

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

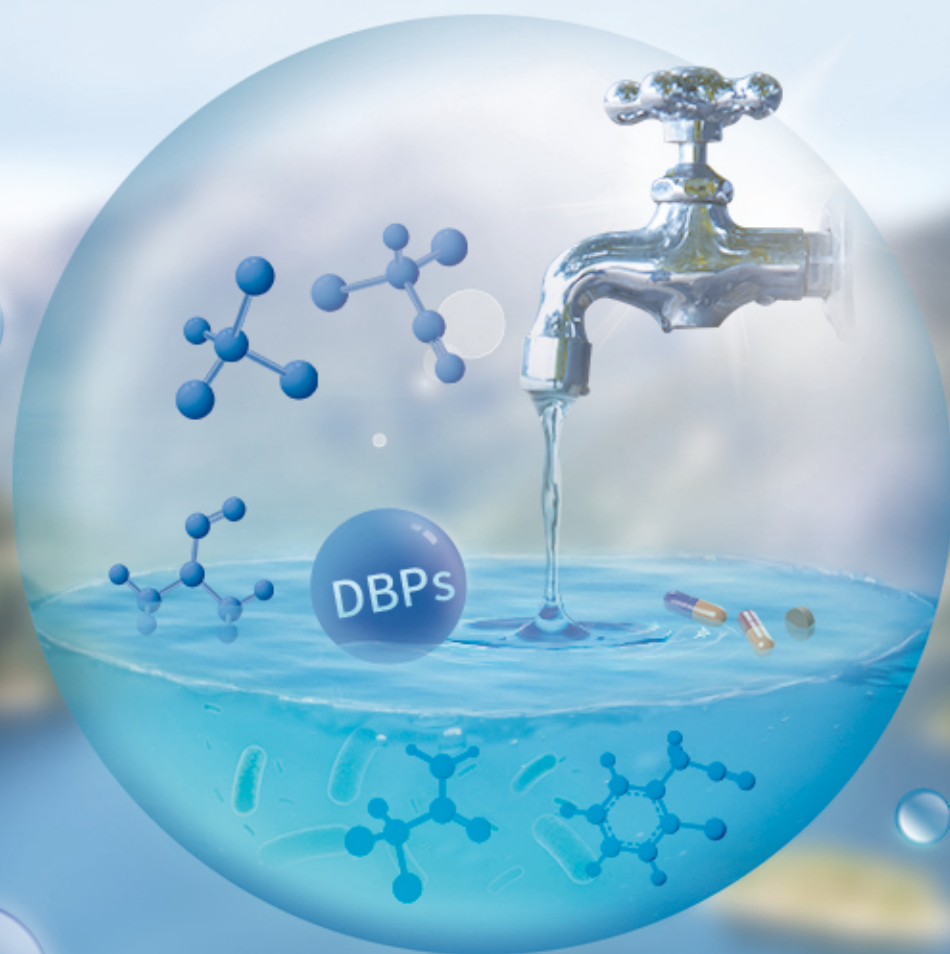
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期
Vol.42 No.11

目次

综述与专论

- 饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华 (5059)
生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹 (5086)

研究报告

- 1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑 (5100)
COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (5109)
汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铖, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华 (5122)
石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇 (5131)
天津市冬季空气湿度对 $PM_{2.5}$ 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹 (5143)
承德市 $PM_{2.5}$ 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升 (5152)
中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍 (5162)
2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (5169)
基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华 (5180)
典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润 (5193)
沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫棋, 于兴娜 (5201)
天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强 (5210)
郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙 (5220)
基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O_3 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超 (5228)
长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月 (5239)
河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞吟, 张馨童, 姚波, 崔建升 (5250)
城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋 (5264)
北京城市河流河水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李颀, 谢珍雯, 陈磊 (5275)
太湖西岸地表水中极性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯 (5284)
河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧 (5294)
白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升 (5303)
雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊 (5312)
基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南 (5322)
千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮 (5333)
巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠 (5346)
洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 瞿鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞 (5355)
成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛 (5364)
雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰 (5375)
粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀 (5384)
红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇 (5394)
减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璇骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲 (5405)
互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞 (5414)
基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邱琰茗, 郭道宇 (5424)
硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁嵘 (5433)
高锰酸钾改性松木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹄, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华 (5440)
混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤 (5450)
负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟 (5460)
一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送 (5472)
生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳 (5481)
紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳 (5491)
南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京 (5500)
城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君 (5510)
我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平 (5519)
典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平 (5526)
稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区: 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠 (5535)
镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 彭杰, 李佳欣, 陈文清 (5545)
纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮 (5554)
《环境科学》征订启事 (5108) 《环境科学》征稿简则 (5151) 信息 (5249, 5263, 5283)

1998 ~ 2016 中国八大经济区植被覆盖对 PM_{2.5} 浓度时空分布的影响

杨玉莲^{1,2}, 杨昆^{1,2*}, 罗毅^{1,2}, 喻臻钰^{1,2}, 孟超^{1,2}, 李岑^{1,2}

(1. 云南师范大学地学部, 昆明 650500; 2. 西部资源环境地理信息技术教育部工程研究中心, 昆明 650500)

摘要: 目前很少有 PM_{2.5} 污染与植被覆盖的相关性深入研究, 尝试对此进行补充. 基于 1998 ~ 2016 年的 PM_{2.5} 和归一化植被指数(NDVI)的栅格数据, 以中国内地八大经济区为研究对象, 对 NDVI 值进行 3 个等级划分(低植被覆盖区、中植被覆盖区和高植被覆盖区), 并计算相应等级的 PM_{2.5} 污染浓度. 在此基础上, 从 NDVI 的景观尺度和类型尺度分析 PM_{2.5} 污染的时空特征, 然后利用面板数据模型量化 NDVI 景观格局指数对 PM_{2.5} 的影响. 结果表明: ①北部沿海、东部沿海、南部沿海、长江中游和东北经济区在植被覆盖相对较低的区域, PM_{2.5} 污染较严重; 而黄河中游、西南地区及大西北经济区则在植被覆盖相对较低的区域表现出较轻的 PM_{2.5} 污染; ②大部分区域的 PM_{2.5} 随时间变化呈显著上升趋势; ③PM_{2.5} 与 NDVI 景观格局指数相关性显著($P < 0.05$)的区域相对较少; ④景观形状指数(LSI)、斑块面积比(PLAND)、斑块数量(NP)、最大斑块占景观面积比(LPI)和聚集度指标(AI)指数对 PM_{2.5} 的影响都表现出明显的空间异质性.

