

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

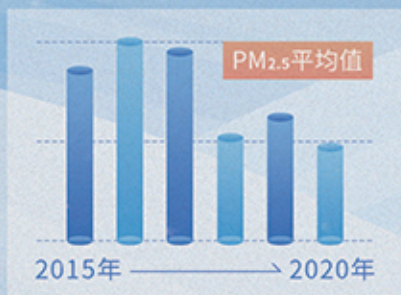
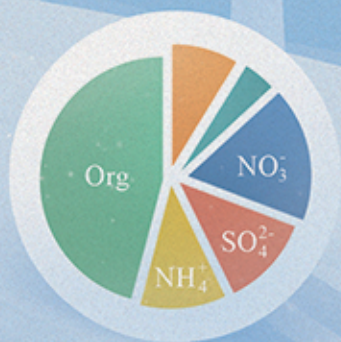
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径

刘光瑾^{1,2}, 苏方成^{1,2}, 徐起翔^{2,3}, 张瑞芹^{2,3}, 王克^{2,3*}

(1. 郑州大学化学学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学环境科学研究院, 郑州 450001; 3. 郑州大学生态与环境学院, 郑州 450001)

摘要: 河南省大气污染严重且与周边区域污染传输及交互影响明显, 以 2017 年 1、4、7 和 10 月为研究对象, 将河南省内 18 个地市的排放源分别标记, 并应用于 WRF-CMAQ 溯源模型进行模拟。污染物分布结果表明, 由于排放和气象的共同影响, 河南省 PM_{2.5}、NO₂ 和 SO₂ 浓度表现为冬季最高, 夏季最低。O₃-8h 浓度的季节变化则为夏季最高, 春季次之, 冬季最低。不同季节间污染物浓度差距较大, 河南省 PM_{2.5}、NO₂ 和 SO₂ 冬季浓度平均值分别是夏季的 4.17、4.12 和 6.24 倍, 而 O₃-8h 在夏季的浓度是冬季的 2.24 倍。由于 PM_{2.5}、NO₂ 和 SO₂ 与一次排放关系密切且具有一定的同源性, 这 3 种污染物的高值分布为北高南低, 季节趋势较为一致。而 O₃-8h 季节分布差异较大, 夏季气象条件有助于 O₃ 的生成, O₃-8h 高值主要分布于河南省东北区域; 冬春秋季由于气象条件的抑制和 NO_x 的消耗 O₃-8h 高值主要分布在河南省的南部。传输结果表明, 冬季省外传输和天然源对河南省 PM_{2.5}、O₃-8h、NO₂ 和 SO₂ 浓度的贡献率都是最大的, 分别为 36.20%~72.32%、77.96%~96.08%、49.45%~78.80% 和 59.05%~88.85%。在仅考虑本地排放和省内传输时, 夏季河南省内各市的排放对本地 4 种污染物浓度的贡献率均为最高; 春季省内传输对各市 PM_{2.5} 和 O₃-8h 浓度的贡献率较大, 分别为 25.63%~74.69% 和 30.21%~80.01%, 冬季省内传输对各市 NO₂ 和 SO₂ 浓度的贡献率较大, 分别为 26.02%~76.96% 和 20.30%~82.34%。河南省内 PM_{2.5}、NO₂ 和 SO₂ 的传输路径相似, 冬季多由北向南传输, 春季多由西向东, 西南向东北传输, 夏季多由西南向东北传输, 秋季多由北向南传输, 但 PM_{2.5} 的传输更加复杂。而 O₃-8h 传输路径与其他 3 种较为不同, 特别是在秋季 O₃-8h 由西南向东北的传输路径明显。

关键词: 河南省; WRF-CMAQ 模型; 排放溯源; 区域传输; 传输路径

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-3953-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202111126

One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities

LIU Guang-jin^{1,2}, SU Fang-cheng^{1,2}, XU Qi-xiang^{2,3}, ZHANG Rui-qin^{2,3}, WANG Ke^{2,3*}

(1. College of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Research Institute of Environmental Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Air pollution in Henan province is serious and is significantly impacted by pollution transmission and interactions with surrounding areas. The emission sources in 18 cities in Henan province were labeled and applied to the WRF-CMAQ traceability model for simulation in January, April, July, and October of 2017. The pollutant distribution results showed that due to the combined influence of emissions and meteorology, the concentrations of PM_{2.5}, NO₂, and SO₂ in Henan province were the highest in winter and the lowest in summer. The seasonal variation in O₃-8h concentration was the highest in summer, followed by spring, and the lowest in winter. There was a large difference in pollutant concentrations between different seasons. The average concentrations of PM_{2.5}, NO₂, and SO₂ in winter in Henan province were 4.17, 4.12, and 6.24 times those in summer, respectively, whereas the concentration of O₃-8h in summer was 2.24 times that in winter. Since PM_{2.5}, NO₂, and SO₂ are closely related to primary emissions and have a certain homology, the distributions of high values of these three pollutants were higher in the north and lower in the south, and the seasonal trends were more consistent. The seasonal distribution of O₃-8h varied widely, with high O₃-8h values mainly distributed in the northeastern region of Henan province in summer, when meteorological conditions contributed to O₃ production; in winter, spring, and autumn, high O₃-8h values were mainly distributed in the southern part of Henan province due to the suppression of meteorological conditions and NO_x consumption. The results of the study on the transport of pollutants showed that extra-provincial transport and natural sources contributed the most to the concentrations of PM_{2.5}, O₃-8h, NO₂, and SO₂ in winter, with 36.20%-72.32%, 77.96%-96.08%, 49.45%-78.80%, and 59.05%-88.85%, respectively. When considering only local emissions and intra-provincial transmission, the contributions of emissions to local concentrations of the four pollutants in summer were the highest in all cities of Henan province. The contributions of intra-provincial transmission to PM_{2.5} and O₃-8h in spring were the largest, with 25.63%-74.69% and 30.21%-80.01%, respectively, and the contributions of intra-provincial transmission to NO₂ and SO₂ in winter were larger, with 26.02%-76.96% and 20.30%-82.34%. The transmission paths of PM_{2.5}, NO₂, and SO₂ were more similar in Henan province, with more transmission from north to south in winter, from west to east and southwest to northeast in spring, from southwest to northeast in summer, and from north to south in autumn; however, the transmission of PM_{2.5} was more complicated. The O₃-8h transport path was more different from the others, especially in autumn when pollutants were mostly transported from north to south, but the O₃-8h transport path from southwest to northeast was obvious.

Key words: Henan province; WRF-CMAQ simulation; emission traceability; regional transport; transmission path

收稿日期: 2021-11-12; 修订日期: 2021-12-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212403); 中央引导地方科技发展专项资金计划项目(HN 2016-149)

作者简介: 刘光瑾(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染物传输, E-mail: Liuxiaohuajq@163.com

* 通信作者, E-mail: wangk@zzu.edu.cn

随着中国经济的不断发展,大气污染问题也愈加严重^[1,2].为了人民的健康和社会的发展,我国制定了《大气污染防治行动计划》.在2013~2017年间,中国的大气环境污染情况有了很大的改善,人为排放的SO₂减少了59%,NO_x减少了21%,PM_{2.5}减少了33%^[3,4].但是在这一期间内,中国的O₃浓度却在以2.14~6.42 μg·(m³·a)⁻¹的速率持续升高^[5,6],而且大部分地区PM_{2.5}的浓度达标率仍然很低^[7].相较于其他区域,河南省大气污染情况改善程度较低^[8,9].其中PM_{2.5}浓度下降幅度明显较小,2017年河南省内18个城市PM_{2.5}的浓度年均值均超过了国家二级标准^[10].而且河南省O₃污染也愈加严重,污染天数不断增加^[11].

区域传输对大气环境质量有很大的影响,污染物经过的地方和到达的地区,空气污染状况会持续加重.Wang等^[12]探究了2015年2月厦门两次PM_{2.5}重污染事件产生的原因,发现这期间内发生的两次寒潮,能够使PM_{2.5}在两天内从中国的北方传播到南方,传输距离可达2 000 km.Xing等^[13]的研究开发了ERSMv2.0建模技术,来量化多区域来源对京津冀地区PM_{2.5}和O₃的贡献,结果表明PM_{2.5}受本地化学转化的影响大于区域传输的影响,相反O₃受区域传输的影响更大.Wang等^[14]探究了2012年和2016年1月京津冀城市群冬季4种主要空气污染物(SO₂、NO_x、PM_{2.5}和PM₁₀)的传输特征,发现排放量和气象因素都会对城市间污染物的传输方向产生影响.污染传输的研究有助于提前预测污染源,进而提前进行精确控制,从而达到降低污染物浓度峰值和减少污染物浓度累积的目的.

河南省位于中国中部,是中国的经济大省,也是全国重要的综合交通枢纽.近年来,河南省的大气污染情况严重,本地排放的污染物浓度较高^[15].除了本地污染源,区域传输也是影响大气环境的重要因素^[16,17].在2014年1月河南省的一次PM_{2.5}重污染事件中,本地排放和区域传输对PM_{2.5}的平均贡献分别是50.6%和49.4%^[18].在2015年冬季的3次河南省PM_{2.5}重污染过程中,本地排放对PM_{2.5}浓度的平均贡献率均为最大.而省外传输主要来源为湖北、安徽和江苏,贡献率分别为20.7%、17.7%和18.5%^[19].尽管针对河南省大气污染的研究越来越多,但是少有系统地对河南省18个城市大气污染物的分布和迁移的综合研究.

