

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.5
第41卷 第5期

目次

上海大气 PM _{2.5} 来源解析对比: 基于在线数据运用 3 种受体模型	周敏 (1997)
不同浓度臭氧对单颗粒气溶胶化学组成的影响	吴梦曦, 成春雷, 黄渤, 李梅, 陈多宏 (2006)
二次有机气溶胶壳对氯化钠核吸湿性的影响: 基于单颗粒微观尺度	张淑佳, 徐亮, 郭新梅, 黄道, 李卫军 (2017)
城区与县区不同空气质量下碳组分污染特征对比分析	李欣悦, 张凯山, 邓林俐, 向铤鹏, 武文琪, 殷子渊 (2026)
临沂市 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 中元素分布特征及来源解析	陆平, 赵雪艳, 殷宝辉, 张楠, 王歆华, 余浩, 杨文, 王晓丽 (2036)
西安市秋冬季市区与山区微生物气溶胶组成特征及来源	谢雯文, 路瑞, 慕飞飞, 戚玉珍, 白文艳, 李彦鹏 (2044)
北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征	何万清, 王天意, 邵霞, 聂磊, 石爱军 (2050)
基于随机森林模型的中国 PM _{2.5} 浓度影响因素分析	夏晓圣, 陈菁菁, 王佳佳, 程先富 (2057)
大气污染联合治理分区视角下的中国 PM _{2.5} 关联关系时空变异特征分析	杨文涛, 黄慧坤, 魏东升, 赵斌, 彭焕华 (2066)
基于地-空观测数据的粤港澳大湾区大气污染调查及时空演变特征	王耀庭, 梁加成, 郑祚芳, 李青春, 李威, 窦俊 (2075)
龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因	唐春雷, 郑秀清, 梁永平 (2087)
三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析	唐小娅, 童思陈, 黄国鲜, 许光祥, 李丹 (2096)
三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征	杨凡, 纪道斌, 王丽婧, 李虹, 李莹杰 (2107)
汉丰湖正式运行年水体营养盐分布特征	付适, 倪九派, 何丙辉, 李天阳, 唐毅, 钱田, 向可翠 (2116)
白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征	刘鑫, 史斌, 孟晶, 周云桥, 可欣, 王铁宇 (2127)
新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应	史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 刘明亮, 虞左明, 吴志旭, 郑文婷, 王裕成, 笄文怡, 胡林娜 (2137)
不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征	张柳青, 石玉, 李元鹏, 郭燕妮, 周蕾, 周永强, 张运林, 杨艳 (2149)
水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价	李衍庆, 黄廷林, 张海涵, 温成成, 杨尚业, 林子深, 高欣 (2158)
人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响	王晨旭, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 徐金兰, 司凡, 张晗, 路林超 (2166)
雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 岳智丞, 张航, 王周强, 刘世崇, 彭瑞哲, 苑世超, 李再兴, 崔建升 (2177)
分层型水库水体好氧不产氧光合细菌时空演替特征	张海涵, 王燕, 黄廷林, 王晨旭, 路林超, 司凡, 李楠, 刘凯文, 闫苗苗, 苗雨甜 (2188)
大型通江湖泊有色可溶性有机物对不同水文情景的响应	郭燕妮, 李元鹏, 石玉, 张柳青, 周蕾, 周永强, 张运林, 韩龙飞 (2198)
秦岭北麓河流夏季有色溶解有机物分布特征及影响因素	林子深, 黄廷林, 杨尚业, 温成成, 李衍庆, 周石磊, 宋选社 (2210)
长江下游流水体中多环芳烃的分布及生态风险评估	贾天琪, 雷荣荣, 武小琳, 倪涛涛, 孙树睿, 郭伟, 刘文彬 (2221)
太湖水体中 NSAIDs 的时空分布规律和生态风险评价	廉杰, 李祎飞, 王晓喧, 叶彬, 邹华, 史红星 (2229)
8 种典型 PhACs 在水中的赋存、生态风险及其对大型溞的影响	徐鑫磊, 刘建超, 陆光华 (2239)
我国南方桉树人工林区水库沉积物污染物的分布特征及迁移规律	朱雅, 李一平, 罗凡, 李荣辉, 黄列, 程一鑫, 蒋裕丰 (2247)
基于连续监测的城市内河返黑返臭机制初探: 以南宁市二坑溪为例	李永新, 王威, 何妹, 申泰铭 (2257)
城郊流域源汇景观格局与水体抗生菌的关系	李敏, 唐剑峰, 陈利顶, 赵方凯, 冯青郁, 杨磊 (2264)
城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性	聂云汉, 陈浩, 李磊, 朱奔, 赵昕, 贾其隆, 徐慧婷, 叶建峰 (2272)
方解石/氯磷灰石混合物添加对水体内源磷迁移转化的调控效应和机制	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 吴俊麟, 辛慧敏, 黄良君 (2281)
不同环境条件下铁矿物和针铁矿纳米颗粒稳定性	王智巧, 马杰, 陈雅丽, 翁莉萍, 顾亚陶, 李永涛 (2292)
向日葵秸秆生物炭强化 Fe(III)/S ₂ O ₈ ²⁻ 体系降解苯甲酸	孙鹏, 张凯凯, 张玉, 张延荣 (2301)
非活化单过硫酸盐降解柳氮磺胺吡啶: 动力学及机制	丁曦, 张学维, 周润生, 宋哲, 严佳颖, 周磊, 修光利 (2310)
贵州某规模化养猪场废水中抗生素的污染特征及去除效果	杨钊, 李江, 向福亮, 李彦澄, 马凯, 谢锋 (2320)
新型填料 A/O 生物滤池处理低碳氮比农村污水脱氮	赵远哲, 杨永哲, 王海燕, 储昭升, 常洋, 董伟羊, 闫国凯, 王欢, 李丛宇 (2329)
贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析	文刚, 王彤, 黄廷林, 万琪琪, 曹瑞华, 寇莉青, 杨尚业 (2339)
连续流 SNAD 工艺处理猪场沼液启动过程中微生物种群演变及脱氮性能	秦嘉伟, 信欣, 鲁航, 张萍萍, 王露蓉, 邹长武, 郭俊元 (2349)
不同培养条件厌氧氨氧化颗粒污泥性质及微生物群落结构差异	姜澄, 郭萌蕾, 谢军祥, 常尧彬, 谢嘉玮, 陈重军, 沈耀良 (2358)
反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动	陈亚, 印雯, 张星星, 张钰, 宋吟玲, 吴鹏, 徐乐中 (2367)
土壤环境承载力评价体系构建与应用	李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿 (2373)
磁性生物炭的合成及对土壤重金属污染的钝化效果	王俊楠, 程珊珊, 展文豪, 任强, 马晓宇, 王洋洋 (2381)
还原增溶强化 EGTA 淋洗修复重金属污染土壤	张金永, 朱玉婷, 王明新, 韩堂, 葛嘉琦 (2390)
不同价态铬和土壤理化性质对大麦根系毒性阈值的影响	付平南, 贡晓飞, 罗丽韵, 王琪, 李花粉 (2398)
生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响	王舒, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 慈恩, 徐国鑫, 李妍, 高明 (2406)
长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系	王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 吴少君, 卢绪巧, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (2416)
施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响	王强, 耿增超, 许晨阳, 郭靖宇, 李倩倩, 刘莉丽, 赵汉红, 杜旭光 (2425)
间种高粱及施用大颗粒尿素对茶园 N ₂ O 排放的影响	张珂彬, 刘新亮, 康曼, 王毅, 沈健林, 李勇 (2434)
缙云山森林植被类型对土壤 N ₂ O 相关功能微生物的影响	王盛燕, 王富华, 罗东海, 吕盛, 王子芳, 高明 (2445)
咸水滴灌对棉田土壤 N ₂ O 排放和反硝化细菌群落结构的影响	郭慧楠, 马丽娟, 黄志杰, 李美琪, 侯振安, 阎伟 (2455)
有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响	储成, 吴赵越, 黄欠如, 韩成, 钟文辉 (2468)
模拟酸雨对毛竹阔叶林过渡带土壤真菌结构及其多样性的影响	王楠, 潘小承, 王传宽, 白尚斌 (2476)
海洋沉积物中细菌 DNA 和 RNA 水平群落差异	李明月, 杨雨虹, 米铁柱, 贺惠, 甄毓 (2485)
2003 ~ 2013 年中国湿地变化的空间格局与关联性	周婷, 马姣姣, 徐颂军 (2496)

大气污染联合治理分区视角下的中国 $\text{PM}_{2.5}$ 关联关系时空变异特征分析

杨文涛^{1,2}, 黄慧坤^{1,3}, 魏东升⁴, 赵斌³, 彭焕华²

(1. 湖南科技大学地理信息系, 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学地理空间信息技术国家地方联合工程实验室, 湘潭 411201; 3. 中南大学地质资源与地质工程系, 长沙 410000; 4. 中南林业科技大学测绘工程系, 长沙 410000)

