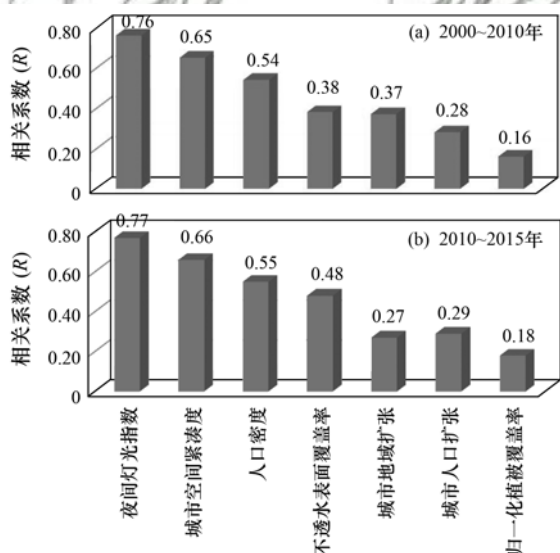


图6 2000~2015年间城市扩张和城市特征变化与 $PM_{2.5}$ 的关系

Fig. 6 Relationship between urban expansion and $PM_{2.5}$ in 2000-2015

3 结论

(1)突破传统采用城市行政区划界定城市区域,利用城市分类数据来界定城市区域,使得城市扩张以及城市特征变化的计算与分析更为准确.对2000~2010年和2010~2015年城市空间特征变化是利用2015年城市区域内均值减去2010年的面积加权均值,2000~2010年间变化是2010年城市区域均值减去2000年的面积加权均值.

(2)分别从不同的空间维度和时间阶段分析了中国城市扩张、城市空间特征变化、城市特征空间异质性对 $PM_{2.5}$ 污染的影响.基于2015年的城市区域,分析了2010~2015年期间,城市扩张,城市空间特征变化,城市空间特征异质性变化对 $PM_{2.5}$ 浓度变化总贡献率为80.30%,城市空间特征变化的贡献率最高为55.00%,城市空间异质性的贡献率为25.60%,均大于2010年基础城市特征的贡献率5.70%.基于2010年的城市区域,分析了2000~2010年期间,得出城市空间特征变化对 $PM_{2.5}$ 变化贡献率为39.30%,城市空间特征异质性的贡献率分别为14.90%,均大于2000年基础城市特征的贡献率3.70%.

(3)中国城市扩张以及城市空间特征变化与 $PM_{2.5}$ 污染显著相关,相关强度顺序为:夜间灯光指数 > CI > 人口密度 > ISC > 城市地域扩张 ≥ 城市人口扩张 > NDVI;夜间灯光指数与 $PM_{2.5}$ 变化关系最明显,相关系数 R 为0.77,具强相关性,表征经济发展对 $PM_{2.5}$ 的影响最大;人口密度和城市CI与 $PM_{2.5}$ 变化的相关系数分别为0.55和0.66,中强相关.表明城市化进程中城市格局对城市空气污染水平具有重大影响,科学合理的绿色生态城市发展不但不会产生污染,反而能提升城市生态功能.因此,要全面贯彻和实现城市绿色生态发展理念,合理布局城市基础设施,推动绿色低碳循环的经济发展,促进城市精细化管理.把对生态环境的影响降到最低,降低空气污染排放,减缓城市空气污染水平,实现绿色生态城区可持续发展建设.

参考文献:

- [1] 乔文怡,李玢,管卫华,等. 2016—2050年中国城镇化水平预测[J]. 经济地理, 2018, **38**(2): 51-58.
Qiao W Y, Li L, Guan W H, et al. Prediction of urbanization level in China: 2016-2050[J]. Economic Geography, 2018, **38**(2): 51-58.
- [2] 全国两会特别报道. 共商共治共享,高质量推进生态建设[N/OL]. 解放日报, <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?QueryID=2&CurRec=1&recid=&FileName=JFRB201803190040&DbName=CCNDLAST2018&DbCode=CCND&yx=&pr=&URLID=>, 2018-03-19.
- [3] United Nations. World urbanization prospects (2014 revision) [M]. New York: United Nations, 2014.
- [4] 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.
- [5] Wigginton N S, Fahrenkamp-Uppenbrink J, Wible B, et al. Cities are the future[J]. Science, 2016, **352**(6288): 904-905.
- [6] 王彤, 华阳, 许庆成, 等. 京津冀郊区站点秋冬季大气 $PM_{2.5}$ 来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1035-1042.
Wang T, Hua Y, Xu Q C, et al. Source apportionment of $PM_{2.5}$ in suburban area of Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1035-

