

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



2020

Vol.41 No.7
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响	汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)
华北地区大气细颗粒物(PM _{2.5})年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应	杨伟, 姜晓丽 (2995)
郑州市民运会期间大气PM _{2.5} 改善效果评估	王申博, 姜亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)
成都夏冬季PM _{2.5} 中水溶性无机离子污染特征	冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)
川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析	雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)
四川省典型行业挥发性有机物源成分谱	徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)
成都市工业挥发性有机物排源成分谱	周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)
郑州市典型工业企业VOCs排放特征及风险评估	齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)
阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响	牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)
典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)
华北地区典型重工业城市夏季近地面O ₃ 污染特征及敏感性	欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)
稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性	顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运霞 (3095)
苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析	卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)
轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征	谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日超, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)
非超低与超低排放煤电机组启动过程NO _x 排放特征对比分析	李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)
邢台市区道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别	宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)
叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响	魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)
关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源	赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)
岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析	田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)
木沥河流域氮素污染及其污染源解析	齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)
辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析	齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)
鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应	王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾琰杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)
象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析	王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)
乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献	张慧, 王世亮, 余杨 (3204)
连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征	李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)
茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险	吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)
金盆水库沉积物铁锰释放规律	路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)
城市湖泊沉积物微塑料污染特征	王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)
西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析	刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)
海水中的红毒素与营养盐对微藻的复合影响	王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)
梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律	温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)
宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析	徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)
分层型水库藻类垂直演替的水质与细菌种群调控	闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾克宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)
长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响	毕薇薇, 叶胜, 于建全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)
供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型	刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)
碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制	崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)
弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe ⁰ /WMF)对水中Cr(VI)的去除特性及机制	计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)
一硫代肟在针铁矿上的吸附及影响因素	廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)
生物滤池快速启动ANAMMOX运行策略及菌群特征	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)
低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响	张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)
羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响	邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)
低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性	高春娣, 张娜, 韩微, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)
我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化	董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)
城镇河流CO ₂ 及CH ₄ 排放与市政排水管网污水输入的关联影响	李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)
控释尿素对黄河故道沙性潮土N ₂ O排放的影响	姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)
我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放	张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)
不同母质发育土壤Cd环境行为对水分管理模式的响应差异	黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)
锰基改性生物炭对弱碱性Cd污染土壤团聚体结构以及Cd含量特征的影响	孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)
钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响	曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)
叶面喷施2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响	杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)
《环境科学》征订启事 (3011)	《环境科学》征稿简则 (3084)
信息 (3174, 3185, 3391)	

华北地区大气细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应

杨伟¹, 姜晓丽²

(1. 太原师范学院地理科学学院, 晋中 030619; 2. 太原师范学院城镇与区域发展研究所, 晋中 030619)

摘要: 大气细颗粒物($PM_{2.5}$)是大气污染的重要组成部分,对其影响因素探讨具有重要的意义。但目前来看,多数的研究都聚焦于 $PM_{2.5}$ 与气象要素以及经济因素之间的关系,分析土地利用/覆被变化对 $PM_{2.5}$ 影响的研究相对较少,需要进一步的深入探讨。基于 $PM_{2.5}$ 空间分布数据及土地利用/覆被数据,对华北地区 $PM_{2.5}$ 变化特征及土地利用/覆被变化特征进行了系统分析,并利用地理加权回归、GIS空间分析等手段探讨了 $PM_{2.5}$ 变化与土地利用/覆被变化的响应关系,结果表明:①华北地区 $PM_{2.5}$ 浓度整体呈现东南高、西北低的空间格局,且18a均保持这一态势没有变化。时间上来看,在2006年达到污染最大值,之后虽有波动但一直居高不下。多数城市 $PM_{2.5}$ 浓度超标,整体环境污染形势严峻;②2000~2015年研究区土地利用类型/覆被以耕地、林地和草地为主,土地利用/覆被变化趋势主要表现为耕地的大量减少以及建设用地的持续增加,水域和未利用地面积略有减少,林地和草地转入转出面积接近,因而总量变化不大;③地理加权回归模型计算结果表明,Local R^2 (衡量局部拟合度)较低的区域为土地利用/覆被未发生变化的区域,而在土地利用/覆被变化明显的区域,Local R^2 较高,说明 $PM_{2.5}$ 变化对土地利用/覆被变化有着显著的响应作用;④对于不同土地利用/覆被状况而言, $PM_{2.5}$ 分布特征表现出建设用地>耕地>水域>草地>林地>未利用地的趋势。对于不同土地利用/覆被转换方式而言,当自然用地向人工用地转换时 $PM_{2.5}$ 浓度上升,而人工用地向自然用地转变时 $PM_{2.5}$ 浓度降低。

关键词: 大气细颗粒物($PM_{2.5}$); 土地利用/覆被变化(LUCC); 热点分析; 地理加权回归(GWR); 空间响应

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-2995-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201911079

Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change

YANG Wei¹, JIANG Xiao-li²

(1. School of Geographical Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, China; 2. Institute of Urban and District Development, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, China)

Abstract: Fine particulate matter ($PM_{2.5}$) is an important component of air pollution, and thus it is meaningful to analyze its influencing factors. According to existing literature, most studies to date have focused on the relationship between $PM_{2.5}$ and meteorological or economic factors, whereas fewer have analyzed the relationship between $PM_{2.5}$ and land use and land cover change (LUCC). This study employed spatial distribution data of $PM_{2.5}$ and land use and land cover data to analyze the relationship between dynamic characteristics of $PM_{2.5}$ and LUCC. A geographically weighted regression (GWR) model and spatial analysis tools based on ArcGIS were used to analyze the relationship between $PM_{2.5}$ dynamic characteristics and LUCC. North China was selected as the study area, and the results showed that ① The spatial pattern of $PM_{2.5}$ in North China was high in the southeast and low in the northwest for 18 years. From a time perspective, the $PM_{2.5}$ reached its maximum value in 2006 and has maintained a high value since then. The $PM_{2.5}$ exceeded the permissible standard in most of the cities, with serious environmental pollution generally. ② The main land use and land cover types in North China from 2000 to 2015 were cropland, woodland, and grassland, and the land use and land cover change showed a trend of great decline in cropland and a great increase in construction land. ③ The results of the GWR model showed that local R^2 is low in non-LUCC areas and high in LUCC areas, and the $PM_{2.5}$ dynamic characteristics have a significant response to LUCC. ④ For different land use and land cover types, the distribution of $PM_{2.5}$ showed a trend of construction land > cropland > water area > grassland > woodland > unused land, for different types of LUCC. $PM_{2.5}$ concentration increased when natural land changed to artificial land and decreased when artificial land changed to natural land.