空气质量模型可以对大气环境中污染物的排放、输送、反应和清除等过程进行仿真模拟.李锋等^[20]的研究运用CMAQ模拟和量化了2013年长江

三角洲地区的一次重污染过程,发现整个污染期间本地贡献占49%左右,而来自安徽、山东南部 and 苏北地区的跨界输送对该区域PM_{2.5}的贡献率分别为3.5%~24.9%、0.14%~30.0%和0.03%~17.5%.Dong等^[21]的研究用CMAQ模型,发现了2014~2017年期间,京津冀地区的PM_{2.5}年均浓度下降了33%,其中本地排放、区域内传输和区域外的传输分别下降了47%、25%和28%.许艳玲等^[22]的研究通过CMAQ模式模拟,发现了2015年成都市PM_{2.5}年均浓度受本地源贡献约为61%,外地源贡献为39%,1、4、7和10月的区域传输对该市PM_{2.5}浓度的贡献率分别为42%、32%、38%和43%.由此可以看出,通过CMAQ模型可以很好地模拟出大气污染物的分布和传输情况,为研究提供数据支持,使研究结果更加精准可靠.

基于此,本研究使用CMAQ模型模拟了河南省2017年的空气质量,旨在全面描述中国中部地区空气污染物的分布特征.在对河南省18个城市的排放清单及河南省省外排放源分别进行标注后,采用面向源的化学传输模式CTM模型来分析区域内外及城市间的污染物传输情况.在区域传输结果计算中,将城市区域网格视为整体进行处理计算区域传输情况;随后基于城市间传输结果,用矢量箭头链接了不同城市大气污染物的最大流动方向,进而构建河南省内城市间污染物的传输路径,以期对污染物在不同地区之间的联系提供了一个独特的视角,对研究空气污染物的区域传输具有数据支持和参考作用.

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究所使用的大气污染数据来自中国环境监测中心(<http://113.108.142.147:20035/emcpublish/>)发布的2017年的1、4、7和10月,河南省国家环境空气质量控制点(75个点)测得的包括PM_{2.5}、O₃、NO₂和SO₂的小时浓度数据,用于评估模型模拟情况.

1.2 排放数据

本研究所采用的排放清单是通过逐层嵌套的方法构建的.REAS2应用于中国以外的地区,网格分辨率为36 km;MEIC应用于区域1、区域2和3河南省外部分;河南省的排放清单是基于以前的研究而整理的^[23].扬尘排放是在CMAQ在线模拟中生成的.自然界的排放是由自然界气体和气溶胶排放模型(MEGAN)2.10版^[24]计算的,关于排放的一些细节和模型设置也可以在以前的研究中找到^[25].在排

放产生的过程中,河南省18个城市的排放被分别标出(图1),希望本研究能更清楚地显示河南省18个城市之间的污染物传输以及各城市对该地区空气污染的贡献.河南18个城市的名称为:郑州(ZZ)、安阳(AY)、鹤壁(HB)、焦作(JZ)、济源(JY)、开封(KF)、漯河(LH)、洛阳(LY)、南阳(NY)、平顶山(PDS)、濮阳(PY)、三门峡(SMX)、商丘(SQ)、新乡(XX)、信阳(XY)、许昌(XC)、周口(ZK)和驻马店(ZMD).

1.3 模型参数

本研究使用WRF 4.1.3模式对气象情况进行模拟,为化学传输模型提供天气驱动场,并使用1°×1°分辨率的FNL全球再分析数据为模型提供初始气象场和边界气象场^[26,24].图1显示了三级嵌套区域,分别是水平分辨率为36、12和4 km的区域网格域.

本研究使用的CMAQ模型为5.3.1版本,该版本能够更好地解析研究区域内大气污染物的迁移和转化.该版本的CMAQ包括一些额外的功能,如广泛的化学更新,新的AERO7气溶胶模块,更新的M3Dry双向沉积模型,以及新的STAGE双向沉积模型^[27].

1.4 模型结果评估

本研究使用了统计学数据分析方法对WRF/CMAQ模型的性能进行了计算和评估,计算公式如表1.

表1 模式验证统计参数计算公式

统计量	数学表达式
平均偏差(MB)	$MB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)$
标准平均偏差(NMB)	$NMB = \frac{\sum_i (M_i - O_i)}{\sum_i O_i} \times 100\%$
标准平均误差(NME)	$NME = \frac{\sum_i M_i - O_i }{\sum_i O_i} \times 100\%$
平均分数偏差(MFB)	$MFB = \frac{1}{n} \sum_i \frac{(M_i - O_i)}{(M_i + O_i)/2} \times 100\%$
平均分数误差(MFE)	$MFE = \frac{1}{n} \sum_i \frac{ M_i - O_i }{(M_i + O_i)/2} \times 100\%$
相关系数(R)	$R = \frac{\sum_i (M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O})}{[\sum_i (M_i - \bar{M})^2 (O_i - \bar{O})^2]^{1/2}}$

表2 模式评估统计

Table 2 Model evaluation statistics								
项目	监测平均值 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	模拟平均值 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	MB / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	NMB/%	NME/%	MFB/%	MFE/%	R
PM _{2.5}	67.75	57.77	-9.97	-14.72	29.35	-15.77	32.59	0.81
O ₃ -8h	96.80	89.54	-7.26	-7.50	19.13	-8.54	21.97	0.81
NO ₂	38.00	38.85	0.85	2.25	19.23	1.05	19.97	0.82
SO ₂	20.56	20.58	0.02	0.10	27.75	-7.45	26.54	0.78

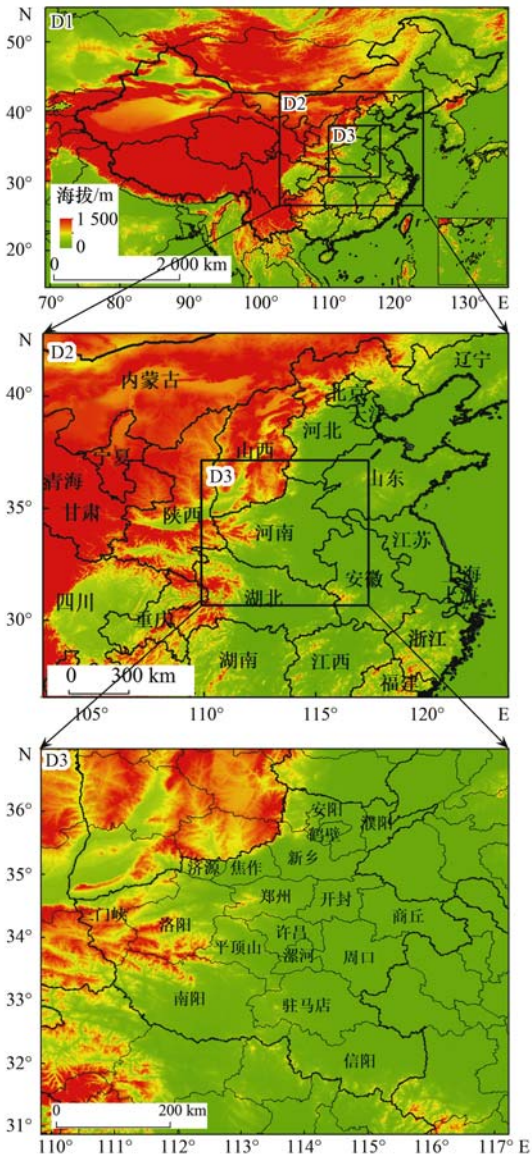


图1 三层嵌套模拟范围

Fig. 1 Three-layer nested simulation domain

以上各式中, M_i 和 O_i 为*i*时刻的模式模拟值和监测值,*n*为参与评估的总数据个数.考虑到本研究中模拟时段较长,模拟值和监测值均使用日均值参与计算.此外,对每个城市的多个监测站点的监测值进行平均计算,来代表该城市的整体污染水平,同时对模拟值也进行相应的平均操作.计算的结果如表2.

本文将WRF/CMAQ模型模拟的2017年的1、4、7和10月河南省PM_{2.5}、O₃-8h、NO₂和SO₂的浓

度变化情况与实际监测的情况进行了对比(其中 O_3 -8h 是指每日 O_3 浓度最大 8h 的平均值),对模型的效果进行分析评估. 根据河南省 18 个市 4 种污染物模拟值与监测值的日值,计算出模型统计检验指标的数值,如表 2 所示. 可以看出 SO_2 模型模拟的结果均值与监测值的相差最小,为 $0.02 \mu g \cdot m^{-3}$, $PM_{2.5}$ 相差最大,为 $9.97 \mu g \cdot m^{-3}$. $PM_{2.5}$ 和 O_3 -8h 的 MB 为负值,说明在模型模拟过程中二者的值被低估. 从 NMB 和 NME 的评价结果来看, $PM_{2.5}$ 、 O_3 -8h、 NO_2 和 SO_2 的模拟结果均在最优范围内^[28]. 因为 NMB 和 NME 是通过除以观测浓度的总和计算的,而不是使用单独的观测值,因此它们在一定程度上

可以避免异常值带来的影响,但当它们应用于低浓度时,可能更容易受到异常值的影响, SO_2 的 NMB 极小但 NME 高可能与此有关. 4 种污染物的 MFB 和 MFE 均在“目标标准” ($\pm 30\%$ 和 $\pm 50\%$) 内^[29]. $PM_{2.5}$ 、 O_3 -8h 和 NO_2 的相关系数 (R) 均大于 0.8. 通过河南省 18 个市不同季节 4 种大气污染物浓度的模式模拟值与监测值日均值的对比(图 2),可以看出模拟情况整体较好,两者之间的数值相似,变化趋势相对一致,对大部分峰值也有较好的再现能力. 因此研究者认为模型预测情况较为良好,能够准确地模拟出河南省 2017 年 4 种污染物的浓度变化态势,可以用于后续的研究.