关键词: PM_{2.5}; 归一化植被指数(NDVI); 植被覆盖; 景观格局指数; 面板数据模型

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5100-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202101277

Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM_{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016

YANG Yu-lian^{1,2}, YANG Kun^{1,2*}, LUO Yi^{1,2}, YU Zhen-yu^{1,2}, MENG Chao^{1,2}, LI Cen^{1,2}

(1. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. GIS Technology Engineering Research Centre for West-China Resources and Environment, Ministry of Education, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: The study researched the relationship between vegetation cover and PM_{2.5} pollution. The raster NDVI dataset from 1998 to 2016 were reclassified into low, medium, and high vegetation coverage area, and the corresponding PM_{2.5} concentration in eight economic regions in China were then calculated. On this basis, the temporal and spatial characteristics of PM_{2.5} pollution were analyzed and Pearson correlation coefficient was used to explore its correlation with NDVI landscape pattern indexes separately from landscape and class level NDVI. The preliminary results showed that: ①The northern, eastern, southern coastal, middle reaches of the Yangtze River, and the northeast economic zones have relatively low vegetation coverage in areas with relatively serious PM_{2.5} pollution. However, the middle reaches of the Yellow River, the southwestern and the Northwestern Economic Zones in areas with relatively low vegetation coverage showed lighter PM_{2.5} pollution. ②PM_{2.5} increased in most areas between 1998 and 2016. ③A significant correlation between PM_{2.5} and NDVI landscape pattern indexes was not found for all areas. ④Therefore, the impacts of the landscape shape index (LSI), percent of landscape (PLAND), number of patches (NP), largest patch index (LPI), and aggregation index (AI) on PM_{2.5} are heterogeneous.

Key words: PM_{2.5}; normalized difference vegetation index (NDVI); vegetation coverage; landscape pattern indexes; panel data model

短期暴露在高浓度的 PM_{2.5} 环境中或长期暴露在 PM_{2.5} 环境中, 会增加人的不良健康风险^[1]. Cohen 等^[2]的研究对 1990 ~ 2015 年空气污染引起的全疾病负担估计及其变化趋势分析表明: 2015 年 PM_{2.5} 在全球所有威胁健康因素中排名第五. 对中国而言, 大部分地区的 PM_{2.5} 污染浓度高于世界卫生组织标准($10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)^[3], 由此引发的公众健康问题也更为严重. 为降低 PM_{2.5} 污染, 中国做了很多努力. 2012 年环境保护部在环境空气质量标准中增加了 PM_{2.5} 的浓度限值并通过官方平台发布 PM_{2.5} 的实时监测结果^[4]; 2013 年和 2018 年国务院分别发布了大气污染防治行动计划^[5]和打赢蓝天保卫战三年行动计划^[6]. 这些努力确实改善了空气质量, 但城市空气污染物浓度仍维持在较高水平^[7]. 如何在经济发展的同时, 尽可能地降低 PM_{2.5} 污染是亟需解决

的问题.

PM_{2.5} 污染的主要来源是人类活动^[8,9], 而土地利用/覆被变化(land use/land cover change, LUCC)能够反映人类活动的强度^[10]. 因此, 有较多研究从 LUCC 角度出发, 定量定性地分析 PM_{2.5} 与土地利用类型之间的关系^[11,12]. 植被是陆地生态系统的主体, 是土地利用类型变化不可缺少的部分^[13], 也能反映出人类的活动强度^[14]. 在较大尺度上, 长时间序列的遥感植被覆盖数据的获取与处理能力明显高于土地利用数据^[15]. 已有学者探索了用植被格局替代土地利用反映人类活动强度的可行性.

收稿日期: 2021-01-29; 修订日期: 2021-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(D010701)

作者简介: 杨玉莲(1986 ~), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为环境地理信息系统、空间分析与建模, E-mail: yyl100200@foxmail.com

* 通信作者, E-mail: kmdecy@163.com

Whistler^[16]、Griffith^[17]和张军^[18]通过相同的遥感影像,分别获得同一流域土地利用和植被 NDVI 数据,并建立它们与水质的关系,发现河流水质与植被 NDVI 的相关性显著高于土地利用类型. 现有关于 $\text{PM}_{2.5}$ 与植被的研究中主要是把高植被覆盖度作为绿地类型来研究绿地对 $\text{PM}_{2.5}$ 的减弱作用,且研究集中在中小尺度^[19~21],较少涉及将植被覆盖与 $\text{PM}_{2.5}$ 污染作为对象的深入研究. 本文试图将 $\text{PM}_{2.5}$ 与 LUCC 的研究方法应用于 $\text{PM}_{2.5}$ 与植被的研究中,以此来深入了解二者的关系.

在 $\text{PM}_{2.5}$ 与土地利用类型的研究中,主要分为两类:一类是应用较为普遍的土地利用回归模型 (land use regression, LUR),该模型以 $\text{PM}_{2.5}$ 监测站点为中心,生成一定范围内的缓冲区,以监测站点的 $\text{PM}_{2.5}$ 为因变量,将该缓冲区内的土地利用、交通和人口密度等数据作为自变量,构建回归模型^[22,23];另一类是从景观生态学角度,研究土地利用/覆盖的类型、数量、组合效应及整个景观格局的变化对大气污染物浓度变化的影响^[24,25]. LUR 方法中对缓冲距离的设置相对狭窄,需要的数据较多,比较适合小尺度研究. 本研究以中国内地八大经济区作为研究对象,尺度较大,且缺乏长时间序列的 $\text{PM}_{2.5}$ 观测数据,不适合用 LUR 方法,因而选择后者.

目前有很多的植被指数,但归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 应用最为广泛^[26],能较为准确地反映地表植被覆盖状况. 综上所述,本文以中国内地八大经济区为研究对象,以 1998 ~ 2016 的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NDVI 数据为基础,将 NDVI 值划分为 3 个等级,从景观生态学角度出发,分析不同 NDVI 等级的景观格局指数与 $\text{PM}_{2.5}$ 污染物浓度是否具有关联性及其如何影响 $\text{PM}_{2.5}$ 污染,以期治理 $\text{PM}_{2.5}$ 污染及发展绿色经济提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区

$\text{PM}_{2.5}$ 污染具有区域性特点,以八大经济区 (图 1) 作为研究区是比较合理的,该划分综合考虑了自然条件、自然资源及经济技术发展水平的差异性,同时又保留了行政区的完整性^[27],便于区域联合防控. 从图 1 可看出,我国总体地势特征为西高东低,除西南、西北和黄河中游经济区,其它经济区以低海拔 (≤ 500 m) 为主. 地势特征会深刻影响研究区内的其它地理特征,如气候、人口分布和交通等.