Key words: fine particulate matter ($PM_{2.5}$); land use and land cover change (LUCC); hot spot analysis; geographically weighted regression model (GWR); spatial response

随着我国社会经济的快速发展和工业生产规模极速扩张,空气污染已经成为影响我国生态环境、威胁人们健康的重要问题^[1,2]。在诸多污染物中,大气颗粒物污染被认为是首要污染物^[3,4],其中,细颗粒物($PM_{2.5}$)由于其显著的危害性而引起了广泛的关注^[5-8]。

作为一种严重的大气污染物, $PM_{2.5}$ 的排放以人为源为主,如尾气排放^[9]及工业排放^[10,11]。但 $PM_{2.5}$

收稿日期: 2019-11-11; 修订日期: 2020-01-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701191); 山西省应用基础研究项目(201701D221226)

作者简介: 杨伟(1984~),男,博士,副教授,主要研究方向为环境遥感, E-mail: weiaiweiwei@163.com

的时空分布却受到不同因素的影响,包括气象条件^[12]和人类活动^[13]等.气象条件会影响 $PM_{2.5}$ 的集聚与扩散,包括降水和风况等^[14~17].此外,下垫面条件的变化也会对 $PM_{2.5}$ 的分布产生影响,如土地利用/覆被类型的变化(LUCC),尤其是当自然植被被人造表面替代时表现尤为明显^[18].在局地尺度上,优化土地利用/覆被类型,可以在一定程度上缓解 $PM_{2.5}$ 污染^[19,20],厘清 LUCC 与 $PM_{2.5}$ 特征之间的关系对于缓解大气污染具有重要意义.但就现有的研究来看,多数的研究都聚焦于 $PM_{2.5}$ 与气象要素^[21,22]以及经济因素^[23]之间的关系,分析 LUCC 对 $PM_{2.5}$ 影响的研究相对较少,需要进一步地深入探讨.

分析 LUCC 对 $PM_{2.5}$ 影响的首要问题是 LUCC 以及 $PM_{2.5}$ 数据的获取.基于遥感的 LUCC 研究历史较长且已经相对成熟^[24],而遥感技术也成为获取土地利用/覆被数据的重要手段^[25].传统的 $PM_{2.5}$ 数据获取方法为站点监测,每个站点代表的有效半径一般为 $0.5 \sim 4 \text{ km}$ ^[26],站点之间的区域无法观测,因而难以实现空间上的连续观测,而空间连续的 $PM_{2.5}$ 数据更有利于分析其与 LUCC 之间的作用关系.

因此,本研究以华北地区为例,利用由大气成分分析组织 (Atmospheric Composition Analysis Group, ACAG) 提供的 $PM_{2.5}$ 空间分布数据以及基于遥感数据获取的土地利用/覆被数据,在对 $PM_{2.5}$ 空间分布特征进行分析的基础上,采用地理加权回归分析和空间分析等方法对二者之间的响应进行分析,探讨 LUCC 对大气细颗粒物污染的响应机制,以期为区域环境保护和维护区域生态安全提供决策依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

华北地区的地理范围包括北京市、天津市、河北省、山西省和内蒙古中部.本文根据研究区域的整体性以及数据的可获取性,以行政区划边界为标准,去除不完整的内蒙古中部,选择北京市、天津市、河北省和山西省作为研究区域(图1).研究区域内,京津冀地区为我国北方经济规模最大、最具活力的地区,同时也是我国大气污染最为严重的区域之一.山西省为我国重要的能源基地,以能源消耗为主的经济结构也使其成为大气污染最为严重的区域之一.

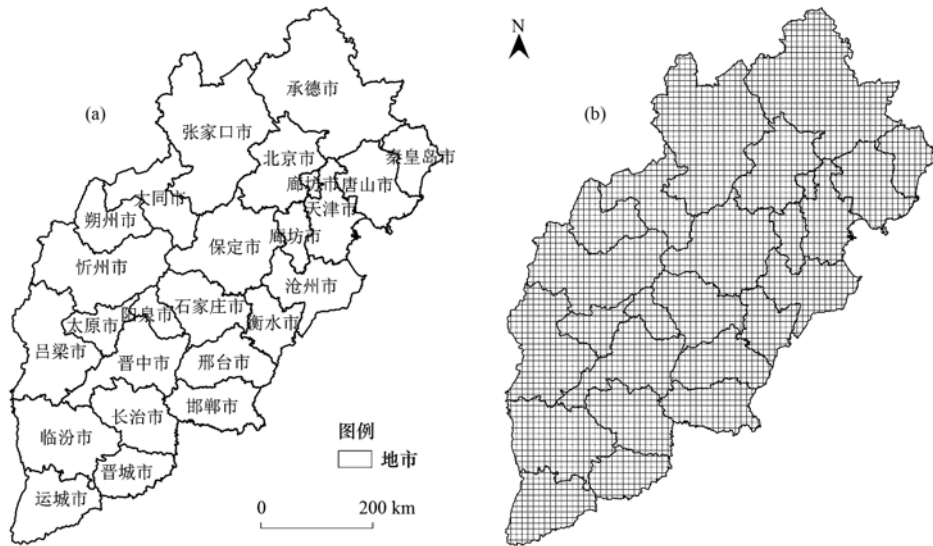


图1 研究区范围及 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 网格

Fig. 1 Study area and the $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ grid of the study area

1.2 数据来源

本文选用年均 $PM_{2.5}$ 浓度作为分析指标,历年 $PM_{2.5}$ 浓度数据来源于 ACAG^[27],时间范围为2000~2017年(图2),该数据充分结合了模型模拟、遥感监测以及站点实测数据,具有较高的精度,并已被用于国内大气污染相关研究^[28].