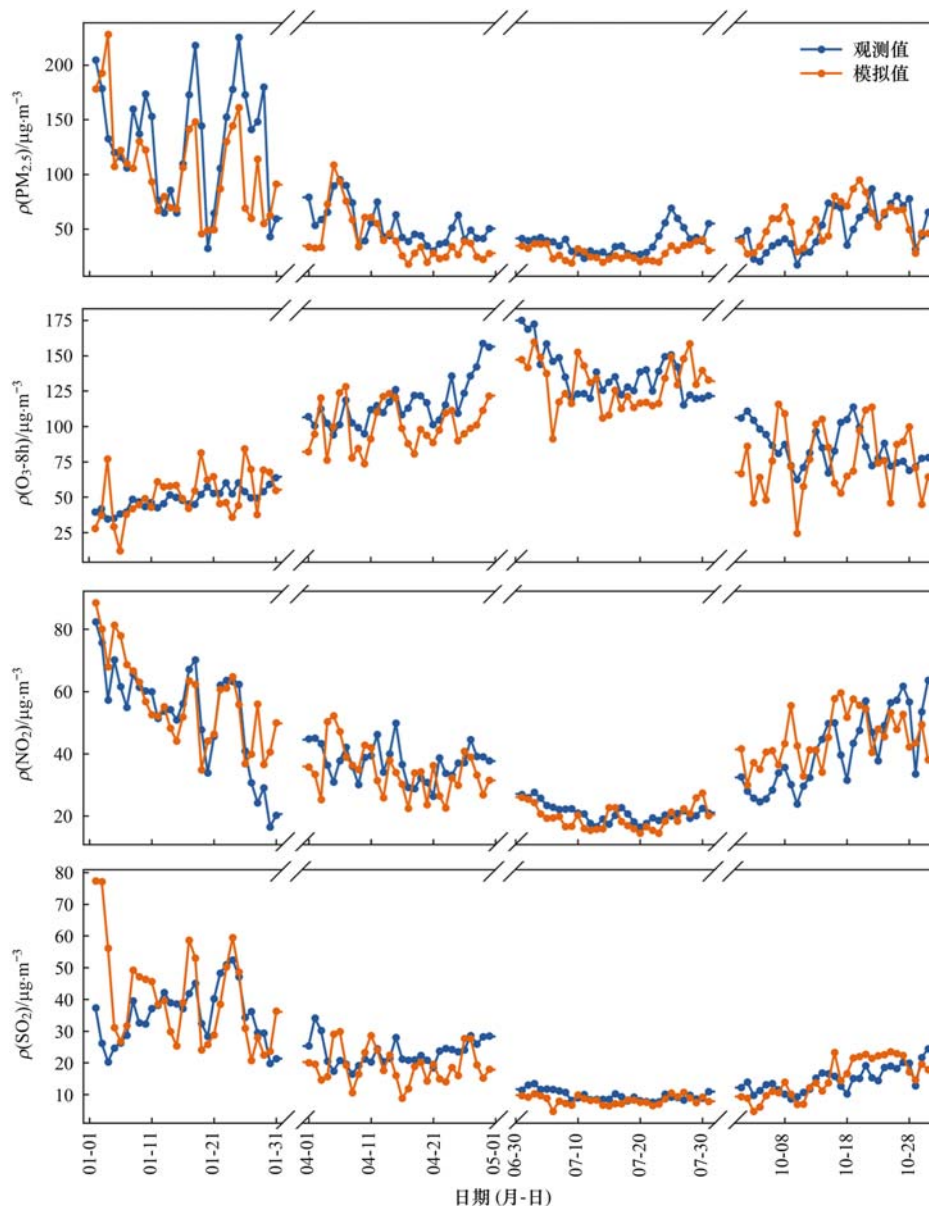


图 2 2017 年污染物浓度模拟值与监测值日均值的对比

Fig. 2 Comparison of simulated and monitored daily average pollutant concentration values in 2017

1.5 污染物传输矩阵

为了研究河南省内大气污染物的传输,本研

究建立了包含 18 个城市的传输矩阵模型. 假设 R_{ik} 为来自 k 市的污染物对 i 市的大气产生的影响,

那么:

$$R_{ik} = \left(\sum C_{ikj} / \sum C_{ij} \right) \times (N/N_k) \quad (1)$$

式中, C_{ikj} 和 N_k 分别为仅 k 市排放时 i 市每个网格内污染物的浓度和网格个数, C_{ij} 和 N 为当所有城市均正常排放时 i 市每个网格内污染物的浓度和网格个数。

使用 R_{ik} 作为元素, 建立的大气污染物传输矩阵能够更清晰地展现河南省 18 个城市间污染物的传输情况。

2 结果与讨论

2.1 区域分布及特征

通过 WRF/CMAQ 模型模拟了 2017 年河南省 4 种大气污染物浓度的整体分布情况 (图 3)。可以看出, 河南省 NO_2 和 SO_2 污染主要集中在豫北地区。这是由于 NO_2 和 SO_2 是一次污染物, 其浓度受排放

的直接影响较大。河南省北部多为城市密集区域和工业区, 排放强度大^[30,31]。夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 -8h 主要集中于豫北地区, 但是其他季节, $\text{PM}_{2.5}$ 在豫北和豫东地区浓度较高, O_3 -8h 在豫西南地区浓度较高。这是由于夏季的大气辐射强、气温高且风速低, 有利于光化学反应产生大量的 O_3 ^[32]。由于地理位置和气象条件的影响, 河南省夏季 O_3 会出现局地累积现象, 人为排放导致的 O_3 浓度会迅速增加, 造成豫北地区 O_3 浓度变高^[33]。但是, 在冬春秋季光照的减弱和温度降低, 使河南省北部区域 O_3 的生成被极大地抑制, 而此时 NO_x 排放依然处于高位, 对 O_3 的消耗较强, O_3 的分布与 NO_x 分布呈现为负相关状态。因此, 冬春秋季 O_3 -8h 高值分布西南高, 东北低。而夏季大气氧化性强, 豫北地区 O_3 浓度高, 也会促进豫北地区二次颗粒物的形成, 这也是该区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度明显高于其他区域的原因之一。^[34,35]

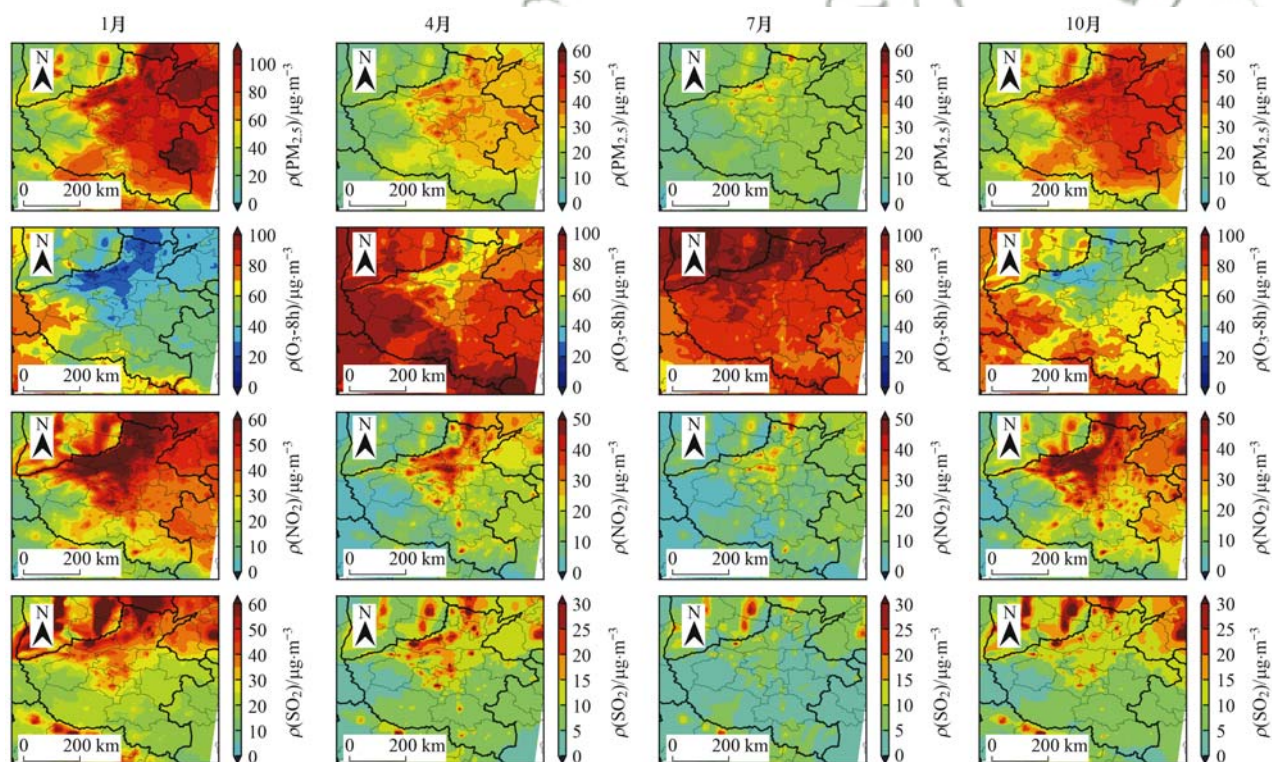


图3 2017年河南省大气污染物分布情况

Fig. 3 Distribution of air pollutants in Henan province in 2017

考虑到空气质量监测站点均分布于主城区和主城区周边区域, 为了在城市尺度更为清晰地了解河南省各类污染物的特征, 本研究将不同城市按照城市边界进行区分 (图 1), 进而计算城市内所有格点内污染物的浓度平均值以代表城市的整体状况。2017 年, 河南省 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_2 的季节性浓度变化规律较为相似, 都是冬季浓度最高 ($50.31 \sim 127.45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $22.43 \sim 65.05 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 秋季次之 ($27.64 \sim 63.36 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $12.15 \sim 45.33 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),

