

目次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测 陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 (1)

粤港澳大湾区大气PM_{2.5}浓度的遥感估算模型 代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 (8)

典型输送通道城市冬季PM_{2.5}污染与传输变化特征 代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 (23)

郑州市夏季PM_{2.5}中二次无机组分污染特征及其影响因素 和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 (36)

重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析 彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沫, 翟天宇 (48)

2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析 陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 (61)

2020年“三连击”台风对我国东部地区O₃污染的影响分析 花丛, 尤媛, 王晴, 张碧辉 (71)

北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析 张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 (81)

机动车减排降碳综合评价体系综述 范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 (93)

基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景 杨峰, 张贵驰, 孙伟, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 (104)

广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力 翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王焯嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 (115)

给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素 张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 (123)

中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评价 襄殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 (131)

太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评价 张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 (140)

水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价 张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈冈, 沈晓盛 (151)

长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析 姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 (159)

珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用 李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 (173)

富春江水库浮游植物功能群变化的成因 张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 (181)

合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制 陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 (194)

新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素 李军, 欧阳宏涛, 周金龙 (207)

京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素 李魁明, 王晓燕, 姚罗兰 (218)

近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析 王耕, 张芙蓉 (228)

光伏电站建设对陆地生态环境的影响: 研究进展与展望 田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 (239)

大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因 石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 (248)

西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究 徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 (262)

不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响 崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 (275)

基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测 帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋珉 (287)

基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测 石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 (300)

长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态 胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨浩, 高超 (314)

漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子 申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 (323)

不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响 陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 (335)

紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征 李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 (343)

氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响 薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 (354)

重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析 梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 (364)

中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展 刘浩然, 邢静怡, 任文杰 (376)

基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测 解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 (386)

基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析 马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 (396)

铜陵某废弃硫铁矿矿区土壤重金属污染特征及来源解析 李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 (407)

天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价 李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 (417)

基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应 唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 (429)

腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值 胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍茂, 魏世强 (439)

生物质炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复 吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 (450)

人体微塑料污染特征及健康风险研究进展 马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 (459)

聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(*Lactuca sativa*)生理生态的影响 牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霆, 刘淑丽 (470)

转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制 刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (480)

微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响 赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 (489)

微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响 刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 (496)

民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测 王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 (508)

不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应 郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 (520)

厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响 刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 (530)

土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征 陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 (543)

叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响 梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二革, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 (555)

昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析 王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 (567)

基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征 黄福义, 周曙屹, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张娴 (576)

城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素 刘可, 董蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 (584)

氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制 刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 (594)

CO₂气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb²⁺吸附性能对比 江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 (606)

《环境科学》征订启事(70) 《环境科学》征稿简则(193) 信息(334,554,605)

粤港澳大湾区大气PM_{2.5}浓度的遥感估算模型

代园园¹, 龚绍琦^{1*}, 张存杰², 闵爱莲¹, 王海君¹

(1. 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院, 南京 210044; 2. 国家气候中心, 北京 100081)

摘要: PM_{2.5}对大气环境和人类健康危害极大, 及时准确地掌握高时空分辨率的PM_{2.5}浓度对空气污染防治起着重要作用. 基于粤港澳大湾区2015~2020年多角度大气校正算法(MAIAC)1 km AOD产品、ERA5气象资料和站点污染物浓度(CO、O₃、NO₂、SO₂、PM₁₀和PM_{2.5}), 分别建立了估算PM_{2.5}浓度的时空地理加权模型(GTWR)、BP神经网络模型(BPNN)、支持向量机回归模型(SVR)和随机森林模型(RF). 结果表明, RF模型的估算能力优于BPNN、SVR和GTWR模型, BPNN、SVR、GTWR和RF模型的相关系数依次为0.922、0.920、0.934和0.981, 均方根误差(RMSE)分别为7.192、7.101、6.385和3.670 μg·m⁻³, 平均绝对误差(MAE)分别为5.482、5.450、4.849和2.323 μg·m⁻³; RF模型在季节PM_{2.5}的预测中以冬季效果最佳、夏季次之、春季和秋季再次, 预测值与实测值的相关系数在0.976以上; RF模型可用于大湾区PM_{2.5}浓度的预测分析研究. 在时间上, 大湾区各市2021年逐日ρ(PM_{2.5})呈“先减后增”的变化趋势, 最高值在65.550~112.780 μg·m⁻³, 最低值介于5.000~7.899 μg·m⁻³; 月均浓度变化呈“U”型分布, 1月开始降低至6月达到谷值后逐渐升高; 季节上表现为冬季浓度最高、夏季最低、春秋季节过渡的特点; 大湾区年均ρ(PM_{2.5})为28.868 μg·m⁻³, 低于年均二级浓度限值. 空间上, 2021年PM_{2.5}呈“西北-东南”递减的特征, 高污染区域聚集在大湾区的中部, 以佛山为代表; 低浓度区主要分布在惠州东部、港澳和珠海等沿海地区; 不同季节PM_{2.5}浓度在空间分布上也表现出异质性和区域性. RF模型估算了高精度PM_{2.5}浓度, 为大湾区PM_{2.5}污染相关的健康风险评估提供了科学依据.

关键词: 粤港澳大湾区; MAIAC AOD; PM_{2.5}; 时空地理加权模型(GTWR); BP神经网络模型(BPNN); 支持向量机回归模型(SVR); 随机森林模型(RF)

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)01-0008-15 DOI: 10.13227/j.hjxx.202302237

Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric PM_{2.5} Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

DAI Yuan-yuan¹, GONG Shao-qi^{1*}, ZHANG Cun-jie², MIN Ai-lian¹, WANG Hai-jun¹

(1. School of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. National Climate Center, Beijing 100081, China)

Abstract: PM_{2.5} is extremely harmful to the atmospheric environment and human health, and a timely and accurate understanding of PM_{2.5} with high spatial and temporal resolution plays an important role in the prevention and control of air pollution. Based on multi-angle implementation of atmospheric correction algorithm (MAIAC), 1 km AOD products, ERA5 meteorological data, and pollutant concentrations (CO, O₃, NO₂, SO₂, PM₁₀, and PM_{2.5}) in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area during 2015-2020, a geographically and temporally weighted regression model (GTWR), BP neural network model (BPNN), support vector machine regression model (SVR), and random forest model (RF) were established, respectively, to estimate PM_{2.5} concentration. The results showed that the estimation ability of the RF model was better than that of the BPNN, SVR, and GTWR models. The correlation coefficients of the BPNN, SVR, GTWR, and RF models were 0.922, 0.920, 0.934, and 0.981, respectively. The RMSE values were 7.192, 7.101, 6.385, and 3.670 μg·m⁻³. The MAE values were 5.482, 5.450, 4.849, and 2.323 μg·m⁻³, respectively. The RF model had the best effect during winter, followed by that during summer, and again during spring and autumn, with correlation coefficients above 0.976 in the prediction of different seasons. The RF model could be used to predict the PM_{2.5} concentration in the Greater Bay Area. In terms of time, the daily ρ(PM_{2.5}) of cities in the Greater Bay Area showed a trend of "decreasing first and then increasing" in 2021, with the highest values ranging from 65.550 μg·m⁻³ to 112.780 μg·m⁻³ and the lowest values ranging from 5.000 μg·m⁻³ to 7.899 μg·m⁻³. The monthly average concentration showed a U-shaped distribution, and the concentration began to decrease in January and gradually increased after reaching a trough in June. Seasonally, it was characterized by the highest concentration during winter, the lowest during summer, and the transition during spring and autumn. The annual average ρ(PM_{2.5}) of the Greater Bay Area was 28.868 μg·m⁻³, which was lower than the secondary concentration limit. Spatially, there was a "northwest to southeast" decreasing distribution of PM_{2.5} in 2021, and the high-pollution areas clustered in the central part of the Greater Bay Area, represented by Foshan. Low concentration areas were mainly distributed in the eastern part of Huizhou, Hong Kong, Macao, Zhuhai, and other coastal areas. The spatial distribution of PM_{2.5} in different seasons also showed heterogeneity and regionality. The RF model estimated the PM_{2.5} concentration with high accuracy, which provides a scientific basis for the health risk assessment associated with PM_{2.5} pollution in the Greater Bay Area.

Key words: Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; MAIAC AOD; PM_{2.5}; geographically and temporally weighted regression model (GTWR); BP neural network model (BPNN); support vector machine regression model (SVR); random forest model (RF)

PM_{2.5}对自然环境和人类健康具有极大的危害, 及时准确地掌握PM_{2.5}浓度对空气污染治理起着重要

收稿日期: 2023-02-28; 修订日期: 2023-04-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFA0608203); 科技部外国专家项目(G2022014083L); 江苏省研究生科研创新项目(KYCX22_1215)

作者简介: 代园园(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为空气PM_{2.5}浓度的遥感估算模型, E-mail: dyy18567171446@163.com

* 通信作者, E-mail: shaoqigong@163.com

作用^[1]。造价高且分布不均的地面监测站无法对 PM_{2.5} 浓度在面尺度上进行长时间连续监测, 遥感卫星具有空间分辨率高、连续性强、覆盖范围广和动态监测等优点, 气溶胶光学厚度(AOD)与近地面 PM_{2.5} 浓度之间存在复杂且紧密的关系, 利用 AOD 来估算地面 PM_{2.5} 浓度, 可以有效地弥补地基监测数据的空间断层和信息缺口, 目前已被广泛应用于近地面 PM_{2.5} 浓度预测研究中, 为空气污染治理提供科学依据^[2-4]。

准确的模型是估算空气 PM_{2.5} 浓度的关键, 当前主要有: 模式比例因子模型、基于半经验的物理机制模型、统计模型和机器学习模型等^[5,6]。模式比例因子模型是根据大气化学传输模型计算 AOD 与大气 PM_{2.5} 的比例因子来估算近地面 PM_{2.5} 浓度, 其模型结构复杂且模拟过程繁琐, 预测精度受限^[7]; 基于半经验的物理机制模型是根据 PM_{2.5} 浓度与 AOD 的物理机制来建立的模型, 模型精度受排放清单和气溶胶特征参数等影响, 容易引入误差^[8]; 统计模型和机器学习模型没有考虑污染物复杂的化学和物理机制, 通过加入各类气象数据、土地利用数据等辅助变量来建立估算 PM_{2.5} 浓度的模型^[9-14]。应用较广的传统统计模型包括: 简单线性回归模型、广义可加模型、线性混合模型和地理加权回归模型等。考虑到 PM_{2.5} 浓度的时空异质性, 利用监测点之间距离和监测时间建立的权重矩阵来计算回归系数, 使得构建的时空地理加权模型具有很好的预测效果, Liu 等^[15]和 Guo 等^[16]研究表明利用时空地理加权回归模型预测 PM_{2.5} 浓度的效果优于传统回归模型。鉴于 AOD 和气象因子等与 PM_{2.5} 数据具有较强的非线性关系, 机器学习模型是以数据驱动的方式处理非线性关系的大数据, 具有实现简单、计算量小、速度快和存储资源低等优点, 被逐渐应用于 PM_{2.5} 浓度的预测中^[17,18], 主要包括神经网络算法、支持向量机和随机森林等。尚俊倩^[19]基于气象数据和 PM_{2.5} 浓度历史数据建立了 BP 神经网络模型对西安市 PM_{2.5} 浓度进行了预测研究, 研究表明季节性预测模型精度高于整体模型精度, 能够减少模型误差。李华^[20]以污染源排放量为自变量, 基于特征选择算法, 利用粒子群算法与支持向量机组合方法构建了 PSO-SVM 预测模型, 结果表明该模型具有很好的预测能力。康新礼等^[21]基于随机森林算法构建了京津冀地区不同季节的 AOD-PM_{2.5} 估算模型, 春夏秋冬 4 组模型相关系数 R 分别为 0.78、0.66、0.83 和 0.83, 模拟精度较高, 研究表明 RF 模型在京津冀地区具有很好的 PM_{2.5} 估算能力。