土地利用/覆被数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(网址为 <http://www.resdc.cn>)提供的中国多时期土地利用/土地覆被遥感监测数据

库(CNLUCC)^[29],该数据集以 Landsat 遥感影像数据为主信息源,通过人工目视解译的方式建立,共包含6个一级分类以及25个二级分类.结合本文的应用实际,将类别合并为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6类,共获取2000年和2015年两期数据(图3).

1.3 分析方法

采用 Getis-Ord G_i^* 空间热点分析方法对研究区的 $PM_{2.5}$ 空间集聚特征进行分析,该方法可以反映研

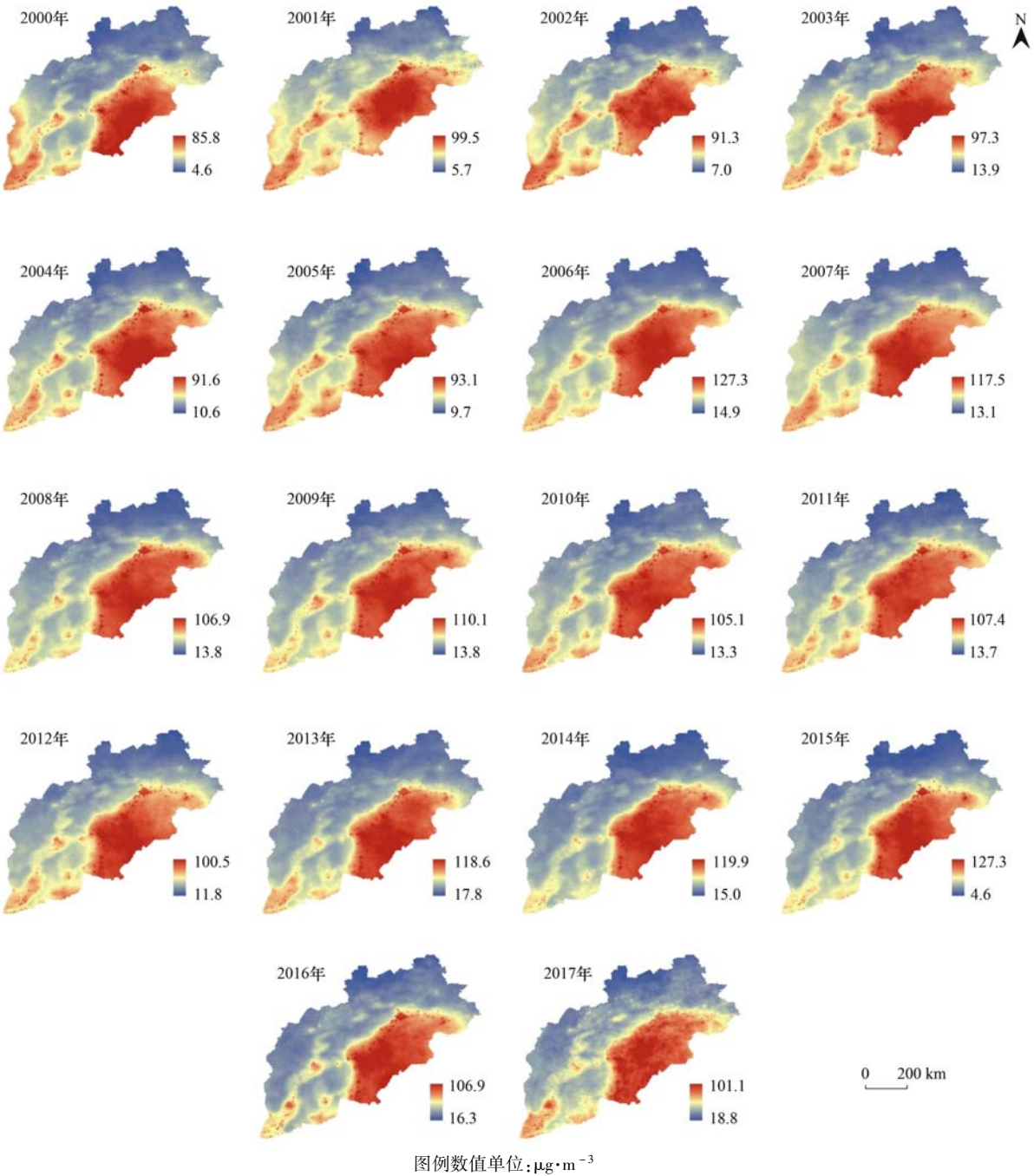


图2 华北地区 2000 ~ 2017 年 PM_{2.5} 空间分布

Fig. 2 Distribution of PM_{2.5} from 2000 to 2017 in North China

研究对象在局部空间上的高值聚集区(热点区)和低值聚集区(冷点区)^[30,31]. 计算公式为:

$$Gi^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - x^{-2}} \sqrt{\frac{\left[n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{ij} \right)^2 \right]}{n-1}}}$$

Gi* 大于 0 时,局部表现为高值聚集区,即“热点区”;当 Gi* 小于 0 时,局部表现为低值聚集区,即“冷点区”.

地理加权回归分析 (geographically weighted

regression, GWR) 是最小二乘模型在空间范围内的扩展,回归参数能够随空间位置的变化而发生改变,是探索空间关系异质性的有效工具^[32]. GWR 模型能够反映参数在不同地理空间位置的非平稳性,使变量之间的相关关系因地理空间位置的差异而变化,分析结果更加符合客观实际. 因此,本文选择 GWR 模型以分析 LUCC 与 PM_{2.5} 之间的相关性,模型结构如下:

$$y_i = a_0(u_i, v_i) + \sum_k a_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i$$