摘要: 联合治理分区下 $\text{PM}_{2.5}$ 关联关系时空变异特征识别对中国大气污染防治意义重大. 本文主要基于 2000 ~ 2016 年遥感反演的中国大陆 334 个地级市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据, 利用空间单元聚合策略与地理时空加权回归技术, 系统分析了大气污染联合治理分区视角下的中国 $\text{PM}_{2.5}$ 关联关系时空变异特征. 结果表明: ①以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物, 综合考虑污染程度、地理位置、气象、地形和经济等因素可将中国大陆地区划分为 10 个大气污染联合治理区. ②地理时空加权回归能够有效刻画 $\text{PM}_{2.5}$ 与关联因素间的时空非平稳关系. 同时, 人口规模、第二产业生产总值、 SO_2 排放量、年平均气温、年降水量以及年平均相对湿度被识别出对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化影响存在显著时空差异. ③人口规模对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响程度各年最大的地区均为京津冀蒙区域; 川渝滇黔区域中第二产业生产总值对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响程度变异度最大, 在黑吉辽区域之外, SO_2 排放量回归系数值均先随时间逐渐减小再增大最后又减小; 各治理区中年平均温度对 $\text{PM}_{2.5}$ 影响程度的时间变异程度较小; 而年降水量与年平均相对湿度对 $\text{PM}_{2.5}$ 影响程度在各区域中呈现不同的变异特征.

关键词: 细颗粒物; 区域联合治理; 遥感数据; 时空变异性; 地理时空加权回归模型

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2020)05-2066-09 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.201908125

Spatio-temporal Variation of $\text{PM}_{2.5}$ Related Relationships in China from the Perspective of Air Pollution Regional Linkage Control and Prevention

YANG Wen-tao^{1,2}, HUANG Hui-kun^{1,3}, WEI Dong-sheng⁴, ZHAO Bin³, PENG Huan-hua²

(1. Department of Geographical Information Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. National-Local Joint Engineering Laboratory of Geo-Spatial Information Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. Department of Geological Engineering, Central South University, Changsha 410000, China; 4. Department of Surveying and Mapping Engineering, Central South University of Forest and Technology, Changsha 410000, China)

Abstract: Identification of spatio-temporal variation of $\text{PM}_{2.5}$ related relationships under joint management zones is of great significance for scientifically conducting joint control of air pollution in China. Based on the $\text{PM}_{2.5}$ concentration data of 334 prefecture-level cities in China from 2000 to 2016, from the perspective of air pollution regional linkage control and prevention, this paper systematically analyzes the spatio-temporal variation of $\text{PM}_{2.5}$ related relationships in China using a spatial unit aggregation strategy and geographically and temporally weighted regression. The results show that: ① With $\text{PM}_{2.5}$ as the primary pollutant, ten air pollution joint management areas are obtained by considering the degree of pollution, geographical location, meteorology, topography, and economy. ② Geographically and temporally weighted regression can effectively reveal the spatio-temporal non-stationarity of the relationships between $\text{PM}_{2.5}$ concentration and related factors. Meanwhile, population size, secondary industry gross domestic product, SO_2 emissions, annual average temperature, annual precipitation, and annual relative humidity are identified as having a significant effect on changes in $\text{PM}_{2.5}$ concentration. ③ The population impacts on $\text{PM}_{2.5}$ concentration in the Beijing-Tianjin-Yunmeng region are the largest of all regions during the period. The influence of the secondary industry's gross domestic product on the $\text{PM}_{2.5}$ concentration in the Sichuan-Yunnan District is the most variable. Apart from these values in the northeast of China, the regression coefficient values of SO_2 emissions first decrease with time, then increase, and then decrease again. The time variability of the average annual temperature of each treatment area to $\text{PM}_{2.5}$ is small. The influences of annual precipitation and annual average relative humidity on $\text{PM}_{2.5}$ present different variability characteristics in each region.

Key words: $\text{PM}_{2.5}$; regional linkage control and prevention; remote sensing data; spatio-temporal variation; geographically and temporally weighted regression

改革开放以来,粗放型经济发展模式在满足我国人民日益增长的物质文化需求的同时,给我国生态环境带来了极为严峻的挑战.当前,以细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)为特征的区域性大气污染问题尤为突出,严重威胁着人民群众身体健康,制约着社会经济可持续发展.有研究显示,2013年中国近83%的人口暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 年

均浓度高于空气质量二级阈值[《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)]的污染环境中, $\text{PM}_{2.5}$ 暴露导致

收稿日期: 2019-08-14; 修订日期: 2019-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801311); 湖南省自然科学基金项目(2018JJ3150)

作者简介: 杨文涛(1988~),男,博士,讲师,主要研究方向为地理时空数据分析与挖掘, E-mail: yangwentao8868@126.com

约 130 万人过早死亡^[1], 2017 年全国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染健康经济损失约占当年 GDP 的 1.53%^[2], 近十年来环境污染治理成本已达到 GDP 的 10%^[3]. 面临空前严峻的大气污染形势, 我国政府明确提出防治大气污染, 转变经济发展模式, 优化产业结构和布局、调整能源结构, 推行区域大气污染联合防治。

针对细颗粒物为特征的大气污染防治, 首先需要回答, 究竟有哪些因素与细颗粒物存在关联, 关联机制是否随时空发生变化, 如何变化. 以这一系列问题为导向, 国内外学者已进行了大量研究, 较多研究集中于局地/区域空间尺度或较短时间跨度, 由于各区域的污染关联因素(自然因素或社会经济因素)呈现显著的时空变异性, 即不同区域在同一时期的关联机制各异, 同一区域关联机制亦随时间发生变化, 使得 $\text{PM}_{2.5}$ 关联分析结果存在明显的差异^[4~12]. 此外, 从大气污染治理的角度看, 大气污染的外溢性引起治理责任界定模糊, 各自为政的方式会导致“搭便车”等问题, 只有相邻地区的联合和突破行政边界, 摸清大气污染潜在的关联机制, 形成污染治理合力才能有效地控制污染物的转移^[13], 因此, 联合治理分区下 $\text{PM}_{2.5}$ 关联关系时空变异特征识别对有效大气污染联合治理具有重要的现实意义. 然而, 我国虽然已成立京津冀与长三角区域大气污染防治小组, 但目前国家尺度上大气污染防治联合分区规模尚未成熟, 全国统筹的大气污染联合治理框架仍未形成^[14,15]. 国内学者虽然从不同的视角出发, 构建了大气污染联防联控划分方案, 但是, 划分策略不同与选择因素各异导致分区结果的不一致^[16,17]. 鉴于不同污染物的形成与关联机制存在差异^[18~20], 基于不同的污染物构建的分区可能不尽相同, 故迫切需要针对当前细颗粒物造成的污染, 建立污染联合治理分区方案, 实现大气污染联合治理分区下 $\text{PM}_{2.5}$ 关联关系时空变异特征识别。

为此, 本文基于 2000 ~ 2016 年遥感反演的 $\text{PM}_{2.5}$ 数据与社会经济数据等, 利用地理时空加权回归模型, 识别 334 个地级市 $\text{PM}_{2.5}$ 关联关系的时空变异特征, 在此基础上, 针对国家尺度大气污染防治对区域性 $\text{PM}_{2.5}$ 关联关系识别的迫切需求, 建立以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的大气污染联合治理分区方案, 通过空间单元聚合分析不同 $\text{PM}_{2.5}$ 关联关系时空变异特征, 以期对区域大气污染联合防治提供有效的决策支撑信息。

1 材料与方法

1.1 数据来源与处理

本研究所采用的 $\text{PM}_{2.5}$ 数据来源于 MODIS、

MISR 以及 SeaWiFS 气溶胶反演的全球 2000 ~ 2016 年年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度格网数据集 (<https://beta.sedac.ciesin.columbia.edu>), 空间分辨率为 1km. 考虑到城市是人类活动最为强烈的区域, 亦是 $\text{PM}_{2.5}$ 污染事件发生的主要区域, 本文以我国大陆地区 334 个地级市为初始的分析单元, 采用 2000 ~ 2012 年的 DMSP/OLS 以及 2013 ~ 2016 年 NPP/VIIRS 夜间灯光数据 (<https://ngdc.noaa.gov/>) 分别对每年城市建成区的范围进行提取^[21], 图 1 为提取 2005 年全国城市建成区的空间分布, 将各地级市范围内建成区包含格网中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值设置为分析单元的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值. 自然因素主要包括: 我国大陆地区 607 个气象站点记录 2000 ~ 2016 年的年平均气温、年降水量以及年平均相对湿度(数据来源于 <http://data.cma.cn>). 社会经济数据则直接来源于 2000 ~ 2016 年城市统计年鉴 (<http://www.stats.gov.cn>), 主要包括: 国内生产总值、第二产业生产总量、地区人口数量、 SO_2 排放量和城市年用电量。