- 1042.
- [7] 周伟奇, 钱雨果. 中国典型区域城市化过程及其生态环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [8] 秦雨, 张强, 李鑫, 等. 中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5289-5295.
Qin Y, Zhang Q, Li X, *et al.* Patterns of mortality from air pollutant emissions in China's coal-fired power plants [J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5289-5295.
- [9] Yang H. China's soil plan needs strong support [J]. Nature, 2016, **536**(7617): 375.
- [10] Qi Y, Stern N, Wu T, *et al.* China's post-coal growth [J]. Nature Geoscience, 2016, **9**(8): 564-566.
- [11] 黄丹丹, 周敏, 余传冠, 等. 长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5308-5314.
Huang D D, Zhou M, Yu C G, *et al.* Physiochemical properties of the aerosol particles and their impacts on secondary aerosol formation at the background site of the Yangtze river delta [J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5308-5314.
- [12] Palmer M, Bernhardt E, Chornesky E, *et al.* Ecology for a crowded planet [J]. Science, 2004, **304**(5675): 1251-1252.
- [13] McDonnell M J, Macgregor-Fors I. The ecological future of cities [J]. Science, 2016, **352**(6288): 936-938.
- [14] Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, *et al.* Factors contributing to haze and fog in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(13): 1178-1187.
- [15] Peng J, Chen S, Lu H L, *et al.* Spatiotemporal patterns of remotely sensed PM_{2.5} concentration in China from 1999 to 2011 [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, **174**: 109-121.
- [16] 段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 等. 中国 PM_{2.5} 污染空间分布的社会经济影响因素分析 [J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2498-2504.
Duan J X, Zhai W X, Cheng C Q, *et al.* Socio-economic factors influencing the spatial distribution of PM_{2.5} concentrations in China: an exploratory analysis [J]. Environmental Science, 2017, **39**(5): 2498-2504.
- [17] 王桂林, 杨昆, 杨扬. 京津冀地区不透水表面扩张对 PM_{2.5} 污染的影响研究 [J]. 中国环境科学, 2017, **37**(7): 2470-2481.
Wang G L, Yang K, Yang Y. The spatio-temporal variation of PM_{2.5} pollution and its correlation with the impervious surface expansion [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(7): 2470-2481.
- [18] 韩立建. 城市化与 PM_{2.5} 时空格局演变及其影响因素的研究进展 [J]. 地理科学进展, 2018, **37**(8): 1011-1021.
Han L J. Relationship between urbanization and urban air quality: An insight on fine particulate dynamics in China [J]. Progress in Geography, 2018, **37**(8): 1011-1021.
- [19] Larkin A, Van Donkelaar A, Geddes J A, *et al.* Relationships between changes in urban characteristics and air quality in East Asia from 2000 to 2010 [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(17): 9142-9149.
- [20] Van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, *et al.* Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical-statistical method with information from satellites, models, and monitors [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(7): 3762-3772.
- [21] Han L J, Zhou W Q, Pickett S T A, *et al.* An optimum city size? The scaling relationship for urban population and fine particulate (PM_{2.5}) concentration [J]. Environmental Pollution, 2016, **208**: 96-101.
- [22] Han L J, Zhou W Q, Li W F. Increasing impact of urban fine particles (PM_{2.5}) on areas surrounding Chinese cities [J]. Scientific Reports, 2015, **5**: 12467.
- [23] 贺晋瑜, 燕丽, 王彦超, 等. 我国 PM_{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析 [J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2036-2042.
He J Y, Yan L, Wang Y C, *et al.* Scenario analysis of PM_{2.5} concentration targets and milestones in China [J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2036-2042.
- [24] 卢文, 王红磊, 朱彬, 等. 南京江北 2014~2016 年 PM_{2.5} 质量浓度分布特征及气象和传输影响因素分析 [J]. 环境科学学报, 2019, **39**(4): 1039-1048.
Lu W, Wang H L, Zhu B, *et al.* Distribution characteristics of PM_{2.5} mass concentration and their impacting factors including meteorology and transmission in north suburb of Nanjing during 2014 to 2016 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(4): 1039-1048.
- [25] 沈利娟, 王红磊, 李莉, 等. 嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析 [J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 2871-2880.
Shen L J, Wang H L, Li L, *et al.* Observation analysis on the characteristics of meteorological elements and pollutants during a continuous fog and haze episode in spring in Jiaxing City [J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 2871-2880.
- [26] Han L J, Zhou W Q, Li W F, *et al.* Impact of urbanization level on urban air quality: a case of fine particles (PM_{2.5}) in Chinese cities [J]. Environmental Pollution, 2014, **194**: 163-170.
- [27] Keola S, Andersson M, Hall O. Monitoring economic development from space: using nighttime light and land cover data to measure economic growth [J]. World Development, 2015, **66**: 322-334.
- [28] Hao Y, Liu Y M. The influential factors of urban PM_{2.5} concentrations in China: a spatial econometric analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, **112**: 1443-1453.
- [29] World Bank. East Asia's changing urban landscape: measuring a decade of spatial growth [M]. Washington, DC: The World Bank, 2015.
- [30] Jerrett M. Atmospheric science: the death toll from air-pollution sources [J]. Nature, 2015, **525**(7569): 330-331.
- [31] 环境空气质量标准 (GB 3095-2012) [S]. 中华人民共和国: 2012.
- [32] Normile D. China rethinks cities [J]. Science, 2016, **352**(6288): 916-918.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NP1	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)