式中, y 为因变量, x 为解释变量, (u_i, v_i) 为第 i 个样

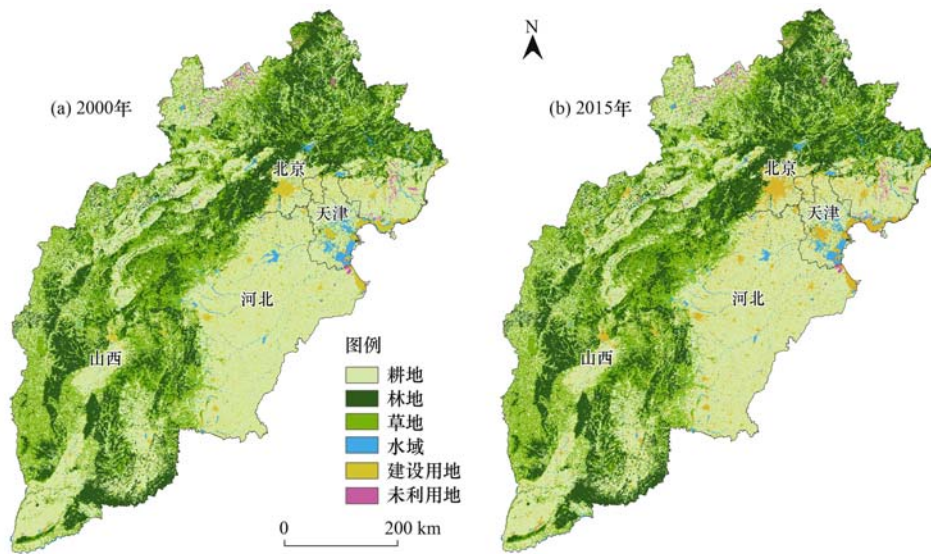


图3 华北地区土地利用/土地覆被分类

Fig. 3 Land use and land cover type in North China

本空间单元的地理中心坐标, $a_k(u_i, v_i)$ 为函数 $a_k(u, v)$ 在点 i 处的值, 为误差项.

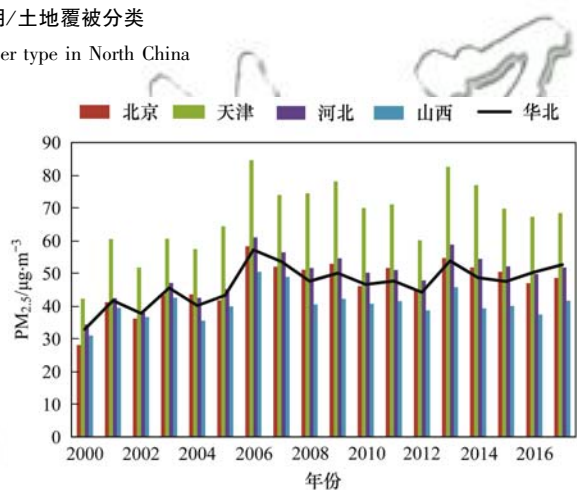
为了识别 LUCC 与 $PM_{2.5}$ 变化的空间响应模式, 将研究区范围划分为 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 的网格[图1(b)], 统计每个网格内 2000~2015 年 $PM_{2.5}$ 的变化均值作为因变量, 统计每个网格内耕地、林地、草地和建设用地面积变化量作为解释变量, 运用 GWR 模型, 对 LUCC 于 $PM_{2.5}$ 变化进行空间相关性分析, 探讨其时空分异性.

在以上分析的基础上, 基于 ArcGIS 10.2 的空间分析工具, 对不同土地利用/覆被类型下的 $PM_{2.5}$ 进行统计, 分析不同土地利用/覆被类型下的 $PM_{2.5}$ 分布特征; 对不同土地利用/覆被转换方式下的 $PM_{2.5}$ 进行统计, 探讨不同转换方式下 $PM_{2.5}$ 的动态变化特征.

2 $PM_{2.5}$ 对 LUCC 的响应分析

2.1 $PM_{2.5}$ 时空特征

研究区大气污染问题形势较为严峻, 进入 21 世纪后污染程度增加更为明显. 由图 4 可以看出, 从 2000~2017 年 $PM_{2.5}$ 浓度整体呈现增高的态势, $PM_{2.5}$ 均值由 2000 年的 $33\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加到 2017 年的 $52.69\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 并在 2006 年达到最大值 $57.22\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 之后一直居高不下. 依据文献[33], $PM_{2.5}$ 年均浓度低于 $35\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 被认为是空气质量达标, 研究时间范围内只有 2000 年的 $PM_{2.5}$ 浓度值略低于标准, 空气质量达标. 若依据世界卫生组织 $10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的标准, 则没有任何一个年份达标. 从空间角度来看, 华北地区 $PM_{2.5}$ 浓度整体呈现东南高、西北低的空间格局, 且 18a 均保持这一态势没有变化

图4 华北地区各省市 $PM_{2.5}$ 变化趋势Fig. 4 Variation trend of $PM_{2.5}$ in North China

(图2). 此外, 城市区域 $PM_{2.5}$ 浓度要远高于其他区域, 可见人类活动是造成大气污染的主要因素.

分区域来看, 天津市大气污染最为严重, 历年 $PM_{2.5}$ 浓度均远高于区域平均值, 最高值为 2006 年, 达 $84.64\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 山西省大气污染相对较轻, 历年 $PM_{2.5}$ 浓度均低于区域平均值. 北京市与河北省历年 $PM_{2.5}$ 浓度均接近区域平均值. 依据文献[33], 天津市没有空气质量达标的年份, 北京市、河北省以及山西省只有 2000 年空气质量达标, 分别为 28.16 、 34.44 和 $31.10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其他年份均不达标.

依据文献[33], 从时间序列来看, $PM_{2.5}$ 质量达标地市数量最多为 2000 年, 24 个地市中共有 12 个, 其次为 2004 年, 共有 7 个城市达标(图5). 达标城市数最少为 2006 年, 只有 2 个城市达标, 分别为承德市和张家口市. 整体来看, 各年份 $PM_{2.5}$ 质量达标地市数量均较少, 多数年份达标地市数量占比均小于 $1/3$.