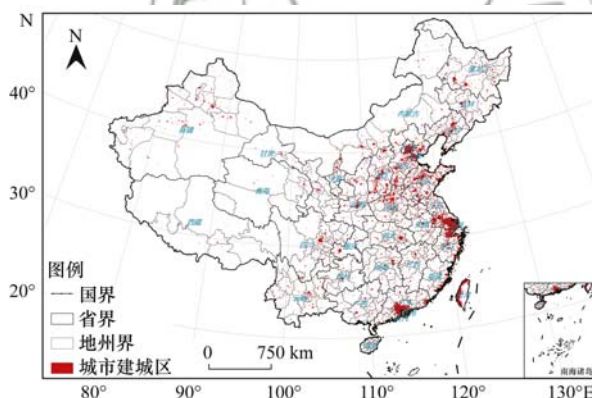


图 1 2005 年我国城市建成区空间分布示意

Fig. 1 Spatial distribution of built-up areas of Chinese cities in 2005

1.2 研究方法

1.2.1 大气污染联合治理分区策略

本文以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物, 综合考虑污染程度、地理位置、气象、地形和经济等因素建立大气污染联合治理分区方案^[14]. $\text{PM}_{2.5}$ 污染严重的区域是治理主要关注点, 因此, 可将污染程度转化为污染中心地条件, 依据污染中心地条件识别不同类型污染区域, 进一步以重点区为分区的逻辑起点, 兼顾其它因素进行污染治理联合分区. 地形与气象条件直接影响污染物扩散与输送, 同时该物理过程在空间的连续性决定了在风向路径上地理位置越邻近的地区越容易产生跨区污染问题, 故风向与地理邻近是区域划分的约束条件. 此外, 城市经济联系度高的地区通常表现为政府、企业间强关联度, 此条件下联合治理效率高, 经济联系度应作为区域划分因素之一. 城市 i 与 j 之间经济联系度 T_{ij} 可利用空间交互模型进

行测度,其表达式如下:

$$T_{ij} = (G_i \times G_j) / d_{ij}^2 \quad (1)$$

式中, G_i 与 G_j 表示城市 i 与 j 的经济总量, d_{ij} 为城市间的空间距离。

基于上述分析可以定义大气污染防治分区方案:首先,构建省份间空间邻近关系的 0~1 矩阵(有公共边界的省份定义为相邻,元素值设为 1,否则为 0),并依据式(1)计算省份间社会经济关联距离矩阵;然后,对各省份污染物浓度进行分级,参考《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中 $PM_{2.5}$ 年平均浓度一、二级限值,按照年平均浓度 0~15、15~25、25~35、35~45 与 $>45 \mu g \cdot m^{-3}$ 识别出污染轻微污染区、较轻度污染区、中度污染区、较重污染区与重度污染区;在此基础上,以重度污染区为逻辑起点,合并其风向路径上最大经济联系度的空间邻近单元,依次对其它污染类型区域进行处理,直到所有区域均被遍历一次。

1.2.2 地理空加权回归模型

地理时空加权回归 (geographically and temporally weighted regression, GTWR) 是在经典地理加权回归的基础上,通过构建时空依赖的局部模型对时空非平稳关系建模^[22,23]。由于该模型能够较好地刻画变量间关系的时空变异,近年来受到了广泛地关注与应用^[24~26]。GTWR 模型的表达式为:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i, t_i) \times x_{ik} + \varepsilon_i \quad (2)$$

式中, (u_i, v_i, t_i) 表示 i 个观测点 ($i=1, 2, \dots, n$, n 为观测样本数) 的空间与时间位置信息, y_i 与 x_{ik} 分别为第 i 个观测点因变量与自变量, $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 与 $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 分别表示第 i 个观测点所在位置回归模型的常数项与系数项, ε_i 表示模型的随机误差项。回归系数的估计值可以表示为:

$$\beta = [X^T W(u_i, v_i, t_i) X]^{-1} X^T W(u_i, v_i, t_i) Y \quad (3)$$

式中,权重 $W(u_i, v_i, t_i) = \text{diag}(\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{in})$, α_{ij} 为观测点 j 的样本权重。在对第 i 观测点对应模型的参数估计中,通常假设:离观测点 i 时空距离越近的样本点 j 其重要性越大,该点观测值对应的权重 α_{ij} 赋予较大的值,而距离较远的观测点则被赋予较小的权值。此外,考虑到空间与时间尺度效应的差异,GTWR 在定义时空耦合距离基础上,建立时空距离衰减函数来计算权重。

2 结果与讨论

2.1 $PM_{2.5}$ 污染联合治理分区结果

依据 1.2.1 节中大气污染防治分区方案,首先,

基于空间拓扑关系判断省份间是否存在公共边,构建描述空间邻近关系的 0~1 矩阵,并计算省份间经济联系度;然后,按照年平均浓度 0~15、15~25、25~35、35~45 与 $>45 \mu g \cdot (m^3)^{-1}$ 对 2016 年的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度进行分级,识别出轻微污染区、较轻度污染区、中度污染区、较重污染区与重度污染区(图 2)。在此基础上,通过合并风向路径上最大经济联系度的空间邻近单元,最终得到 10 个联合治理区(图 3),分别为: I 区苏皖沪浙、II 区陕晋豫鲁、III 区鄂湘赣、IV 区黑吉辽、V 区桂粤闽琼、VI 区京津冀蒙、VII 区川渝滇黔、VIII 区宁甘、IX 区青藏与 X 区新疆。

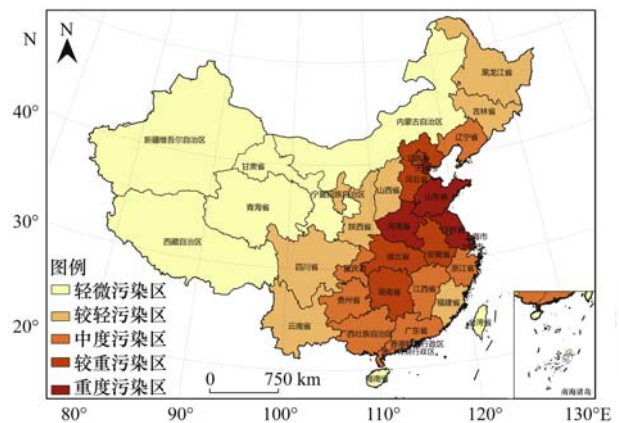


图 2 全国 $PM_{2.5}$ 污染分级结果

Fig. 2 Graded results of $PM_{2.5}$ pollution in China

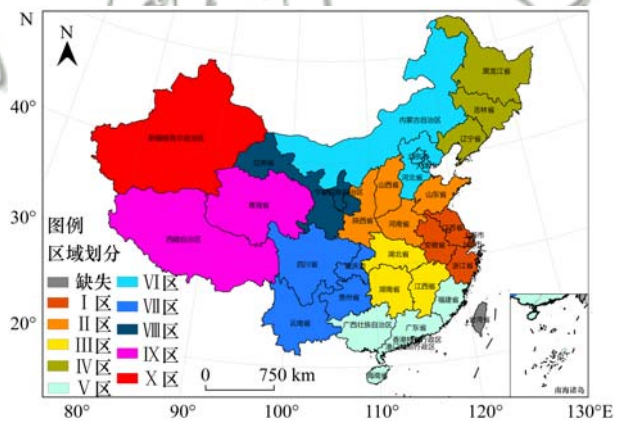


图 3 大气污染联合治理分区结果

Fig. 3 Results of zoning for air pollution regional linkage control and prevention

2.2 GTWR 模型的有效性分析

采用 GTWR 对数据集进行建模分析,可以得到 334 个地级市 $PM_{2.5}$ 关联因素的回归系数值。为了评价 GTWR 结果的有效性,选择普通最小二乘回归 (OLS) 与地理加权回归 (GWR) 对比分析。其中,OLS 通过建立全局模型来描述变量间的关系,而 GWR 通过参数空间依赖的局部模型对变量间关系的空间非平稳性进行表达,GTWR 则能够同时对时间与空间非平稳关系建模。以 ArcGIS 10.2 为实验平台,通

过载入 GTWR_Beta 安装包实现 GTWR、OLS 与 GWR 模型的运行 (http://www.grm.cuhk.edu.hk/~huangbo/GTW_R/GTWR_AddIn.rar). 不同模型的精度表列入表 1, 可以发现: GTWR 的模型 AICc 的值为 45 179. 21, 小于 OLS 的 AICc 值 (53 321. 04); GTWR 模型的决定系数 (R^2) 以及调整后的决定系数 (R^2_{adj}) 均为 0. 81, 远大于 OLS 与 GWR 对应的值; GTWR、OLS 与 GWR 模型拟合结果的均方根误差 (RMSE) 分别为 10. 17、20. 29 与 13. 27, 其中, GTWR 模型的 RMSE 最小, 不同的评价指标值均证实 GTWR 模型效果优于 OLS 与 GWR 模型, 即 PM_{2.5} 与其关联因子间关系存在时空变异特征. 此外, 通过多重共线性分析以及统计 T 检验, 最终识别出 6 个解释变量, 即: 人口规模 (千万)、第二产业生产总值 (千亿)、SO₂ 排放量 (万 t)、年平均气温 (°C)、年降水量 (100 mm) 以及年平均相对湿度 (%).