夏季最低 ($13.84 \sim 32.30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $84.88 \sim 18.46 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。 SO_2 的变化规律稍有不同, 其春季浓度为 $5.87 \sim 19.63 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 略高于秋季 ($5.12 \sim 16.92 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。 O_3 -8h 与其他 3 种污染物的变化规律有着很大的不同, 其浓度夏季最高 ($80.86 \sim 100.48 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 春季次之 ($66.87 \sim 94.73 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 冬季最低 ($41.22 \sim 75.42 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。 河南省 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 和 SO_2 冬季的浓度平均值分别是夏季的 4.17、 4.12 和 6.24 倍, 而 O_3 -8h 夏季的浓度平均值是冬季的

2.24 倍. 污染物浓度较高的城市与之前研究中排放浓度较高的城市并不完全一致^[23]. 其中有的城市是边界城市, 它们作为省外污染物输入的起点, 除城市中心的部分区域外, 区域内自身的污染物浓度受省外传输影响较大, 也有一些城市与其他省份不接壤, 但与省内排放强度较高的城市相邻, 本地的污染物浓度也会有所上升. 这说明空气质量的评估应该将污染物的本地排放和区域传输进行综合考虑.

此外, 本研究还对比了 2017 年河南省内外 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 -8h、 NO_2 和 SO_2 的传输情况 (图 4). 可以看出, 在仅考虑本地排放和省内传输时, 河南省北部 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 和 SO_2 的大气污染情况较为严重. 这是

由于河南省北部人口密度高, 经济增长速度较快, 煤炭消耗量较大, 工业区较多, 导致了大气污染物浓度相对较高^[36]. 而且豫南地区城市的气象条件也更有利于污染物的扩散、稀释和传输^[37]. 4 种污染物中, NO_2 和 SO_2 在大气中存在的时间较短^[38], 而 $\text{PM}_{2.5}$ 中的二次组分和 O_3 -8h 的区域传输包括上风向源区向受体城市直接输送的污染物和间接传输的前体物, 这些前体物在输送过程中及输送到受体城市后均有可能经过一系列反应生成污染物^[39]. 二次污染物是距离较远区域间大气传输的主要污染物^[40]. 因此作为典型的二次污染物, 河南省 O_3 -8h 浓度受省外传输的影响更大.

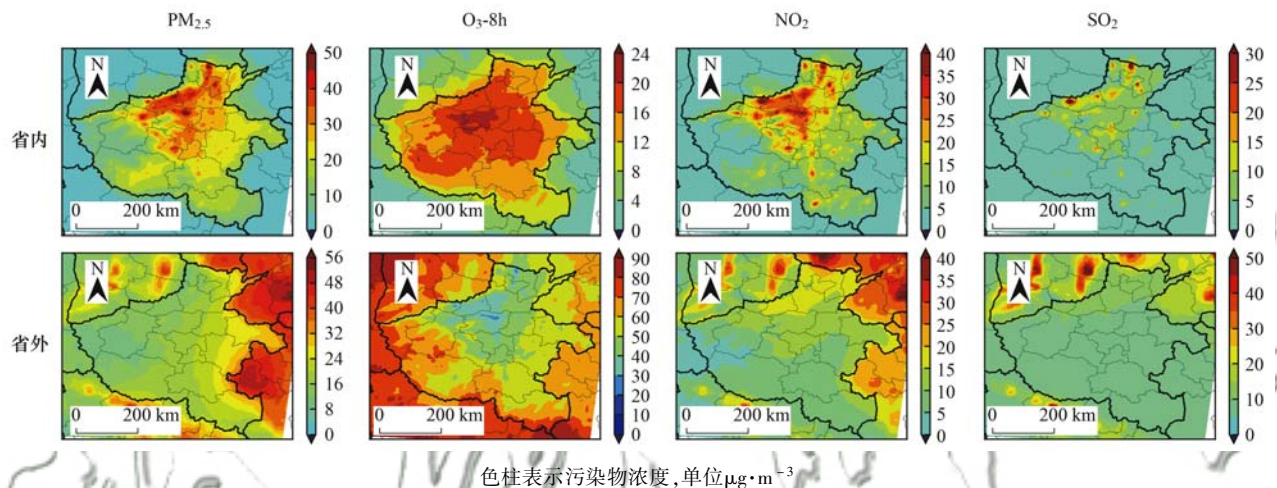


图 4 2017 年河南省内外污染物贡献情况对比

Fig. 4 Comparison of pollutants from differing regional transmission in Henan in 2017

周围省份大气污染情况越严重, 就会对河南省的空气质量产生越大的影响. 省外传输的污染物由四周向河南省中部蔓延, 污染影响也逐渐变弱. 无论是省内传输还是省外传输, 污染物浓度越高的区域对周边大气环境的影响越大, 同时污染越轻的区域受到来自其他区域的影响也越大. 而且相邻区域间大气污染的交互作用更强, 这也与该地区的气象条件有着紧密的关系.

2.2 省外传输及天然源贡献

本文计算了不同季节, 省外传输和天然源对河南省 18 个市 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 -8h、 NO_2 和 SO_2 浓度的贡献率 (图 5). 由于计算的是所有格点内污染物的浓度平均值, 因此省外传输和天然源的浓度结果相对较高于仅城市点位取值结果. 季节的更替会使气流产生一定的变化, 从而对大气中污染物的传输情况产生影响^[41]. 可以看出, 省外传输和天然源对河南省大气污染情况有着显著的影响, 而 4 种污染物中受到影响最大的是 O_3 -8h.

2017 年, 省外传输和天然源对河南省各市 O_3 -8h 浓度的年均贡献率为 66.20% ~ 88.90%. O_3 -8h

受省外传输和天然源的影响较大的城市分别处在三省交界处, 这些位置更容易受到来自多个省份污染物的传输影响. 受省外传输和天然源的影响, 河南省西南区域 O_3 -8h 的年均浓度变化较大, 这可能与南方比北方温度高、日照强且风力弱等气象因素有关, 这些气象条件有利于 O_3 -8h 的光化学产生以及 O_3 -8h 及其前体物的积累^[42]. 分季节来看, 夏季省外传输和天然源对河南省各市 O_3 -8h 浓度的贡献率最小, 为 58.51% ~ 85.53%, 冬季最大, 为 77.96% ~ 96.08%. 不同季节省外传输和天然源使河南省各市污染物浓度产生的变化中, 夏季最高, 为 49.40 ~ 83.41 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 冬季最低, 为 21.83 ~ 54.62 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 可以看出, 冬季 O_3 -8h 浓度整体偏低, 但省外传输和天然源的贡献率反而更大.

相较于 O_3 -8h, 省外传输和天然源对河南省 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的年均贡献率较小, 为 34.17% ~ 69.30%. 河南省 $\text{PM}_{2.5}$ 受影响较大的城市依然是三省交界处. 河南省受省外和天然源的影响, $\text{PM}_{2.5}$ 的年均浓度变化较大的城市主要分布在豫东. 这种情况与河南省周围省份的人口分布、产业模式和气象