1.2 数据来源及预处理

NDVI 是通过计算遥感影像的近红外波段 (植

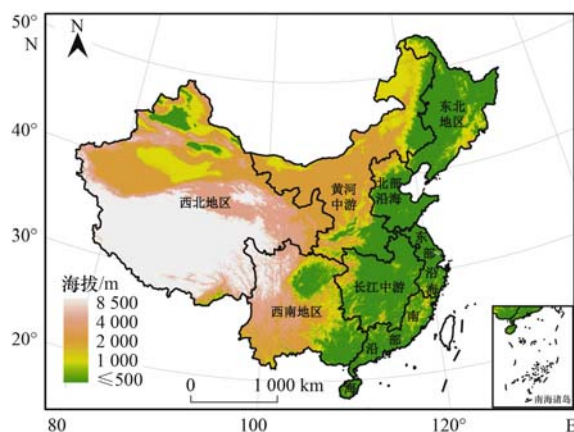


图 1 研究区示意

Fig. 1 Overview of the study area

被强烈反射) 和红光波段 (植被吸收) 之间的差异来量化植被,值介于 $-1 \sim 1$ 之间,值越大说明植被覆盖越大,值为负则可能表示水体. 中国年度 NDVI 数据集来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 1 km,该数据集通过遥感 SPOT-VGT 采用最大值合成法合成. $\text{PM}_{2.5}$ 污染数据集来源于美国国家航天局 NASA 发布的全球表面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据 (<http://earthdata.nasa.gov/>),数据分辨率为 0.01° ,该数据集去除了大部分水体. $\text{PM}_{2.5}$ 数据集与 NDVI 数据集的时间尺度为 1998 ~ 2016 年共计 19 a.

在 ArcGIS 软件中将所有栅格数据的地理坐标系设为 GCS-WGS-84,投影坐标系设置为兰伯特等角,空间分辨率为 1 km. 利用 $\text{PM}_{2.5}$ 的数据集裁剪 NDVI 数据集,使两个数据集的行列数相同. 在此基础上,利用 ArcGIS 软件里的 reclassify 工具,对八大经济区的 NDVI 数据集进行 3 个等级划分,获得 24 个分区. 分类标准为: $0 \leq \text{NDVI} \leq 0.4$ 为低值区, $0.4 < \text{NDVI} \leq 0.7$ 为中值区, $0.7 < \text{NDVI} \leq 1$ 为高值区,分别代表低植被覆盖区、中植被覆盖区和高植被覆盖区. 然后,利用 ArcGIS 里的 zonal statistics as table 工具,计算每年各经济区的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染浓度值及各 NDVI 等级下的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染浓度值.

1.3 研究方法

1.3.1 基于 NDVI 背景下的 $\text{PM}_{2.5}$ 变化趋势分析

利用 Sen 和 Mann-Kendall 相结合是判断时序数据趋势的重要方法,该方法不要求数据服从任何分布,不受异常值干扰. 其中,用 Sen 趋势度 (β) 计算数据的趋势,用 Mann-Kendall 检验构建 Z 统计量,进而判断趋势变化的显著性^[28,29]. 在 0.05 的置信水平下,当 $\beta > 0$ 且 $|Z| > 1.96$, $\text{PM}_{2.5}$ 随时间呈显著上升趋势;当 $\beta < 0$ 且 $|Z| > 1.96$, $\text{PM}_{2.5}$ 随时间呈显著下降趋势;当 $\beta > 0$ 且 $|Z| \leq 1.96$ 或 $\beta < 0$

且 $|Z| \leq 1.96$, $PM_{2.5}$ 变化呈基本稳定趋势. β 计算公式如下:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad (1998 \text{ 年} \leq i < j \leq 2016 \text{ 年}) \quad (1)$$

式中, x_i 和 x_j 分别为第 i 年和第 j 年的 $PM_{2.5}$ 值; Median 为中位数函数.

Z 统计量计算公式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

其中, n 为 19(时间序列长度); sgn 是符号函数, 公式如下:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (1998 \text{ 年} \leq i < j \leq 2016 \text{ 年}) \quad (3)$$

1.3.2 $PM_{2.5}$ 与 NDVI 景观格局指数的相关性分析

NDVI 景观指数能量化表达 NDVI 景观格局的类型组成和空间结构特征, 本文的 NDVI 景观指数包括斑块类型水平(class-level indexes)和景观水平(landscape-level indexes)两个层次. NDVI 类型水平计算不同 NDVI 等级的景观指数, 而 NDVI 景观水平计算整体 NDVI 的景观指数. 本文选取的景观指数如表 1 所示. 在此基础上, 利用皮尔森相关系数(Pearson correlation coefficient)分析 $PM_{2.5}$ 与 NDVI 景观格局的相关性.

表 1 NDVI 景观指数

Table 1 Indexes of NDVI landscape

指标	说明	单位	应用尺度
斑块面积比(percent of landscape, PLAND)	同一经济区内, 各 NDVI 等级类型面积占经济区面积的百分比. 可反映经济区内主要的 NDVI 等级类型	%	类型
最大斑块占景观面积比(largest patch index, LPI)	用于识别类型或景观级别中占优势度的斑块, LPI 值的变化可以反映出受干扰的强度 ^[30]	%	类型/景观
斑块数量(number of patches, NP)	反映景观破碎度及空间异质性, NP 越大, 破碎度高 ^[30] . 类型级别上为各 NDVI 等级的斑块数量, 景观级别上为各经济区内所有 NDVI 等级的斑块数量	个	类型/景观
景观形状指标(landscape shape index, LSI)	反映斑块形状的复杂程度, LSI 值越大形状越复杂 ^[30]	无	类型/景观
聚集度指标(aggregation index, AI)	反映斑块聚集度, AI 越大聚集度越高 ^[30]	%	类型/景观

1.3.3 NDVI 景观格局指数对 $PM_{2.5}$ 的影响

为量化分析不同分区(或个体)的各 NDVI 景观指数对 $PM_{2.5}$ 的影响, 本文分别建立 $PM_{2.5}$ 与各 NDVI 景观指数的混合模型、固定系数和变系数模型, 并根据 Wald 检验(F -test)的 P 值(< 0.05)来确定合适的模型.

固定效应模型假设不同个体的各 NDVI 景观格局指数对 $PM_{2.5}$ 的影响系数相同但截距不同, 表达式如下^[31]:

$$Y_{it} = \alpha_{it} + \beta X_{it} + \mu_{it} \quad (4)$$

式中, i 为个体, 在景观级别中, 个体为八大经济区, 值为 $1 \leq i \leq 8$; 在类型尺度中, 个体为各经济区的各 NDVI 等级分区, 值为 $1 \leq i \leq 24$. $t = 1, 2, 3, \dots, 19$, 表示 19 个时点; Y_{it} 为 t 时刻, 个体 i 的 $PM_{2.5}$ 污染浓度; X_{it} 为 t 时刻, 个体的 NDVI 景观格局指数; β 为待估系数; μ_{it} 为随机误差; α_{it} 为截距. 如果 $\alpha_{it} = \alpha_i$ 则为个体固定效应模型, 截距的不同是由个体效应引起的; 如果 $\alpha_{it} = \alpha_t$ 为时点固定效应模型, 截

距的不同是由时间效应引起的.