2.3 治理分区视角下 PM_{2.5} 浓度关联关系时空变异性分析

以 2.1 节中识别出的 10 个联合治理区为基础,

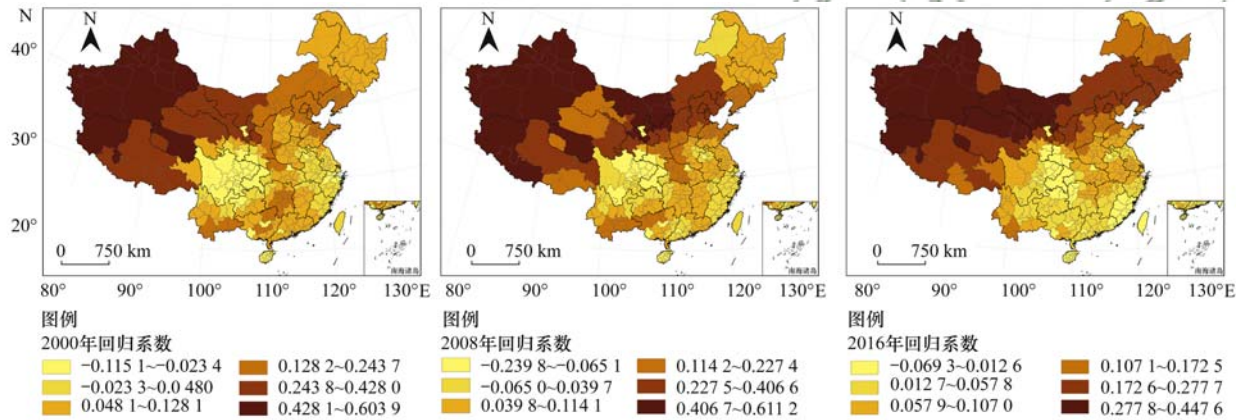


图 4 人口因素回归系数空间分布 (2000、2008 与 2016 年)

Fig. 4 Spatial distribution of population regression coefficient (2000, 2008, and 2016)

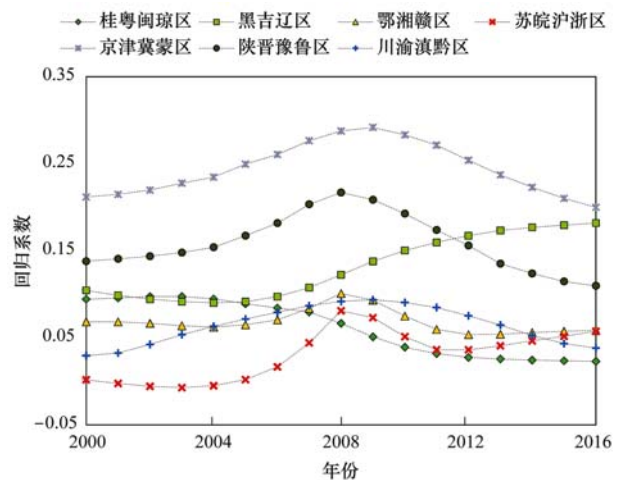


图 5 各治理区人口回归系数值变化曲线

Fig. 5 Change curve of population regression coefficient in management areas

表 1 不同模型的精度评价结果			
Table 1 Results of accuracy evaluation of different models			
指标	GTWR	OLS	GWR
AICc	45 179. 21	53 321. 04	—
R^2	0. 81	0. 24	0. 64
R^2_{adj}	0. 81	0. 23	0. 63
RMSE	10. 17	20. 29	13. 27

分别对各区域中关联因素的回归系数值进行统计聚合, 得到不同治理区的 PM_{2.5} 关联因素回归系数值变化曲线. 考虑到Ⅷ区 (宁甘)、Ⅸ区 (青藏) 与Ⅹ区 (新疆) 污染程度低, 因此, 本研究重点分析其它治理区中 PM_{2.5} 关联关系时空变异特征.

2.3.1 人口因素回归系数值的时空变异特征

由 GTWR 模型分析出的人口因素回归系数值 (2000、2008 与 2016 年回归系数值的空间分布如图 4 所示) 可发现: 人口规模对 PM_{2.5} 浓度的影响主要表现为正向相关, 其中, 影响较高的主要集中于西北与华北地区. 各治理区中回归系数值随时间变化的曲线如图 5 所示. 依据曲线形态的不同, 可将治理区

分为三类模式: 第一类为“先增后减”型, 回归系数值随时间先增大后减小, 该类包括: I 区 (苏皖沪浙)、II 区 (陕晋豫鲁)、III 区 (鄂湘赣)、IV 区 (京津冀蒙) 与 VII 区 (川渝滇黔); 第二类为“先减后增”型, 回归系数值总体上随时间先减小后增大, 该类包括: IV 区 (黑吉辽); 第三类为“单调递减”型, 回归系数值总体上随时间逐渐减小, 该类包括: V 区 (桂粤闽琼). 从个体水平上看, VI 区 (京津冀蒙) 人口因素在 2000 ~ 2016 年对 PM_{2.5} 浓度的影响程度均是最大的, 平均值约为 $0.25 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{千万人口})^{-1}$, 这意味着该区域中城市每增加 1 千万人口, PM_{2.5} 年平均浓度上升约 $0.25 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 而 2000 ~ 2008 年间人口因素影响程度最小为 I 区 (苏皖沪浙), 其回归系数值均接近 $0 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{千万人口})^{-1}$, 2009 ~ 2016 年间

人口因素回归系数值最低为 V 区(桂粤闽琼),约为 $0.02 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{千万人口})^{-1}$.

2.3.2 第二产业生产总值回归系数值的时空变异特征

由 GTWR 所得到第二产业生产总值回归系数

值(2000、2008 与 2016 年回归系数值的空间分布如图 6 所示)可发现:在整个研究时空范围内,该因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度既有正相关又存在负相关.通过空间统计聚合得到各治理区中第二产业生产总值回归系数值的变化曲线如图 7 所示.依据曲线形态的不同,可

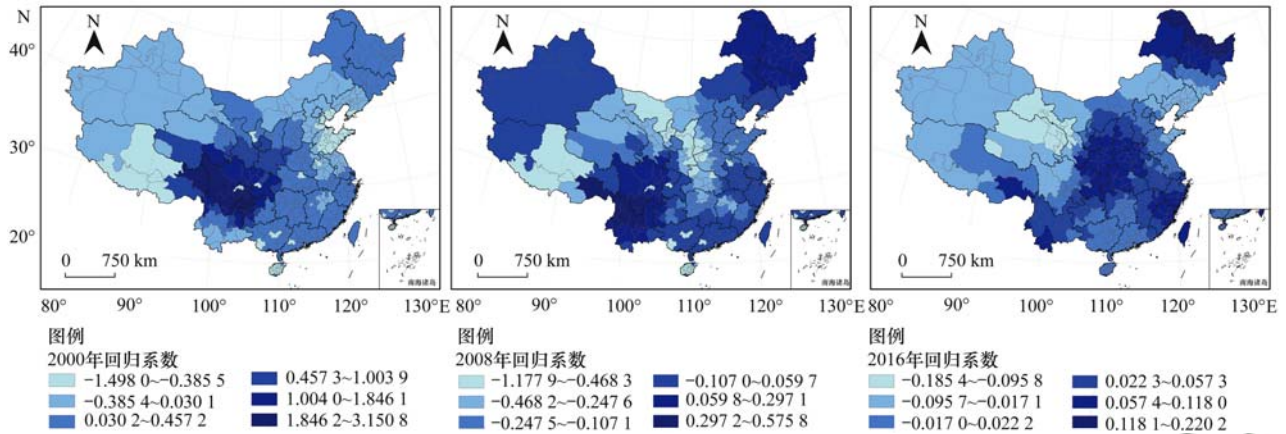


图 6 第二产业生产总值回归系数值空间分布(2000、2008 与 2016 年)

Fig. 6 Spatial distribution of regression coefficient of total amount of secondary industry (2000, 2008, and 2016)

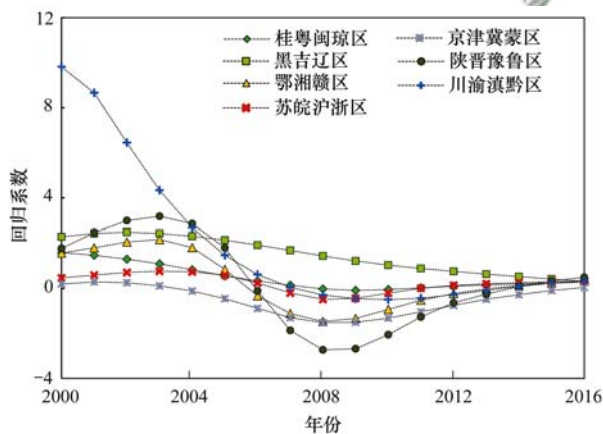


图 7 各治理区第二产业生产总值回归系数值变化曲线

Fig. 7 Change curve of regression coefficient of total amount of secondary industry in management areas

以识别出两类模式:第一类为“单调递减”型,该类包括:IV 区(黑吉辽)、V 区(桂粤闽琼)与 VII 区(川渝滇黔);第二类为“先增再减后增”型,回归系数值大致上先随时间逐渐增大再减小最后又增大,该类包括: I 区(苏皖沪浙)、II 区(陕晋豫鲁)、III 区(鄂湘赣)以及 VI 区(京津冀冀蒙).其中, VII 区(川渝滇黔)回归系数值变异程度最大,由 2000 年的约 $10 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{千亿元})^{-1}$ 逐渐减小到 2008 年的 $0 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{千亿元})^{-1}$,随后趋于稳定.