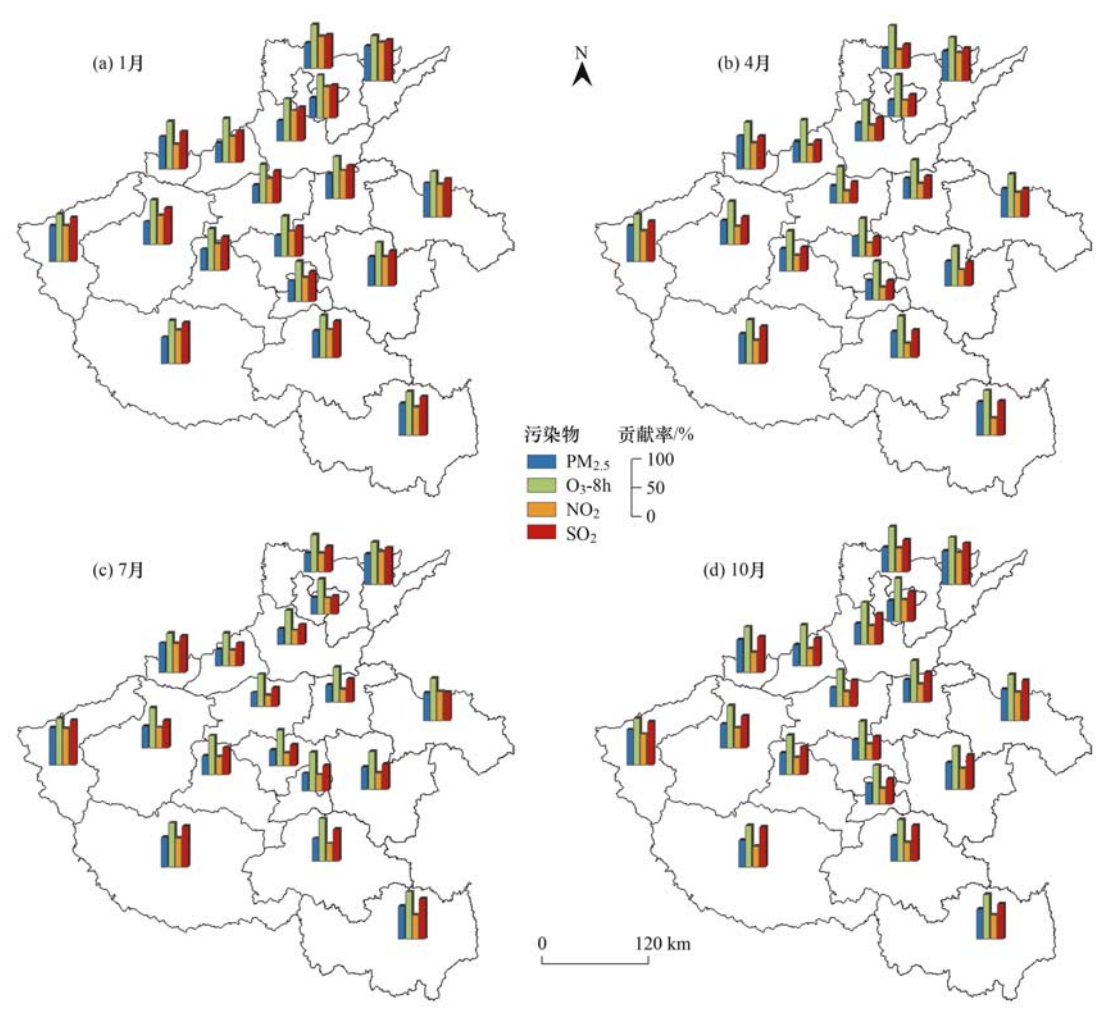


图 5 2017 年不同季节省外污染物的传输对河南省大气环境的影响

Fig. 5 Impact of regional transporting from other provinces in different seasons on the atmospheric environment of Henan province in 2017

等因素有关^[43,44].不同季节省外传输和天然源对河南省各市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献率相对较小,其中冬季最大,为 36.20%~72.32%.但是,从分季节省外传输和天然源使河南省各市 $\text{PM}_{2.5}$ 产生的浓度变化可知,冬季最大,为 29.69~90.47 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,夏季最小,为 7.14~13.53 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.与 $\text{O}_3\text{-8h}$ 恰恰相反, $\text{PM}_{2.5}$ 整体浓度越高,受省外传输和天然源的影响越大.

2017 年,省外传输和天然源对河南省 NO_2 和 SO_2 浓度的年均贡献率分别为 34.69%~66.52% 和 48.96%~84.88%.受省外传输和天然源的影响 NO_2 的年均浓度变化较大的城市均在河南省的东北区域,而 SO_2 的年均浓度变化较大的城市分布在河南省北部.冬季省外传输和天然源对河南省 NO_2 浓度的贡献率最大,为 49.45%~78.80%,且冬季省外传输和天然源使河南省各市 NO_2 浓度的增加,明显高于其他季节为 14.93~40.66 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.冬季省外传输和天然源使河南省 SO_2 浓度的增加,也明显高于其他季节为 14.76~36.26 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其他 3 个季节中夏季增加的浓度也明显低于其他季节为 1.78

~3.90 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

整体看来,省外传输和天然源对三门峡和濮阳 4 种污染物浓度的年均贡献率较大.4 种污染物中,除 SO_2 外,省外传输和天然源对郑州市污染物浓度的年均贡献率都是最小的,这可能与郑州地理位置处在河南省中部,并且本地污染物排放量较高有较大的关系.许昌的 SO_2 受省外传输的影响最小,原因之相同.

从污染物年均浓度变化来看,受省外传输和天然源的影响,河南省西南部 $\text{O}_3\text{-8h}$ 的浓度变化更大,河南省东部 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化较大,河南省北部 NO_2 和 SO_2 浓度变化较大.4 个季节中,冬季省外传输和天然源对 4 种污染物浓度的贡献率都是最大的.除夏季省外传输的 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度较高,其余 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 和 SO_2 均是冬季省外传输到河南省的污染物浓度最高.相较于河南省南部,冬季省外传输到河南省北部城市的 NO_2 和 SO_2 的浓度更大.由于河南省处于中国的中部,是典型的内陆省,周围与之交界的省份较多,它们产生的污染物容易传输到河南省.特别是河南省北部地区的气温较低,大气污染物传输到

河南省后由于冷锋变弱,污染物在河南省的停留时间会更久.同时河南省三面环山,只有东部是平原,其产生的大气污染物也很难快速扩散.因此仅对河南省进行减排控制,能够达到的效果十分有限,只有实现多个区域污染物协同控制,才能更加有效地降低河南省大气污染物的浓度.

2.3 河南省内污染物的传输

为了研究河南省 18 个地市的本地排放以及省内污染物的传输对各市大气环境的影响,本研究建立了河南省省内的传输矩阵模型,该模型在计算时仅考虑河南省内区域排放的贡献(图 6).同时本文也计算了不同季节河南省内的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 -8h、 NO_2 和 SO_2 的传输情况(图 7).

2017 年河南省内各市排放的污染物对本地污染物浓度的年均贡献率分别是: $\text{PM}_{2.5}$ 为 26.46%~74.36%, O_3 -8h 为 24.37%~74.19%, NO_2 为 26.36%~79.13%, SO_2 为 23.13%~80.09%.由此可以看出本地排放对 SO_2 的年均浓度影响最大,对 O_3 -8h 的影响最小. $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 -8h、 NO_2 和 SO_2 的年均浓度受本地排放影响较大的城市多为河南省边界城市.而 2017 年河南省内各市由本地排放引起的污

染物年均浓度值变化范围分别是: $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 4.36~20.52 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 为 2.99~10.17 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{NO}_2)$ 为 2.36~14.72 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{SO}_2)$ 为 1.05~6.54 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.本地排放使河南省 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 和 SO_2 年均浓度值变化较大的城市多分布于豫北区域,使 O_3 -8h 年均浓度值变化较大的城市除郑州外,多分布于豫南.根据本地排放对 4 种污染物浓度的影响比例来看,除 O_3 -8h 中的郑州位于河南省中部,其余受影响较大的城市均为河南省四周与其他省份交界处,这是由于对于边界城市与之相邻的省内城市相对较少,受省内传输的影响相对较小.

根据不同季节的划分比较,本研究发现 2017 年夏季河南省内各市排放的 4 种污染物对本地污染物浓度的贡献率均为最高: $\text{PM}_{2.5}$ 为 28.30%~80.76%, O_3 -8h 为 23.15%~83.65%, NO_2 为 30.51%~88.87%, SO_2 为 29.21%~90.15%.然而 2017 年各季节中,河南省内各市由本地排放引起 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 浓度值变化最大的季节为冬季(7.09~37.91 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 1.66~13.52 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), O_3 -8h 浓度值变化最大的季节为夏季(6.73~18.76 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), NO_2 浓度值变化最大的季节为秋季(3.17~14.72 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