随机系数模型假设不同分区的 NDVI 景观指数对 $PM_{2.5}$ 的影响不同. 表达式如下^[31]:

$$Y_{it} = \beta_{it} X_{it} + \mu_{it} \quad (5)$$

如果 $\beta_{it} = \beta_i$, 则为个体随机系数模型; 如果 $\beta_{it} = \beta_t$, 则为时点随机系数模型.

混合模型即普通线性回归模型: 从时间上看, 不同个体的 NDVI 景观格局指数对 $PM_{2.5}$ 污染浓度的影响不存在显著性差异; 从截面上看, 不同个体之间的 NDVI 景观格局指数对 $PM_{2.5}$ 污染浓度的影响也不存在显著性差异. 表达式如下^[31]:

$$Y_{it} = \alpha + \beta X + \mu \quad (6)$$

2 结果与讨论

2.1 八大经济区 $PM_{2.5}$ 浓度分布时空特征

从景观级别即经济区尺度看(图 2), 总体上 $PM_{2.5}$ 污染的特征与地势的特征一致, 都为东高西低. 1998 ~ 2016 年西南地区 and 南海沿海的 $PM_{2.5}$ 污

染浓度基本稳定,其它经济区则显著上升. 这可能是因为南部沿海和西南地区主要位于湿润地区(年降水量大于 800 mm),对 $\text{PM}_{2.5}$ 起到了很好地沉降作用. $\text{PM}_{2.5}$ 污染的多年平均值从大到小依次为: 北部沿海、东部沿海、长江中游、南部沿海、东北地区、黄河中游、西南地区和西北地区. 前 3 个经济区大多数年份的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染浓度高于中国环境空气质量标准(GB 3095-2012)中规定的年均二级污染浓度限制($\geq 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 从箱线图的四分位数差看, $\text{PM}_{2.5}$ 污染浓度波动最大的也是前 3 个经济区,波动最小的则是西北地区. 从图 1 还可明显看出西北地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染浓度每年在 $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以内,是唯一符合世界卫生组织标准的地区. 在八大经济区中,经济发展水平较高的为北部沿海、东部沿海地区,而经济发展水平较低的为西南地区、西北地区^[32]. 这再次证实经济是推动中国空气污染物排放的一个越来越关键的因素^[33,34].

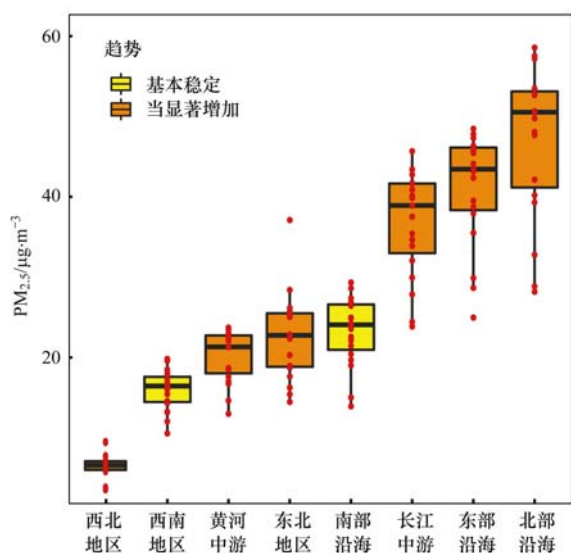


图2 $\text{PM}_{2.5}$ 多年平均值排序的箱线图

Fig. 2 Sorting a boxplot based on average $\text{PM}_{2.5}$

从图 3 可进一步了解各经济区的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染随时间变化情况. 除东北经济区,其它经济区的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染在 2008 年以前主要表现为增长趋势,在 2008 ~ 2012 年间则表现为基本稳定或明显减少,在 2013 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度又开始升高. 东北经济区的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染则是在 2009 年前主要表现出增长趋势,2009 ~ 2012 年表现出下降趋势. 北部沿海、东部沿海、东北地区、黄河中游的 $\text{PM}_{2.5}$ 波动曲线最为相似,但波动范围不一致,这可能是因为这 4 大经济区在地理位置上紧邻(图 1),而前 2 个经济区的经济强于后二者的经济^[32],所以污染模式也相似. 同样的原因导致南部沿海和西南地区的污染波动曲线也相似. 长江中游地区近几年经济不断发展^[35],大气污染也

越来越严重. 西北及西南地区城市化进程起步较晚,经济发展相对沿海开放地区落后,人口数量、人均 GDP 和机动车保有量都远远低于沿海地区^[36,37],同时受多种地势地貌等自然因素的影响,所以地区内的大气污染整体变化不明显且处于较低水平.

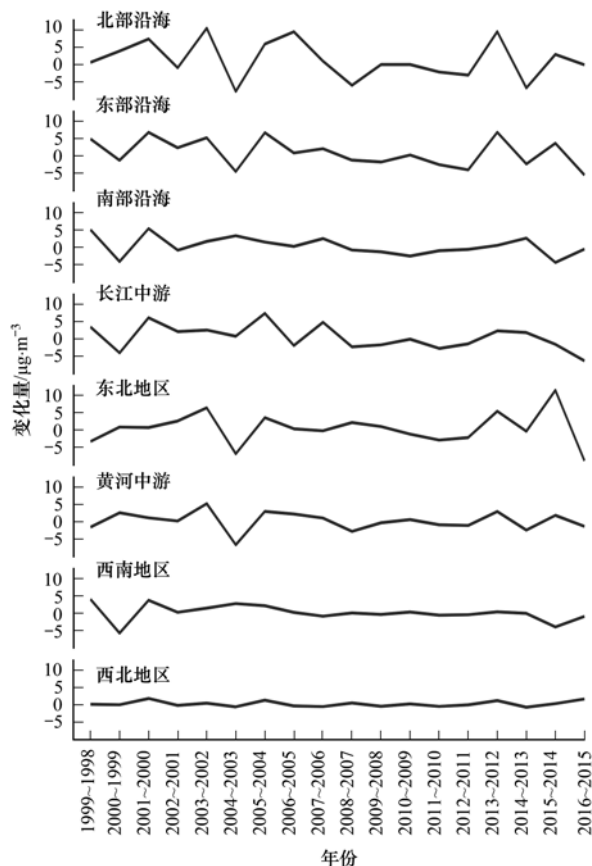


图3 下一年与上一年的 $\text{PM}_{2.5}$ 变化量

Fig. 3 Difference of $\text{PM}_{2.5}$ between the next year and the previous year

表 2 是类型尺度的 Sen 和 Mann-Kendall 计算结果. 1998 ~ 2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 污染浓度只在 6 个分区中保持基本稳定,而在大多数分区中表现出明显的上升趋势. 除东部沿海和西北地区,经济区内的 NDVI 低值区比例基本没发生变化;大部分经济区的中值区和高值区比例分别表现为显著的下降和上升趋势,所以大部分经济区植被覆盖率的增加是由 NDVI 高值区比例增加引起的. 从表中还可看出植被覆盖增加的区域并没有表现出 $\text{PM}_{2.5}$ 污染降低的趋势,这可能是因为二者都是随时间呈上升趋势且植被对降低 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的作用是有限的.