2.3.3 SO_2 排放量回归系数值的时空变异特征

由 GTWR 所得到 SO_2 排放量回归系数值(2000、2008 与 2016 年回归系数值的空间分布如图 8 所示)可发现:在整个研究时空范围中, SO_2 排放量对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响主要呈正相关关系,部分负相

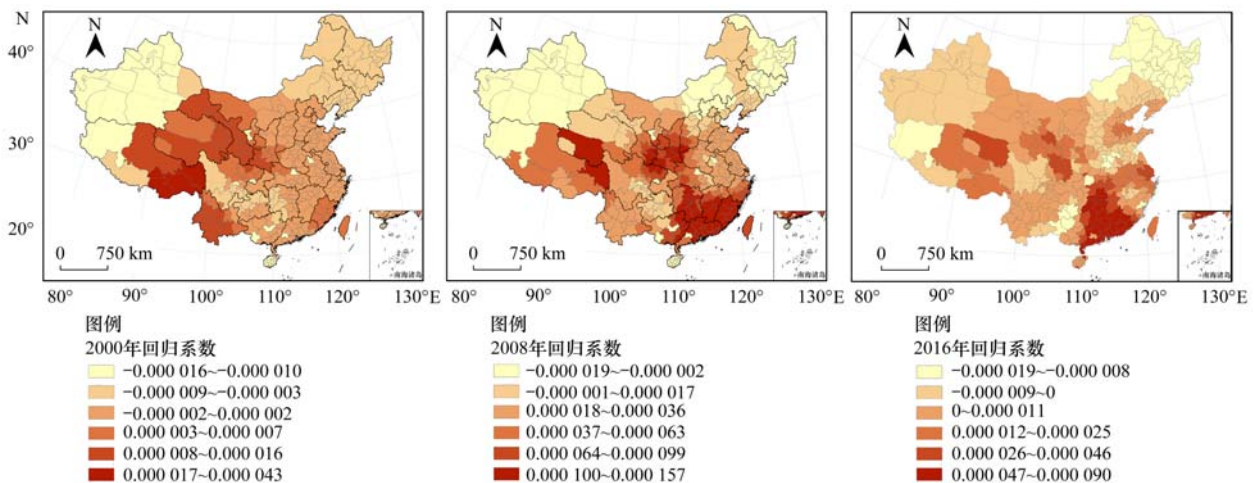


图 8 SO_2 排放量回归系数值空间分布(2000、2008 与 2016 年)

Fig. 8 Spatial distribution of regression coefficient of SO_2 emissions (2000, 2008, and 2016)

关的地区主要集中在西北与东北地区. 依据图 9 中回归系数值变化曲线可知: 仅 IV 区(黑吉辽)的回归系数值变异程度较小, 呈现“平稳”型变化特征, 其它区域的回归系数值均表现为“先减再增后降”型, 即回归系数值大致上先随时间逐渐减小再增大最后又减小. 其中, 2007 与 2010 年左右的回归系数值分别对应的极小值与极大值, 变异程度最大的位于 V

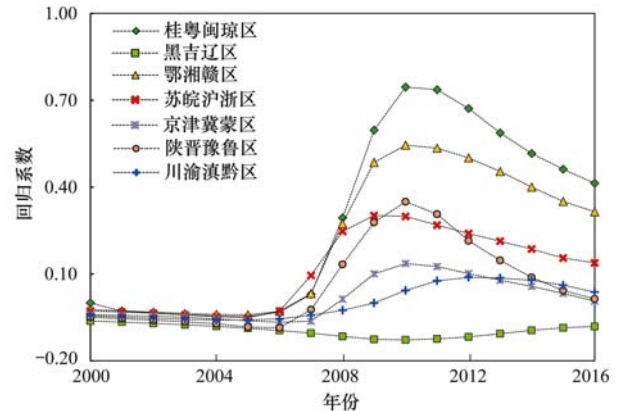


图 9 各治理区 SO₂ 排放量回归系数值变化曲线

Fig. 9 Change curve of regression coefficient of SO₂ emissions in management areas

区(桂粤闽琼), 2010 年增加到 $0.70 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{万 t})^{-1}$.

2.3.4 年平均温度回归系数值的时空变异特征

由 GTWR 所得到年平均温度回归系数值(2000、2008 与 2016 年的回归系数值如图 10 所示)可发现: 在整个研究时空范围中, 年平均温度对 PM_{2.5} 浓度的影响既有正向相关亦有负向相关. 分区统计的回归系数值变化曲线如图 11 所示, I 区(苏皖沪浙)、III 区(鄂湘赣)、IV 区(黑吉辽)与 VII 区(川渝滇黔)的回归系数值曲线大致上平行于横坐标轴, 时间变异程度较小, 呈现“平稳”型变化特征, 其中, IV 区(黑吉辽)与 VII 区(川渝滇黔)的回归系数值均为正, 约为 $4.5 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 与 $0 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$, 而 I 区(苏皖沪浙)与 III 区(鄂湘赣)的回归系数值为负, 分别为 $-1.0 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 与 $-3.5 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$. 此外, II 区(陕晋豫鲁)与 V 区(桂粤闽琼)的回归系数值分别呈现“单调递增”型与“单调递减”型, VI 区(京津冀冀蒙)的回归系数值先增大后减小, 各年的回归系数值均是所有区域中最大的值.

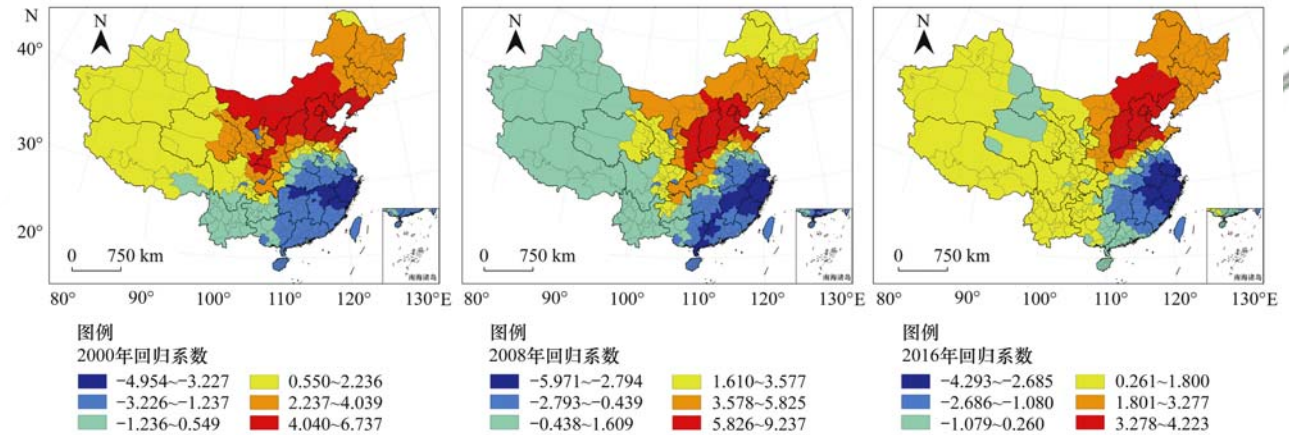


图 10 年平均温度回归系数值空间分布(2000、2008 与 2016 年)

Fig. 10 Spatial distribution of regression coefficient of annual average temperature (2000, 2008, and 2016)

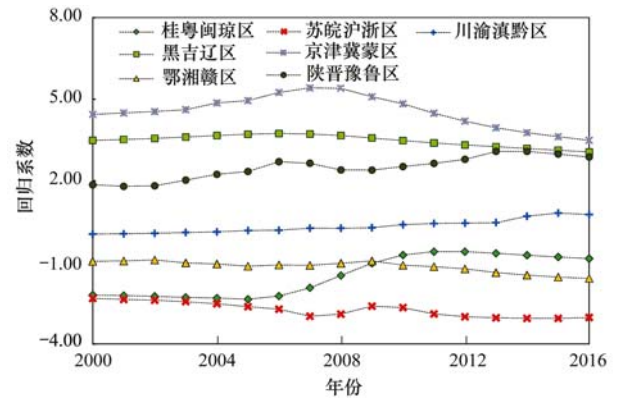


图 11 各治理区年平均温度回归系数值变化曲线

Fig. 11 Change curve of regression coefficient of annual average temperature in management areas

