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

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第5期
2020年5月15日

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, 向锌鹏, 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, 窦有俊(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, 笪文怡, 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, 岳哿丞, 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)
长江下游支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, 王晓暄, 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, 何姝, 申泰铭(2257)
城郊流域源汇景观格局与水体抗生素的关系 …… 李敏, 唐剑锋, 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, 朱弈, 赵昕, 贾其隆, 徐慧婷, 叶建锋(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)
不同环境条件下水铁矿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)/$S_2O_8^{2-}$ 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 …… 姜滢, 郭萌蕾, 谢军祥, 常尧枫, 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, 韩莹, 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, 李娇, 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)
施用生物炭对墁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_2O 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产 N_2O 相关功能微生物的影响 …… 王鋆燕, 王富华, 罗东海, 吕盛, 王子芳, 高明(2445)
咸水滴灌对棉田土壤 N_2O 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, 闵伟(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, 马姣娇, 徐颂军(2496)
《环境科学》征订启事(2086) 《环境科学》征稿简则(2187) 信息(2209, 2263, 2309)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第5期 2020年5月
Vol.41, No.5 May, 2020

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[1,2], 陈菁菁[1,2], 王佳佳[1,2], 程先富[1,2*]
(1. 安徽师范大学地理与旅游学院, 芜湖 241002; 2. 安徽自然灾害过程与防控研究省级实验室, 芜湖 241002)

摘要: 选取气溶胶光学厚度、海拔、年降水量、年均气温、年均风速、人口密度、GDP 密度和 NDVI 作为影响因子,基于随机森林模型、特征重要性排序和偏依赖图技术,研究中国 $PM_{2.5}$浓度空间分布的影响因素及其区域差异. 结果表明:①与多元回归、广义可加模型和 BP 神经网络相比,随机森林模型估算的 $PM_{2.5}$浓度精度最高,可用于 $PM_{2.5}$污染的影响因素研究. ② $PM_{2.5}$浓度随气溶胶光学厚度、人口密度和 GDP 密度的增加呈先上升后平稳的趋势,随降水、风速和 NDVI 的增加呈先下降后平稳的趋势,随海拔和气温的增加呈下降→上升→下降的趋势. ③ 气溶胶光学厚度对 $PM_{2.5}$浓度空间分布的影响最大,可解释 37.96% 的 $PM_{2.5}$浓度空间分异;年降水量对 $PM_{2.5}$浓度空间分布的影响最小,解释率仅为 5.75%. ④影响因子与 $PM_{2.5}$浓度的关系存在空间异质性,同一影响因子对不同地理分区的 $PM_{2.5}$浓度的影响程度有所不同. 气溶胶光学厚度对华南地区 $PM_{2.5}$浓度的空间分布影响最大,对东北地区影响最小.

关键词:$PM_{2.5}$; 影响因素; 区域差异; 随机森林; 中国
中图分类号: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)05-2057-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201910126

$PM_{2.5}$ Concentration Influencing Factors in China Based on the Random Forest Model

XIA Xiao-sheng[1,2], CHEN Jing-jing[1,2], WANG Jia-jia[1,2], CHENG Xian-fu[1,2*]
(1. College of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China; 2. Provincial Key Laboratory of Natural Disaster Process and Prevention, Anhui Province, Wuhu 241002, China)

Abstract: In this paper, aerosol optical depth (AOD), elevation (DEM), annual precipitation (PRE), annual average temperature (TEM), annual average wind speed (WS), population density (POP), gross domestic product density (GDP), and normalized difference vegetation index (NDVI) were selected as factors influencing $PM_{2.5}$ concentration. The random forest model, order of feature importance, and partial dependency plots were applied to investigate these factors and their regional differences in $PM_{2.5}$ spatial pattern. The results showed that: ① The random forest model was more accurate than multiple regression, generalized additive, and back propagation neural network models in estimating $PM_{2.5}$ concentration, which can be applied to quantifying $PM_{2.5}$ influencing factors. ② $PM_{2.5}$ concentration initially increased and then remained stable with increases in AOD, POP, and GDP, and initially decreased and then stabilized with increases in PRE, WS, and NDVI. The responses of DEM and TEM to $PM_{2.5}$ concentration changed from decline to ascend and then changed to decline again. ③ AOD had the largest influence on $PM_{2.5}$ annual concentrations with a spatial influencing magnitude of 37.96%, whereas PRE had the least influence with a merely individual spatial influencing magnitude of 5.75%. ④ The relationships between $PM_{2.5}$ pollution and influencing variables vary with geography and thus exhibit significant spatial heterogeneity. The same factor had different spatial influencing magnitudes on $PM_{2.5}$ annual concentrations in seven geographical subareas. AOD had the greatest influence on $PM_{2.5}$ concentration in the south of China, with the least influence in the northeast.

Key words:$PM_{2.5}$; influencing factor; regional variation; random forest; China

$PM_{2.5}$是中国目前面临的最重要的大气污染物,呈现出典型的区域性、复合型污染特征,逐渐演变为中国大气污染的重点和难点[1]. 高浓度的 $PM_{2.5}$不仅降低大气能见度[2]和影响局地气候[3],还危害人体健康[4]和增加居民死亡率[5]. 因此,识别 $PM_{2.5}$浓度的关键影响因素对防治大气污染至关重要.

目前,学者们主要从自然和社会经济因素两个方面,应用多元回归[6]、空间计量模型[7]、因素分解模型[8]、地理探测器[9]、地理加权回归模型[10,11]和化学传输模型[12]等方法进行 $PM_{2.5}$浓度的影响因素研究. 例如,Meng 等[6]利用多元回归分析了逆温、大气边界层高度、风向和相对湿度等不同气象因子对北京市冬季 $PM_{2.5}$浓度的相对贡献. Jiang 等[13]基于结构方程模型量化城市规模、工业活动和居民活动等不同社会经济因子对中国城市 $PM_{2.5}$污染的相对贡献. 刘海猛等[7]运用空间自相关分析和空间计量模型,定量解析了自然与人文因素对京津冀区县尺度 $PM_{2.5}$的贡献程度及其空间溢出效应. 近年来,机器学习在 $PM_{2.5}$污染研究领域的应用不断深化,主要集中在 $PM_{2.5}$浓度估算和预测[14~16]以及大气污染定量归因的跨学科研究[17~21]. 如尹晓梅等[17]借助大数据挖掘算法,基于 K 近邻和支持向量机模型评估

收稿日期: 2019-10-18; **修订日期**: 2019-12-04
基金项目: 国家自然科学基金项目(41271516)
作者简介: 夏晓圣(1994~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气环境遥感,E-mail: xiaoshengxia19@163.com
* 通信作者,E-mail:xianfucheng@sina.com

气象和减排对北京市空气质量改善的贡献. Li 等[20]利用卷积神经网络模型探讨人口密度、GDP 密度、地形、土地利用对 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布的影响. 贺祥等[19]运用广义可加模型分析影响因素的交互作用对 $PM_{2.5}$ 浓度变化的影响.