从各地市来看, 2000~2017 年的 18 a 中, 承德

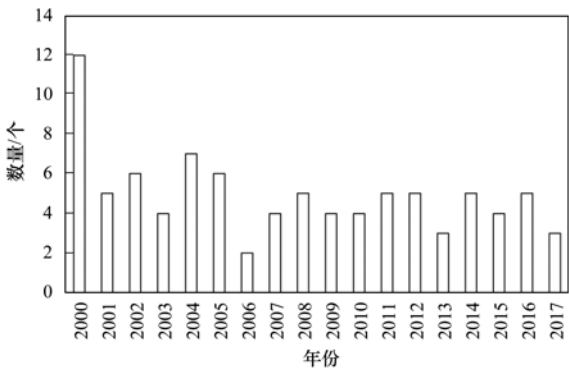
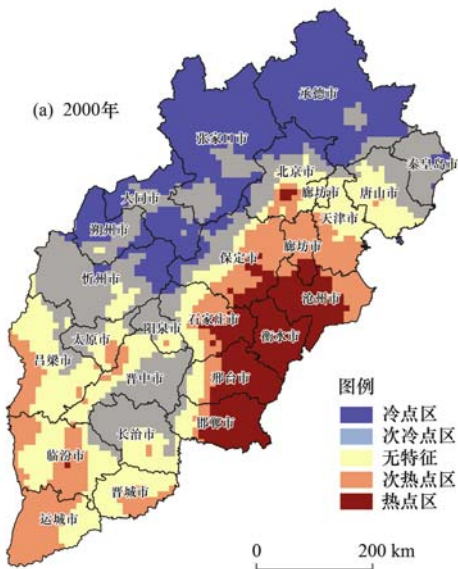


图5 2000~2017年PM_{2.5}达标地市数量
Fig. 5 Number of cities reached the PM_{2.5} standards from 2000 to 2017

市和张家口市空气质量最好,所有年份PM_{2.5}浓度均低于文献[33]中的标准.其次为大同市、朔州市和忻州市,达标年数分别为17、17和13 a(表1).吕梁市有5 a的PM_{2.5}达标,秦皇岛市有4 a的PM_{2.5}达标.北京市、唐山市、阳泉市、太原市、晋中市和长治市只有1 a的PM_{2.5}达标.其余11个地市16 a来无PM_{2.5}达标年份.可以看出,不论是从区域整体还是各地市来看,华北地区PM_{2.5}污染形势严峻.

表1 2000~2017年各地市PM_{2.5}达标年份数量
Table 1 Number of years reached the PM_{2.5} standards of each city from 2000 to 2017

地市	达标年数/a	地市	达标年数/a	地市	达标年数/a
承德	18	朔州	17	太原	1
张家口	18	保定	0	晋中	1
北京	1	忻州	13	邢台	0
秦皇岛	4	沧州	0	邯郸	0
唐山	1	石家庄	0	长治	1
大同	17	吕梁	5	临汾	0
天津	0	衡水	0	晋城	0
廊坊	0	阳泉	1	运城	0



采用局域空间关联指数 Getis-Ord Gi* 来探测PM_{2.5}空间分布的局部集聚程度,并识别不同空间位置上的低值集聚区与高值集聚区,即冷点区与热点区分布特征.分别对2000年和2017年的PM_{2.5}空间分布情况做局部关联分析,生成研究区PM_{2.5}的空间冷热点分布(图6).

可以看出,2000~2017年研究区PM_{2.5}冷热点空间分布格局基本保持稳定,即东南高西北低的分布格局,但各类型区所占比例有一定程度的变化.冷点区和次热点区的比例减少,次冷点区和热点区的占比增加,并主要表现为冷点区向次冷点区转化以及次热点区向热点区转化的趋势.从冷热点空间分布来看,热点区域在2000年主要分布于北京市、河北省东南部各市以及临汾市.到2017年,热点区域分布仍为这些区域,但空间上有了显著的扩张,此外天津市也由次热点区转化为热点区.冷点区在两个年份均主要分布于承德市、张家口市、大同市、朔州市和忻州市,但空间范围逐步缩小,并表现出向西北缩减的趋势.

2.2 土地利用/覆被变化及其转移分析

由表2可以看出,研究区的主要土地利用/覆被类型为耕地、林地和草地,三者面积之和约占区域总面积的90%.从变化趋势来看,耕地呈现减少趋势,占比由2000年的46.10%下降为2015年的45.20%,建设用地呈增加趋势,占比由5.85%增长为6.86%.

从转换类型来看(表3),2000~2015年耕地的转出类型主要为建设用地,占耕地转出总面积的77.67%,主要分布于各大城市的周边区域.林地、草

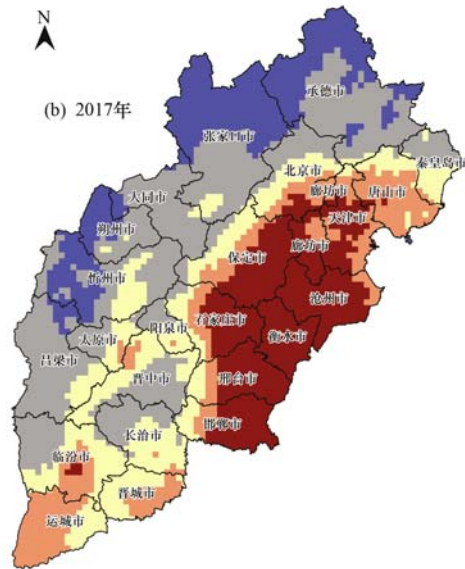


图6 PM_{2.5}冷热点分布
Fig. 6 Distribution of cold/hot spot of PM_{2.5}

地的主要转出类型同样为建设用地,分别占总转出面积的 73.36% 和 58.13%。水域的主要转出类型为耕地和建设用地,分别占转出总量的 48.68% 和 42.59%。未利用地的主要转出类型为耕地、建设用地和水域,分别占转出总量的 41.53%、30.51% 和 21.19%。

总体来看,2000~2015 年研究区土地利用类型/覆被以耕地、林地和草地为主,土地利用/覆被变化趋势主要表现为耕地的大量减少以及建设用地的

表 2 2000 年和 2015 年研究区土地利用/覆被类型面积

Table 2 Area of each land use/cover types in 2000 and 2015 of the study area				
土地利用类型	2000 年		2015 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
耕地	171 596	46.10	168 259	45.20
林地	88 309	23.72	88 448	23.76
草地	80 609	21.66	80 376	21.59
水域	7 723	2.07	7 497	2.01
建设用地	21 779	5.85	25 530	6.86
未利用地	2 204	0.59	2 110	0.57

表 3 2000~2015 年华北地区土地利用/覆被面积转移矩阵/km²

Table 3 Area conversion matrix for land use/cover change during 2000-2015 in North China/km ²								
年份	地类	2015 年						
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	合计
2000	耕地	167 748	315	287	256	2 985	5	171 596
	林地	37	88 020	19	19	212	2	88 309
	草地	99	75	80 043	62	329	1	80 609
	水域	296	23	15	7 115	259	15	7 723
	建设用地	30	11	8	20	21 709	1	21 779
	未利用地	49	4	4	25	36	2 086	2 204
	合计	168 259	88 448	80 376	7 497	25 530	2 110	372 220