结合表 2 和图 4,各分区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化,综合影响着各经区的污染状况. 在南部沿海、黄河中游和西南地区的各 NDVI 等级区里, $\text{PM}_{2.5}$ 污染有上升和基本不变两种趋势,由于各 NDVI 等级的比例不同,景观尺度上的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染趋势与 NDVI 等级中比例最大的区域表现为一致的污染趋势. 如黄河中

游的 $PM_{2.5}$ 污染趋势在 NDVI 的低、中值区为无显著变化,而在面积占比最大的高值区为显著上升,黄河

中游地区整体的 $PM_{2.5}$ 污染趋势则表现为显著上升 (图 2)。

表 2 基于 Sen 和 Mann-Kendall 的趋势分析¹⁾

Table 2 Trend analysis by Sen and Mann-Kendall

NDVI 等级	北部沿海		东部沿海		南部沿海		长江中游		东北地区		黄河中游		西南地区		西北地区	
低值区	+	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	-	+	-
中值区	+	-	+	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	+	-
高值区	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+

1) + 表示 $PM_{2.5}$ 显著上升, ++ 和 -- 分别表示 NDVI 等级比例 (PLAND) 显著上升和显著下降, - 表示无显著变化

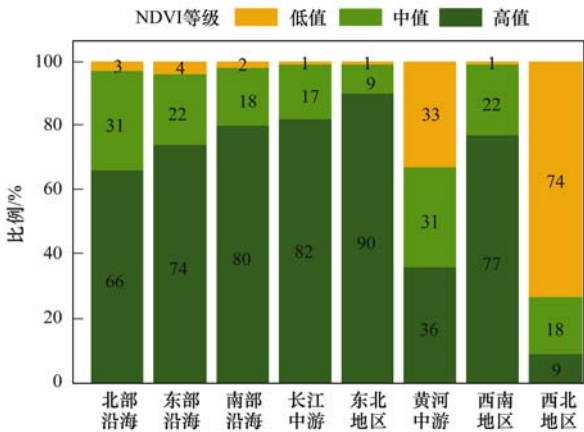


图 4 NDVI 等级比例

Fig. 4 Percent of NDVI classes

从图 5 可看出,在 NDVI 等级低值区,前面 5 个经济区的 $PM_{2.5}$ 污染较严重,而黄河中游、西南地区及西北地区的 $PM_{2.5}$ 污染则较轻,在高值区则情况相反。从多年平均值看,前 5 个经济区内 $PM_{2.5}$ 污染从大到小为低值 > 中值 > 高值; 后 3 个经济区的 $PM_{2.5}$ 排序则为低值 < 中值 < 高值,这些区域因受地

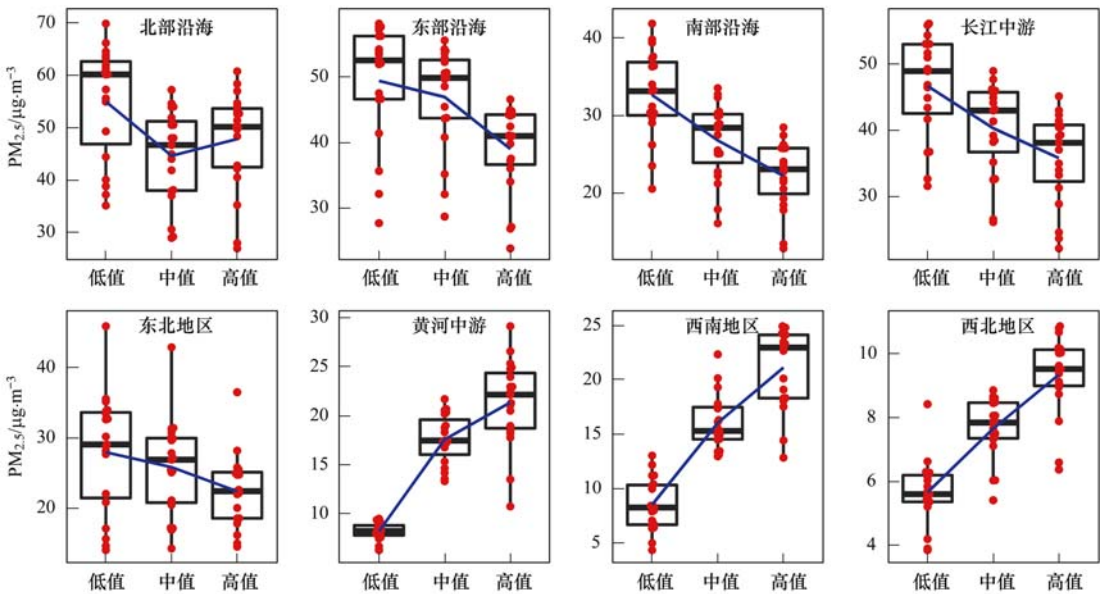
势地貌等自然因素影响,经济活动主要发生在植被覆盖相对较高的地方。从箱线图的四分位差看,在 $PM_{2.5}$ 污染最严重的 NDVI 等级区里, $PM_{2.5}$ 污染波动最大。

2.2 $PM_{2.5}$ 与 NDVI 景观格局指数相关性分析

2.2.1 NDVI 景观格局指数与 $PM_{2.5}$ 的相关性分析

从景观尺度看 (图 6), $PM_{2.5}$ 与各景观指数的关系并不固定,有正有负,相关系数通过显著性检验的个数只有 9 个; $PM_{2.5}$ 与 NP 和 LPI 主要表现出正相关性,且与 LPI 的相关性大多呈高于 0.5; $PM_{2.5}$ 与 AI 和 LSI 只在西南地区表现出显著的相关性。

从类型尺度看 (图 7), 同一指数与不同分区的 $PM_{2.5}$ 污染相关性大小不同,且既有正相关也有负相关。东部沿海和西北地区的 NDVI 景观指标与 $PM_{2.5}$ 的相关性在所有经济区中是最弱的。相关系数共 120 个,通过显著统计检验的个数仅为 44 个,其中大多数的绝对值大于 0.5。在 NDVI 的中、高值区, PLAND 与 $PM_{2.5}$ 分别主要表现为负相关和正相关。NP、LSI 指数与 $PM_{2.5}$ 在 NDVI 的中低值区主要呈现