应用机器学习技术研究 $PM_{2.5}$ 浓度的影响因素,取得了丰富的成果,但前人的研究大多关注于机器学习模型的拟合精度,缺乏对模型本身的解释[20];且对地理空间维度重视不够,缺乏对 $PM_{2.5}$ 浓度影响因素的空间异质性研究. 随机森林模型一般不考虑回归分析中的多元共线性问题,无需进行变量选择,可借助特征重要性排序和偏依赖图等方法提高模型的可解释性. 如王超等[22]基于随机森林模型和特征重要性排序探索西藏地区人口分布的影响因素及其区域差异. Ye 等[23]应用随机森林模型和偏依赖图技术明确地形、道路等要素对中国人口空间分布的影响. 因此,本研究首先基于随机森林模型,应用特征重要性排序和偏依赖图技术增强模型的可解释性,明确影响因子对 $PM_{2.5}$ 浓度的相对重要性和非线性响应关系. 其次,利用模型验证集的拟合精度(R^2)量化和比较影响因素对 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异的解释力度. 最后从区域分异的视角,比较同一影响因素对不同地理分区 $PM_{2.5}$ 浓度的影响差异.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

$PM_{2.5}$ 浓度与其影响因素间的关系具有明显的空间异质性. 因此,本文基于中国科学院自然地理分区标准,将中国划分为七大地理分区(图 1),从全国和区域两个尺度分析各影响因素与 $PM_{2.5}$ 浓度的关系,着重讨论同一影响因素与 $PM_{2.5}$ 浓度的关系在不同区域间的差异.

1.2 研究数据

根据对已有研究的梳理,基于数据能够被栅格化的原则,本文选取 2000、2005、2010 和 2015 年这 4 个时期年降水量(PRE)、年均气温(TEM)、年均风速(WS)、海拔高度(DEM)和 NDVI 作为自然因子解释变量,AOD、人口密度(POP)和 GDP 密度(GDP)作为社会经济解释变量. 由于产业结构、能源消费等统计年鉴数据缺乏成熟的空间化栅格数据集,故本研究未选用此类指标变量.

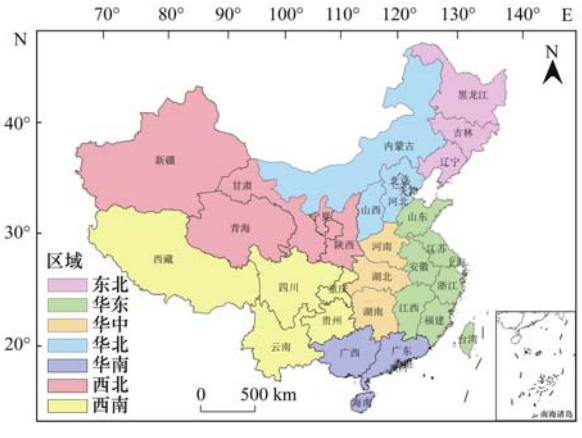

图 1 中国七大地理分区分布示意

Fig. 1 Map of China and the its seven geographical subareas

1.2.1 $PM_{2.5}$ 数据

2000 ~ 2015 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度栅格数据集来源于戴尔豪斯大学大气成分分析组织,网址为 http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/?page_id=140,空间分辨率为 0.1° × 0.1°[24].

1.2.2 再分析数据集

MERRA-2 再分析数据集是 NASA 戈达德地球科学数据和信息服务中心在融合多种气象观测资料和卫星数据基础上所生成的同化数据集,空间分辨率为 0.5° × 0.625°(纬度 × 经度). 本文提取逐月气溶胶光学厚度(AOD)和风速(由 10 m 径向风和纬向风合成)数据,利用均值合成年均 AOD 和年均风速.

1.2.3 栅格数据集

年降水量和年均气温数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心的中国 1980 年以来逐年年降水量、年平均气温空间插值数据集. 该数据集是基于全国2 400多个气象站点日观测数据,通过整理、计算和空间插值处理生成,空间分辨率为 1 km × 1 km.

NDVI、DEM、GDP 密度和人口密度数据均来自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 × 1 km.

1.2.4 数据处理

首先,将所有栅格数据统一投影至 China-Lambort 投影,并重采样至 10 km 分辨率. 其次,将 $PM_{2.5}$ 年均浓度栅格数据转点,利用 ArcGIS 中 Extract Multi Values to Points 工具提取解释变量栅格相应位置处的像元值,实现 $PM_{2.5}$ 年均浓度和所有解释变量数据的空间匹配,共计360 808个匹配样本. 以 2015 年为例,所有影响因素的可视化展示如图 2 所示.

1.3 随机森林模型

随机森林(RF)模型是 Breiman 提出的一种基于决策树的机器学习算法[25]. RF 通过 bootstrap 重采样技术从原始训练样本集中抽取并生成训练样本子集,然后根据训练样本集生成多个决策树并组成随机森林,其分类或回归模型结果按决策树投票分数而定.