持续增加,水域和未利用地面积略有减少。林地和草地转入转出面积接近,因而总量变化不大。

2.3 PM_{2.5}对LUCC的响应分析

2.3.1 地理加权回归分析

为从整体上分析土地利用/覆被变化与PM_{2.5}变化的空间响应,本文将PM_{2.5}变化趋势作为因变量,以主要土地利用/覆被类型(包括建设用地、林地、草地、耕地)变化趋势作为解释变量,利用地理加权回归模型进行空间拟合分析。模型拟合Local R²为0.86,拟合效果良好。从拟合结果的标准化误差(StdResid)来看[图7(a)],值为-2~2的范

围占结果的94.34%,说明模型拟合的关系稳定^[34,35]。

从图7(b)可以看出,Local R²范围在0.000 5~0.805 0之间,结合土地利用/覆被数据来看,Local R²较低的区域为土地利用/覆被未发生变化的区域,而在土地利用/覆被变化明显的区域,Local R²较高,说明PM_{2.5}变化对土地利用/覆被变化有着显著的响应作用。

2.3.2 不同土地利用/覆被类型下的PM_{2.5}特征

由表4可以看出,林地的PM_{2.5}浓度均值最小,

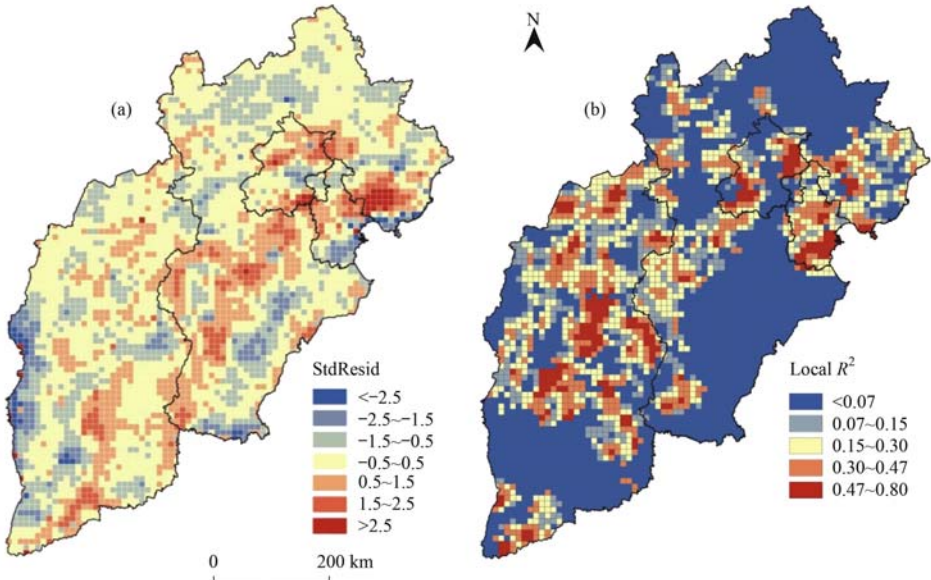


图 7 地理加权回归分析结果

Fig. 7 Results of GWR analysis

分别为 23.14 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 35.56 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 建设用地的 PM_{2.5} 浓度均值最大, 分别为 48.03 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 68.03 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 远高于其他土地利用/覆被类型, 浓度值接近林地的 2 倍. 耕地和水域的 PM_{2.5} 浓度值接近, 林地、草地和未利用地的 PM_{2.5} 浓度值接近. 可见, 不同土地利用/覆被条件下 PM_{2.5} 表现出不同的特征, 且

两个年份表现出完全一致的趋势, 即建设用地 > 耕地 > 水域 > 草地 > 林地 > 未利用地. 因此, 根据不同土地利用/覆被类型下的 PM_{2.5} 浓度特征, 可以将其划分为 3 个等级, 即严重污染, 包括建设用地; 中度污染, 包括耕地和水域; 轻度污染, 包括林地、草地和未利用地.

表 4 不同土地利用/覆被条件下的 PM_{2.5} 变化特征/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
Table 4 Characteristics of PM_{2.5} variation under different land use/cover types/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

地类	2000 年				2015 年			
	最大值	最小值	均值	标准差	最大值	最小值	均值	标准差
耕地	83.59	4.6	39.87	19.63	111.2	16.5	55.90	23.48
林地	74.3	5.6	23.14	9.44	98.5	16.4	35.56	10.02
草地	74.4	4.6	25.19	11.32	91.2	16.4	36.54	10.74
水域	82.7	6.2	36.91	16.68	98.4	16.6	55.87	20.41
建设用地	85.8	4.7	48.03	17.17	111.2	16.5	68.03	19.51
未利用地	63.3	5.8	20.54	13.79	100.1	16.5	35.10	20.11

2.3.3 不同转换方式下的 PM_{2.5} 特征

由于水域和未利用地占比较小, 本文选择耕地、林地、草地和建设用地这 4 种类型讨论土地利用/覆被类型转换对 PM_{2.5} 的影响. 此外, 由之前分析可以看出, 较之 2000 年, 研究区 2015 年 PM_{2.5} 浓度发生了较大幅度的增加, 而造成这一增加趋势的主要影响因素为 PM_{2.5} 排放量的增加, 并不是土地利用/覆被变化. 因此, 为了避开这一因素的影响, 单独讨论不同土地利用/覆被类型转换方式对 PM_{2.5} 浓度的影响, 首先对未发生土地利用类型转换的区域 PM_{2.5} 浓度变化进行分析(表 5).

以表 5 中的变化幅度作为参照变化幅度对发生土地利用/覆被类型转换的区域 PM_{2.5} 浓度变化特征进行分析. 用不同转换方式下的 PM_{2.5} 浓度变化幅度减去参照变化幅度, 得到该转换方式下的 PM_{2.5} 浓度变化趋势(表 6). 可以看出, 不同转换方式下 PM_{2.5}

表 5 未发生土地利用/覆被类型转换区域 PM_{2.5} 浓度变化/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
Table 5 Change in PM_{2.5} concentration in the areas without land use/cover change/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

类型	2000 年	2015 年	变化幅度
耕地	39.84	55.90	16.06
林地	23.12	35.56	12.45
草地	25.18	36.54	11.36
建设用地	48.07	68.85	20.78

浓度呈现不同的变化趋势, 当耕地转为林地、草地, 林地转为草地以及建设用地转为林地、草地时 PM_{2.5} 浓度呈现下降趋势. 而其他转换方式下, PM_{2.5} 浓度均呈现上升趋势. 如果把林地和草地划分为自然用地, 而把耕地和建设用地划分为人工用地, 那么当自然用地向人工用地转换时 PM_{2.5} 浓度上升, 而人工用地向自然用地转变时 PM_{2.5} 浓度降低.