粤港澳大湾区经济总量大且增速快, 是我国经济最发达的地区之一, 然而随着产业升级换代, 大湾

区的生态环境面临着巨大的挑战。王毓铮等^[22]研究发现工业源和生物质燃烧是肇庆市 2014~2016 年期间 PM_{2.5} 污染减排的关键贡献源。于广河等^[23]研究发现二次有机气溶胶、机动车和生物质燃烧是深圳市 2017~2018 年 PM_{2.5} 中有机物的主要来源。沈劲等^[24]研究表明珠三角地区 PM_{2.5} 污染具有较强的区域性和复合性特点。颜丰华等^[25]研究表明在 O₃ 重污染过程中, 夜间高湿和低风速使得 PM_{2.5} 浓度显著上升。蒋超^[26]利用多元回归模型对粤港澳大湾区 PM_{2.5} 浓度的时空分布模拟, 研究发现高浓度聚集区以广佛交界为典型区, 月均值呈“U”型分布。李昕^[27]分析了 2011~2015 年香港地区 PM_{2.5} 浓度逐年下降的年际变化及“冬高夏低”的季节变化特征, 并发现该地区 PM_{2.5} 浓度与气压呈正相关, 与气温、降雨量、相对湿度和风速呈负相关关系。何沐全等^[28]利用 MODIS AOD 3 km 产品分析了 2010~2019 年间广东省 AOD 呈先缓慢上升后下降趋势, 在空间上表现为: 珠三角>粤西>粤北>粤东北。刘艳群等^[29]研究发现 2001~2018 年广东省 AOD 呈南高北低分布特征, 珠三角、汕头和湛江为高值区, 总体呈下降趋势。王婕纯等^[30]利用 MODIS C6 AOD 产品研究发现珠江三角洲西部的佛山市、东莞市和中山市是全省 AOD 的高值区。

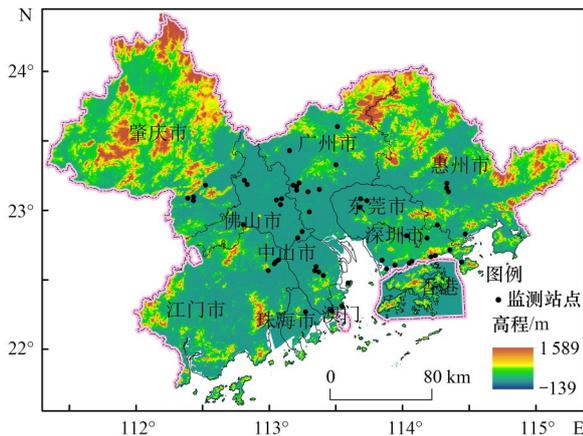
目前, 在粤港澳大湾区大气 PM_{2.5} 浓度的研究中, 更多地利用站点实测数据进行地统计插值法分析其时空分布特征和影响因素, 对空间 PM_{2.5} 浓度的遥感估算研究相对较少。仅利用时空分辨率较粗的 Terra 或 Aqua 单个卫星 MODIS AOD 产品数据做估算, 反演的 PM_{2.5} 浓度效果不佳。为了提高时空分辨率和覆盖度, 以更好地研究城市内部或区域 PM_{2.5} 浓度, 本研究利用数据缺失较少、时空分辨率高的逐日 MAIAC AOD 1km 产品数据, 结合 2015~2020 年逐日 ERA5 气象资料和地面站点实测的空气污染物(CO、O₃、NO₂、SO₂和 PM₁₀)浓度日平均数据, 建立大气 PM_{2.5} 浓度的时空地理加权模型(GTWR)、BP 神经网络模型(BPNN)、支持向量机回归模型(SVR)和随机森林模型(RF), 利用最佳估算模型估算 2021 年 1 km 分辨率的大湾区逐日面状 PM_{2.5} 浓度, 并分析其时空分布特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

粤港澳大湾区位于东经 111°21′~115°43′、北纬 21°57′~24°34′范围内, 见图 1, 包括广州、深圳、珠海、佛山、东莞、中山、江门、惠州、肇庆这 9 个城市和香港、澳门这 2 个特别行政区, 以下简称“大湾区”。大湾区地域广阔、地理位置优越、经济发达, 陆

地总面积约 5.6 万 km^2 , 三面环山, 三江聚集, 一面沿海, 人口密度大, 截至 2020 年 12 月, 常住人口达 8 617.19 万人. 大湾区属亚热带湿润季风气候, 雨季集中在 4~9 月, 年降水量为 1 300~2 100 mm, 平均气温为 23°C , 受季风气候影响, 夏季盛行东南风, 冬季盛行偏北风^[31]. 近年来, 大湾区经济水平不断提高, 但生态环境质量与世界其他湾区相比仍存在一定差距^[32], 因此, 对该区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度进行时空演变分析和预测研究具有重要的意义.



文本所有地图基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4632 号标准地图制作, 底图边界无修改

图 1 粤港澳大湾区监测站点分布

Fig. 1 Distribution of monitoring stations in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

1.2 数据获取与预处理

1.2.1 MCD19A2 产品数据

MCD19A2 数据是 NASA 利用搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上的中分辨率成像光谱仪 MODIS 采用多角度大气校正算法 (multi-angle implementation of atmospheric correction algorithm, MAIAC) 反演的陆地气溶胶光学厚度 AOD 网格化 2 级产品, 具有覆盖范围广、时空分辨率高和 AOD 反演精度高等特点^[33], 空间分辨率为 1 km. 对其进行投影转换、镶嵌拼接、裁剪、提取站点数据和剔除无效值等预处理后, 获得 2015~2020 年覆盖大湾区的 MAIAC 550 nm AOD 数据共 2 192 景. 其中投影转换是将 sinusoidal 投影坐标系转为 WGS84 地理坐标系; 提取站点数据是以大湾区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度地面监测站点为中心的 3×3 格网内 AOD 平均值作为站点 AOD 数据.

1.2.2 地面站点空气污染物数据

我国在 2012 年建成空气质量地基监测网络, 其中包括对空气 $\text{PM}_{2.5}$ 、 CO 、 O_3 、 NO_2 、 SO_2 和 PM_{10} 等空气污染物浓度实时监测, 本文在中国环境监测总站获取了与 MAIAC AOD 产品同期的大湾区空气污染

物浓度逐小时数据, 站点分布如图 1. 为了减小误差, 对每个站点空气污染物 10:00~14:00 之间浓度取平均值, 作为与卫星过境时间相对应的站点日数据. 利用克里金插值法重采样为 1 km 分辨率的栅格数据, 为面尺度上的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度预测做准备.

1.2.3 气象数据

边界层高度 (BLH)、风速 (WS)、风向 (WD)、相对湿度 (RH)、温度 (T) 和总降水量 (TP) 等气象数据来自于欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 公布的再分析资料 ERA5 数据集, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间分辨率 1 h, 时间跨度与污染物一致. 采用克里金插值法重采样为 1 km 分辨率的栅格数据, 计算 10:00~14:00 的站点经纬度周围 3×3 格网数据的平均值作为各站点气象数据的日数据. 其中风速和风向是由 UV 风场计算得到.

1.2.4 数据归一化

在构建大气 $\text{PM}_{2.5}$ 模型之前, 需要对质量控制后的数据进行归一化处理, 使待处理的数据限定在一定的范围内, 消除奇异样本数据导致的不良影响, 提高模型精度和速度, 本文采用最大-最小值方法将数据转化为 $[0, 1]$ 范围内. 归一化公式为:

$$y = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中, y 为归一化后数据; x 为原始数据; x_{\min} 为数据最小值; x_{\max} 为数据最大值. 在数据归一化后, 大湾区各实测站点的 $\text{PM}_{2.5}$ 、AOD、气象因子和污染物浓度数据相匹配的样本数有 117 258 对, 随机挑选 80% 的样本作为建立模型的训练集, 共 93 806 对, 剩余 20% 用于模型检验的验证集, 共 23 452 对, 最后全部样本作为测试集.

1.3 研究方法

1.3.1 技术流程

本文主要利用 MAIAC AOD 数据、ERA5 气象因子、 CO 、 O_3 、 NO_2 、 SO_2 和 PM_{10} 等空气污染物浓度的日均数据构建大湾区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度估算模型, 研究路线如图 2, 具体步骤如下.

(1) 对预处理和时空匹配后的实测污染物浓度、AOD 和 ERA5 气象数据的站点日均数据进行统计性描述、相关性分析和多重共线性分析, 为建模做准备.

(2) 使用相同的训练集、验证集和测试集分别建立时空地理加权模型、BP 神经网络模型、支持向量机回归模型、随机森林模型来估算大湾区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度, 采用相关系数 (R)、均方根误差 (RMSE) 和平均绝对误差 (MAE) 来评价模型的精度, 不断优化模型参数以获得最佳预测模型.

(3) 将 2021 年空间分辨率均为 1 km 的 AOD、ERA5 气象因子和污染物浓度的栅格数据输入最优

估算模型,估算大湾区 1 km 分辨率的面状 PM_{2.5} 浓度,并分析其时空演化特征.

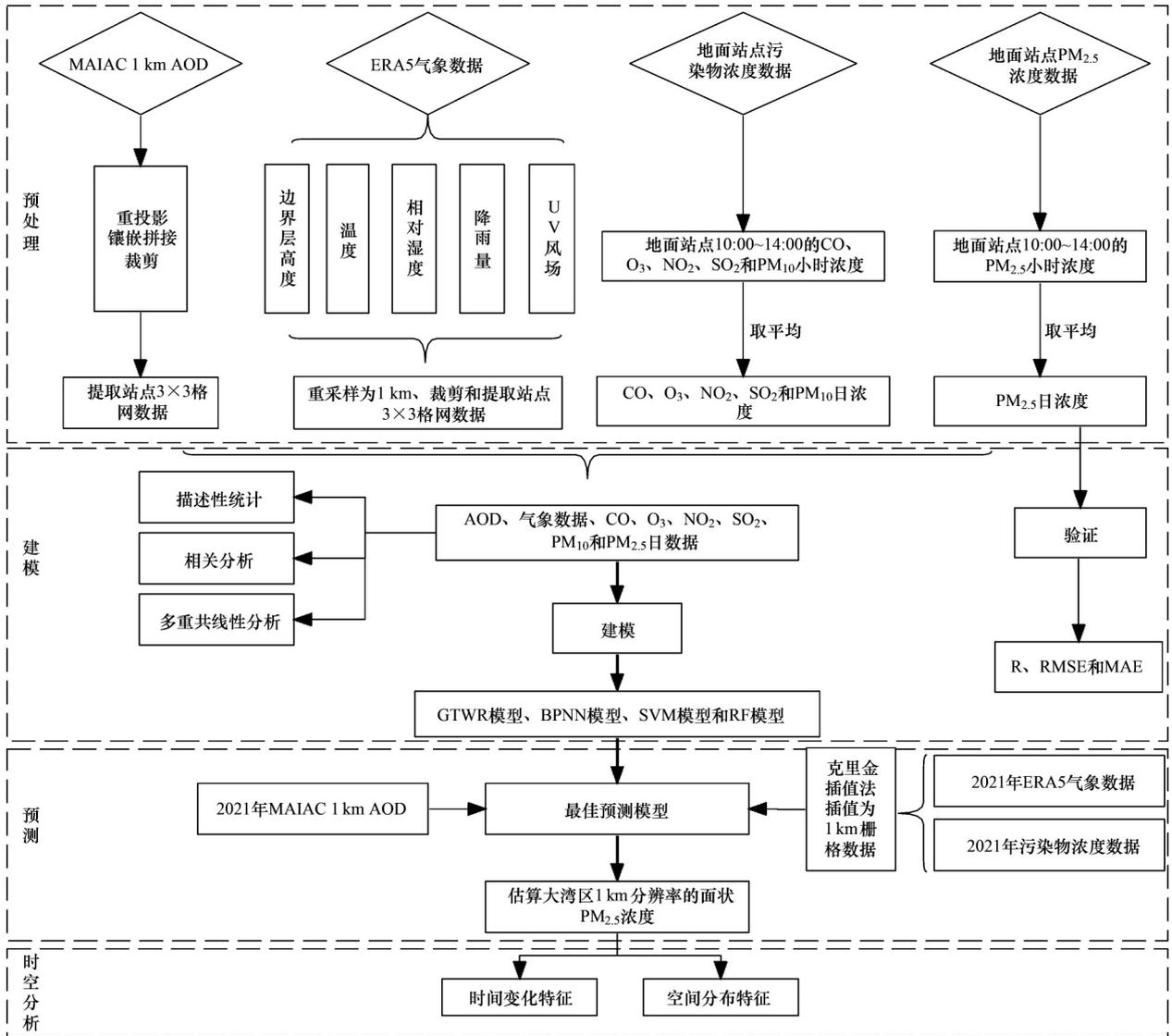


图 2 研究路线
Fig. 2 Research route

1.3.2 模型原理与构建

(1) 时空地理加权模型(GTWR)是在经典地理加权回归(GWR)的基础上增加时间效应,构建时空依赖的局部效应对时空非平稳性进行建模,其本质是利用时空加权距离的方法为每个空间点设置一个权重矩阵,通过该矩阵构建局部空间关系,结合空间点距离衰减效应来预测和校准局部回归^[34],公式如下:

$$PM_{2.5(i)} = \beta_0(\mu_i, v_i, t_i) + \sum_k \beta_k(\mu_i, v_i, t_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (2)$$

$$\hat{\beta}(\mu_i, v_i, t_i) = [X^T W(\mu_i, v_i, t_i) X]^{-1} X^T W(\mu_i, v_i, t_i) \cdot PM_{2.5(i)} \quad (3)$$

式中, i 为空间点; $PM_{2.5(i)}$ 为样本点的因变量值; $(\mu_i, v_i,$

$t_i)$ 为在 t_i 时刻坐标为 (μ_i, v_i) 的点; x_{ik} 为第 i 点的第 k 个自变量,包括 AOD、BLH、WS、WD、RH、 T 、TP、CO、O₃、NO₂、SO₂ 和 PM₁₀; $\beta_0(\mu_i, v_i, t_i)$ 为样本点的回归常数; ε_i 为样本点 i 的残差; $\beta_k(\mu_i, v_i, t_i)$ 为第 i 点的第 k 个自变量的回归系数; $\hat{\beta}(\mu_i, v_i, t_i)$ 为 $\beta_k(\mu_i, v_i, t_i)$ 的估计值; $W(\mu_i, v_i, t_i)$ 为第 i 点的时空权重矩阵.

空间权重由空间核函数和带宽来确定,本文采用 CV 法计算带宽,高斯函数定义空间权重,以自适应法确定模型的最佳带宽和权重.

(2) BP 神经网络模型(BPNN)是一种按误差反向传播算法训练的多层前馈神经网络,包括输入层、一个或多个隐藏层和输出层,具有较强的非线性映射能力,本质是通过反向传播算法对网络的权值和偏差进行反复的调整训练,直到网络输出层的误差

平方和小于指定的误差时完成训练^[35]。

激活函数会影响神经网络预测能力,由于 Tanh 函数输出值带有负值,ReLU 函数输出不是以原点为中心的,导致后一层神经网络引入偏置偏移,梯度下降效果不佳,又因为 PM_{2.5} 值不会出现负值,也不会出现无穷大的情况,本文选择 Sigmoid 为神经网络的激活函数,将网络的训练次数固定为 1 500 次,学习率为 0.01,训练目标最小误差规定为 0.000 1,隐藏层的层数设置为 1 层,根据试凑法确定神经网络隐藏层神经元个数,常用的经验公式为:

$$n = \sqrt{n_1 + n_2} + a \quad (4)$$

式中, n 为隐藏层, n_1 为输入层, n_2 为输出层神经元个数, a 为 0~10 的任意常数,本文隐藏层个数范围为 3~13,记录每次模型的相关系数(R)、均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE),结果如表 1 所示。当神经元个数为 11,模型的 R 为 0.929,RMAE 为 6.905 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,MAE 为 4.931 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,预测效果相对较好。

表 1 隐藏层不同神经元个数时预测精度

Table 1 Prediction accuracy with different number of neurons in hidden layers

个数	R	RMSE / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	MAE / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
3	0.897	8.978	5.652
4	0.904	8.977	5.639
5	0.899	8.019	5.592
6	0.896	8.086	5.593
7	0.834	8.852	6.553
8	0.919	7.929	5.578
9	0.905	7.944	5.537
10	0.926	7.553	5.512
11	0.929	6.905	4.931
12	0.918	7.329	5.557
13	0.900	7.972	5.595

(3) 支持向量机回归模型(SVR)是通过核函数将非线性数据投影到特征空间,使输入空间维度升高,改变了内积的运算,在高维上构造超平面使得所有样本点到超平面的间隔最小,从而在高维特征空间通过最优算法构造回归函数^[36]。

惩罚因子 C 和核函数对 SVR 模型的性能影响很大,本文选择的核函数为非线性投影的高斯核函数,惩罚因子 C 为 1。

(4) 随机森林模型(RF)是以决策树作为基本分类器对样本进行训练和预测的集成学习算法^[37]。其本质是基于 bootstrap 思想,通过对大量决策树的集成提高预测精度,解决分类或回归问题,每个决策树相互独立并且具有相同的分布特征,有放回地随机抽

取样本,具有良好的泛化能力^[38]。

随机森林的预测能力与决策树的个数和单个决策树最大深度有关,本文将决策树个数设置为 200~2 000,间隔为 10,决策树最大深度设置为 10~100,间隔为 10,经过十折交叉验证根据均方根误差和节点纯度不断优化决策树个数和决策树最大深度来提高模型精度,决策树个数最终确定为 1 200,决策树最大深度为 20,拆分内部节点所需的最小样本数为 10,叶节点所需的最小样本数为 2。

1.3.3 模型验证和精度评价

为了验证模型预测效果,采用十折交叉验证方法获得 PM_{2.5} 的站点预测值,将 4 种模型的 PM_{2.5} 预测值和地面站点实测值进行对比,采用 R 、RMSE 和 MAE 这 3 个指标对所建模型进行精度评估, R 越接近 1,模型预测精度越高,RMSE 和 MAE 反映模型预测的偏差和绝对误差,二者数值越小,模型精度越高。计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} \quad (7)$$

式中, n 为各变量的个数; x_i 为 PM_{2.5} 浓度的实测值; y_i 为 PM_{2.5} 浓度的预测值; \bar{x} 为 PM_{2.5} 实测浓度的平均值, \bar{y} 为 PM_{2.5} 预测浓度的平均值。

2 结果与分析

2.1 数据统计性描述

图 3 和图 4 分别是大湾区 2015~2020 年的 AOD、气象要素、空气污染物和 PM_{2.5} 浓度的站点日均值变化特征和统计性描述。AOD 介于 0.001~2.656,平均值为 0.465,标准差为 0.267;BLH 介于 11.066~1 726.600 m,均值为 287.637 m,标准差为 193.260 m;平均风速为 3.616 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,以微风为主,风力级别较小,最大风速为 18.422 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,标准差为 2.106 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;风向在 150°~180°的频数较大,平均风向为 130.289°,表明该地区受东南风、偏南风 and 北风、东北风影响较多,标准差为 72.384。2015~2020 年 AOD 和 WD 呈波浪式下降趋势,BLH 和 WS 呈波浪式上升趋势,变异系数分别为 57.419%、67.189%、58.241% 和 55.556%,说明 6 年间 AOD、WD、BLH

和 WS 的日变化程度明显. RH 在 18.823% ~ 100.290%, 平均值为 76.032%, 标准差为 14.884%, 变异系数为 19.576%, 说明 6 年内该地区的相对湿度相对稳定; 平均温度为 23.320°C, 最高温度为 35.677°C, 最低温度为 1.832°C, 温度为 26 ~ 28°C 的天数较多; 日降雨量在 0 ~ 2 mm 的频数最大, 最大日降雨量为 60.046 mm, 平均值为 0.792 mm, 说明大湾区降雨强度较小. RH、T 和 TP 在 6 年内呈波浪上升趋势. $\rho(\text{CO})$ 介于 0.006 ~ 6.789 mg·m⁻³, 平均值为 0.757 mg·m⁻³, 标准差为 0.269 mg·m⁻³, 变异系数为 35.535%, 离散程度不明显且呈波浪下降趋势;

$\rho(\text{O}_3)$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{SO}_2)$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 分别在 1.000 ~ 403.000、1 ~ 290.750、1 ~ 396 和 1 ~ 380.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 平均值分别为 74.645、28.046、10.171 和 49.772 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 变异系数分别为 53.395%、67.247%、73.218% 和 58.591%, 说明 2015 ~ 2020 年大湾区内 O₃、NO₂、SO₂ 和 PM₁₀ 日均浓度变化程度较大且整体呈波浪下降趋势; 地面监测的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的 6 a 平均值为 29.640 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 日变化介于 1 ~ 352.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 标准差为 19.039 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 变异系数为 70.525%, 说明 2015 ~ 2020 年日变化程度大且整体呈下降趋势.