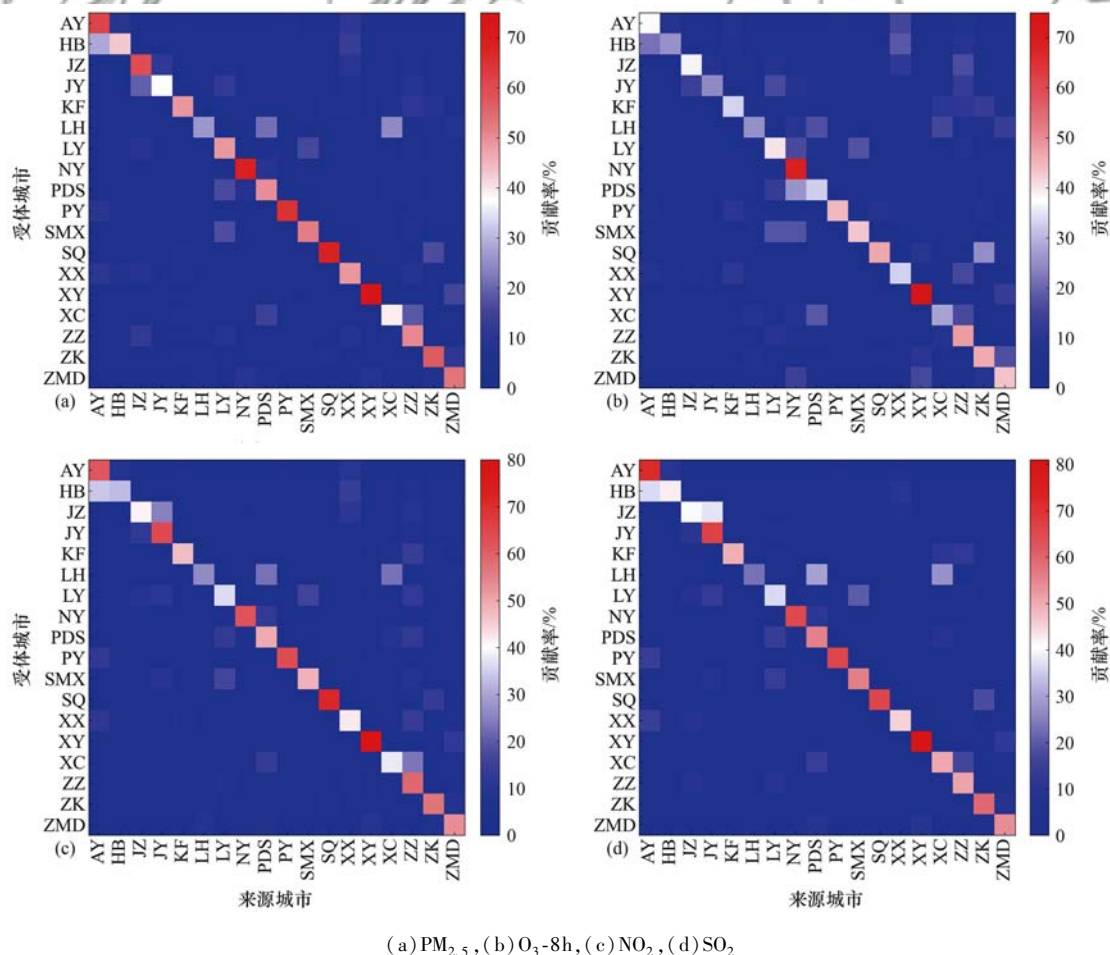


图 6 2017 年河南省内大气污染物的传输情况

Fig. 6 Transmission of air pollutants in Henan province in 2017

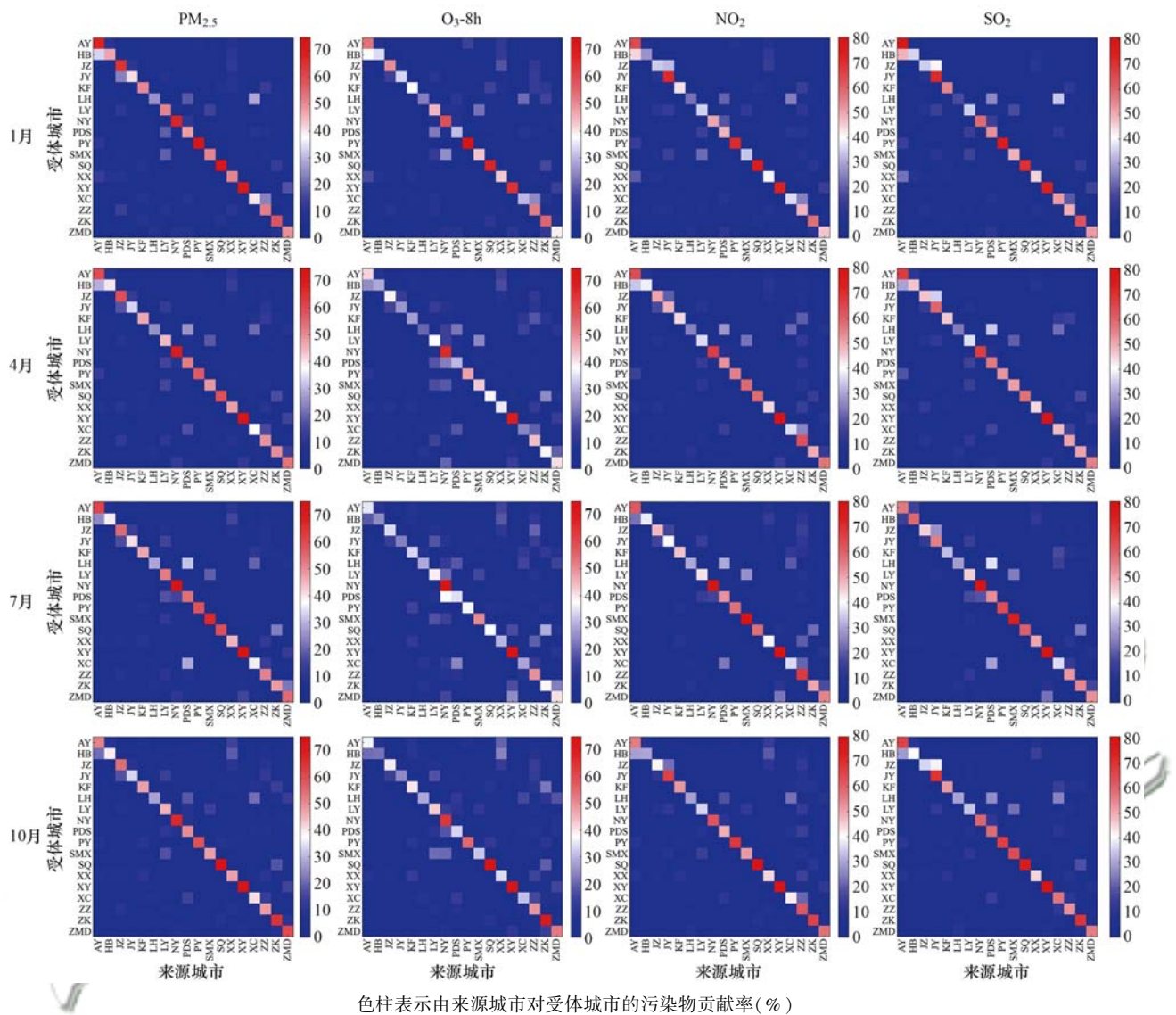


图 7 2017 年不同季节河南省内大气污染物的传输情况

Fig. 7 Transmission of air pollutants in Henan province in different seasons of 2017

~19.20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). $\text{O}_3\text{-8h}$ 受本地排放影响的浓度值变化最小的季节为冬季,其他 3 种污染物均为夏季.

在仅考虑本地排放和省内传输的情况下,本地排放的影响越小则相对的省内传输的影响就会越大. 2017 年省内传输对河南省内各市 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{O}_3\text{-8h}$ 、 NO_2 和 SO_2 浓度贡献率较大的城市多分布于豫北地区. 其中,省内传输对漯河 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 和 SO_2 浓度的贡献率均为 18 个市中最大,分别为 73.54%、73.64% 和 76.87%,对 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度的贡献率为 74.52%,仅次于济源. 平顶山和许昌对漯河 SO_2 浓度的贡献率分别为 30.05% 和 27.55%,均高于漯河市本地排放的贡献率 23.13%. 这可能与漯河市位于河南省地理位置中心,是河南省由北向南的过渡区域,周围临近的城市也较多,本身行政区划面积较小,更容易受到省内传输的影响. 同样情况的还有安阳对鹤壁 NO_2 浓度的贡献率为 34.18%,高于鹤壁

本地排放的贡献率 32.74%. 而 2017 年河南省内各市由省内传输引起的污染物年均浓度值变化范围分别是: $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 4.04 ~ 27.76 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 为 2.72 ~ 13.29 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{NO}_2)$ 为 1.72 ~ 13.44 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{SO}_2)$ 为 0.50 ~ 6.38 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

不同季节,省内传输对河南省 18 个市污染物浓度的贡献率也会有所变化. 春季省内传输对各市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度的贡献率较大,分别为 25.63% ~ 74.69% 和 30.21% ~ 80.01%,冬季省内传输对各市 NO_2 和 SO_2 浓度的贡献率较大,分别为 26.02% ~ 76.96% 和 20.30% ~ 82.34%. 根据 2017 年各季节河南省内各市由省内传输引起的污染物浓度值变化情况,发现受省内传输影响 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 和 SO_2 浓度值变化最大的季节均为冬季(6.83 ~ 51.72、2.88 ~ 19.92 和 1.07 ~ 11.44 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度值变化最大的季节为夏季(1.94 ~ 27.07 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 与本地

排放带来的影响相同,除 O_3-8h 外,其他 3 种污染物受省内传输影响的浓度值变化最小的季节均为夏季, $\rho(PM_{2.5})$ 为 $1.41 \sim 12.51 \mu g \cdot m^{-3}$, $\rho(NO_2)$ 为 $0.26 \sim 7.13 \mu g \cdot m^{-3}$, $\rho(SO_2)$ 为 $0.10 \sim 2.75 \mu g \cdot m^{-3}$,而 O_3-8h 浓度值变化最小的季节为冬季 ($0.58 \sim 5.03 \mu g \cdot m^{-3}$).

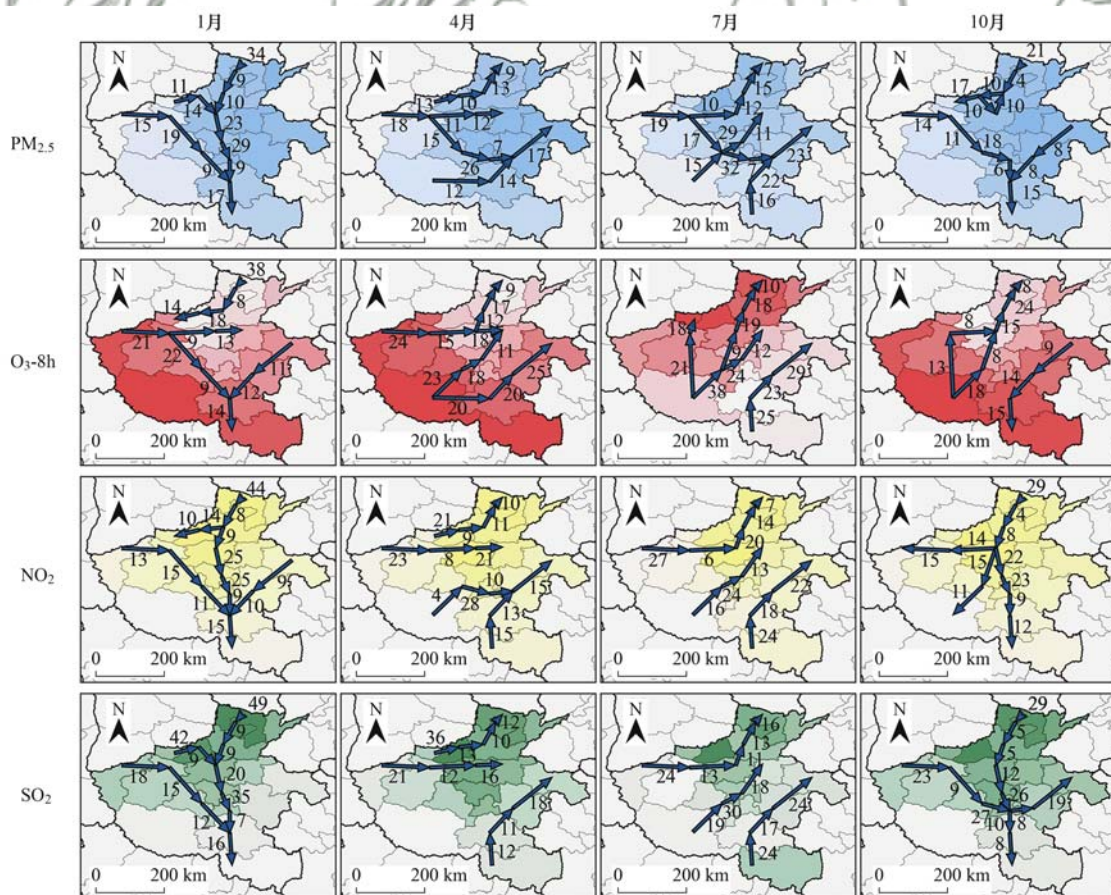
与省外传输影响正相反,本地排放和省内传输对河南省北部 $PM_{2.5}$ 、 O_3-8h 、 NO_2 和 SO_2 影响相对较大.本地排放和省内传输对郑州 $PM_{2.5}$ 、 O_3-8h 和 NO_2 浓度的贡献率是全省 18 个城市中最大的,分别为 65.83%、33.80% 和 65.31%.而郑州受本地排放和省内传输的影响产生的 $\rho(PM_{2.5})$ 年均值为 $39.69 \mu g \cdot m^{-3}$, $\rho(O_3-8h)$ 为 $19.90 \mu g \cdot m^{-3}$, $\rho(NO_2)$ 为 $24.98 \mu g \cdot m^{-3}$,均为全省最高.郑州市的本地排放贡献了当地 $PM_{2.5}$ 的 50.55%、 O_3-8h 的 48.14%、 NO_2 的 58.91% 和 SO_2 的 51.09%.由此可见,郑州市 $PM_{2.5}$ 的浓度与当地的排放情况是密切相关的.对郑州市 $PM_{2.5}$ 浓度影响较大的城市均分布在郑州市的周围.郑州市的 $PM_{2.5}$ 和 NO_2 受西北方向上省内传输的影响更大, O_3-8h 受西南方向上的影响更大.夏