2.3.5 年降水量回归系数值的时空变异特征

由 GTWR 所得到年降水量回归系数值(2000、2008 与 2016 年回归系数值空间分布如图 12 所示)可发现: 在整个研究时空范围内, 年降水量对 PM_{2.5} 浓度的影响既存在正向相关又有负向相关, 负相关的区域主要位于西北与华东地区. 分区统计的回归系数值变化曲线如图 13 所示, 依据回归系数值的变化形态的差异, 可以区分四类模式: 第一类为“单调递减”型, 该类包括: IV 区(黑吉辽)与 VI 区(京津冀冀蒙), 两者均从 2000 年的 $1.5 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot 100 \text{ mm})^{-1}$ 减小到 2016 年 $0 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot 100 \text{ mm})^{-1}$; 第二类为“单调递增”型, 该类包括: VII 区(川渝滇黔), 从 2000 年的 $-2.8 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot 100 \text{ mm})^{-1}$ 增大到 2016 年

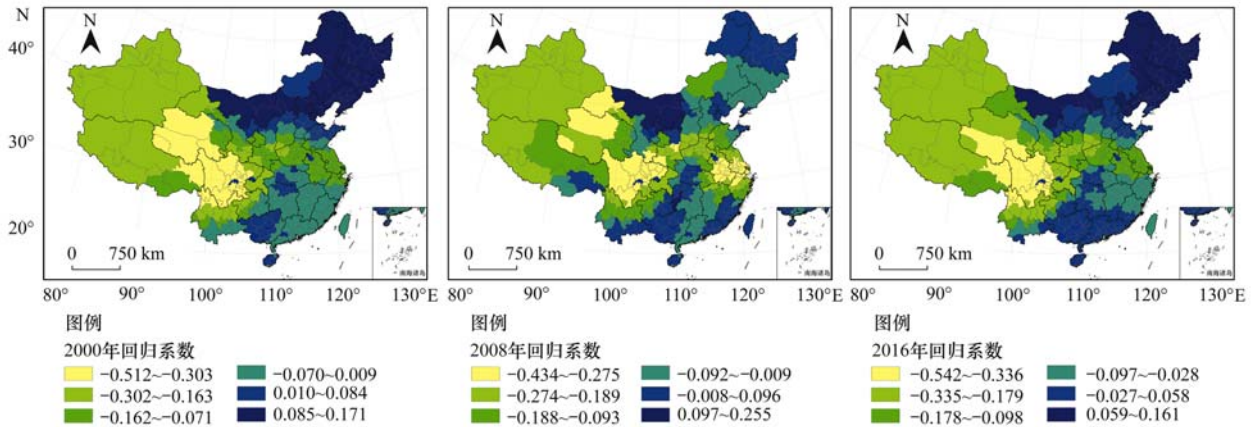


图 12 年降水量回归系数值空间分布(2000、2008 与 2016 年)

Fig. 12 Spatial distribution of regression coefficient of annual precipitation (2000, 2008, and 2016)

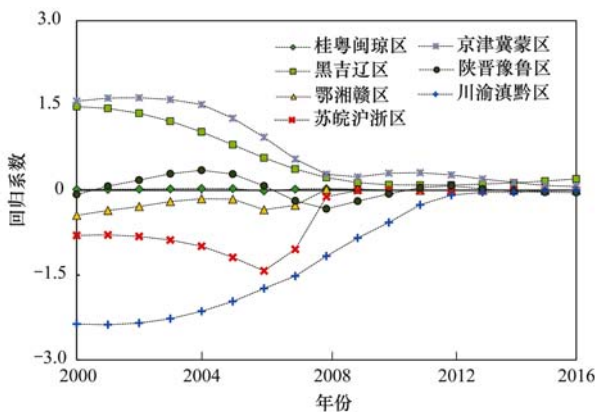


图 13 各治理区年降水量回归系数值变化曲线

Fig. 13 Change curve of regression coefficient of annual precipitation in management areas

$0 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot 100 \text{ mm})^{-1}$; 第三类为“先减后增”型, 该类包括: I 区(苏皖沪浙), 2006 年的系数值最小, 约为 $-1.5 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot 100 \text{ mm})^{-1}$; 第四类为“平稳”型, 包括: II 区(陕晋豫鲁)、III 区(鄂湘赣)与 V 区(桂粤闽琼), 回归系数值在 $0 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot 100 \text{ mm})^{-1}$ 上下波动。

2.3.6 年平均相对湿度回归系数值的时空变异特征

由 GTWR 所得到年平均相对湿度回归系数值(2000、2008 与 2016 年回归系数值的空间分布如图 14 所示)可发现:在整个研究时空范围内,年平均湿度对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响既有表现正向相关亦有负向相关,较高的正相关区域主要分布在西南与华东地区,而较高的负相关区域则主要位于中南地区。治理分区统计的回归系数值变化曲线如图 15 所示,依据形态的差异可识别出三类模式:第一类为“单调递减”型,该类包括: V 区(桂粤闽琼)与 VII 区(川渝滇黔),从 2000~2016 年回归系数值分别减少了 0.10 与 $1.5 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \%)^{-1}$;第二类为“单调递增”型,该类包括: IV 区(黑吉辽)与 VI 区(京津冀蒙),两者的回归系数值均从 2000 年的 $-0.65 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \%)^{-1}$ 增大到 $0.4 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \%)^{-1}$;第三类为“先减后增”型,该类包括: I 区(苏皖沪浙)与 III 区(鄂湘赣),分别在 2004 年与 2005 年取极小值 $-1.0 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \%)^{-1}$ 与 $-1.3 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \%)^{-1}$;第四类为“先减再增后减”型,该类包括: II 区(陕晋豫鲁),在 2008 年取得最

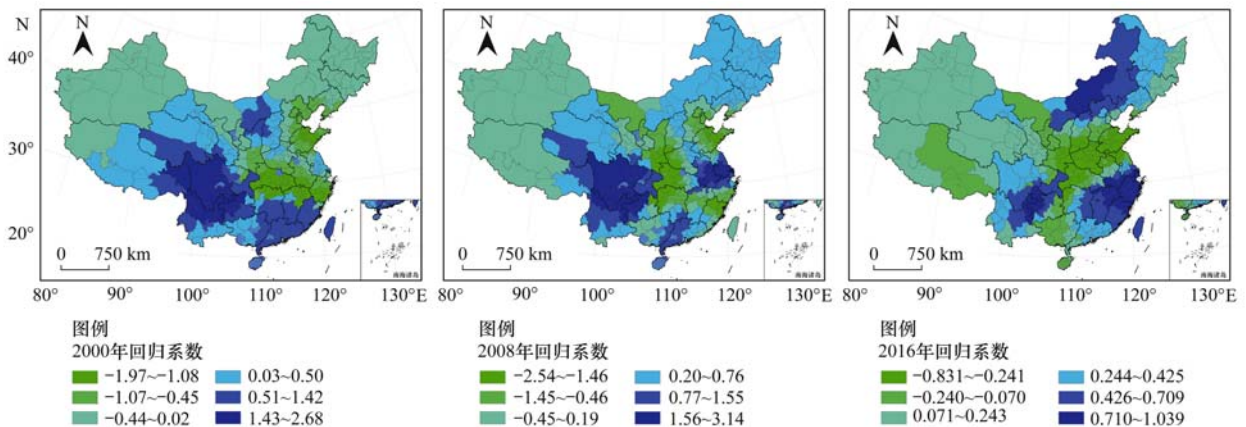


图 14 年平均相对湿度回归系数值空间分布(2000、2008 与 2016 年)

Fig. 14 Spatial distribution of regression coefficient of annual average humidity (2000, 2008, and 2016)

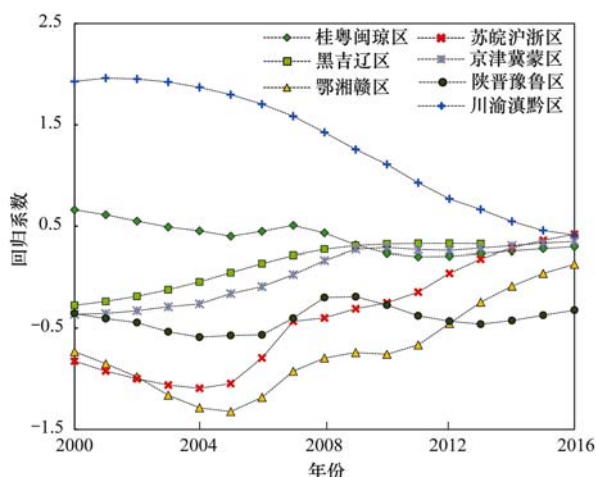


图 15 各治理区年平均相对湿度回归系数数值变化曲线

Fig. 15 Change curve of annual average humidity regression coefficient in governance areas