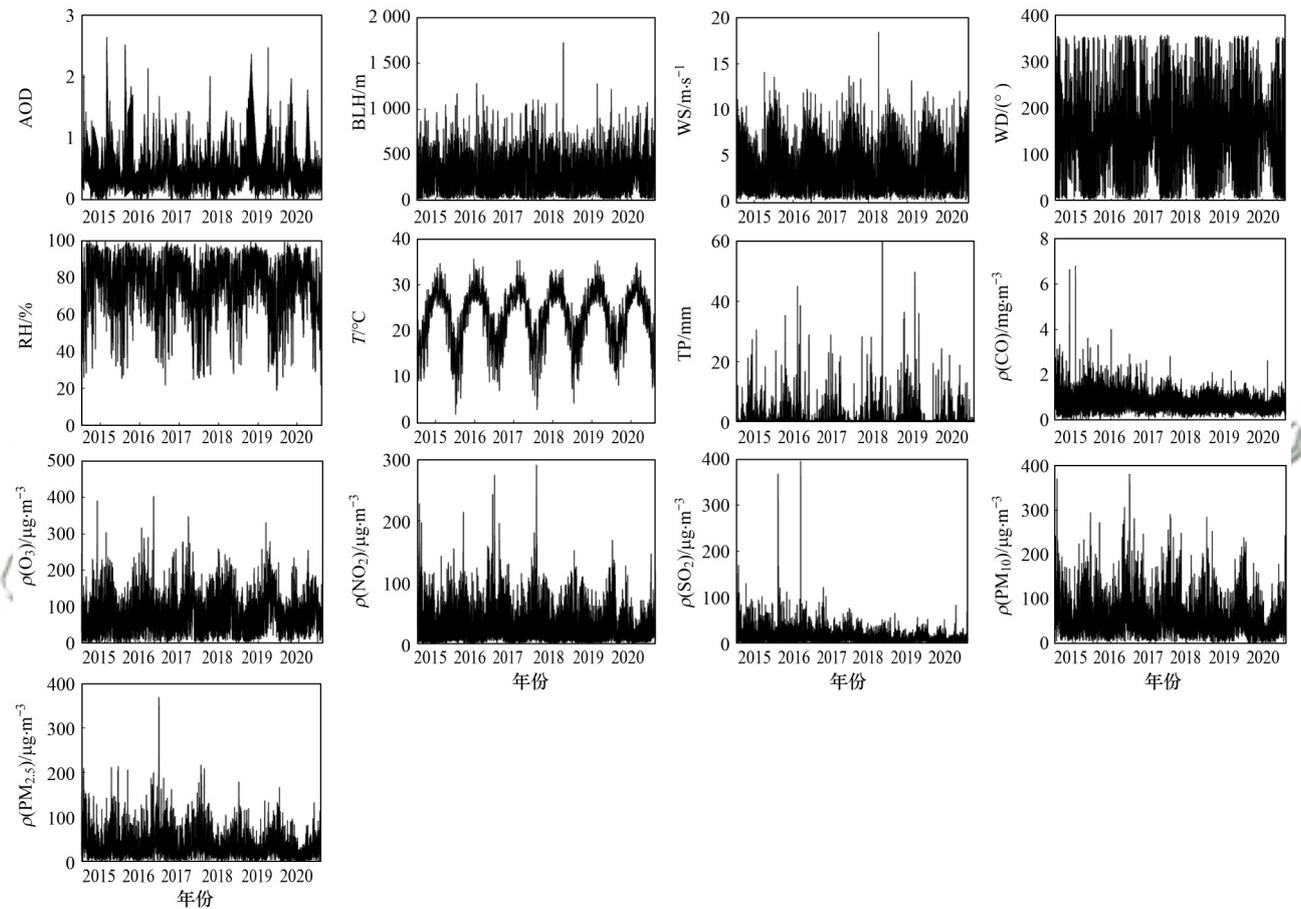


图3 各变量日变化特征

Fig. 3 Daily variation characteristics of each variable

PM_{2.5}浓度与 AOD、气象因子和空气污染物的相关关系见表 2. 大湾区的各辅助因素与 PM_{2.5}浓度之间存在非线性关系, 在 99% 置信区间内显著相关. PM_{2.5}浓度随相对湿度、边界层高度、风速、温度和降雨量上升而下降, 相关系数分别为 -0.365、-0.307、-0.016、-0.149 和 -0.113, 随 AOD、风向、CO、O₃、NO₂、SO₂ 和 PM₁₀ 上升而上升, 相关系数分别为 0.189、0.037、0.481、0.322、0.638、0.600 和 0.896. 用多重线性回归分析计算方差膨胀因子 (VIF) 来诊断的各因素是否存在共线性, 当 VIF < 5 时,

变量之间不存在多重共线性; 当 5 < VIF < 10 时, 变量间可能存在共线性; 当 VIF ≥ 10 时, 变量间存在多重共线性^[39]. 各变量的多重共线性回归分析结果见表 3, 辅助变量的 VIF 得分都低于 5, 说明变量间不存在多重共线性, 均可参与模型预测.

2.2 大气 PM_{2.5} 估算模型性能对比

BPNN、SVR、GTWR 和 RF 模型使用相同的训练集、验证集和测试集, 训练集用于模型训练, 验证集用于模型的选择, 模型确定后将测试数据输入模型进行预测 PM_{2.5} 浓度, 图 5 是各模型预测值和实测值

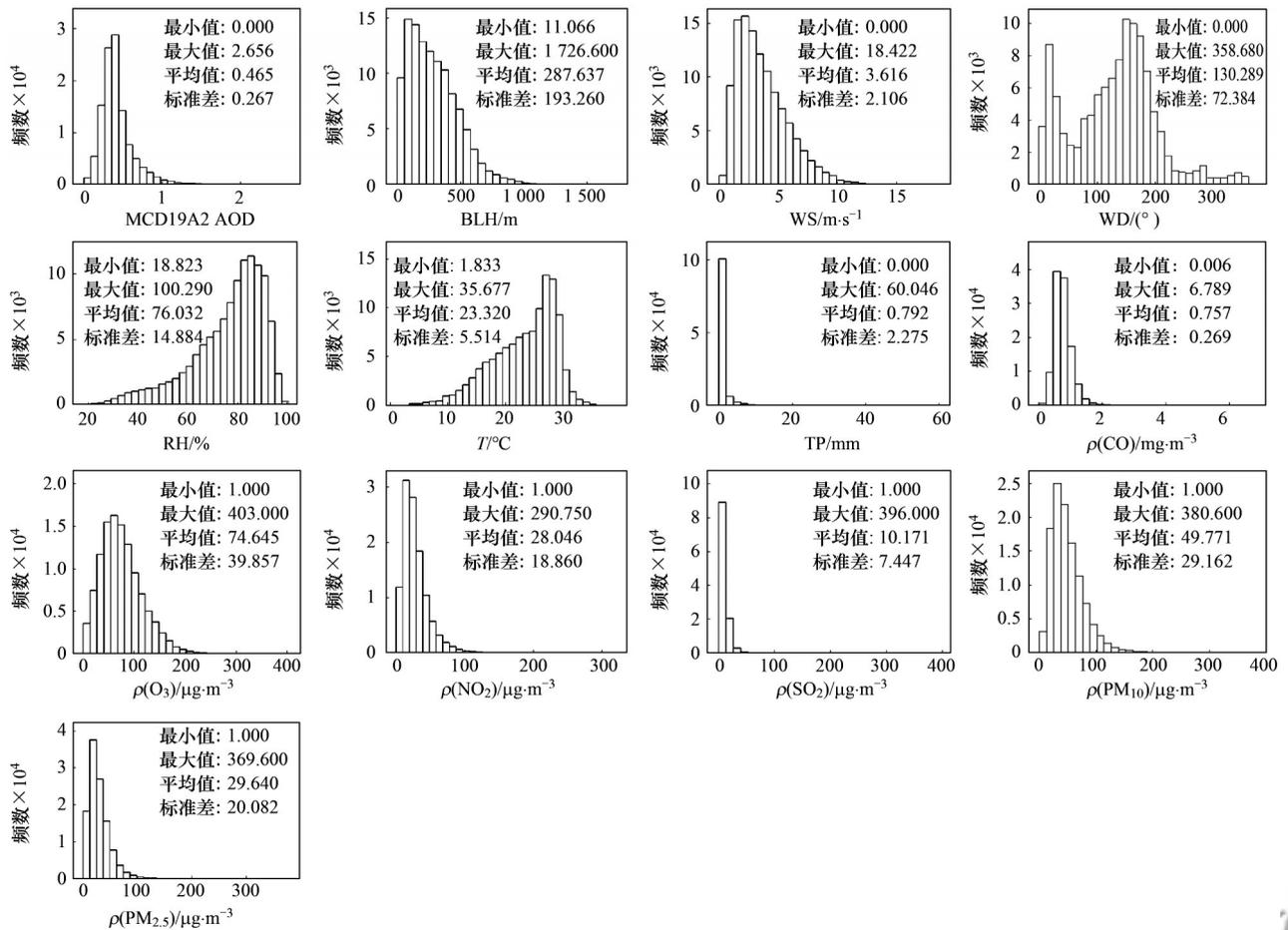


图4 数据统计性分析

Fig. 4 Statistical analysis of data

表2 各变量皮尔逊相关分析¹⁾

Table 2 Pearson correlation analysis diagram of each variable

项目	AOD	BLH	WS	WD	RH	T	TP	CO	O ₃	NO ₂	SO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}
AOD	1	-0.065***	-0.009**	0.004	0.043***	-0.085***	-0.001	0.152***	0.018**	0.160***	0.098***	0.169***	0.189***
BLH	—	1	0.631**	-0.234***	0.124***	-0.077**	0.085***	-0.081***	-0.251***	-0.220***	-0.007	-0.299***	-0.307***
WS	—	—	1	-0.370***	-0.232***	-0.556***	-0.032***	0.107***	-0.193***	0.054***	-0.062***	-0.010**	-0.016**
WD	—	—	—	1	0.167***	0.513***	0.003	-0.126***	0.209***	-0.029**	0.028***	0.037***	0.037***
RH	—	—	—	—	1	0.320***	0.296***	-0.073***	-0.336***	-0.128***	-0.263***	-0.365***	-0.365***
T	—	—	—	—	—	1	0.061***	-0.294***	0.347***	-0.214***	-0.055***	-0.124***	-0.149***
TP	—	—	—	—	—	—	1	0.001	-0.126***	0.013**	-0.069**	-0.113***	-0.113***
CO	—	—	—	—	—	—	—	1	-0.119***	0.503***	0.345***	0.431***	0.481***
O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	1	-0.125***	0.154***	0.322***	0.322***
NO ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	0.474***	0.638***	0.638***
SO ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	0.586***	0.600***
PM ₁₀	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	0.896***
PM _{2.5}	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1

1)***表示在0.01水平上显著相关,**表示在0.05水平上显著相关,*表示在0.1水平上显著相关

表3 多重共线性回归分析结果

Table 3 Results of multicollinearity regression analysis

项目	AOD	BLH	WS	WD	RH	T	TP	CO	O ₃	NO ₂	SO ₂	PM ₁₀
VIF	1.066	2.254	2.775	1.413	1.799	2.458	1.108	1.509	1.967	2.374	1.620	2.933

对比图,图6是各模型逐日预测值与实测值的散点密度图,其中色柱表示半径为1.5的圆内包含的点数,

表4是各模型在季节上的PM_{2.5}估算精度。

由图5可知,当PM_{2.5}浓度实测值较小或过大时,

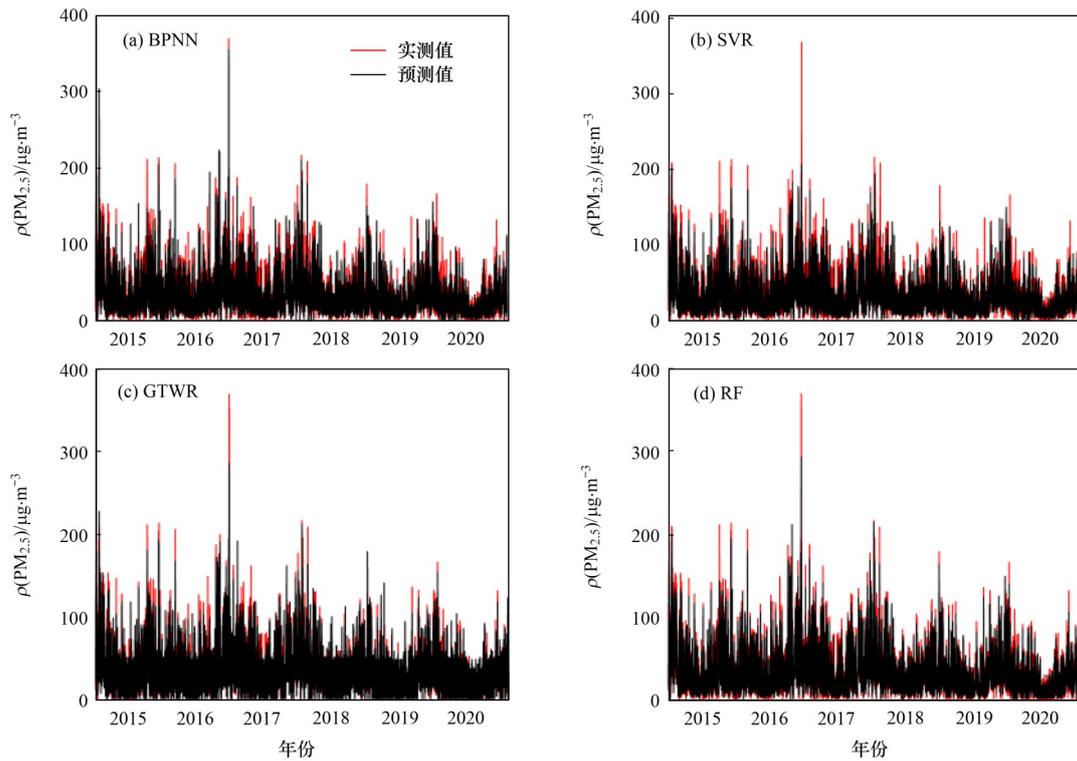


图5 预测值和实测值对比

Fig. 5 Comparison of predicted and measured values

模型预测值与真实值相差较大。当 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $20 \sim 80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,预测值和实测值重叠度高,各模型的预测精度较高;当 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 小于 20 或大于 $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,预测值和实测值差异增大,预测精度减小;当 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 大于 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,预测值和实测值差异较大,预测效果不理想。