蓝线为多年平均值连线

图 5 NDVI 等级背景下 $PM_{2.5}$ 箱线图

Fig. 5 Boxplot in the background of NDVI

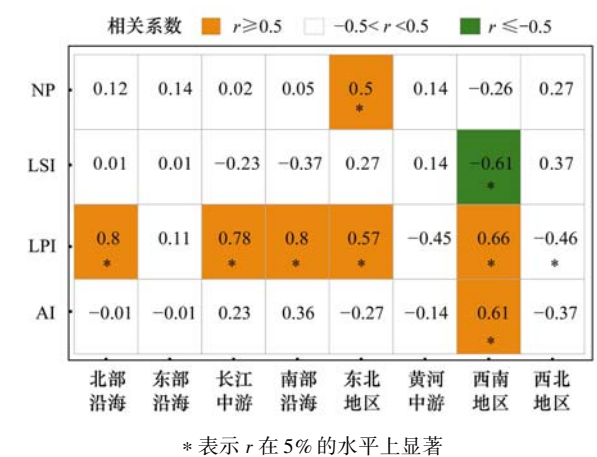


图 6 景观尺度下的 PM_{2.5} 与 NDVI 景观格局指数的相关系数

Fig. 6 Pearson correlation coefficients between PM_{2.5} and NDVI landscape level metrics

出正相关,而在 NDVI 高值区则表现为负相关,但这些相关性大部分是没通过显著性检验的. LPI 和 AI 指数与 PM_{2.5} 在 NDVI 的中低值区主要表现为负相关,而在高值区为正相关.

2.2.2 PM_{2.5} 污染与 NDVI 模型建立

为定量研究每个 NDVI 景观格局指数对 PM_{2.5} 的影响,对每个指标及 PM_{2.5} 数据进行极差标准化,并分别筛选各 NDVI 景观格局指数与 PM_{2.5} 存在显著统计相关性的数据(图 6 和图 7),建立混合模型、固定效应模型、个体随机变系数模型,并通过 F -test 检验选择适合的模型.从景观尺度看(表 3),东北地区的植被斑块个数(NP)增加一个单位,PM_{2.5} 增加 0.65 个单位.在西南地区,斑块聚集度(AI)越聚大,PM_{2.5} 污染越严重;而 LSI 值越大则 PM_{2.5} 污染越小.

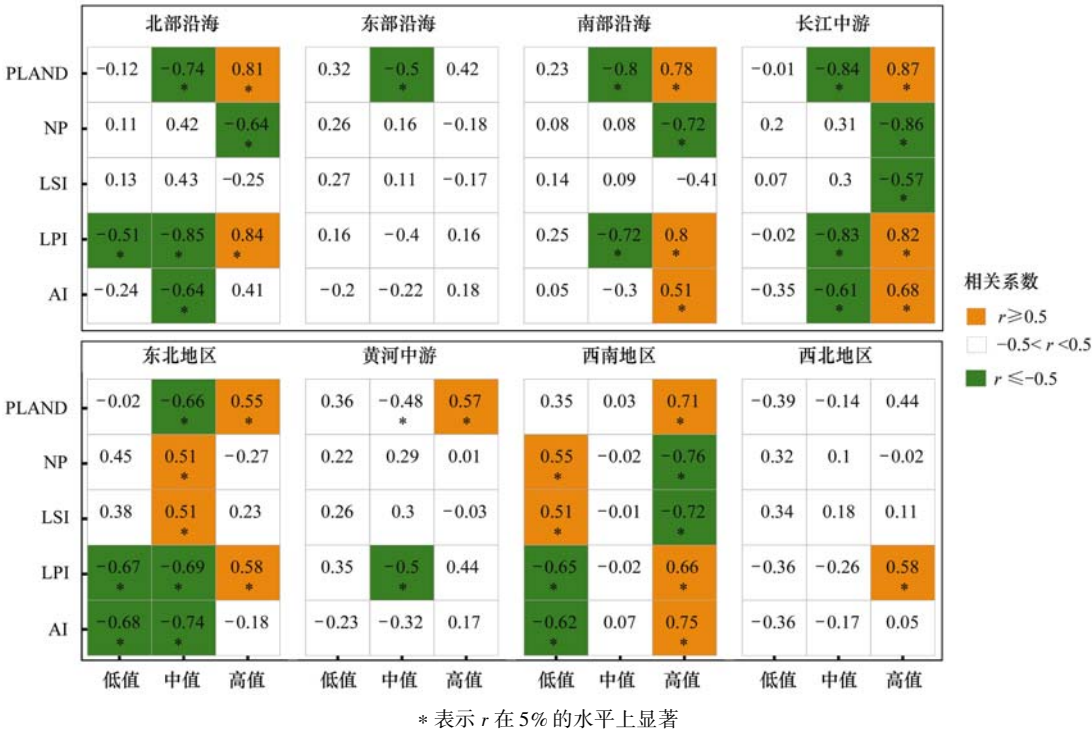


图 7 类型尺度下的 PM_{2.5} 与 NDVI 景观格局指数的相关系数

Fig. 7 Pearson correlation coefficients between PM_{2.5} and NDVI class level metrics

表 3 景观尺度下 PM_{2.5} 与 NDVI 景观格局指数的面板数据模型结果¹⁾

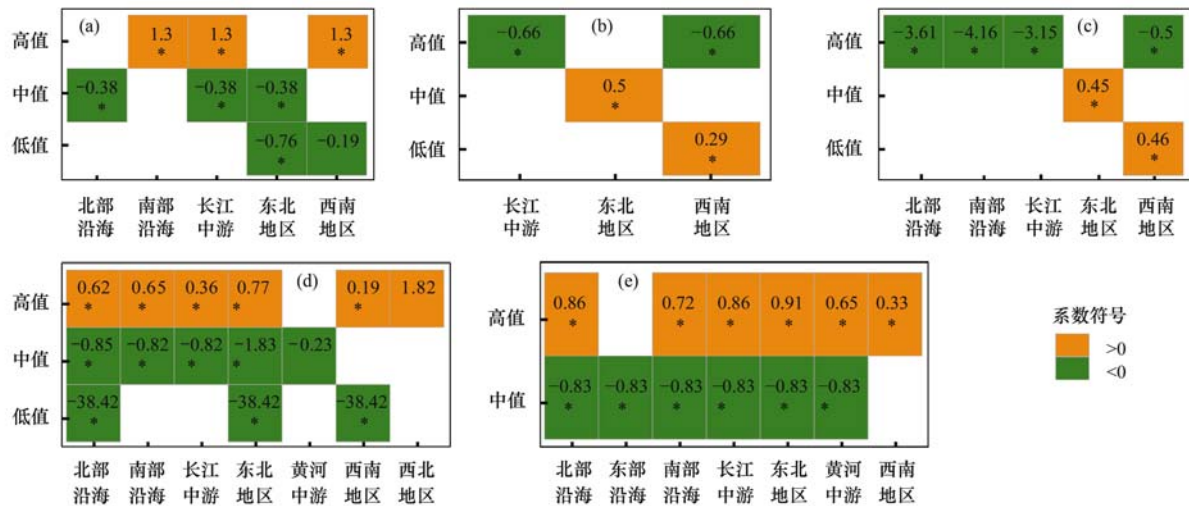
Table 3 Result of the panel data model between PM_{2.5} and NDVI landscape level metrics