大值,为 $-0.25 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \%)^{-1}$ 。

3 结论

(1) 以 PM_{2.5} 为首要污染物,综合考虑污染程度、地理位置、气象、地形和经济等因素实现了国家尺度上大气污染联合治理区的划分,该分区结果与存在过污染治理合作的省域较一致,如:京津冀地区与珠三角地区为包含关系,长三角地区则完全一致。

(2) 与普通最小二乘回归与地理加权回归相比,地理时空加权回归能够有效揭示 PM_{2.5} 与关联因素的时空非平稳关系,研究证实了人口规模、第二产业生产总值、SO₂ 排放量、年平均气温、年降水量与年平均相对湿度与 PM_{2.5} 的关系随时空位置发生改变。

(3) 在所识别的联防联控治理单元中,2000 ~ 2016 年人口因素对 PM_{2.5} 浓度主要是正向影响,其它因素与 PM_{2.5} 浓度同时存在正向与负向相关,同时,由回归系数值在时间维度上变化曲线能够探测出不同因素在各治理区中与 PM_{2.5} 浓度的关联关系。

参考文献:

- [1] Liu J, Han Y Q, Tang X, *et al.* Estimating adult mortality attributable to PM_{2.5} exposure in China with assimilated PM_{2.5} Concentrations based on a ground monitoring network [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **568**: 1253-1262.
- [2] 曾贤刚,阮芳芳,彭彦彦. 基于空间网格尺度的中国 PM_{2.5} 污染健康效应空间分布[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(6): 2624-2632.
Zeng X G, Ruan F F, Peng Y Y. Health effects' spatial distribution analysis of PM_{2.5} pollution in China based on spatial grid scale [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(6): 2624-2632.
- [3] Liu M D, Shadbegian R, Zhang B. Does environmental regulation affect labor demand in China? Evidence from the textile printing and dyeing industry [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2017, **86**: 277-294.
- [4] Luo J Q, Du P J, Samat A, *et al.* Spatiotemporal pattern of PM_{2.5} concentrations in mainland China and analysis of its influencing factors using geographically weighted regression [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 40607, doi: 10.1038/srep40607.
- [5] He Z J, Deng M, Cai J N, *et al.* Mining spatiotemporal association patterns from complex geographic phenomena [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2019, doi: 10.1080/13658816.2019.1566549.
- [6] 刘可可,张红,刘桂建. 合肥市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3415-3420.
Liu K K, Zhang H, Liu G J. Elemental composition characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀, and heavy pollution analysis in Hefei [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3415-3420.
- [7] 吕喆,魏巍,周颖,等. 2015 ~ 2016 年北京市 3 次空气重污染红色预警 PM_{2.5} 成因分析及效果评估 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 1-10.
Lv Z, Wei W, Zhou Y, *et al.* Cause and effect evaluation of PM_{2.5} during three red alerts in Beijing from 2015 to 2016 [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 1-10.
- [8] 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*, 2018, **39**(5): 2498-2504.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Wang Z B, Fang C L. Spatial-temporal characteristics and determinants of PM_{2.5} in the Bohai rim urban agglomeration [J]. *Chemosphere*, 2016, **148**: 148-162.
- [12] Zhou C S, Chen J, Wang S J. Examining the effects of socioeconomic development on fine particulate matter (PM_{2.5}) in China's cities using spatial regression and the geographical detector technique [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **619-620**: 436-445.
- [13] 袁凯华,李后建,林章悦. 约束性考核促进了官员的减排激励吗 [J]. *当代经济科学*, 2014, **36**(6): 1-10.
Yuan K H, Li H J, Lin Z Y. Does constraining assessment enhance the officials' incentives to reduce emission? [J]. *Modern Economic Science*, 2014, **36**(6): 1-10.
- [14] 高明,郭施宏,夏玲玲. 大气污染府际间合作治理联盟的达成与稳定——基于演化博弈分析 [J]. *中国管理科学*, 2016, **24**(8): 62-70.
Gao M, Guo S H, Xia L L. Analysis on the formation and stability of cooperation management alliance of air pollution control among local governments: based on the evolutionary game [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2016, **24**(8): 62-70.
- [15] 王金南,宁森,孙亚梅. 区域大气污染联防联控的理论及方

- 法分析[J]. 环境与可持续发展. 2012, **37**(5): 5-10.
- Wang J N, Ning M, Sun Y M. Study on theory and methodology about joint prevention and control of regional air pollution[J]. Environment and Sustainable Development, 2012, **37**(5): 5-10.
- [16] 汪克亮, 孟祥瑞, 杨宝臣, 等. 技术异质下中国大气污染排放效率的区域差异与影响因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, **27**(1): 101-110.
- Wang K L, Meng X R, Yang B C, *et al.* Regional differences and influencing factors of China's air pollution emission efficiency considering technological heterogeneity[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, **27**(1): 101-110.
- [17] 胡志高, 李光勤, 曹建华. 环境规制视角下的区域大气污染联合治理——分区方案设计、协同状态评价及影响因素分析[J]. 中国工业经济, 2019, (5): 24-42.
- Hu Z G, Li G Q, Cao J H. Air pollution regional linkage control and prevention from the perspective of environmental regulation—the scheme design, state evaluation and influencing factors analysis[J]. China Industrial Economics, 2019, (5): 24-42.
- [18] 刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 等. 常州夏冬季 $PM_{2.5}$ 中无机组分昼夜变化特征与来源解析[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 980-989.
- Liu J S, Gu Y, Ma S S, *et al.* Day-night differences and source apportionment of inorganic components of $PM_{2.5}$ during summer-winter in Changzhou city[J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 980-989.
- [19] 郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 等. 兰州市燃煤污染物排放清单及其对 $PM_{2.5}$ 浓度贡献[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 4849-4857.
- Guo W K, Liu X, Zhu Y F, *et al.* Emissions inventory of smoldering Chinese Kangs and their contribution to $PM_{2.5}$ pollution in Lanzhou city[J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 4849-4857.
- [20] 尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 等. 2014~2017 北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1011-1023.
- Yin X M, Li Z M, Xiong Y J, *et al.* Contribution assessment of meteorology conditions and emission change for air quality improvement in Beijing during 2014-2017[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1011-1023.
- [21] 汪韬阳, 张过, 李沛然, 等. 基于 DMSP/OLS 夜光遥感影像的城市扩张政策驱动因素分析[J]. 测绘学报, 2018, **47**(11): 1466-1473.
- Wang T Y, Zhang G, Li P R, *et al.* Analysis on the driving factors of urban expansion policy based on DMSP/OLS remote sensing image[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, **47**(11): 1466-1473.
- [22] Huang B, Wu B, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, **24**(3): 383-401.
- [23] He Q Q, Huang B. Satellite-based mapping of daily high-resolution ground $PM_{2.5}$ in China via space-time regression modeling[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, **206**: 72-83.
- [24] Chu H J, Huang B, Lin C Y. Modeling the spatio-temporal heterogeneity in the PM_{10} - $PM_{2.5}$ relationship[J]. Atmospheric Environment, 2015, **102**: 176-182.
- [25] 杨文涛, 姚诗琪, 邓敏, 等. 北京市 $PM_{2.5}$ 时空分布特征及其与 PM_{10} 关系的时空变异特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 684-690.
- Yang W T, Yao S Q, Deng M, *et al.* Spatio-temporal distribution characteristics of $PM_{2.5}$ and spatio-temporal variation characteristics of the relationship between $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Beijing[J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 684-690.
- [26] Shi Y, Ho H C, Xu Y, *et al.* Improving satellite aerosol optical Depth- $PM_{2.5}$ correlations using land use regression with microscale geographic predictors in a high-density urban context[J]. Atmospheric Environment, 2018, **190**: 23-34.