图6表明,4种模型的 R 在 $0.920 \sim 0.981$ 之间,预测效果均较好,RF模型预测精度最高, R 为 0.981 ,比BPNN、SVR和GTWR模型分别高 0.059 、 0.061 和 0.047 。RF模型的RMSE为 $3.670 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,预测值和实测值的误差较小,而BPNN、SVR和GTWR模型的RMSE分别为 7.192 、 7.101 和 $6.385 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,分别比RF模型高 3.522 、 3.431 和 $2.715 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,预测结果与实测值误差较大。RF模型的MAE为 $2.323 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,误差相对较小,比BPNN、SVR和GTWR模型的MAE分别低 3.159 、 3.127 和 $2.526 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。各模型样本点多分布在 $1:1$ 线(红色虚线)附近,说明利用AOD、ERA5气象资料数据和污染物浓度数据估算PM_{2.5}浓度的精度较好,在高值区间散点较为离散,分布在 $1:1$ 线下方,存在“高值低估,低值高估”的现象,其原因可能是位于PM_{2.5}浓度高值区域的遥感影像缺失或不完整,AOD反映污染能力较差,该区域PM_{2.5}浓度的估算能力减弱,导致预测结果被低估,粤港澳大湾区的实测站点分布不均,大多集中在污染严重的市区,PM_{2.5}浓度低的郊区和山区等偏僻地区分布

稀疏,所以偏远地区污染物预测结果可能会被高估^[40]。

将建模数据按照季节进行分类,分别讨论4种模型在季节上的PM_{2.5}估算能力,见表4。总体而言,BPNN、SVR、GTWR和RF模型的每个季节PM_{2.5}预测结果与实测值的相关系数 R 在 $0.896 \sim 0.982$ 之间,均表现为冬季预测精度最高,夏秋季次之,春季

表4 各模型在季节上的PM_{2.5}估算精度Table 4 Seasonal accuracy of PM_{2.5} estimation of each model

模型	季节	R	RMSE $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	MAE $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
BPNN	春季	0.896	7.147	5.474
	夏季	0.901	5.304	4.171
	秋季	0.900	7.131	5.676
	冬季	0.927	8.764	6.720
SVR	春季	0.897	7.033	5.379
	夏季	0.903	5.144	4.085
	秋季	0.900	7.016	5.652
	冬季	0.923	8.724	6.807
GTWR	春季	0.899	6.706	5.290
	夏季	0.925	4.719	3.616
	秋季	0.926	6.173	4.918
	冬季	0.942	7.399	5.631
RF	春季	0.976	3.570	2.301
	夏季	0.976	2.738	1.760
	秋季	0.976	3.691	2.430
	冬季	0.982	4.482	2.848

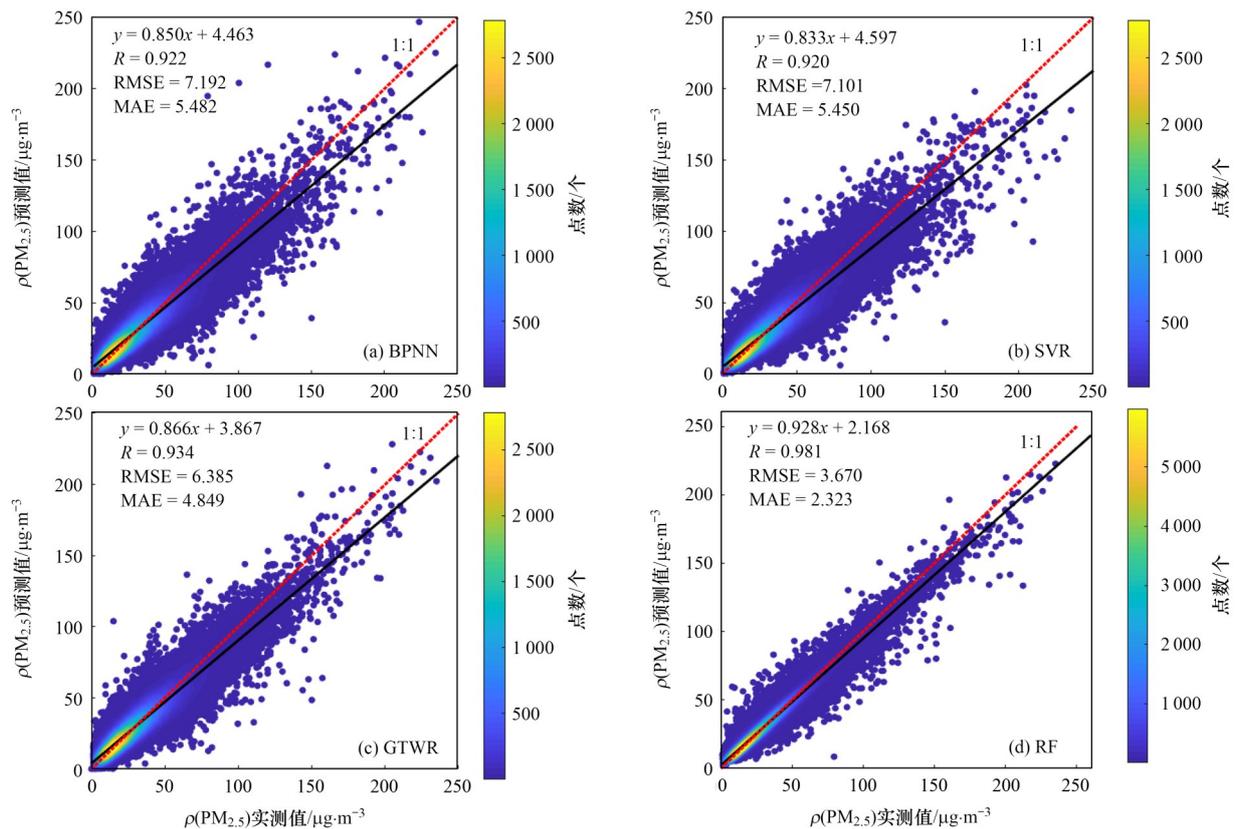


图6 模型逐日预测值与实测值的散点密度图

Fig. 6 Scatter density diagram of the predicted and measured values of the model

再次, RF模型四季的预测精度均优于BPNN、SVR和GTWR模型,其模型的 R 在0.976~0.982, RMSE介于2.738~4.482 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, MAE为1.760~2.848 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中冬季RF模型预测精度最佳,夏季次之,最后是春季和秋季再次. RF模型冬季 R 为0.982,比其他季节均高0.006,夏季的RMSE最低,为2.738 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,比其他季节分别低0.832、0.953和1.744 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, MAE为夏季最低,为1.760 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,分别比其他季节低0.541、0.670和1.088 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 总体而言, RF模型对大湾区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变异解释能力最强, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度预测值和实测值的相关程度最高,误差最小,具有较高地泛化能力,能更好地处理高维数据集,而BPNN、GTWR和SVR模型在针对多数数据样本时,其训练过程耗时较长,且算法精度要低于RF模型.

2.3 大湾区空气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时空特征分析

综上所述, RF模型能较好地预测大湾区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度. 将分辨率均为1 km的AOD、ERA5气象数据和污染物栅格数据输入RF模型,来估算2021年大湾区逐日1 km空间分辨率的面尺度 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度. 根据大湾区内各城市的经纬度范围计算各市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值,分析各市 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度变化和占比,见图7和图8,计算11个城市以及整个大湾区的月均浓度,

分析 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的月度变化特征及变化幅度,见图9和图10. 将2021年大湾区逐日 $\text{PM}_{2.5}$ 栅格数据进行镶嵌合并,得到季度和年度 $\text{PM}_{2.5}$ 空间分布,见图11和图12.

2.3.1 大湾区逐日 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化特征

由图7可见,大湾区各城市2021年逐日 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 呈“先减后增”的变化趋势,最高值在65.550~112.780 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最低值介于5.000~7.899 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,佛山、中山和肇庆浓度较高,最高值分别达到112.780、103.870和97.745 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,香港、澳门和惠州浓度较低,最高值分别为65.797、65.550和69.874 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 环境空气质量标准(GB 3095-2012)规定 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度24 h平均值和年均浓度限值^[41]见表5. 由图10可见,珠海、香港和澳门地区2021年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日均值均低于二级浓度限制,其他城市超过二级浓度限制天数占全年天数的比例在0.274%~6.575%之间,惠州的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日均值在一级浓度限值内的天数占全年天数35.342%,其他城市占比达到80%,特别是港澳地区,占全年天数的90%以上,说明2021年大湾区内 $\text{PM}_{2.5}$ 污染程度较轻.

2.3.2 大湾区月度 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化特征

由图9和图10可知,大湾区 $\text{PM}_{2.5}$ 月均值整体呈“U”型分布,1和12月为峰值,6月为谷值,这与蒋

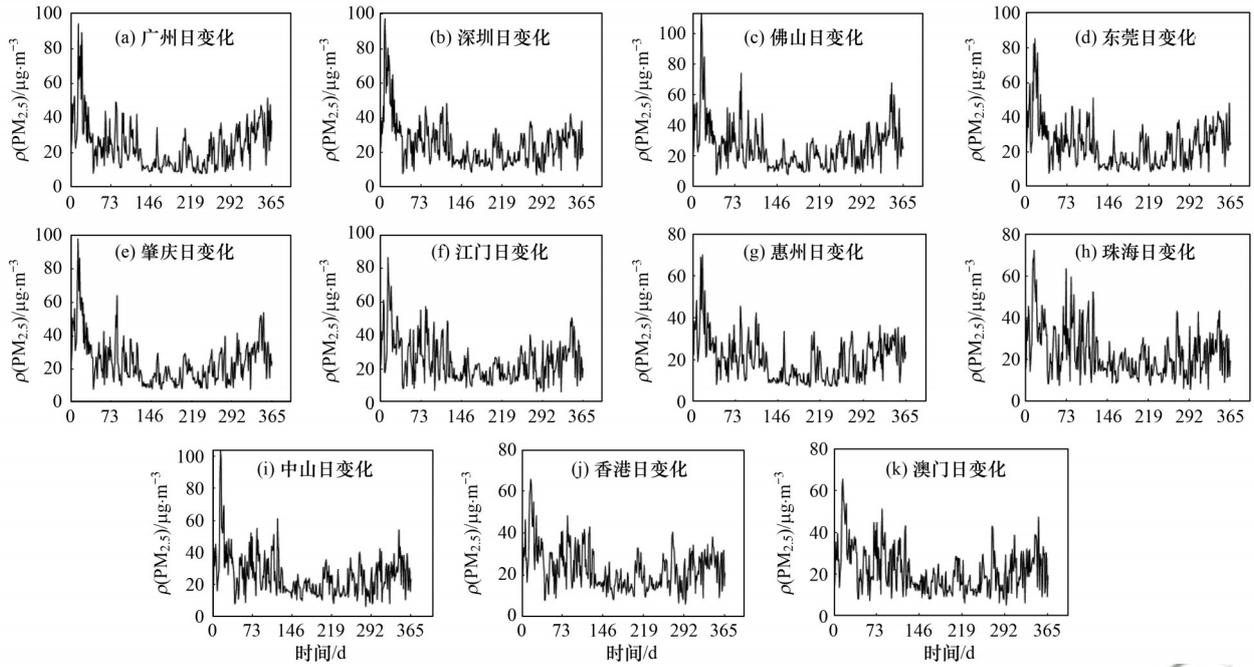


图7 各市PM_{2.5}浓度日均值变化

Fig. 7 Variation in daily average PM_{2.5} concentration in different cities

表5 PM_{2.5}浓度限值

Table 5 Limits for PM_{2.5} concentration

项目	一级浓度限值 /μg·m ⁻³	二级浓度限值 /μg·m ⁻³
ρ(PM _{2.5})24 h 平均值	35	75
ρ(PM _{2.5})年均值	15	35