季本地排放和省内传输对郑州 $PM_{2.5}$ 、 O_3-8h 、 NO_2 和 SO_2 浓度的贡献率均是最大,分别为 74.88%、41.49%、79.94% 和 65.73%,其中本地排放贡献率分别为 51.54%、49.61%、67.62% 和 52.22%.对郑州市夏季 $PM_{2.5}$ 、 O_3-8h 、 NO_2 和 SO_2 浓度影响较大的其他城市主要分布在郑州市的西北部、西部、西南部和南部.郑州市受本地排放和省内传输影响产生的 $\rho(PM_{2.5})$ 和 $\rho(SO_2)$ 最大值出现在冬季,分别为 $72.86 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $2.64 \mu g \cdot m^{-3}$, $\rho(O_3-8h)$ 最大值出现在夏季,为 $37.82 \mu g \cdot m^{-3}$, $\rho(NO_2)$ 最大值出现在秋季,为 $31.25 \mu g \cdot m^{-3}$.

2.4 输送通道

以每个城市污染物的最大输入通量为主线,图 8 显示了 2017 年不同季节河南省内大气污染物的传输情况.由于不同季节的气候不同,季风方向也有所不同,加之不同季节每种污染物的分布也各不相同,因此 4 个季节 $PM_{2.5}$ 、 O_3-8h 、 NO_2 和 SO_2 的传输主线不尽相同.而地势的高低也会对气流方向产生改变,进而影响污染物的传输和扩散^[45].

河南省冬季多为偏北风,且河南省北部 $PM_{2.5}$ 、 NO_2 和 SO_2 的浓度高于南部,因此这 3 种污染物主



箭头方向表示污染物的传输方向,颜色由浅至深表示污染物的浓度由低到高,箭头数字表示由来源城市对受体城市的污染物贡献率(%)

图 8 2017 年不同季节河南省省内污染物的传输主线

Fig. 8 Main transmission paths of pollutants in Henan province in different seasons of 2017

要由北向南传输. 冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 和 SO_2 主要传输路径为: 由安阳向南传输到信阳、由三门峡向东南方向传输到信阳. 冬季 O_3 -8h 在西南和东南两个传输方向的基础上, 多了一个由西向东的传输方向. 春季污染物多由西向东, 由西南向东北传输. 春季 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 和 SO_2 的主要传输路径为: 由三门峡向西传输到开封、由济源向东北传输到安阳. O_3 -8h 的传输路径中由西南向东北方向的传输更为明显. 夏季多为偏南风, 与春季相比, 河南省夏季的 4 种污染物由西南向东北方向的传输路径有所增多, 由西向东的传输路径有所减少. 夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 和 SO_2 的主要传输路径为: 由信阳向东南传输到商丘、由三门峡向东北传输到安阳和由南阳向东北传输到开封. 而相较于其他 3 种污染物, O_3 -8h 的主要传输路径由南向北的传输更为显著. 相比于其他季节, 秋季 4 种污染物的主要传输路径区别较大. 秋季河南省 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 和 SO_2 主要是由北向南传输, O_3 -8h 主要由西南向东北方向传输. 这是由于 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 -8h 对前体物排放源的敏感类型不同, 相较于其他季节秋季的排放有较为显著的变化, 进而影响了它们的生成路径和主控因子, 因此结合气象条件形成了不同的传输特征.

可以看出, 有的城市在某个季节会处于两条甚至更多的污染物主要传输路径的交点或端点处. 这种情况出现次数最多的城市是驻马店, 分别在冬季 4 种污染物和秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 的传输中位于两条到 3 条主要传输路径的交界处. 这可能与其地理位置有关, 驻马店处于河南省南部, 当季风为偏北风时, 污染物多由北经驻马店汇集, 向南继续传输. 郑州出现这种情况的次数仅次于驻马店, 分别出现在冬季 SO_2 、春秋两季的 O_3 -8h 和秋季的 NO_2 的主要传输路径中. 这是造成郑州市大气污染严重, 且郑州市对周边区域的大气污染物浓度影响较高的原因之一.

3 结论

(1) 由于排放和气象的共同影响, 河南省 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 和 SO_2 浓度区域分布均为北高南低, 全省四季平均值分别为 40.15、26.30 和 15.02 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. O_3 -8h 浓度区域分布在夏季与其他 3 种污染物浓度区域分布相一致, 而气象条件的抑制和 NO_x 的消耗, 使其在冬春秋季分布为西南高东北低. 2017 年河南省 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_2 的浓度大小为: 冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季; SO_2 的浓度大小为: 冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季; O_3 -8h 的浓度大小为: 夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季. 冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 和 SO_2 的浓度平均值分别是夏季的 4.17、4.12 和 6.24 倍, 夏季 O_3 -

8h 的浓度平均值是冬季的 2.24 倍.

(2) 从城市尺度来看, 冬季省外传输和天然源对河南省内城市 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 -8h、 NO_2 和 SO_2 的贡献率分别为: 36.20% ~ 72.32%、77.96% ~ 96.08%、49.45% ~ 78.80% 和 59.05% ~ 88.85%; 浓度变化分别为: 29.69 ~ 90.47、21.83 ~ 54.62、14.93 ~ 40.66 和 14.76 ~ 36.26 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. O_3 -8h 在夏季受省外传输和天然源的影响浓度变化较大 (49.40 ~ 83.41 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 和 SO_2 在冬季受省外传输和天然源的影响浓度变化较大. 总体趋势为省外传输的污染物由四周向河南省中部蔓延, 同时影响程度也逐渐减弱.

(3) 仅考虑河南省区域内排放的贡献时, 2017 年河南省内各市排放的污染物对本地污染物浓度的年均贡献率分别是: $\text{PM}_{2.5}$ 为 26.46% ~ 74.36%, O_3 -8h 为 24.37% ~ 74.19%, NO_2 为 26.36% ~ 79.13%, SO_2 为 23.13% ~ 80.09%. 夏季河南省内各市排放的 4 种污染物对本地污染物浓度的贡献率均为最高. 各市由本地排放引起的污染物年均浓度值变化范围分别是: $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 4.36 ~ 20.52 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 为 2.99 ~ 10.17 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{NO}_2)$ 为 2.36 ~ 14.72 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{SO}_2)$ 为 1.05 ~ 6.54 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. O_3 -8h 受本地排放影响的浓度值变化最小的季节为冬季, 其他 3 种污染物均为夏季浓度值变化最小.

(4) 季节的改变会造成河南省省内、省外污染物传输影响和路径的改变. 冬季污染物多由北向南传输, 春季污染物多由西向东、西南向东北传输, 夏季污染物多由西南向东北传输, 秋季污染物多由北向南传输, 但由于西南区域 O_3 -8h 浓度较高, 其由西南向东北的传输路径更为明显.