CONTENTS

Comparison of Three Receptor Models for Source Apportionment of PM _{2.5} in Shanghai: Using Hourly Resolved PM _{2.5} Chemical Composition Data	ZHOU Min (1997)
Impact of Differents in the Concentrations of Ozone on the Chemical Composition of Single Particles	WU Meng-xi, CHENG Chun-lei, HUANG Bo, <i>et al.</i> (2006)
Influence of Secondary Organic Coating on Hygroscopicity of a Sodium Chloride Core: Based on Micro-scale Single Particle Analysis	ZHANG Shu-jia, XU Liang, GUO Xin-mei, <i>et al.</i> (2017)
Comparative Analysis of Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosol Components in the Atmosphere Between Urban and Suburban Areas	LI Xin-yue, ZHANG Kai-shan, DENG Lin-li, <i>et al.</i> (2026)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Elements Bonded with PM _{2.5} and PM ₁₀ in Linyi	LU Ping, ZHAO Xue-yan, YIN Bao-hui, <i>et al.</i> (2036)
Characteristics and Sources of Microbial Aerosols in Urban and Mountainous Areas in Autumn and Winter in Xi'an, China	XIE Wen-wen, LU Rui, MU Fei-fei, <i>et al.</i> (2044)
Pollution Characteristics of Cooking Fumes, Particulates, and Non-methane Hydrocarbons in the Exhaust of Typical Beijing Restaurants	HE Wan-qing, WANG Tian-yi, SHAO Xia, <i>et al.</i> (2050)
PM _{2.5} Concentration Influencing Factors in China Based on the Random Forest Model	XIA Xiao-sheng, CHEN Jing-jing, WANG Jia-jia, <i>et al.</i> (2057)
Spatio-temporal Variation of PM _{2.5} Related Relationships in China from the Perspective of Air Pollution Regional Linkage Control and Prevention	YANG Wen-tao, HUANG Hui-kun, WEI Dong-sheng, <i>et al.</i> (2066)
Characteristics of Spatial and Temporal Evolution and Investigation of Air Pollution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Ground-Space Observation Data	WANG Yao-ting, LIANG Jia-cheng, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2075)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in the Longzici Spring Catchment	TANG Chun-lei, ZHENG Xiu-qing, LIANG Yong-ping (2087)
Tempo-spatial and Retention Analysis of Total Phosphorus in the Three Gorges Reservoir	TANG Xiao-ya, TONG Si-chen, HUANG Guo-xian, <i>et al.</i> (2096)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Chlorophyll a in Typical Tributaries During the Impoundment Period of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, JI Dao-bin, WANG Li-jing, <i>et al.</i> (2107)
Spatial-temporal Distribution of Nutrients in Hanfeng Lake After Official Operation	FU Shi, NI Jiu-pai, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2116)
Spatio-temporal Variations in the Characteristics of Water Eutrophication and Sediment Pollution in Baiyangdian Lake	LIU Xin, SHI Bin, MENG Jing, <i>et al.</i> (2127)
Spatial-temporal Distribution of Suspended Solids and Its Sedimentation Flux and Nutrients Effects in Xin'anjiang Reservoir, China	SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (2137)
Bioavailability Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping Under Different Hydrological Scenarios	ZHANG Liu-qing, SHI Yu, LI Yuan-peng, <i>et al.</i> (2149)
Succession Characteristics of Algae Functional Groups and Water Quality Assessment in a Drinking Water Reservoir	LI Yan-qing, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Artificial Mixing on Temporal and Spatial Succession of Algae Community Structure in Jinpen Reservoir	WANG Chen-xu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2166)
Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Aerobic Denitrification Bacterial Community Structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUE Ge-cheng, <i>et al.</i> (2177)
Spatial and Temporal Succession Characteristics of Aerobic Anoxygenic Photosynthesis Bacteria in a Stratified Reservoir	ZHANG Hai-han, WANG Yan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2188)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Dynamics to Different Hydrological Scenarios in the Two Largest Freshwater Lakes Connected to the Yangtze River	GUO Yan-mi, LI Yuan-peng, SHI Yu, <i>et al.</i> (2198)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Northern-Side River of the Qinling Mountains in Summer	LIN Zi-shen, HUANG Ting-lin, YANG Shang-ye, <i>et al.</i> (2210)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Tributary Waters of the Lower Reaches of the Yangtze River, China	JIA Tian-qi, LEI Rong-rong, WU Xiao-lin, <i>et al.</i> (2221)
Temporal and Spatial Occurrence of NSAIDs in Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	LIAN Jie, LI Yi-fei, WANG Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2229)
Occurrence and Ecological Risk of Eight Typical PhACs in Surface Water and Its Impact on <i>Daphnia magna</i>	XU Xin-lei, LIU Jian-chao, LU Guang-hua (2239)
Distribution Characteristics and Migration Rules of Pollutants in Sediments of Reservoirs with <i>Eucalyptus</i> Plantation, Southern China	ZHU Ya, LI Yi-ping, LUO Fan, <i>et al.</i> (2247)
Mechanism of Urban Black Odorous Water Based on Continuous Monitoring: A Case Study of the Erkeng Stream in Nanning	LI Yong-xin, WANG Wei, HE Mei, <i>et al.</i> (2257)
Relationship Between Source-Sink Landscape Pattern and Antibiotics in Surface Water in Peri-urban Watershed	LI Min, TANG Jian-feng, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2264)
Molecular Chemo-diversity of the Dissolved Organic Matter Occurring in Urban Stormwater Runoff	NIE Yun-han, CHEN Hao, LI Lei, <i>et al.</i> (2272)
Regulating Effect and Mechanism of Calcite/Chlorapatite Mixture Addition on Transformation and Transport of Phosphorus in Sediments	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2281)
Stability of Ferrihydrite and Goethite Nanoparticles Under Different Environmental Conditions	WANG Zhi-qiao, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i> (2292)
Sunflower-Staw-Derived Biochar-Enhanced Fe(III)/S ₂ O ₈ ²⁻ System for Degradation of Benzoic Acid	SUN Peng, ZHANG Kai-kai, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2301)
Non-activated Peroxymonosulfate-Induced Degradation of Sulfasalazine: Kinetics and Mechanism Investigations	DING Xi, ZHANG Xue-wei, ZHOU Run-sheng, <i>et al.</i> (2310)
Pollution Characteristics and Removal Effects of Antibiotics in Wastewater from Large-Scale Pig Farms in Guizhou	YANG Zhao, LI Jiang, XIANG Fu-liang, <i>et al.</i> (2320)
Nitrogen Removal in Low-C/N Rural Sewage Treatment by Anoxic/Oxic Biofilter Packed with New Types of Fillers	ZHAO Yuan-zhe, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2329)
Nitrogen Removal Performance and Nitrogen/Carbon Balance of Oligotrophic Aerobic Denitrifiers	WEN Gang, WANG Tong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2339)
Bacterial Community Shifts and Nitrogen Removal Characteristics for a SNAD Process Treating Anaerobic Digester Liquor of Swine Wastewater (ADLSW) in a Continuous-Flow Biofilm Reactor (CFBR)	QIN Jia-wei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2349)
Characteristics of ANAMMOX Granular Sludge and Differences in Microbial Community Structure Under Different Culture Conditions	JIANG Ying, GUO Meng-lei, XIE Jun-xiang, <i>et al.</i> (2358)
Start-up of an Integrated Process of Denitrifying Phosphorus Removal Coupled with Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	CHEN Ya, YIN Wen, ZHANG Xing-xing, <i>et al.</i> (2367)
Construction and Application of an Evaluation System for Soil Environmental Carrying Capacity	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2373)
Synthesis of Magnetic Biochar and Its Application in the Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soils	WANG Jun-nan, CHENG Shan-shan, ZHAN Wen-hao, <i>et al.</i> (2381)
Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soil by EDTA Washing Enhanced with Reduction Solubilization	ZHANG Jin-yong, ZHU Yu-ting, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (2390)
Toxicity of Chromium to Root Growth of Barley as Affected by Chromium Speciation and Soil Properties	FU Ping-nan, GONG Xiao-fei, LUO Li-yun, <i>et al.</i> (2398)
Effect of Fertilizer Reduction and Biochar Application on Soil Nitrogen Loss in Purple Upland	WANG Shu, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (2406)
Relationship Between the Composition of Soil Aggregates and the Distribution of Organic Carbon Under Long-Term Abandoned Restoration	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHANG Xin-yi, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Biochar Application on Soil Microbial Nutrient Limitations and Carbon Use Efficiency in Lou Soil	WANG Qiang, GENG Zeng-chao, XU Chen-yang, <i>et al.</i> (2425)
N ₂ O Emissions from Tea Plantations with Sorghum Intercropping and Application of Big Urea Pills	ZHANG Ke-bin, LIU Xin-liang, KANG Man, <i>et al.</i> (2434)
Effects of Different Forest Vegetation Types on Soil Nitrogen-Related Microbial Communities and Functions in Jinyun Mountain	WANG Ying-yang, WANG Fu-hua, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (2445)
Nitrous Oxide Emission and Denitrifying Bacterial Communities as Affected by Drip Irrigation with Saline Water in Cotton Fields	GUO Hui-nan, MA Li-juan, HUANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2455)
Effect of Organic Matter Promotion on Nitrogen-Cycling Genes and Functional Microorganisms in Acidic Red Soils	CHU Cheng, WU Zhao-yue, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (2468)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Fungi Diversity in the Transition Zone of Moso Bamboo and Broadleaf Forest	WANG Nan, PAN Xiao-cheng, WANG Chuan-kuan, <i>et al.</i> (2476)
Differences Between DNA- and RNA-Based Bacterial Communities in Marine Sediments	LI Ming-yue, YANG Yu-hong, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (2485)
Spatial Patterns and Spatial Autocorrelations of Wetland Changes in China During 2003-2013	ZHOU Ting, MA Jiao-jiao, XU Song-jun (2496)