表 6 不同土地利用/覆被类型转换方式下的 PM_{2.5} 浓度特征¹⁾/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
Table 6 Characteristics of PM_{2.5} variation under different land use/cover change types/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

转换类型	转换前	转换后	变化幅度	参照变化幅度	变化趋势
耕地转为林地	20.15	33.51	13.36	16.06	-2.70 ↓
耕地转为草地	27.64	35.55	7.91	16.06	-8.15 ↓
耕地转为建设用地	44.95	66.22	21.28	16.06	5.22 ↑
林地转为耕地	26.74	46.76	20.02	12.45	7.57 ↑
林地转为草地	30.63	39.52	8.89	12.45	-3.56 ↓
林地转为建设用地	29.99	49.06	19.08	12.45	6.63 ↑
草地转为耕地	16.36	28.48	12.12	11.36	0.76 ↑
草地转为林地	21.94	37.00	15.06	11.36	3.70 ↑
草地转为建设用地	29.40	43.95	14.55	11.36	3.19 ↑
建设用地转为耕地	40.06	68.21	28.15	20.78	7.38 ↑
建设用地转为林地	18.38	33.55	15.16	20.78	-5.61 ↓
建设用地转为草地	33.54	49.29	15.75	20.78	-5.03 ↓

1) ↓表示减少趋势; ↑表示增加趋势

3 结论

(1) 华北地区 $PM_{2.5}$ 浓度整体呈现东南高、西北低的空间格局,且 16 a 均保持这一态势没有变化. 时间上来看,在 2006 年达到污染最大值,之后虽有波动但一直居高不下. 多数城市 $PM_{2.5}$ 浓度超标,整体环境污染形势严峻.

(2) 2000 ~ 2015 年研究区土地利用类型/覆被以耕地、林地和草地为主,土地利用/覆被变化趋势主要表现为耕地的大量减少以及建设用地的持续增加,水域和未利用地面积略有减少. 林地和草地转入转出面积接近,因而总量变化不大.

(3) GWR 模型计算结果表明,Local R^2 较低的区域为土地利用/覆被未发生变化的区域,而在土地利用/覆被变化明显的区域,Local R^2 较高,说明 $PM_{2.5}$ 变化对土地利用/覆被变化有着显著的响应作用.

(4) 对于不同土地利用/覆被状况而言, $PM_{2.5}$ 分布特征表现出建设用地 > 耕地 > 水域 > 草地 > 林地 > 未利用地的趋势. 对于不同土地利用/覆被转换方式而言,当自然用地向人工用地转换则 $PM_{2.5}$ 浓度上升,而人工用地向自然用地转变则 $PM_{2.5}$ 浓度降低.

参考文献:

- [1] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [2] Luo Y, Teng M F, Yang K, *et al.* Research on $PM_{2.5}$ estimation and prediction method and changing characteristics analysis under long temporal and large spatial scale-A case study in China typical regions[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **696**: 133983.
- [3] Bilal M, Nichol J E, Spak S N. A new approach for estimation of fine particulate concentrations using satellite aerosol optical depth and binning of meteorological variables[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, **17**(2): 356-367.
- [4] 范雪波, 刘卫, 王广华, 等. 杭州市大气颗粒物浓度及组分的粒径分布[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(1): 13-18.
Fan X B, Liu W, Wang G H, *et al.* Size distributions of concentrations and chemical components in Hangzhou atmospheric particles[J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(1): 13-18.
- [5] Cakmak S, Dales R, Kauri L M, *et al.* Metal composition of fine particulate air pollution and acute changes in cardiorespiratory physiology[J]. *Environmental Pollution*, 2014, **189**: 208-214.
- [6] Weichenthal S A, Godri-Pollitt K, Villeneuve P J. $PM_{2.5}$, oxidant defence and cardiorespiratory health: a review[J]. *Environmental Health*, 2013, **12**(1): 40.
- [7] 郝静, 孙成, 郭兴宇, 等. 京津冀内陆平原区 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化定量模拟[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1455-1465.
Hao J, Sun C, Guo X Y, *et al.* Simulation of the spatio-temporally resolved $PM_{2.5}$ aerosol mass concentration over the inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1455-1465.
- [8] 时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 等. 近 20 年来中国 $PM_{2.5}$ 污染演变的时空过程[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 1-13.
Shi Y, Liu R M, Luo Y, *et al.* Spatiotemporal variations of $PM_{2.5}$ pollution evolution in China in recent 20 years [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 1-13.
- [9] Kinney P L, Gichuru M G, Volavka-Close N, *et al.* Traffic impacts on $PM_{2.5}$ air quality in Nairobi, Kenya [J]. *Environmental Science & Policy*, 2011, **14**(4): 369-378.
- [10] Meng J, Liu J F, Xu Y, *et al.* Tracing primary $PM_{2.5}$ emissions via Chinese supply chains[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, **10**(5): 054005.
- [11] 李雅男, 丁振民, 邓元杰, 等. 中国城市工业化发展与 $PM_{2.5}$ 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1987-1996.
Li Y N, Ding Z M, Deng Y J, *et al.* Relationship between urban industrialization and $PM_{2.5}$ in China: also discussing the internal mechanism of EKC[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1987-1996.
- [12] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 418-427.
Zhao C X, Wang Y Q, Wang Y J, *et al.* Temporal and spatial distribution of $PM_{2.5}$ and PM_{10} pollution status and the correlation of particulate matters and meteorological factors during winter and spring in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 418-427.
- [13] Bao C Z, Chai P F, Lin H B, *et al.* Association of $PM_{2.5}$ pollution with the pattern of human activity: a case study of a developed city in eastern China[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2016, **66**(12): 1202-1213.
- [14] Li L, Qian J, Ou C Q, *et al.* Spatial and temporal analysis of air pollution index and its timescale-dependent relationship with meteorological factors in Guangzhou, China, 2001-2011 [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **190**: 75-81.
- [15] 江琪, 王飞, 张恒德, 等. 北京市 $PM_{2.5}$ 和反应性气体浓度的变化特征及其与气象条件的关系[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(3): 829-837.
Jiang Q, Wang F, Zhang H D, *et al.* Analysis of temporal variation characteristics and meteorological conditions of reactive gas and $PM_{2.5}$ in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(3): 829-837.
- [16] 黄亚林, 刘超, 曾克峰, 等. 2013-2014 年武汉市 $PM_{2.5}$ 的时空分布特征及其与气象条件的关系[J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(8): 1330-1335.
Huang Y L, Liu C, Zeng K F, *et al.* Spatio-temporal distribution of $PM_{2.5}$ in Wuhan and its relationship with meteorological conditions in, 2013-2014 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(8): 1330-1335.
- [17] 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 等. 长江经济带 $PM_{2.5}$ 分布格局演变及其影响因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1013-1024.
Huang X G, Zhao J B, Cao J J, *et al.* Evolution of the distribution of $PM_{2.5}$ concentration in the Yangtze River Economic Belt and its influencing factors [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1013-1024.
- [18] Superczynski S D, Christopher S A. Exploring land use and land cover effects on air quality in Central Alabama using GIS and remote sensing [J]. *Remote Sensing*, 2011, **3**(12): 2552-2567.
- [19] Briggs D J, De Hoogh C, Gulliver J, *et al.* A regression-based method for mapping traffic-related air pollution: application and testing in four contrasting urban environments[J]. *Science of the*