景观格局指数	模型	系数	个体
NP	普通线性回归模型	0.65 *	东北地区
LSI	普通线性回归模型	-0.26 **	西南地区
AI	普通线性回归模型	0.42 **	西南地区
LPI	个体变系数模型	0.62 **	北部沿海
		0.57 **	南部沿海
		0.31 **	长江中游
		0.72 **	东北地区
		0.16 **	西南地区
		-0.33	西北地区

1) * 表示在 5% 的水平上显著, ** 表示在 1% 的水平上显著

LPI 对大多数经济区的 PM_{2.5} 有影响且存在明显的空间异质性,对东北地区的影响最大,该地区的 LPI 增加一个单位,PM_{2.5} 增加 0.72 个单位.

在类型尺度上(图 8)看,PM_{2.5} 与 AI、LSI 指标在 NDVI 高值区的模型采用普通线性回归模型,表明这些指标在高值区对 PM_{2.5} 污染的影响是相同的,不存在空间异质性. 同样的,在低值区 LPI 对 PM_{2.5} 和在中值区 PLAND 对 PM_{2.5} 污染的影响是相同的.除上面所述,PM_{2.5} 与各指数采用的都是个体变系数模型,这说明各指数对不同个体的 PM_{2.5} 影响从符号和数值上都不尽相同.从 NDVI 等级角度看,在高



(a) AI, (b) LSI, (c) NP, (d) LPI, (e) PLAND, * 表示系数在 5% 的水平上显著

图 8 景观尺度下 $PM_{2.5}$ 与 NDVI 景观格局指数的面板数据模型结果

Fig. 8 Result of the panel data model between $PM_{2.5}$ and NDVI class level metrics

值区的 NDVI 景观指数与 $PM_{2.5}$ 的系数符号与中低值区的系数符号相反. 对结果的合理性及解释还需要进一步探索. 如 NDVI 比例越高则 $PM_{2.5}$ 污染越严重, 出现这种结果的原因可能是 PLAND 和 $PM_{2.5}$ 都随时间增长导致的. 本文只分别考虑了每种指数对 $PM_{2.5}$ 的影响, 没有充分考虑多种指数之间的相关性以及对 $PM_{2.5}$ 的综合影响, 为更好地探究植被覆盖与 $PM_{2.5}$ 的机制, 还需要进一步探索 NDVI 等级的划分, 以便更合理地对结果进行解释.

3 结论

(1) 从 NDVI 景观尺度看, 大部分经济区的 $PM_{2.5}$ 污染随时间呈显著上升趋势. 污染较严重的地区集中在东部地区, 污染较轻的是西南、西北经济区. 北部沿海、东部沿海、黄河中游和东北地区的 $PM_{2.5}$ 随时间变化的曲线相似.

(2) 从 NDVI 等级尺度看, 大多数分区的 $PM_{2.5}$ 呈显著上升趋势. 北部沿海、东部沿海、南部沿海、长江中游、东北地区的 $PM_{2.5}$ 在 NDVI 低值区的污染最大, 而黄河中游、西南和西北经济区的 $PM_{2.5}$ 则在 NDVI 高值区的污染最严重.

(3) 不论是景观尺度还是类型尺度, NDVI 景观格局指数与 $PM_{2.5}$ 具有统计 (5% 置信水平) 相关关系的个数较少. 针对具有统计相关性的数据, 建立的面板数据模型表明: 中值区的 AI、高值区的 LSI、低值区的 LPI 和中值区的 PLAND 对 $PM_{2.5}$ 的影响较稳定; 其余分区的各景观指数对 $PM_{2.5}$ 的影响表现出空间异质性.

参考文献:

[1] 薛涛, 刘俊, 张强, 等. 2013~2017 年中国 $PM_{2.5}$ 污染的快速改善及其健康效益[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50

(4): 441-452.

Xue T, Liu J, Zhang Q, *et al.* Rapid improvement of $PM_{2.5}$ pollution and associated health benefits in China during 2013-2017[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(12): 1847-1856.

[2] Cohen A J, Brauer M, Burnett R, *et al.* Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the global burden of diseases study 2015[J]. The Lancet, 2017, 389(10082): 1907-1918.

[3] 夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 等. 2000~2019 年中国 $PM_{2.5}$ 时空演化特征[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 4832-4843.
Xiao X S, Wang J H, Song W D, *et al.* Spatio-temporal evolution of $PM_{2.5}$ concentration during 2000-2019 in China[J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 4832-4843.

[4] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气质量标准[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqjh/bz/dqjzlbz/201203/W020120410330232398521.pdf>, 2021-04-09.

[5] 国务院. 大气污染防治行动计划[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2013-09/13/content_4561.htm, 2021-04-12.

[6] 国务院. 打赢蓝天保卫战三年行动计划[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-07/03/content_5303158.htm, 2021-04-12.

[7] 中华人民共和国生态环境部. 2019 年中国环境状况公报[EB/OL]. <http://www.cnemc.cn/jcbg/zghjzkgb/202007/P020200716568022848361.pdf>, 2020-10-17.

[8] Bai H M, Gao W K, Zhang Y P, *et al.* Assessment of health benefit of $PM_{2.5}$ reduction during COVID-19 lockdown in China and separating contributions from anthropogenic emissions and meteorology[J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, doi: 10.1016/j.jes.2021.01.022.

[9] 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.