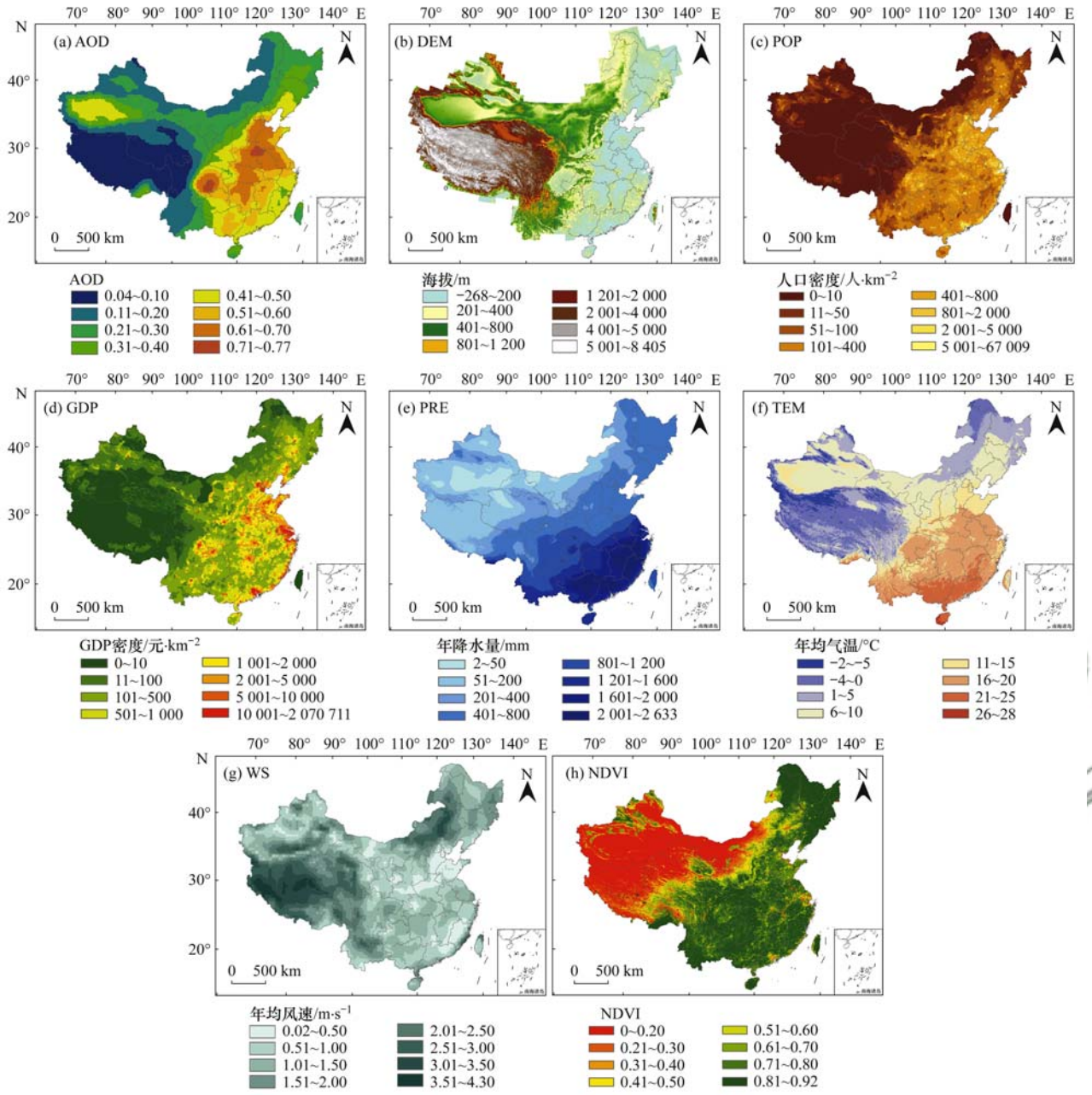

图 2　2015 年解释变量的空间分布

Fig. 2　Spatial pattern diagram of independent variables in 2015

本文基于360 808个匹配样本数据，将所有影响因素作为解释变量，$PM_{2.5}$ 年均浓度作为因变量，构建随机森林回归模型（图 3）. 按 1∶9的比例划分训练集和测试集，利用测试集的模型精度（R^2）衡量影响因素对 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布的影响大小.

偏依赖图（partial dependency plot）显示了机器学习模型中一个自变量对先前拟合模型预测结果的边际效应，被视为一种对机器学习结果的可解释的方法[26]. 偏依赖函数 $\hat{f}_{xs}$ 可通过固定某个变量，计算其它变量的所有组合的预测函数的平均值得到.

$$\hat{f}_{xs}(xs) = E_{xc}[\hat{f}_{xs,xc}] \tag{1}$$

式中，$\hat{f}$ 为机器学习模型（本文中为随机森林模型），xs 为偏依赖图需要绘制的变量，xc 为机器学习模型中使用的其它变量.

1.4　广义可加模型

广义可加模型（GAM）是 Hastie 等[27]提出的一种融合可加模型和广义线性模型的非参数回归模型，可对部分解释变量进行线性拟合，对其他因子进行平滑函数拟合. 模型无需预先设定参数模型，通过建立解释变量的平滑函数，能够自动选择合适的多项式.

$$g(\mu) = s_0 + s_1(X_1) + s_2(X_2) + \cdots + s_p(X_p) \tag{2}$$

式中，$\mu = E(Y \mid X_1, X_2, \cdots, X_p)$，$g(\mu)$ 是连接函数，X_i 为解释变量，$s_p(X_p)$ 是非参数平滑函数，其估计方法

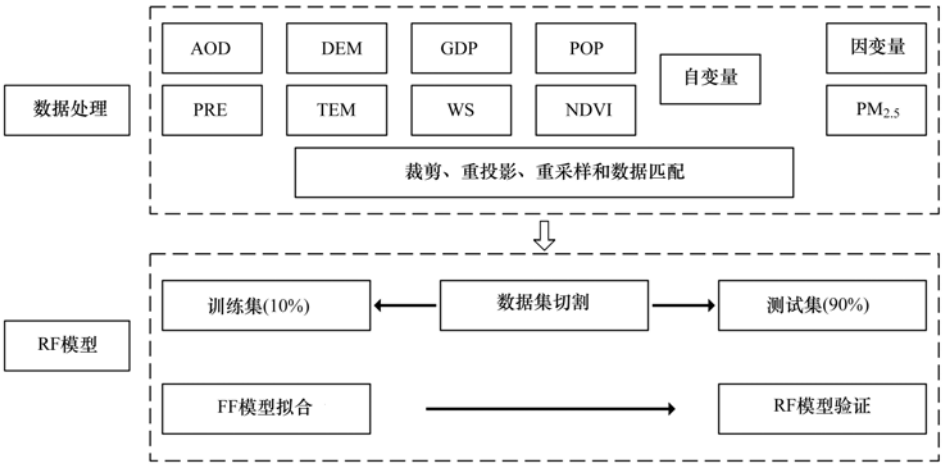

图 3 随机森林模型示意

Fig. 3 Diagram of random forest model

有平滑样条法、局部加权回归散点平滑法、薄板平滑样条法.

1.5 BP 神经网络

BP 神经网络是一种多层前馈神经网络,包含正向传播和反向传播两个过程[14]. 通过模仿人脑神经元的运行机制,神经网络具有自学习、自适应的优点,较强的非线性映射和泛化能力.

2 结果与讨论

2.1 随机森林模型的适用性评估

相关性分析表明,$PM_{2.5}$年均浓度与所有影响因子的相关系数均显著,但与人口密度的偏相关系数不显著(表 1). 这是因为 2006 年以来,中国 $PM_{2.5}$污染整体呈好转趋势[9],而人口呈缓慢增加趋势,说明人口并非是影响 $PM_{2.5}$浓度的关键因素. 回归分析显示,$PM_{2.5}$年均浓度与 AOD、TEM 和 GDP 呈正相关,与 PRE、WS、DEM 和 NDVI 呈负相关;AOD、PRE、WS 和 NDVI 对 $PM_{2.5}$年均浓度的影响较大,TEM、DEM 和 GDP 的影响较小.

表 1 $PM_{2.5}$年均浓度与影响因子的相关系数与标准化回归系数1)

Table 1 Correlation coefficient and standard regression coefficient between $PM_{2.5}$ annual average concentration and each influencing factor

影响因子	相关系数	偏相关系数	标准化回归系数
AOD	0.664 **	0.658 **	0.885
PRE	−0.034 **	−0.392 **	−0.421
TEM	0.435 **	0.087 **	0.098
WS	−0.441 **	−0.272 **	−0.134
DEM	−0.480 **	−0.072 **	−0.074
NDVI	−0.060 **	−0.371 **	−0.239
POP	0.219 **	0.001	—
GDP	0.115 **	0.031 **	0.022

1) * * 表示在 0.01 水平上显著相关

将影响因素作为自变量,$PM_{2.5}$年均浓度作为因变量,分别构建多元线性回归、广义可加模型、BP 神经网络和随机森林回归模型,并比较 4 种方法在测试集中的精度(R^2 和 RMSE). 由图 4 可知,随机森林回归的拟合精度(R^2)最高,优于 BP 神经网络、广义可加模型和多元线性回归;多元线性回归的预测误差(RMSE)最大,大于广义可加模型、BP 神经网络和随机森林回归;此外,多元线性回归、广义可加模型和 BP 神经网络的 $PM_{2.5}$年均浓度估计值中存在负值,与实际意义相悖,而随机森林拟合值中未发现负值. 因此,可以用随机森林方法分析 $PM_{2.5}$浓度空间分异的影响因素. 随机森林模型预测的 2015 年 $PM_{2.5}$年均浓度的空间化可视效果如图 5 所示,可以发现:除少数像元外,随机森林预测的 $PM_{2.5}$年均浓度均能很好地刻画原始 $PM_{2.5}$浓度的空间格局、污染中心.