- Total Environment, 2000, **253**(1-3): 151-167.
- [20] Liu C, Henderson B H, Wang D F, *et al.* A land use regression application into assessing spatial variation of intra-urban fine particulate matter (PM_{2.5}) and nitrogen dioxide (NO₂) concentrations in City of Shanghai, China [J]. Science of the Total Environment, 2016, **565**: 607-615.
- [21] Hajiloo F, Hamzeh S, Gheysari M. Impact assessment of meteorological and environmental parameters on PM_{2.5} concentrations using remote sensing data and GWR analysis (case study of Tehran) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(24): 24331-24345.
- [22] Guo J P, Xia F, Zhang Y, *et al.* Impact of diurnal variability and meteorological factors on the PM_{2.5}-AOD relationship: implications for PM_{2.5} remote sensing [J]. Environmental Pollution, 2017, **221**: 94-104.
- [23] 周侃, 樊杰. 中国环境污染源的区域差异及其社会经济影响因素——基于 339 个地级行政单元截面数据的实证分析 [J]. 地理学报, 2016, **71**(11): 1911-1925.
- Zhou K, Fan J. Regional disparity of environmental pollution source and its socio-economic influencing factors: based on the cross-section data of 339 cities at prefecture level or above in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, **71**(11): 1911-1925.
- [24] 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 等. 土地利用/土地覆被变化 (LUCC) 模型研究进展 [J]. 地理学报, 2009, **64**(4): 456-468.
- Tang H J, Wu W B, Yang P, *et al.* Recent progresses of land use and land cover change (LUCC) Models [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, **64**(4): 456-468.
- [25] 孙倩, 塔西甫拉提·特依拜, 张飞, 等. 渭干河-库车河三角洲绿洲土地利用/覆被时空变化遥感研究 [J]. 生态学报, 2012, **32**(10): 3252-3265.
- Sun Q, Tashpolat T, Zhang F, *et al.* Dynamics of land use/cover changes in the Weigan and Kuqa rivers delta oasis based on Remote Sensing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(10): 3252-3265.
- [26] 孙爽, 李令军, 赵文吉, 等. 京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析 [J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1585-1593.
- Sun S, Li L J, Zhao W J, *et al.* Variation in pollutant concentrations and correlation analysis with the vegetation index in Beijing-Tianjin-Hebei [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1585-1593.
- [27] Van Donkelaar A, Martin R V, Li C, *et al.* Regional estimates of chemical composition of fine particulate matter using a combined geoscience-statistical method with information from satellites, models, and monitors [J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(5): 2595-2611.
- [28] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 等. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析 [J]. 地理学报, 2018, **73**(1): 177-191.
- Liu H M, Fang C L, Huang J J, *et al.* The spatial-temporal characteristics and influencing factors of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, **73**(1): 177-191.
- [29] 徐新良, 刘纪元, 张树文, 等. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集 (CNLUCC) [DB/OL]. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统, 2018, doi: 10.12078/2018070201.
- [30] Feng Y J, Chen X J, Gao F, *et al.* Impacts of changing scale on Getis-Ord Gi* hotspots of CPUE: a case study of the neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the northwest Pacific Ocean [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2018, **37**(5): 67-76.
- [31] Namayande M S, Nejadkoorki F, Namayande S M, *et al.* Spatial hotspot analysis of acute myocardial infarction events in an urban population: a correlation study of health problems and industrial installation [J]. Iranian Journal of Public Health, 2016, **45**(1): 94-101.
- [32] Propastin P. Modifying geographically weighted regression for estimating aboveground biomass in tropical rainforests by multispectral remote sensing data [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, **18**: 82-90.
- [33] HJ 633-2012, 环境空气质量指数 (AQI) 技术规定 (试行) [S].
- [34] 张西雅, 扈海波. 京津冀地区气溶胶时空分布及与城市化关系的研究 [J]. 大气科学, 2017, **41**(4): 797-810.
- Zhang X Y, Hu H B. Spatio-temporal characteristics of aerosol optical depth and their relationship with urbanization over Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, **41**(4): 797-810.
- [35] 庞瑞秋, 腾飞, 魏治. 基于地理加权回归的吉林省人口城镇化动力机制分析 [J]. 地理科学, 2014, **34**(10): 1210-1217.
- Pang R Q, Teng F, Wei Y. A GWR-based study on dynamic mechanism of population urbanization in Jilin Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, **34**(10): 1210-1217.

CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM _{2.5} Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO _x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohe Estuary and the Related Influencing Factors	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe ⁰ /WMF)	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO ₂ and CH ₄ Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N ₂ O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)