[10] Hu Y F, Hu Y. Land cover changes and their driving mechanisms in central Asia from 2001 to 2017 supported by Google earth engine[J]. Remote Sensing, 2019, 11(5), doi:

- 10.3390/rs11050554.
- [11] 杨伟, 姜晓丽. 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[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 2995-3003.
Yang W, Jiang X L. Interannual characteristics of fine particulate matter in north China and its relationship with land use and land cover change[J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 2995-3003.
- [12] Lin Y F, Yuan X Y, Zhai T L, *et al.* Effects of land-use patterns on PM_{2.5} in China's developed coastal region: exploration and solutions[J]. Science of the Total Environment, 2020, **703**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135602.
- [13] Duveiller G, Hooker J, Cescatti A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance [J]. Nature Communications, 2018, **9**(1), doi: 10.1038/s41467-017-02810-8.
- [14] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. 地理学报, 2020, **75**(5): 961-974.
Jin K, Wang F, Han J Q, *et al.* Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982-2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, **75**(5): 961-974.
- [15] 王震, 闫文德, 刘曙光, 等. 基于 MODIS 数据的中国三种主要土地类型变化的空间特征分析[J]. 生态学报, 2017, **37**(10): 3295-3301.
Wang Z, Yan W D, Liu S G, *et al.* Spatial-temporal characteristics of three main land-use types in China based on MODIS data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(10): 3295-3301.
- [16] Whistler J L. A phenological approach to land cover characterization using Landsat MSS data for analysis of nonpoint source pollution[D]. KARS: University of Kansas, 1996. 1-59.
- [17] Griffith J A. Geographic techniques and recent applications of remote sensing to landscape-water quality studies [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2002, **138**(1): 181-197.
- [18] 张军. 丹江流域植被格局演变及其与水质响应关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [19] Qiu L, Liu F, Zhang X, *et al.* Difference of airborne particulate matter concentration in urban space with different green coverage rates in Baoji, China[J]. International journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(8), doi: 10.3390/ijerph16081465.
- [20] 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.
- [21] Crouse D L, Pinault L, Balram A, *et al.* Complex relationships between greenness, air pollution, and mortality in a population-based Canadian cohort [J]. Environment International, 2019, **128**: 292-300.
- [22] 刘炳杰, 彭晓敏, 李继红. 基于 LUR 模型的中国 PM_{2.5} 时空变化分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5296-5307.
Liu B J, Peng X M, Li J H. Analysis of the temporal and spatial variation of PM_{2.5} in China based on the LUR model [J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5296-5307.
- [23] 杨婉莹, 刘艳芳, 刘耀林, 等. 基于 LUR 模型探究城市景观格局对 PM_{2.5} 浓度的影响——以长株潭城市群为例[J]. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(9): 2251-2261.
Yang W Y, Liu Y F, Liu Y L, *et al.* Investigating the effect of urban landscape pattern on PM_{2.5} concentration based on LUR model: a Chang-Zhu-Tan urban agglomeration case study [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, **28**(9): 2251-2261.
- [24] 欧维新, 张振, 陶宇. 长三角城市土地利用格局与 PM_{2.5} 浓度的多尺度关联分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, **29**(7): 11-18.
Ou W X, Zhang Z, Tao Y. Multi-scale correlation analysis of urban landscape pattern and PM_{2.5} concentration in the Yangtze River Delta[J]. China Population Resources and Environment, 2019, **29**(7): 11-18.
- [25] Shi Y, Ren C, Lau K K L, *et al.* Investigating the influence of urban land use and landscape pattern on PM_{2.5} spatial variation using mobile monitoring and WUDAPT[J]. Landscape and urban planning, 2019, **189**: 15-26.
- [26] 黄兴成, 李渝, 蒋大明, 等. 贵州赤水河流域植被指数时空变异研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, **42**(3): 139-145.
- [27] Huang X C, Li Y, Jiang T M, *et al.* Spatio-temporal variations of vegetation index in the Chishui River basin [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2020, **42**(3): 139-145.
- [27] 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.
- [28] Ali R, Kuriqi A, Abubaker S, *et al.* Long-term trends and seasonality detection of the observed flow in Yangtze River using Mann-Kendall and Sen's innovative trend method [J]. Water, 2019, **11**(9), doi: 10.3390/w11091855.
- [29] 卢德彬, 毛婉柳, 杨东阳, 等. 基于多源遥感数据的中国 PM_{2.5} 变化趋势与影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(3): 651-660.
Lu D B, Mao W L, Yang D Y, *et al.* Analysis on the trend and influencing factors of PM_{2.5} in China based on multi-source remote sensing data [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, **28**(3): 651-660.
- [30] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 等. 景观生态学原理及应用[M]. (第二版). 北京: 科学出版社, 2011. 86-92.
- [31] Croissant Y, Millo G. Panel data econometrics with R [M]. USA: John Wiley and Sons Incorporated, 2019. 185-207.
- [32] 魏艳华, 马立平, 王丙参. 中国八大综合经济区经济发展差异测度与评价[J]. 数量经济技术经济研究, 2020, **37**(6): 89-108.
Wei Y H, Ma L P, Wang B C. Evaluation and measurement of the economic development differences among the eight comprehensive economic zones in China [J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2020, **37**(6): 89-108.
- [33] Li Y, Chiu Y, Lin T Y. The impact of economic growth and air pollution on public health in 31 Chinese cities [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(3), doi: 10.3390/ijerph16030393.
- [34] Zhang Y, Shuai C Y, Bian J, *et al.* Socioeconomic factors of PM_{2.5} concentrations in 152 Chinese cities: decomposition analysis using LMDI [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **218**: 96-107.
- [35] 汪侠, 徐晓红. 长江经济带经济高质量发展的时空演变与区

- 域差距[J]. 经济地理, 2020, **40**(3): 5-15.
- Wang X, Xu X H. Spatial-temporal evolution and regional disparity of economic high-quality development in the Yangtze River economic belt[J]. *Economic Geography*, 2020, **40**(3): 5-15.
- [36] 刘鹏飞, 孙斌栋. 中国城市生产、生活、生态空间质量水平格局与相关因素分析[J]. 地理研究, 2020, **39**(1): 13-24.
- Liu D F, Sun B D. The spatial pattern of urban production-living-ecological space quality and its related factors in China [J]. *Geographical Research*, 2020, **39**(1): 13-24.
- [37] 杨昆, 时燕, 罗毅, 等. 经济快速发展背景下中国民用汽车拥有量变化的时空特征[J]. 地理科学, 2019, **39**(4): 65-662.
- Yang K, Shi Y, Luo Y, *et al.* Spatial-temporal characteristics of ownership change of civil car in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, **39**(4): 654-662.

欢迎订阅 2022 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE; Scopus; 化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA); Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA); Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS); Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjks@rcees.ac.cn;网址:www.hjks.ac.cn

CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies: A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i> (5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i> (5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i> (5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOW Wei, <i>et al.</i> (5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i> (5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i> (5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i> (5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i> (5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i> (5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i> (5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i> (5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i> (5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i> (5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i> (5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i> (5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i> (5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i> (5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i> (5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i> (5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i> (5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i> (5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i> (5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i> (5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i> (5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i> (5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i> (5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i> (5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qi, HUANG Chong, <i>et al.</i> (5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in A Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i> (5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong, <i>et al.</i> (5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i> (5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i> (5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i> (5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i> (5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i> (5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i> (5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i> (5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i> (5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i> (5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i> (5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i> (5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i> (5554)