2.2 影响因素对 $PM_{2.5}$浓度的响应

本文分别利用特征重要性排序和偏依赖关系图来增强随机森林模型的可解释性,图 6 为 IncMSE 方法和 IncNodePurity 方法得到的变量重要性排序. 两种不同重要性排序方法的结果大同小异:AOD、DEM、PRE 和 TEM 的变量重要性强于 NDVI、WS、POP 和 GDP;IncMSE 方法中,DEM 的重要性最强,POP 最弱;IncNodePurity 方法中,AOD 的重要性最强,GDP 最弱. 与标准化回归系数相比,基于随机森林算法的影响因子重要性排序情况也有所差异.

偏依赖图显示 $PM_{2.5}$浓度和影响要素之间的相关性. 随着 AOD 的增加,$PM_{2.5}$浓度随之增加[图 7(a)]. 当 AOD 大于 0.7 时,对 $PM_{2.5}$浓度分布的影响程度达到最大并保持不变. 海拔[图 7(b)]与 $PM_{2.5}$浓度分布的关系呈下降→上升→下降的趋势:当海拔低于 600 m 时,随着海拔的升高,$PM_{2.5}$浓度呈快速下降趋势;当海拔在1 000 ~ 3 000 m时,随着海拔的升高,$PM_{2.5}$浓度呈上升趋势;当海拔高于

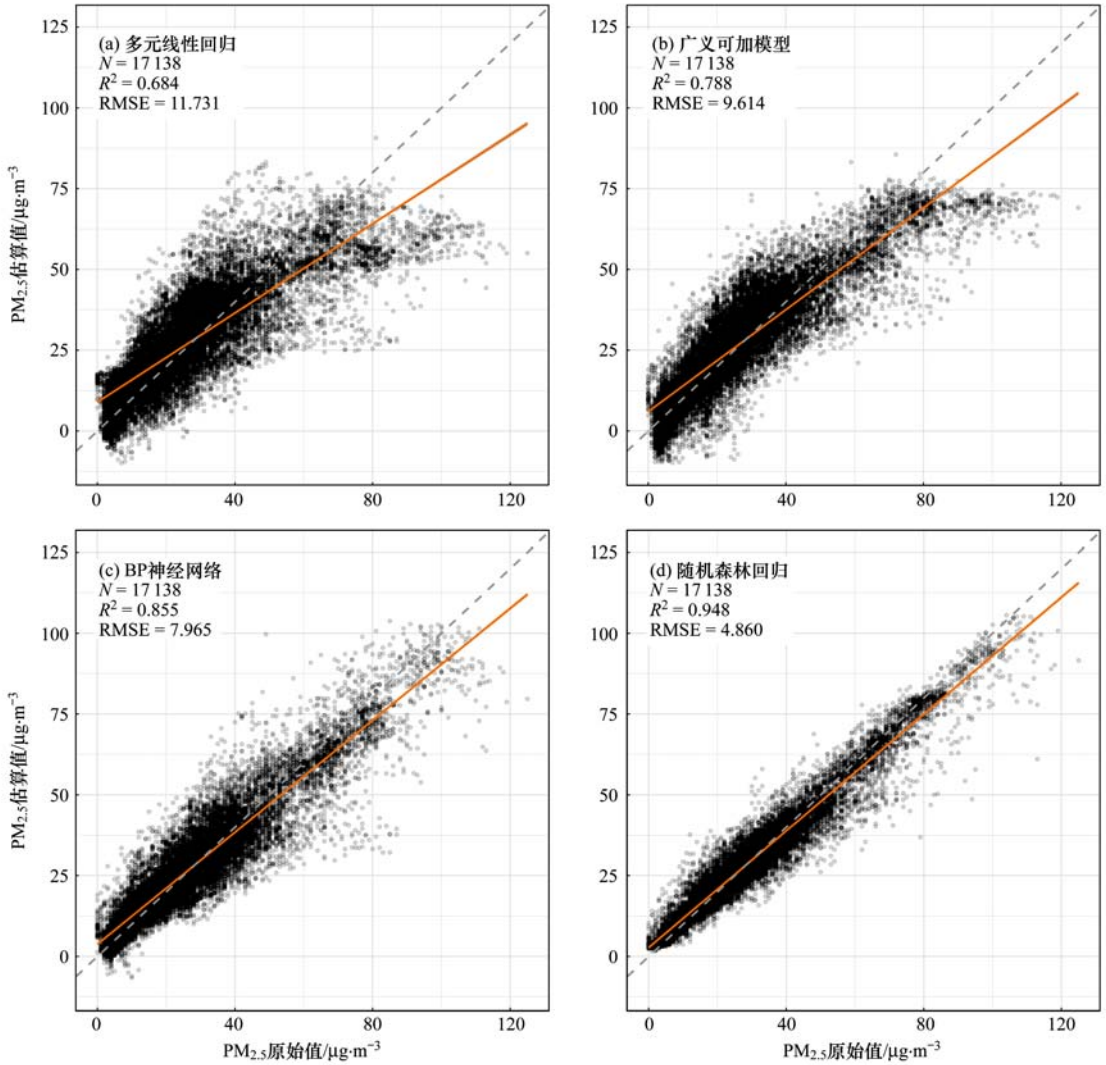

图 4　4 种模型估算的 $PM_{2.5}$ 年均浓度验证

Fig. 4　Scatter plots of $PM_{2.5}$ annual concentration for model estimation and original data

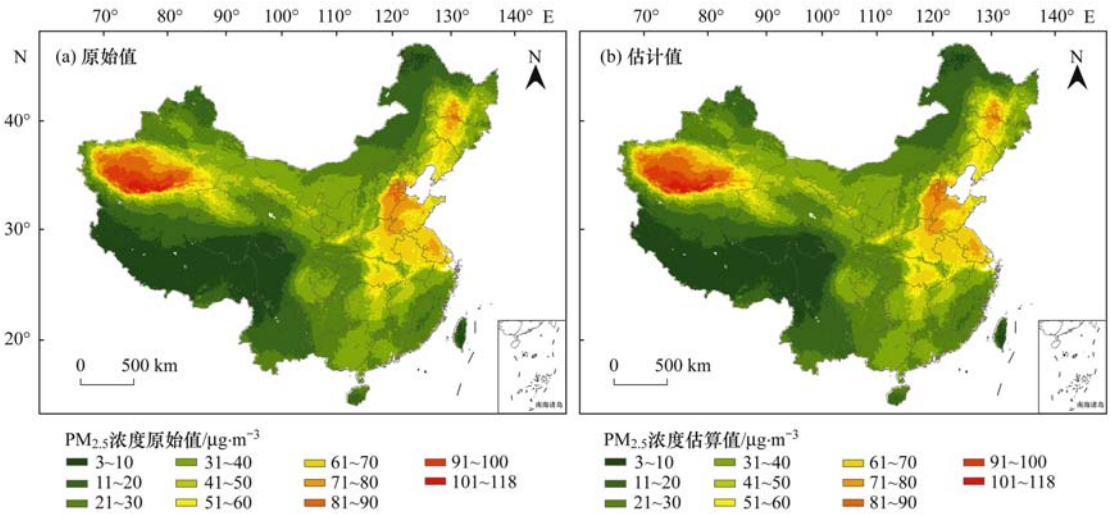

图 5　2015 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度原始值与随机森林模型估计值的空间分布

Fig. 5　Original, estimated spatial distribution of $PM_{2.5}$ annual concentrations by random forest model over China in 2015

3 000 m时，随着海拔的升高，$PM_{2.5}$ 浓度呈下降趋势，5 000 m后趋于平缓.