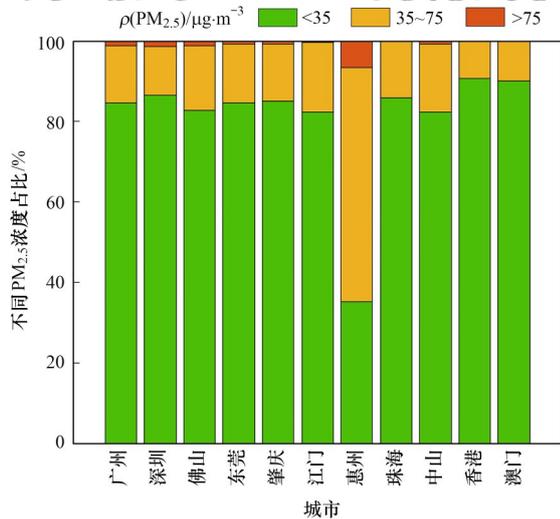


图8 各市PM_{2.5}浓度日均值占比

Fig. 8 Proportion of daily average PM_{2.5} concentration in different cities

超^[26]、李昕^[27]和陈玲玲^[42]研究的结论一致。1月广州、佛山和东莞地区浓度较高， $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为44.341、47.243和46.037 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，高于整个大湾区平均值，港澳地区浓度相对较低，分别为29.268 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和31.537 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ；各个城市2月浓度均下降，特别是东莞降幅为25.541%；3月除东莞有8.842%

的小幅度上升外，其余城市的浓度仍下降，深圳、珠海和惠州的降幅较大，分别为24.754%、23.782%和23.751%，整个大湾区降幅为10.543%；香港、澳门、江门、中山、珠海和深圳地区的PM_{2.5}浓度在4月略微上升，香港地区升幅最大，升幅为18.309%，其他地区浓度持续下降，但下降幅度较小，最大降幅是东莞的14.806%；5~6月大湾区PM_{2.5}浓度较低，此时的空气质量较佳，相比于4月下降趋势明显，澳门地区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为9.381 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，是大湾区最低浓度且下降幅度最大，降幅为53.630%。大湾区受东南方向的南海季风气候、降水充沛、湿度大、温度高且紫外线辐射强等有利气象条件加速对PM_{2.5}等颗粒的冲刷、扩散和光化学作用，使得6月PM_{2.5}浓度降至全年最低^[43]；大湾区各市PM_{2.5}浓度在7月均上升，且上升趋势明显，尤其是澳门和东莞两地，升幅分别为54.113%和47.123%，整个大湾区PM_{2.5}浓度升幅30.681%；8月整个大湾区PM_{2.5}浓度表现为下降趋势，降幅为4.991%，仅有深圳、东莞和澳门地区的PM_{2.5}浓度表现为上升，升幅最大为6.784%；整个大湾区PM_{2.5}浓度在9月为上升趋势，升幅为41.159%，珠海、江门和中山地区的浓度上升明显，升幅分别为79.069%、67.743%和58.013%；深圳、珠海、中山、香港和澳门的PM_{2.5}浓度在10月表现为上升，港澳两地的上升幅度较大，升幅分别为37.763%和16.296%，其他地区的浓度表现为下降，肇庆、广州的下降趋势明显，降幅为28.113%和17.859%；11月的大湾区各地区的PM_{2.5}浓度相比于10月均上升，上

升幅度最大的是肇庆的 28.428%;大湾区 12 月浓度较高,江门地区浓度最高, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $45.343 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,除了香港浓度略微降低外,其他地区均为上升,香港降幅为 0.463%,中山升幅最大,为 38.172%.

由于气候和人类活动的不同,大湾区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随季节变化较明显,呈现“冬高夏低,春秋过渡”的特点^[28,42,44].冬季地面温度降低,边界层下降,环境容量下降,地面气温低会出现“逆温”现

象,使得污染物在近地层累积,冬季以偏北风为主导风向,容易将北部地区的污染物输送至大湾区, $\text{PM}_{2.5}$ 达到高浓度水平.高密度人类活动、生物质不充分燃烧、工业排放和低温使机动车尾气排放量增大,也会导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高.夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在全年中相对较低,特别是港澳地区,雨水冲刷、气温升高、南海季风气候等影响使得颗粒物浓度下降^[45].

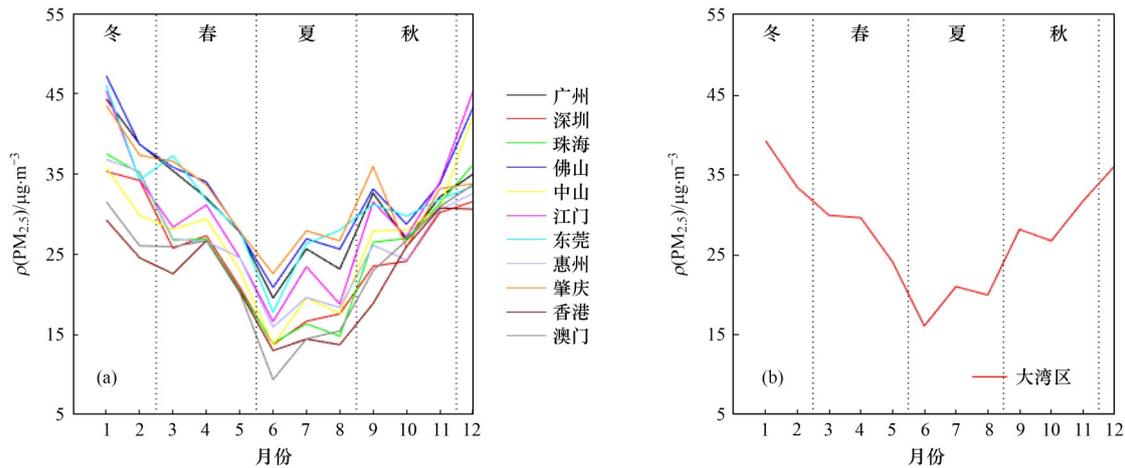


图9 各市 $\text{PM}_{2.5}$ 月均浓度变化特征

Fig. 9 Variation characteristics of monthly average $\text{PM}_{2.5}$ concentration in different cities

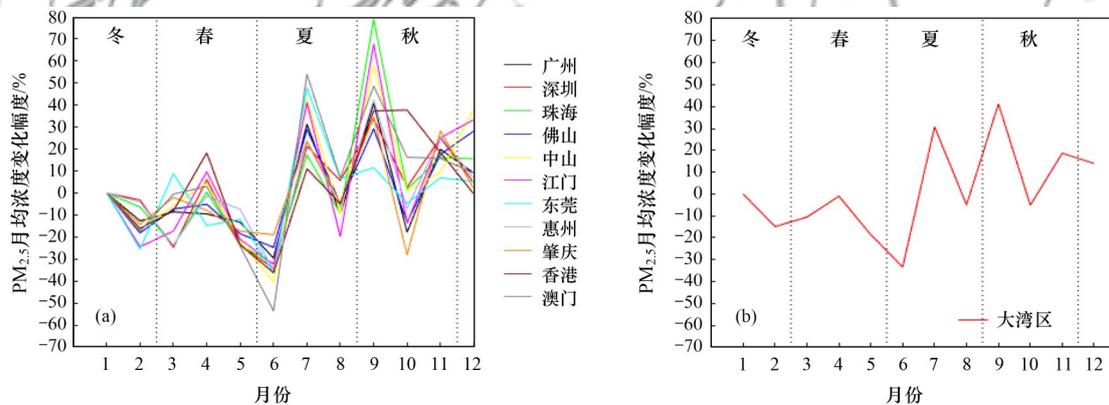


图10 各市 $\text{PM}_{2.5}$ 月均浓度变化幅度

Fig. 10 Variation amplitude of monthly average $\text{PM}_{2.5}$ concentration in different cities

2.3.3 大湾区年度 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分布特征

由图 11 可见,2021 年大湾区各地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年均值以较低和低为主,整个大湾区年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $28.868 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,低于我国环境空气质量的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年均值二级浓度限值,说明大湾区在 2021 年期间的空气质量较好,与该区域多年来开展的减少煤炭燃烧和鼓励工厂清洁生产及排放等高强度的综合治理政策^[22]、新冠疫情期间实施的交通管制和企事业单位停工停产等管控措施有关^[46].在空间上,大湾区 $\text{PM}_{2.5}$ 年浓度呈“中西部地区高、东部沿海地区低”的形式分布,这与蒋超^[26]和陈玲玲^[42]研究的结果一致.

高污染区域聚集紧密,以佛山为代表,广州和肇庆紧接其后,低浓度区包括惠州东部、港澳、珠海和深圳等沿海地区,大湾区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度具有明显的空间异质性.佛山的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值为 $34.088 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,是大湾区在 2021 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度最高的城市,城市化和工业化迅速发展的佛山以陶瓷、金属加工等产业为主,三面环山,地势低,受产业结构、地理环境和不利气象条件影响易造成高浓度空气污染物聚集^[24].广州和肇庆的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值仅次于佛山,分别为 $32.115 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $32.964 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,城市化水平高、人口密度大、车流量大和生活工业消耗能源多,是广

州PM_{2.5}污染的主要原因^[31],工业源和生物质燃烧是肇庆PM_{2.5}污染的重要贡献源,且处于珠三角地区下风向,受到广佛地区污染物排放的影响,地形起伏差异大,不利于污染物的扩散,致使PM_{2.5}等空气污染物滞留^[22].东莞、江门和惠州西部地区PM_{2.5}浓度年均值低于广佛和肇庆,在27.265~32.444 μg·m⁻³之间.东部沿海地区的港澳、珠海、深圳、中山和惠州东部ρ(PM_{2.5})年均值较低,介于23.086~27.837 μg·m⁻³,香港和澳门以旅游业、贸易、金融服务业和博彩业等为经济支柱,不易产生工业污染,并且港澳地区距离海岸线近,受海风和地理位置的影响,相比于内陆城市,港澳地区的污染物易于扩散,细颗粒污染程度较低^[31].