参考文献:

- [1] Mou Y C, Song Y, Xu Q, *et al.* Influence of urban-growth pattern on air quality in China: a study of 338 cities [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(9), doi: 10.3390/ijerph15091805.
- [2] Zhan D S, Kwan M P, Zhang W Z, *et al.* The driving factors of air quality index in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **197**: 1342-1351.
- [3] Zheng B, Tong D, Li M, *et al.* Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of Clean Air Actions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18** (19): 14095-14111.
- [4] 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 等. 《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(7): 2961-2966.
- [5] Wu W L, Xue W B, Wang Y L, *et al.* Health benefit evaluation for air pollution prevention and control action plan in China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 2961-2966.
- [6] Li K, Jacob D J, Liao H, *et al.* Anthropogenic drivers of 2013-2017 trends in summer surface ozone in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of*

- America, 2019, **116**(2): 422-427.
- [6] Chen L, Zhu J, Liao H, *et al.* Meteorological influences on PM_{2.5} and O₃ trends and associated health burden since China's Clean Air Actions[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **744**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140837.
- [7] Li T W, Shen H F, Yuan Q Q, *et al.* Estimating ground-level PM_{2.5} by fusing satellite and station observations: a geointelligent deep learning approach [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(23): 11985-11993.
- [8] 中华人民共和国生态环境部. 2017 中国生态环境状况公报[J]. *环境经济*, 2018, (11): 10-11.
- [9] Chuai X M, Fan C, Wang M S, *et al.* A study of the socioeconomic forces driving air pollution based on a DPSIR model in Henan province, China[J]. *Sustainability*, 2020, **12**(1), doi: 10.3390/su12010252.
- [10] Zhang X X, Gu X C, Cheng C X, *et al.* Spatiotemporal heterogeneity of PM_{2.5} and its relationship with urbanization in North China from 2000 to 2017 [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **744**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140925.
- [11] Gong C, Liao H, Zhang L, *et al.* Persistent ozone pollution episodes in North China exacerbated by regional transport [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **265**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115056.
- [12] Wang J J, Zhang M G, Bai X L, *et al.* Large-scale transport of PM_{2.5} in the lower troposphere during winter cold surges in China [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**, doi: 10.1038/s41598-017-13217-2.
- [13] Xing J, Wang S X, Zhao B, *et al.* Quantifying nonlinear multiregional contributions to ozone and fine particles using an updated response surface modeling technique[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(20): 11788-11798.
- [14] Wang Y, Li Y, Qiao Z, *et al.* Inter-city air pollutant transport in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration: comparison between the winters of 2012 and 2016 [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **250**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109520.
- [15] Liu S H, Hua S B, Wang K, *et al.* Spatial-temporal variation characteristics of air pollution in Henan of China: Localized emission inventory, WRF/Chem simulations and potential source contribution analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **624**: 396-406.
- [16] 刘晓咏, 王自发, 王大玮, 等. 京津冀典型工业城市沙河市大气污染特征及来源分析[J]. *大气科学*, 2019, **43**(4): 861-874.
- Liu X Y, Wang Z F, Wang D W, *et al.* Characteristics and source identification of air pollution in Shahe, a typical industrial city in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2019, **43**(4): 861-874.
- [17] 魏卢泰, 潘小乐, 张小玲, 等. 东亚城市地区春季气溶胶污染特征及退偏比特征变化分析[J]. *环境化学*, 2021, **40**(7): 2016-2027.
- Wei L T, Pan X L, Zhang X L, *et al.* Characteristics of aerosol pollution and analysis of depolarization ratio characteristics at an urban site in East Asia in spring[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(7): 2016-2027.
- [18] 郑海涛, 刘建国, 李杰, 等. 河南省一次 PM_{2.5} 污染过程区域性影响数值模拟[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(5): 617-626.
- Zheng H T, Liu J G, Li J, *et al.* Modeling impacts of regional transport on PM_{2.5} air pollution: case study in Henan Province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(5): 617-626.
- [19] 董贞花, 孔海江, 栗晗. 河南省冬季 3 次重污染过程的数值模拟及输送特征分析[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(3): 1071-1079.
- Dong Z H, Kong H J, Li H. Numerical simulation and transport analysis of three heavy air pollution processes in Henan province in winter [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(3): 1071-1079.
- [20] 李锋, 朱彬, 安俊岭, 等. 2013 年 12 月初长江三角洲及周边地区重霾污染的数值模拟[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(7): 1965-1974.
- Li F, Zhu B, An J L, *et al.* Modeling study of a severe haze episode occurred over the Yangtze River Delta and its surrounding regions during early December, 2013 [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(7): 1965-1974.
- [21] Dong Z X, Wang S X, Xing J, *et al.* Regional transport in Beijing-Tianjin-Hebei region and its changes during 2014-2017: the impacts of meteorology and emission reduction [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **737**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139792.
- [22] 许艳玲, 易爱华, 薛文博. 基于模型模拟的成都市 PM_{2.5} 污染来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 50-56.
- Xu Y L, Yi A H, Xue W B. Modeling studies of source contributions to PM_{2.5} in Chengdu, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 50-56.
- [23] Bai L, Lu X, Yin S S, *et al.* A recent emission inventory of multiple air pollutant, PM_{2.5} chemical species and its spatial-temporal characteristics in central China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **269**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122114.
- [24] Guenther A B, Jiang X, Heald C L, *et al.* The model of emissions of gases and aerosols from nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions [J]. *Geoscientific Model Development*, 2012, **5**(6): 1471-1492.
- [25] Su F C, Xu Q X, Wang K, *et al.* On the effectiveness of short-term intensive emission controls on ozone and particulate matter in a heavily polluted megacity in central China [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **246**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.118111.
- [26] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, *et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, **77**(3): 437-472.
- [27] Appel K W, Bash J O, Fahey K M, *et al.* The community multiscale air quality (CMAQ) model versions 5.3 and 5.3.1: system updates and evaluation [J]. *Geoscientific Model Development*, 2021, **14**(5): 2867-2897.
- [28] Hu J, Zhang H, Ying Q, *et al.* Long-term particulate matter modeling for health effect studies in California-Part 1: model performance on temporal and spatial variations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(6): 3445-3461.
- [29] Boylan J W, Russell A G. PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three-dimensional air quality models [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(26): 4946-4959.
- [30] Zhang L S, Lee C S, Zhang R Q, *et al.* Spatial and temporal evaluation of long term trend (2005-2014) of OMI retrieved NO₂ and SO₂ concentrations in Henan province, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **154**: 151-166.
- [31] Zhang P Y, Zhang Y, Lee J, *et al.* Characteristics of the spatiotemporal trends and driving factors of industrial development and

- industrial SO₂ emissions based on niche theory: taking Henan province as an example[J]. Sustainability, 2020, **12**(4), doi: 10.3390/su12041389.
- [32] Ding A J, Fu C B, Yang X Q, *et al.* Ozone and fine particle in the western Yangtze River Delta: an overview of 1 yr data at the SORPES station[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(11): 5813-5830.
- [33] 杨文夷, 李杰, 陈焕盛, 等. 东亚边界层臭氧时空分布的数值模拟研究[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(7): 1633-1641.
Yang W Y, Li J, Chen H S, *et al.* Modeling analysis of boundary layer ozone distributions over East Asia[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(7): 1633-1641.
- [34] Chen J J, Shen H F, Li T W, *et al.* Temporal and spatial features of the correlation between PM_{2.5} and O₃ concentrations in China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(23), doi: 10.3390/ijerph16234824.
- [35] 逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 等. 新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM_{2.5} 的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(7): 3099-3106.
Lu S Z, Shi X R, Xue W B, *et al.* Impacts of meteorology and emission variations on PM_{2.5} concentration throughout the country during the 2020 epidemic period[J]. Environmental Science, 2021, **42**(7): 3099-3106.
- [36] 史聆聆, 李小敏, 刘静, 等. 河南省大气污染现状及其控制对策分析[J]. 环境工程, 2015, **33**(5): 104-108.
Shi L L, Li X M, Liu J, *et al.* Air pollution situation of Henan province and its controlling measures [J]. Environmental Engineering, 2015, **33**(5): 104-108.
- [37] Xu L J, Zhou J X, Guo Y, *et al.* Spatiotemporal pattern of air quality index and its associated factors in 31 Chinese provincial capital cities[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2017, **10**(5): 601-609.
- [38] Krotkov N, McLinden C A, Li C, *et al.* Aura OMI observations of regional SO₂ and NO₂ pollution changes from 2005 to 2015 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(7): 4605-4629.
- [39] Wang B, Qiu T, Chen B Z. Photochemical process modeling and analysis of ozone generation [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2014, **22**(6): 721-729.
- [40] Ying Q, Kleeman M J. Source contributions to the regional distribution of secondary particulate matter in California [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(4): 736-752.
- [41] 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 等. 京津冀区域 PM_{2.5} 污染相互输送特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 4897-4904.
Wang Y L, Xue W B, Lei Y, *et al.* Regional transport matrix study of PM_{2.5} in Jingjinji region, 2015 [J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 4897-4904.
- [42] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, *et al.* Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects [J]. Science of the Total Environment, 2017, **575**: 1582-1596.
- [43] Wang Y Y, Duan J Y, Xie X, *et al.* Climatic factors and their availability in estimating long-term variations of fine particle distributions over east China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, **124**(6): 3319-3334.
- [44] Zhai S X, Jacob D J, Wang X, *et al.* Fine particulate matter (PM_{2.5}) trends in China, 2013-2018: separating contributions from anthropogenic emissions and meteorology [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, **19**(16): 11031-11041.
- [45] 栗涵舸, 蔡旭晖, 康凌, 等. 保定-雄安新区近地面大气流动与轨迹输送特征[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, **57**(2): 215-224.
Li H K, Cai X H, Kang L, *et al.* Air flow and transport patterns over Baoding-Xiong'an area [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021, **57**(2): 215-224.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i> (3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i> (3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i> (3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i> (3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i> (3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i> (4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i> (4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i> (4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i> (4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i> (4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i> (4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i> (4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i> (4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i> (4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i> (4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i> (4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i> (4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i> (4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i> (4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i> (4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i> (4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i> (4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i> (4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i> (4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i> (4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i> (4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i> (4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i> (4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i> (4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i> (4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i> (4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qi, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i> (4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i> (4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i> (4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i> (4402)