年降水量[图7(c)]与 $PM_{2.5}$ 浓度分布呈负相关关系，当年降水量小于 1 000 mm 时，对 $PM_{2.5}$ 浓度分布的影响程度急剧下降；当年降水量大于 2 000 mm 时，对 $PM_{2.5}$ 浓度分布的影响程度达到最小并保持不

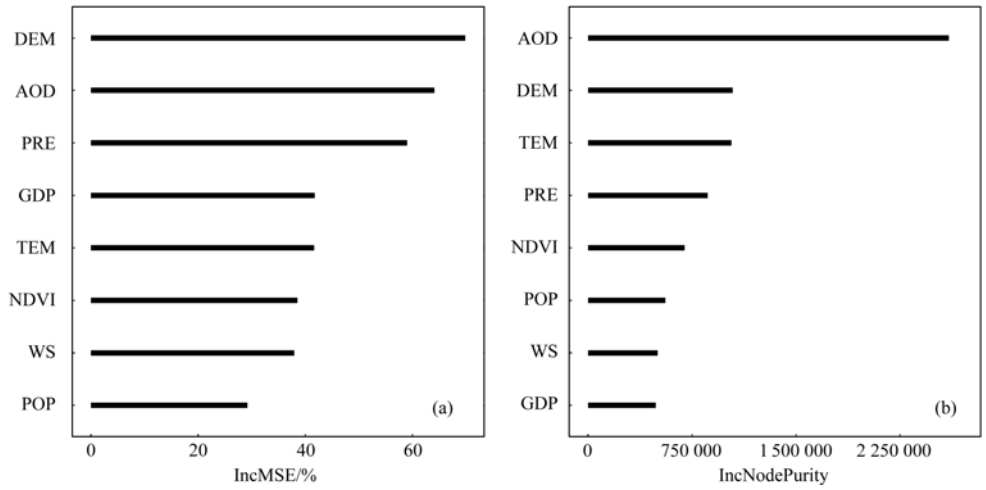

图 6 影响因子重要性排序

Fig. 6 Importance ranking of influencing factors

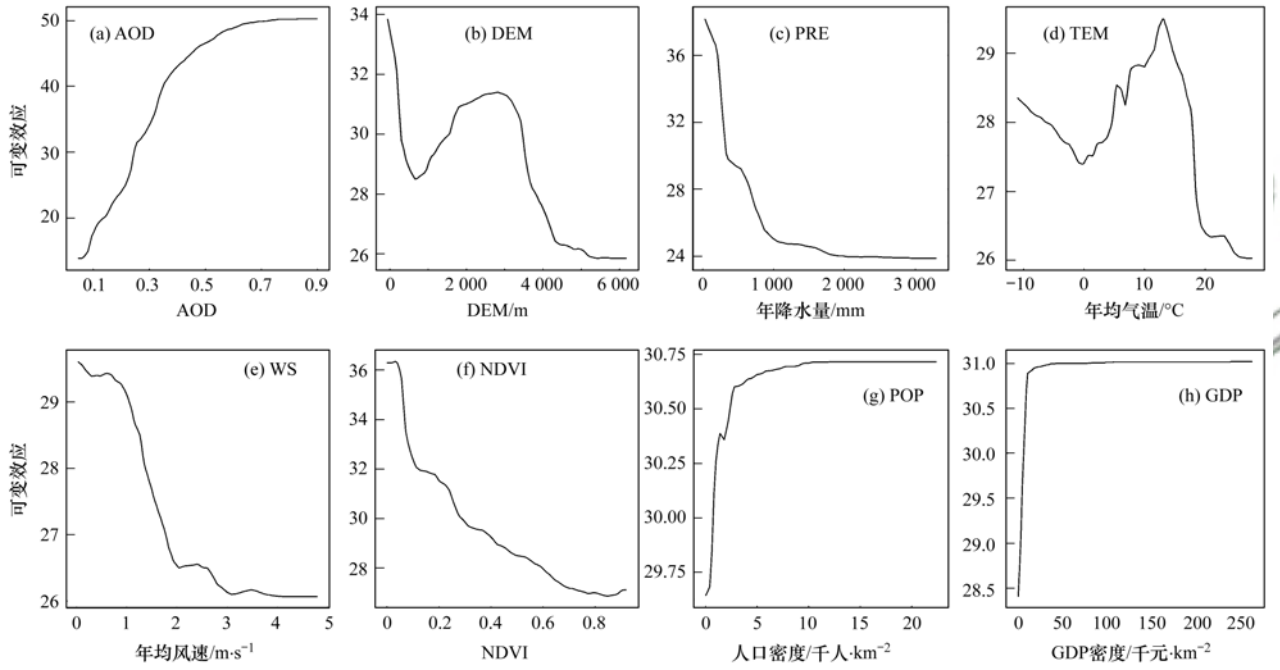

图 7 影响因子对 $PM_{2.5}$ 年均浓度的偏依赖

Fig. 7 Partial dependency plots for the factors in the RF model predicting $PM_{2.5}$ annual average concentration

变. 年均气温[图 7(d)]与 $PM_{2.5}$ 浓度分布的关系与 DEM 类似:气温在 0℃以下,对 $PM_{2.5}$ 浓度分布的影响程度逐渐下降;气温在 0 ~ 13℃之间,对 $PM_{2.5}$ 浓度分布的影响程度逐渐上升;气温大于 13℃,对 $PM_{2.5}$ 浓度分布的影响程度急剧下降. $PM_{2.5}$ 浓度与风速[图 7(e)]呈负相关关系,当风速在 0.7 ~ 2.0 $m \cdot s^{-1}$ 之间,对 $PM_{2.5}$ 浓度分布的影响程度急剧下降;当风速大于 3 $m \cdot s^{-1}$ 时,风速对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响程度达到最小,并保持不变.

NDVI 与 $PM_{2.5}$ 浓度分布呈负相关关系,随着 NDVI 的上升,NDVI 对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响程度逐渐减小[图 7(f)]. 这表明中、低地表植被覆盖区的绿化工程对改善大气环境和降低 $PM_{2.5}$ 浓度的作用更加显著. $PM_{2.5}$ 浓度分布与人口密度呈正相关,当人口密度大于 1 万人 · km^{-2} 时,人口密度对 $PM_{2.5}$ 浓度分布的影响程度达到最大并保持不变[图 7(g)]. 类似的,$PM_{2.5}$ 浓度分布与 GDP 密度呈正相关,当 GDP 密度大于 4 万元·km^{-2} 时,GDP 对 $PM_{2.5}$ 浓度分布的影响程度达到最大并保持不变[图 7(h)].