2.3.4 大湾区季度PM_{2.5}浓度空间分布特征

大湾区2021年四季PM_{2.5}浓度在空间分布特征见图12.大湾区的春季整体上呈“西北-东南”递减形式,内陆城市污染物浓度高,沿海地区浓度偏低,广佛交界处ρ(PM_{2.5})最高,为32.718 μg·m⁻³,其次是ρ(PM_{2.5})为28.029~32.354 μg·m⁻³的肇庆、中山北部、东莞和江门地区,香港、澳门、珠海和惠州地区浓度最低,分别是23.223、24.285、24.733和26.025 μg·m⁻³,春季温度逐渐升高,降雨量相对于冬季偏多,对污染物起到一定的冲刷作用,使得春季污染物浓度相对降低^[43];夏季ρ(PM_{2.5})平均值为19.092 μg·m⁻³,是全年浓度最低的季节,高值区主要分布在佛山、肇庆、江门和中山等地区,介于19.619~25.727 μg·m⁻³,其他地区浓度均较低,澳门浓度最低,ρ(PM_{2.5})为13.092 μg·m⁻³,夏季地面空气温度高,加速污染物的分解与转化,气旋活动频繁和水汽输送较好,有助于PM_{2.5}的扩散和清洗,所以夏季的空气质量相对较好^[45];秋季污染物高值区较聚集,包括肇庆、佛山、广州西部、江门北部、中山北部和东莞,ρ(PM_{2.5})介于28.268~31.887 μg·m⁻³,其次是ρ(PM_{2.5})为27.5~30 μg·m⁻³的江门东部、江门、惠州西部和深圳地区,沿海地区污染物浓度低,主要包括香港、澳门、深圳西部、珠海和惠州北部地区,浓度最低的是香港,ρ(PM_{2.5})为25.194 μg·m⁻³,与夏季的暴雨相比,秋季的雨水持续时间较短,风速和风力减

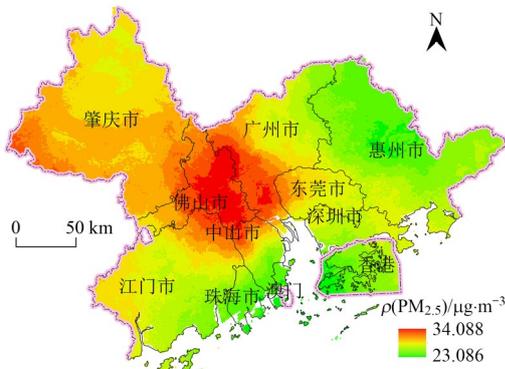


图11 大湾区PM_{2.5}年均浓度空间分布
Fig. 11 Spatial distribution of annual PM_{2.5} in the Greater Bay Area

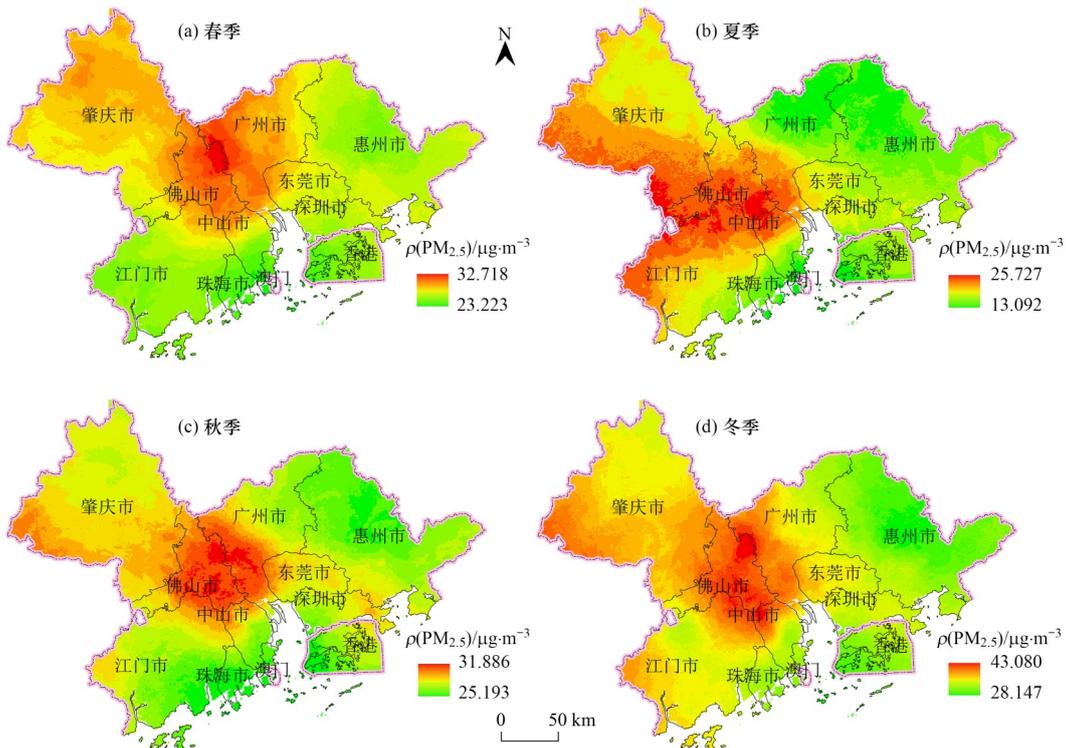


图12 大湾区PM_{2.5}季节浓度空间分布
Fig. 12 Spatial distribution of seasonal PM_{2.5} in the Greater Bay Area

小,湿度增大,对空气中污染物的冲刷效果不明显,潮湿的空气会更容易造成悬浮物的累积,并且秋冬季矿物燃烧和秸秆燃烧等也会增加 $PM_{2.5}$ 浓度^[25];冬季 $PM_{2.5}$ 浓度平均值相对较高,为 $35.614 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,东部沿海地区浓度低于中西部地区,高值区集中在佛山和江门地区, $\rho(PM_{2.5})$ 分别是 $43.080 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $41.675 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,广州、东莞、肇庆和中山北部地区浓度低于佛山和江门,在 $36.018 \sim 39.360 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,深圳、珠海、香港、澳门和惠州北部等沿海地区 $PM_{2.5}$ 浓度相对较低,最低浓度为香港的 $28.147 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,冬季地表温度与上层空气温度不一致,易发生“逆温”现象,造成污染物很难扩散,而且冬季气团干燥,降雨减少且持续时间短,风力和风速减小,对空气中污染物的冲刷和扩散作用不明显,汽车发动机燃油燃烧不充分,生物质燃烧也会增加空气 $PM_{2.5}$ 浓度,受西伯利亚高压和北半球地转偏向力的影响,大湾区冬季形成西北风,受内陆的空气污染物影响,大湾区 $PM_{2.5}$ 污染加重^[23,43]。

3 结论

(1) 2015~2020年大湾区的逐日相对湿度和CO的变异系数较小,离散程度不明显,风速、风向、AOD、边界层高度、降雨量和 PM_{10} 等时空差异性大,各因素与 $PM_{2.5}$ 浓度之间不存在多重共线性,且在99%置信区间显著相关, $PM_{2.5}$ 浓度随相对湿度、边界层高度、风速、温度和降雨量的上升而下降,随AOD、风向、CO、 O_3 、 NO_2 、 SO_2 和 PM_{10} 的上升而上升。

(2) 在 $PM_{2.5}$ 站点日均值预测模型中,RF模型预测精度最高,预测值与实测值的相关系数 R 为0.963,比BPNN、SVR和GTWR模型分别高0.059、0.061和0.047。各季节模型的 R 在0.896~0.982之间,RF模型在季节模型中的预测结果均优于其他模型,其中冬季预测效果最佳, R 为0.982,夏季次之,再次是春季和秋季。RF模型对大湾区 $PM_{2.5}$ 浓度的变异解释能力最强,具有较好地泛化能力,可用于大湾区 $PM_{2.5}$ 浓度在面尺度上的连续预测。

(3) 从时间上看,2021年大湾区逐日 $\rho(PM_{2.5})$ 呈“先减后增”的变化特征,各城市最高值介于 $65.550 \sim 112.780 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最低值介于 $5.000 \sim 7.899 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。珠海、香港和澳门地区均逐日 $PM_{2.5}$ 浓度低于24 h平均值二级浓度限制,其他城市超过二级浓度限制天数占全年天数的比例较少,在0.274%~6.575%之间,惠州逐日 $PM_{2.5}$ 浓度低于24h平均值一级浓度限制的天数占全年天数的36%,其他城市占80%以上,特别是港澳地区,占90%以上,说明2021

年大湾区空气质量较好。大湾区月度 $PM_{2.5}$ 浓度整体呈“U”型分布,1月浓度开始降低至6月达到谷值后逐渐升高至12月浓度为峰值,季节变化呈现“冬高夏低、春秋过渡”的特点,与气象条件有很大的关系。

(4) 从空间上看,大湾区 $PM_{2.5}$ 年浓度呈“中西部地区高、东部沿海地区低”的分布特征。大湾区各地区 $PM_{2.5}$ 年均值以较低和低为主,整个大湾区年均 $\rho(PM_{2.5})$ 为 $28.868 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,低于 $PM_{2.5}$ 年二级浓度限值。高污染区域聚集紧密,以佛山为代表,广州和肇庆次之,低浓度区在惠州东部、港澳、珠海和深圳等沿海地区。大湾区2021年4季 $PM_{2.5}$ 浓度平均值在空间分布上有所不同,表现为明显的时空异质性和区域性。

参考文献:

- [1] 尚永杰,茅宇豪,廖宏,等.基于随机森林的南京市 $PM_{2.5}$ 和 O_3 对减排的响应[J].环境科学,2023,44(8):4250-4261.
Shang Y J, Mao Y H, Liao H, et al. Response of $PM_{2.5}$ and O_3 to reductions of emissions in Nanjing based on random forest[J]. Environmental Science, 2023, 44(8): 4250-4261.
- [2] 夏晓圣,陈菁菁,王佳佳,等.基于随机森林模型的中国 $PM_{2.5}$ 浓度影响因素分析[J].环境科学,2020,41(5):2057-2065.
Xia X S, Chen J J, Wang J J, et al. $PM_{2.5}$ concentration influencing factors in China based on the random forest model [J]. Environmental Science, 2020, 41(5): 2057-2065.
- [3] 吕芳,杨宇鑫,杨俊.气溶胶光学厚度与 $PM_{2.5}$ 浓度的时空分布特征及其关系——以京津冀大气污染传输通道城市群为例[J].生态学报,2023,43(1):153-165.
Lü F, Yang Y X, Yang J. Spatiotemporal distribution characteristics and relationship analysis of aerosol optical depth and $PM_{2.5}$ concentration: taking the “2+26” urban agglomeration as an example [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 153-165.
- [4] 金团因,杨兴川,晏星,等.京津冀及周边MAIAC AOD和 $PM_{2.5}$ 质量浓度特征及相关性分析[J].环境科学,2021,42(6):2604-2615.
Jin J N, Yang X C, Yan X, et al. MAIAC AOD and $PM_{2.5}$ mass concentrations characteristics and correlation analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas [J]. Environmental Science, 2021, 42(6): 2604-2615.
- [5] 沈焕烽,李同文.大气 $PM_{2.5}$ 遥感制图研究进展[J].测绘学报,2019,48(12):1624-1635.
Shen H F, Li T W. Progress of remote sensing mapping of atmospheric $PM_{2.5}$ [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(12): 1624-1635.
- [6] 向娟,陶明辉,郭玲,等.基于卫星遥感的近地面 $PM_{2.5}$ 浓度反演进展[J].遥感学报,2022,26(9):1757-1776.
Xiang J, Tao M H, Guo L, et al. Progress of near-surface $PM_{2.5}$ concentration retrieve based on satellite remote sensing [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(9): 1757-1776.
- [7] Liu Y, Park R J, Jacob D J, et al. Mapping annual mean ground-level $PM_{2.5}$ concentrations using multiangle imaging spectroradiometer aerosol optical thickness over the contiguous United States [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109(D22), doi: 10.1029/2004jd005025.
- [8] Li Z Q, Zhang Y, Shao J, et al. Remote sensing of atmospheric