2.3 单因素对 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布的影响

本文提出的随机森林模型同样可以量化单个因素对 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布的影响程度. 分别将各影响因素作为输入变量,以 $PM_{2.5}$ 年均浓度值作为输出变量,参数设置一律默认,训练随机森林模型. 模型拟合结果如图 8 所示:AOD 和 DEM 对 $PM_{2.5}$ 年均浓度

的空间分布影响程度最高，NDVI 和 PRE 的影响程度最低. 按影响程度大小排序，AOD、DEM、TEM、POP、GDP、WS、NDVI 和 PRE 分别能解释 37.96%、25.91%、22.92%、11.61%、10.63%、8.63%、6.35% 和 5.75% 的 $PM_{2.5}$ 年均浓度的空间分异.

同理，将各因素两两组合作为随机森林模型的输入变量，以量化因素交互作用对 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布的影响（图 8）. AOD 与 PRE 交互能够解释 79.78% 的 $PM_{2.5}$ 年均浓度的空间分异，AOD 与 NDVI（74.70%）和 AOD 与 POP（71.86%）交互也能解释 70% 以上的 $PM_{2.5}$ 年均浓度空间分布.

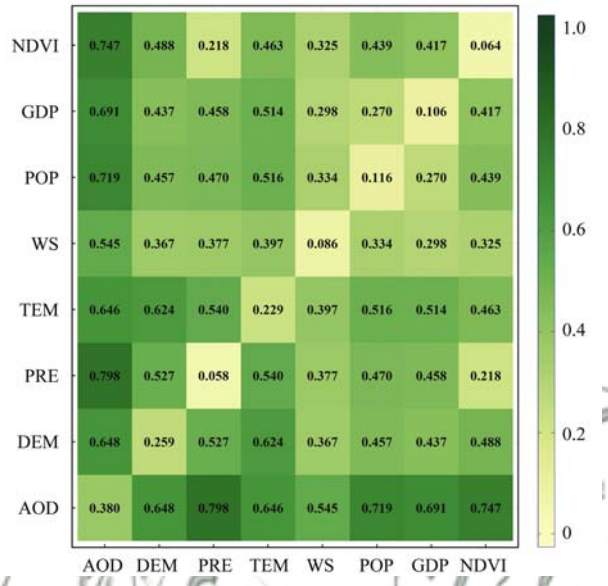

图 8　因素交互作用对 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布的影响

Fig. 8　Spatial influencing magnitude of individual and interactive factors on $PM_{2.5}$ annual concentration

2.4　影响因素的区域差异分析

区域差异是地理学的传统研究视角，为探索 $PM_{2.5}$ 年均浓度影响因子的区域差异，对不同地理分区的影响因子分别进行随机森林拟合与验证（图 9）. 图 9 显示，地理分区尺度下随机森林模型的测试集精度较高（R^2 均大于 0.90），适合进行影响因素研究. 在不同地理分区，AOD 可以解释 44.49%～78.17% 的 $PM_{2.5}$ 年均浓度的空间分异，是影响 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布的关键因子，其解释率在不同地理分区的排序为：华南 > 西南 > 华北 > 华东 > 西北 > 华中 > 东北. 其主要原因为经济发展水平的地区差异，华南、华北和华东地区人口集中，产业密集，人为气溶胶排放量大；西南地区经济发展加速，人为气溶胶排放增长迅速. DEM 能够解释 0.81%～68.15% 的 $PM_{2.5}$ 浓度的空间分布，在不同地理分区，其影响力度依次为：西南 > 华北 > 华中 > 华东 > 西北 > 东北 > 华南. 地形因素对西南地区的 $PM_{2.5}$ 浓度影响最大，青藏高原和云贵高原的 $PM_{2.5}$ 浓度较低，四川盆地的 $PM_{2.5}$ 浓度较高[28].

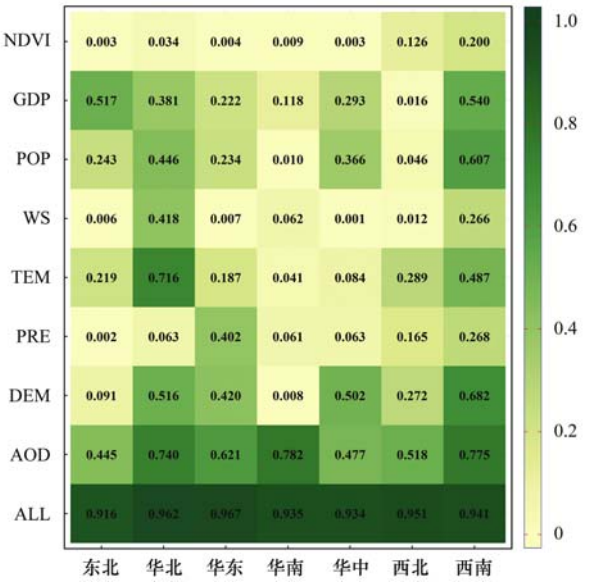

图 9　不同地理分区 $PM_{2.5}$ 年均浓度的影响因子的空间解释力度

Fig. 9　Spatial influencing magnitude of factors on $PM_{2.5}$ concentration in seven geographical subareas

PRE 对 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布的解释力度普遍较弱，在不同地理分区，其影响力度依次为：华东、西南、西北、华中、华北、华南和东北. TEM 对 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布的解释力度在 14.19%～78.57% 之间，在不同地理分区，其影响力度排序为：华北、西南、西北、东北、华东、华中和华南. 华北地区大气层结稳定，逆温天气频发，大气混合层高度低，不利于污染颗粒物的扩散[29]；加之采暖期燃煤排放，导致大气污染严重[30]. 华南地区主要为南亚热带气候类型，年均气温差异较小，对 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异的影响不大. 除华北和西南外，其它地理分区的 WS 对当地 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布的解释力度均较小于 1%. 华北平原的年均风速较小，加之太行山、燕山沿山地区常形成地形辐合线，易于大气污染物的辐合积累[31].

POP 能解释 0.98%～60.69% 的 $PM_{2.5}$ 浓度的空间分布，华南、西北地区 POP 对当地 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布的解释力度最小. 类似地，西北和华南地区 GDP 对当地 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布的解释力度也最小. 西北地区人类活动稀少，经济发展水平不高，$PM_{2.5}$ 以自然气溶胶为主；华南地区的主导产业为服务业、高新技术等第三产业，经济发展对大气的污染较小[32]. 不同地理分区的 NDVI 对当地 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布的解释力度最小，除西南和西北外，其它地理分区的 NDVI 对当地 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布的解释力度均较小于 5%. 植被通过对大气颗粒物的净化、吸收作用有效降低 $PM_{2.5}$ 浓度，但随着 NDVI 的上升，NDVI 对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响程度逐渐减小[图 7

(f)]. 西南、西北地区荒漠化严重,植被覆盖率较低.