- particulate mass of dry PM_{2.5} near the ground: Method validation using ground-based measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **173**: 59-68.
- [9] 孙成, 王卫, 刘方田, 等. 基于线性混合效应模型的河北省PM_{2.5}浓度时空变化模型研究[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(9): 1500-1509.
- Sun C, Wang W, Liu F T, *et al.* Spatial-temporal simulation of PM_{2.5} concentration in Hebei province based on linear mixed effects model [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(9): 1500-1509.
- [10] 潘晨, 康志明. 2001~2019年气象条件对江苏省PM_{2.5}分布的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 649-662.
- Pan C, Kang Z M. Impact of meteorological conditions on PM_{2.5} in Jiangsu province from 2001 to 2019 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 649-662.
- [11] 南洋, 张倩倩, 张碧辉. 基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM_{2.5}长期变化影响因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 499-509.
- Nan Y, Zhang Q Q, Zhang B H. Influencing factors of long-term variations on gridded PM_{2.5} of typical regions in China based on GAM model [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 499-509.
- [12] 赵雪, 侯丽丽, 王鑫龙, 等. 基于LUR模型的2019年北京地区PM_{2.5}与PM₁₀浓度空间分异模拟[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(11): 4060-4069.
- Zhao X, Hou L L, Wang X L, *et al.* Simulation of spatial distribution of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in Beijing in 2019 based on LUR model [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(11): 4060-4069.
- [13] 杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 等. 京津冀地区高分辨率PM_{2.5}浓度时空变化模拟与分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4083-4094.
- Yang X H, Song C J, Fan L H, *et al.* High-resolution estimation of spatio-temporal variation in PM_{2.5} concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4083-4094.
- [14] 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.
- [15] Liu N, Zou B, Li S X, *et al.* Prediction of PM_{2.5} concentrations at unsampled points using multiscale geographically and temporally weighted regression [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **284**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117116.
- [16] Guo B, Wang X X, Pei L, *et al.* Identifying the spatiotemporal dynamic of PM_{2.5} concentrations at multiple scales using geographically and temporally weighted regression model across China during 2015-2018 [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **751**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141765.
- [17] Huang K Y, Xiao Q Y, Meng X, *et al.* Predicting monthly high-resolution PM_{2.5} concentrations with random forest model in the North China Plain [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **242**: 675-683.
- [18] Mao X, Shen T, Feng X. Prediction of hourly ground-level PM_{2.5} concentrations 3 days in advance using neural networks with satellite data in eastern China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2017, **8**(6): 1005-1015.
- [19] 尚俊倩. 基于神经网络的PM_{2.5}浓度预测研究与实现[D]. 西安: 西安石油大学, 2021.
- [20] 李华. 基于特征选择和SVM的PM_{2.5}预测研究[D]. 南宁: 南宁师范大学, 2020.
- [21] 康新礼, 张文豪, 刘原萍, 等. 基于随机森林的京津冀地区PM_{2.5}遥感反演及变化分析[J]. *遥感技术与应用*, 2022, **37**(2): 424-435.
- Kang X L, Zhang W H, Liu Y P, *et al.* PM_{2.5} remote sensing retrieval and change analysis in Beijing-Tianjin-Hebei region based on random forest model [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022, **37**(2): 424-435.
- [22] 王毓铮, 黄志炯, 肖笑, 等. 珠三角典型城市大气污染减排措施的PM_{2.5}改善评估研究[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(7): 2530-2539.
- Wang Y Z, Huang Z J, Xiao X, *et al.* Evaluation of PM_{2.5} improvements from local control measures in typical cities of the Pearl River Delta [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(7): 2530-2539.
- [23] 于广河, 苏翠平, 曹礼明, 等. 珠三角典型轻工业区大气PM_{2.5}中有机物来源解析[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(9): 155-162.
- Yu G H, Su C P, Cao L M, *et al.* Source apportionment of organic matter in atmospheric PM_{2.5} of a typical light-industrial zone in the Pearl River Delta [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(9): 155-162.
- [24] 沈劲, 陈诗琳, 黄晓波, 等. 佛山西部秋季O₃与PM_{2.5}来源解析[J]. *环境科学与技术*, 2019, **42**(S1): 143-146.
- Shen J, Chen S L, Huang X B, *et al.* Source analysis of O₃ and PM_{2.5} in the western Foshan city in autumn [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **42**(S1): 143-146.
- [25] 颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 等. 珠江三角洲大气光化学氧化剂(O₃)与PM_{2.5}复合超标污染特征及气象影响因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1600-1614.
- Yan F H, Chen W H, Chang M, *et al.* Characteristics and meteorological factors of complex nonattainment pollution of atmospheric photochemical oxidant (O₃) and PM_{2.5} in the Pearl River Delta Region, China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1600-1614.
- [26] 蒋超. 基于MODIS和地面监测的粤港澳大湾区PM_{2.5}浓度时空分异特征[D]. 广州: 广州大学, 2020.
- [27] 李昕. 基于MODIS的AOD反演与PM_{2.5}时空变化分析与监测——以香港地区为例[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [28] 何沐全, 肖建军, 石艳军, 等. 2010-2019年粤港澳地区气溶胶光学厚度时空分布特征[J]. *热带气象学报*, 2021, **37**(4): 647-655.
- He M Q, Xiao J J, Shi Y J, *et al.* Spatio-temporal distribution characteristics of aerosol optical depth in Guangdong, Hong Kong and Macao from 2010 to 2019 [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2021, **37**(4): 647-655.
- [29] 刘艳群, 张骥, 庞古乾, 等. 2001-2018年广东省气溶胶参数的时空变化特征[J]. *广东海洋大学学报*, 2020, **40**(6): 77-88.
- Liu Y Q, Zhang J, Pang G Q, *et al.* Spatial and temporal variation characteristics of aerosol parameters in Guangdong province in the past 18 years [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2020, **40**(6): 77-88.
- [30] 王捷纯, 邓玉娇. 利用MODIS C6产品分析广东省气溶胶光学厚度时空特征[J]. *气象科技*, 2018, **46**(4): 809-813.
- Wang J C, Deng Y J. Spatial-temporal characteristics of aerosol optical depth in Guangdong based on MODIS C6 data [J].

- Meteorological Science and Technology, 2018, **46** (4) : 809-813.
- [31] 粤港澳大湾区城市群年鉴编纂委员会. 粤港澳大湾区城市群年鉴-2019[M]. 北京: 方志出版社, 2020.
- [32] 文小明, 刘佳, 陈传忠, 等. 粤港澳大湾区生态环境监测发展现状与展望[J]. 中国环境监测, 2021, **37**(5): 14-20.
Wen X M, Liu J, Chen C Z, *et al.* Development status and prospect of the ecological and environmental monitoring in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Environmental Monitoring in China, 2021, **37**(5): 14-20.
- [33] 陆忠奇, 李京龙, 何清, 等. 南疆地区AOD时空分布特征及气象影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(3): 309-321.
Lu Z Q, Li J L, He Q, *et al.* Spatiotemporal distribution of AOD in southern Xinjiang and meteorological influencing factors [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(3): 309-321.
- [34] Guo Y X, Tang Q H, Gong D Y, *et al.* Estimating ground-level PM_{2.5} concentrations in Beijing using a satellite-based geographically and temporally weighted regression model [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, **198**: 140-149.
- [35] Feng X, Li Q, Zhu Y J, *et al.* Artificial neural networks forecasting of PM_{2.5} pollution using air mass trajectory based geographic model and wavelet transformation [J]. Atmospheric Environment, 2015, **107**: 118-128.
- [36] Yang W T, Deng M, Xu F, *et al.* Prediction of hourly PM_{2.5} using a space-time support vector regression model [J]. Atmospheric Environment, 2018, **181**: 12-19.
- [37] Liu Y, Cao G F, Zhao N Z, *et al.* Improve ground-level PM_{2.5} concentration mapping using a random forests-based geostatistical approach [J]. Environmental Pollution, 2018, **235**: 272-282.
- [38] Hu X F, Belle J H, Meng X, *et al.* Estimating PM_{2.5} concentrations in the conterminous United States Using the random forest approach [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(12): 6936-6944.
- [39] 吴迪, 杜宁, 王莉, 等. 基于GTWR-XGBoost模型的四川省PM_{2.5}小时浓度估算[J]. 环境科学, 2023, **44**(7): 3738-3748.
Wu D, Du N, Wang L, *et al.* Estimation of PM_{2.5} hourly concentration in Sichuan province based on GTWR-XGBoost model [J]. Environmental Science, 2023, **44**(7): 3738-3748.
- [40] 陈惠娟, 徐永明, 莫亚萍, 等. 基于NPP/VIIRS夜光遥感数据的淮南市夜间PM_{2.5}浓度估算研究[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(3): 342-351.
Chen H J, Xu Y M, Mo Y P, *et al.* Estimating nighttime PM_{2.5} concentrations in Huai'an based on NPP/VIIRS nighttime light data [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42** (3) : 342-351.
- [41] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [42] 陈玲玲. 基于LUR模型的粤港澳大湾区PM_{2.5}浓度空间分布模拟与分析[D]. 广州: 广州大学, 2020.
- [43] 湛社霞. 粤港澳大湾区常规大气污染物变化趋势与影响因素研究[D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2018.
- [44] 孙天乐, 邹北冰, 黄晓锋, 等. 深圳市大气PM_{2.5}来源解析[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(1): 13-20.
Sun T L, Zou B B, Huang X F, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} pollution in Shenzhen [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(1): 13-20.
- [45] 刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 等. 长株潭城市群PM_{2.5}和O₃浓度时空分布特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(12): 5354-5366.
Liu X Z, Zhang G Q, Yang W T, *et al.* Analysis of spatiotemporal distribution characteristics and influencing factors of PM_{2.5} and O₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration, China [J]. Environmental Science, 2022, **43** (12): 5354-5366.
- [46] 黄兵役, 王申博, 和兵, 等. 新冠疫情管控措施对郑州市PM_{2.5}浓度、粒径分布、组分和来源的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 2840-2850.
Huang B Y, Wang S B, He B, *et al.* Influence of COVID-19 prevention and control measures on PM_{2.5} concentration, particle size distribution, chemical composition, and source in Zhengzhou, China [J]. Environmental Science, 2022, **43**(6) : 2840-2850.

CONTENTS

Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning	CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, <i>et al.</i> (1)
Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, <i>et al.</i> (8)
Variation Characteristics of PM _{2.5} Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter	DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (23)
Characteristics of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou	HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (36)
Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter	PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, <i>et al.</i> (48)
Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022	CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, <i>et al.</i> (61)
Analysis of O ₃ Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China	HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, <i>et al.</i> (71)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer	ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, <i>et al.</i> (81)
Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction	FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (93)
Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model	YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, <i>et al.</i> (104)
Driving Forces and Mitigation Potential of CO ₂ Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China	WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, <i>et al.</i> (115)
Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant	ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, <i>et al.</i> (123)
Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years	DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, <i>et al.</i> (131)
Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, <i>et al.</i> (140)
Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment	ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, <i>et al.</i> (151)
Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment	LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, <i>et al.</i> (159)
“Load-Unload” Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary	LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-ru, <i>et al.</i> (173)
Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir	ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (181)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City	CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, <i>et al.</i> (194)
Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang	LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long (207)
Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan (218)
Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years	WANG Geng, ZHANG Fu-rong (228)
Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect	TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, <i>et al.</i> (239)
Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone	SHI Song, LI Wen, QU Chen, <i>et al.</i> (248)
Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, <i>et al.</i> (262)
Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin	CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, <i>et al.</i> (275)
Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model	Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, <i>et al.</i> (287)
Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model	SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, <i>et al.</i> (300)
Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain	HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, <i>et al.</i> (314)
Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors	SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, <i>et al.</i> (323)
Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region	CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (335)
Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area	LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (343)
Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations	XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, <i>et al.</i> (354)
Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing	LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, <i>et al.</i> (364)
Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils	LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie (376)
Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model	XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, <i>et al.</i> (386)
Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented	MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (396)
Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China	LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, <i>et al.</i> (407)
Source Apportionment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City	LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, <i>et al.</i> (417)
Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials	TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, <i>et al.</i> (429)
Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety	HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (439)
Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic	WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (450)
Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks	MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, <i>et al.</i> (459)
Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of <i>Lactuca sativa</i>	NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (470)
Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum	LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, <i>et al.</i> (480)
Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil	ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, <i>et al.</i> (489)
Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities	LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge (496)
Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial <i>Haloxylon ammodendron</i> Forest	WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, <i>et al.</i> (508)
Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity	ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei (520)
Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function	LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, <i>et al.</i> (530)
Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper	CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, <i>et al.</i> (543)
Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water	LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, <i>et al.</i> (555)
Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County	WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, <i>et al.</i> (567)
High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, <i>et al.</i> (576)
Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas	LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, <i>et al.</i> (584)
Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw	LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, <i>et al.</i> (594)
Comparison of Pb ²⁺ Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO ₂ Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid	JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, <i>et al.</i> (606)