3 结论

(1)与多元回归、广义可加模型和 BP 神经网络相比,利用随机森林模型估算的 $PM_{2.5}$ 浓度精度最高,可用于 $PM_{2.5}$ 影响因素研究.

(2)$PM_{2.5}$ 浓度与影响因素间存在非线性响应关系,$PM_{2.5}$ 浓度随 AOD、POP 和 GDP 的增加呈先上升后平稳的趋势,随 PRE、WS 和 NDVI 的增加呈先下降后平稳的趋势,随 DEM 和 TEM 的增加呈下降→上升→下降的趋势.

(3)AOD 对 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布的影响最大,可解释 37.96% 的 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异;PRE 对 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布的影响最小,解释率仅为 5.75%. 因子交互显著提高了影响因素对 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布的解释力度.

(4)$PM_{2.5}$ 浓度与影响因素间的关系存在空间异质性,同一影响因子对不同地理分区的 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布的影响力度存在区域差异. AOD 对华南地区 $PM_{2.5}$ 浓度的空间分布影响最大,对东北地区影响最大.

参考文献:

[1] 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.

[2] 宋明, 韩素芹, 张敏, 等. 天津大气能见度与相对湿度和 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 的关系[J]. 气象与环境学报, 2013, **29**(2): 34-41.
Song M, Han S Q, Zhang M, *et al*. Relationship between visibility and relative humidity, PM_{10}, $PM_{2.5}$ in Tianjin [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, **29**(2): 34-41.

[3] 王跃思, 张军科, 王莉莉, 等. 京津冀区域大气霾污染研究意义、现状及展望[J]. 地球科学进展, 2014, **29**(3): 388-396.
Wang Y S, Zhang J K, Wang L L, *et al*. Researching significance, status and expectation of haze in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Advances in Earth Science, 2014, **29**(3): 388-396.

[4] 郭新彪, 魏红英. 大气 $PM_{2.5}$ 对健康影响的研究进展[J]. 科学通报, 2013, **58**(13): 1171-1177.
Guo X B, Wei H Y. Progress on the health effects of ambient $PM_{2.5}$ pollution[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(13): 1171-1177.

[5] Yang Y, Luo L W, Song C, *et al*. Spatiotemporal assessment of $PM_{2.5}$-related economic losses from health impacts during 2014-2016 in China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, **15**(6): E1278.

[6] Meng C, Cheng T H, Gu X F, *et al*. Contribution of meteorological factors to particulate pollution during winters in Beijing[J]. Science of the Total Environment, 2019, **656**: 977-985.

[7] 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.

[8] 陆怡雅, 李闻起, 汪艺晗, 等. 基于 LMDI 分解方法的河北省 $PM_{2.5}$ 排放驱动因素分析[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(8): 2821-2829.
Lu Y Y, Li W Q, Wang Y H, *et al*. Drivers of $PM_{2.5}$ emission in Hebei based on LMDI decomposition analysis[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(8): 2821-2829.

[9] 周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 2000-2011 年中国 $PM_{2.5}$ 时空演化特征及驱动因素解析[J]. 地理学报, 2017, **72**(11): 2079-2092.
Zhou L, Zhou C H, Yang F, *et al*. Spatio-temporal evolution and the influencing factors of $PM_{2.5}$ in China between 2000 and 2011 [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72**(11): 2079-2092.

[10] Wang S J, Liu X P, Yang X, *et al*. Spatial variations of $PM_{2.5}$ in Chinese cities for the joint impacts of human activities and natural conditions: a global and local regression perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, **203**: 143-152.

[11] Tu M Z, Liu Z F, He C Y, *et al*. The relationships between urban landscape patterns and fine particulate pollution in China: a multiscale investigation using a geographically weighted regression model[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **237**, 117744.

[12] 段文娇, 郎建垒, 程水源, 等. 京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 $PM_{2.5}$ 影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1445-1454.
Duan W J, Lang J L, Cheng S Y, *et al*. Air pollutant emission inventory from Iron and steel industry in the Beijing-Tianjin-Hebei region and its impact on $PM_{2.5}$ [J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1445-1454.

[13] Jiang P, Yang J, Huang C H, *et al*. The contribution of socioeconomic factors to $PM_{2.5}$ pollution in urban China [J]. Environmental Pollution, 2018, **233**: 977-985.

[14] 罗毅, 邓琼飞, 杨昆, 等. 近 20 年来中国典型区域 $PM_{2.5}$ 时空演变过程[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3003-3013.
Luo Y, Deng Q F, Yang K, *et al*. Spatial-temporal change evolution of $PM_{2.5}$ in typical regions of China in recent 20 years [J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3003-3013.

[15] 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*. Spatio-temporal variations of $PM_{2.5}$ pollution evolution in China in recent 20 years [J]. Environmental Science, 2020, **41**(1) :1-13.

[16] Qin D M, Yu J, Zou G J, *et al*. A novel combined prediction scheme based on CNN and LSTM for urban $PM_{2.5}$ concentration [J]. IEEE Access, 2019, **7**: 20050-20059.

[17] 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.

[18] 张海霞，程先富，陈冉慧. 安徽省 $PM_{2.5}$ 时空分布特征及关键影响因素识别研究[J]. 环境科学学报，2018，**38**(3)：1080-1089.
Zhang H X，Cheng X F，Chen R H. Analysis on the spatial-temporal distribution characteristics and key influencing factors of $PM_{2.5}$ in Anhui Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae，2018，**38**(3)：1080-1089.

[19] 贺祥，林振山. 基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 $PM_{2.5}$ 浓度变化的影响[J]. 环境科学，2017，**38**(1)：22-32.
He X，Lin Z S. Interactive effects of the influencing factors on the changes of $PM_{2.5}$ concentration based on GAM model[J]. Environmental Science，2017，**38**(1)：22-32.

[20] Li J M，Jin M J，Li H L. Exploring spatial influence of remotely sensed $PM_{2.5}$ concentration using a developed deep convolutional neural network model[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health，2019，**16**(3)：454.

[21] Zhong J T，Zhang X Y，Wang Y Q. Relatively weak meteorological feedback effect on $PM_{2.5}$ mass change in Winter 2017/18 in the Beijing area：observational evidence and machine-learning estimations[J]. Science of the Total Environment，2019，**664**：140-147.

[22] 王超，阚瑷珂，曾业隆，等. 基于随机森林模型的西藏人口分布格局及影响因素[J]. 地理学报，2019，**74**(4)：664-680.
Wang C，Kan A K，Zeng Y L，*et al*. Population distribution pattern and influencing factors in Tibet based on random forest model[J]. Acta Geographica Sinica，2019，**74**(4)：664-680.

[23] Ye T T，Zhao N Z，Yang X C，*et al*. Improved population mapping for China using remotely sensed and points-of-interest data within a random forests model[J]. Science of the Total Environment，2019，**658**：936-946.

[24] Van Donkelaar A，Martin R V，Brauer M，*et al*. Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical-statistical method with information from satellites，models，and monitors[J]. Environmental Science & Technology，2016，**50**(7)：3762-3772.

[25] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning，2001，**45**(1)：5-32.

[26] Guidotti R，Monreale A，Ruggieri S，*et al*. A survey of methods for explaining black box models[J]. ACM Computing Surveys，2019，**51**(5)：93.

[27] Hastie T，Tibshirani R. Generalized additive models[J]. Statistical Science，1986，**1**(3)：297-310.

[28] 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.

[29] 张莹，王式功，贾旭伟，等. 华北地区冬半年空气污染天气客观分型研究[J]. 环境科学学报，2018，**38**(10)：3826-3833.
Zhang Y，Wang S G，Jia X W，*et al*. Study on an objective synoptic typing method for air pollution weather in North China during winter half year[J]. Acta Scientiae Circumstantiae，2018，**38**(10)：3826-3833.

[30] 周曙东，欧阳纬清，葛继红. 京津冀 $PM_{2.5}$ 的主要影响因素及内在关系研究[J]. 中国人口·资源与环境，2017，**27**(4)：102-109.
Zhou S D，Ouyang W Q，Ge J H. Study on the main influencing factors and their intrinsic relations of $PM_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei[J]. China Population，Resources and Environment，2017，**27**(4)：102-109.

[31] 苏福庆，任阵海，高庆先，等. 北京及华北平原边界层大气中污染物的汇聚系统——边界层输送汇[J]. 环境科学研究，2004，**17**(1)：21-25，33.
Su F Q，Ren Z H，Gao Q X，*et al*. Convergence system of air contamination in boundary layer above Beijing and North China：transportation convergence in boundary layer[J]. Research of Environmental Sciences，2004，**17**(1)：21-25，33.

[32] 韩婧，李元征，陈新闯，等. 基于灰色关联模型的中国城镇 $PM_{2.5}$ 浓度影响因素分析[J]. 环境保护科学，2018，**44**(3)：69-73，79.
Han J，Li Y Z，Chen X C，*et al*. Analysis of the influencing factors of $PM_{2.5}$ concentration in the urban areas of China's towns based on grey correlation model[J]. Environmental Protection Science，2018，**44**(3)：69-73，79.

HUANJING K0EXUE
Environmental Science (monthly)
Vol. 41 No. 5
May 15, 2020

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, *et al.* (2006)
Influence of Secondary Organic Coating on Hygroscopicity of a Sodium Chloride Core: Based on Mircro-scale Single Particle Analysis ····· ZHANG Shu-jia, XU Liang, GUO Xin-mei, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2050)
$PM_{2.5}$ Concentration Influencing Factors in China Based on the Random Forest Model ····· XIA Xiao-sheng, CHEN Jing-jing, WANG Jia-jia, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2107)
Spatial-temporal Distribution of Nutrients in Hanfeng Lake After Official Operation ····· FU Shi, NI Jiu-pai, HE Bing-hui, *et al.* (2116)
Spatio-temporal Variations in the Characteristics of Water Eutrophication and Sediment Pollution in Baiyangdian Lake ····· LIU Xin, SHI Bin, MENG Jing, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2177)
Spatial and Temporal Succession Characteristics of Aerobic Anoxygenic Photosynthesis Bacteria in a Stratified Reservoir ····· ZHANG Hai-han, WANG Yan, HUANG Ting-lin, *et al.* (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-ni, LI Yuan-peng, SHI Yu, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2221)
Temporal and Spatial Occurrence of NSAIDs in Taihu Lake and Relevant Risk Assessment ····· LIAN Jie, LI Yi-fei, WANG Xiao-xuan, *et al.* (2229)
Occurrence and Ecological Risk of Eight Typical PhACs in Surface Water and Its Impact on *Daphnia magna* ····· XU Xin-lei, LIU Jian-chao, LU Guang-hua (2239)
Distribution Characteristics and Migration Rules of Pollutants in Sediments of Reservoirs with *Eucalyptus* Plantation, Southern China ····· ZHU Ya, LI Yi-ping, LUO Fan, *et al.* (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, *et al.* (2257)
Relationship Between Source-Sink Landscape Pattern and Antibiotics in Surface Water in Peri-urban Watershed ····· LI Min, TANG Jian-feng, CHEN Li-ding, *et al.* (2264)
Molecular Chemo-diversity of the Dissolved Organic Matter Occurring in Urban Stormwater Runoff ····· NIE Yun-han, CHEN Hao, LI Lei, *et al.* (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, *et al.* (2281)
Stability of Ferrihydrite and Goethite Nanoparticles Under Different Environmental Conditions ····· WANG Zhi-qiao, MA Jie, CHEN Ya-li, *et al.* (2292)
Sunflower-Straw-Derived Biochar-Enhanced Fe(Ⅲ)/$S_2O_8^-$ System for Degradation of Benzoic Acid ····· SUN Peng, ZHANG Kai-kai, ZHANG Yu, *et al.* (2301)
Non-activated Peroxymonosulfate-Induced Degradation of Sulfasalazine: Kinetics and Mechanism Investigations ····· DING Xi, ZHANG Xue-wei, ZHOU Run-sheng, *et al.* (2310)
Pollution Characteristics and Removal Effects of Antibiotics in Wastewater from Large-Scale Pig Farms in Guizhou ····· YANG Zhao, LI Jiang, XIANG Fu-liang, *et al.* (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, *et al.* (2329)
Nitrogen Removal Performance and Nitrogen/Carbon Balance of Oligotrophic Aerobic Denitrifiers ····· WEN Gang, WANG Tong, HUANG Ting-lin, *et al.* (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, *et al.* (2349)
Characteristics of ANAMMOX Granular Sludge and Differences in Microbial Community Structure Under Different Culture Conditions ··· JIANG Ying, GUO Meng-lei, XIE Jun-xiang, *et al.* (2358)
Start-up of an Integrated Process of Denitrifying Phosphorus Removal Coupled with Partial Nitritation and Anaerobic Ammonium Oxidation ····· CHEN Ya, YIN Wen, ZHANG Xing-xing, *et al.* (2367)
Construction and Application of an Evaluation System for Soil Environmental Carrying Capacity ····· LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, *et al.* (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, *et al.* (2381)
Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soil by EGTA Washing Enhanced with Reduction Solubilization ····· ZHANG Jin-yong, ZHU Yu-ting, WANG Ming-xin, *et al.* (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, *et al.* (2398)
Effect of Fertilizer Reduction and Biochar Application on Soil Nitrogen Loss in Purple Upland ····· WANG Shu, WANG Zi-fang, LONG Yi, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2425)
N_2O Emissions from Tea Plantations with Sorghum Intercropping and Application of Big Urea Pills ····· ZHANG Ke-bin, LIU Xin-liang, KANG Man, *et al.* (2434)
Effects of Different Forest Vegetation Types on Soil Nitrogen-Related Microbial Communities and Functions in Jinyun Mountain ····· WANG Ying-yan, WANG Fu-hua, LUO Dong-hai, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2476)
Differences Between DNA- and RNA-Based Bacterial Communities in Marine Sediments ····· LI Ming-yue, YANG Yu-hong, MI Tie-zhu, *et al.* (2485)
Spatial Patterns and Spatial Autocorrelations of Wetland Changes in China During 2003-2013 ····· ZHOU Ting, MA Jiao-jiao, XU Song-jun (2496)