

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

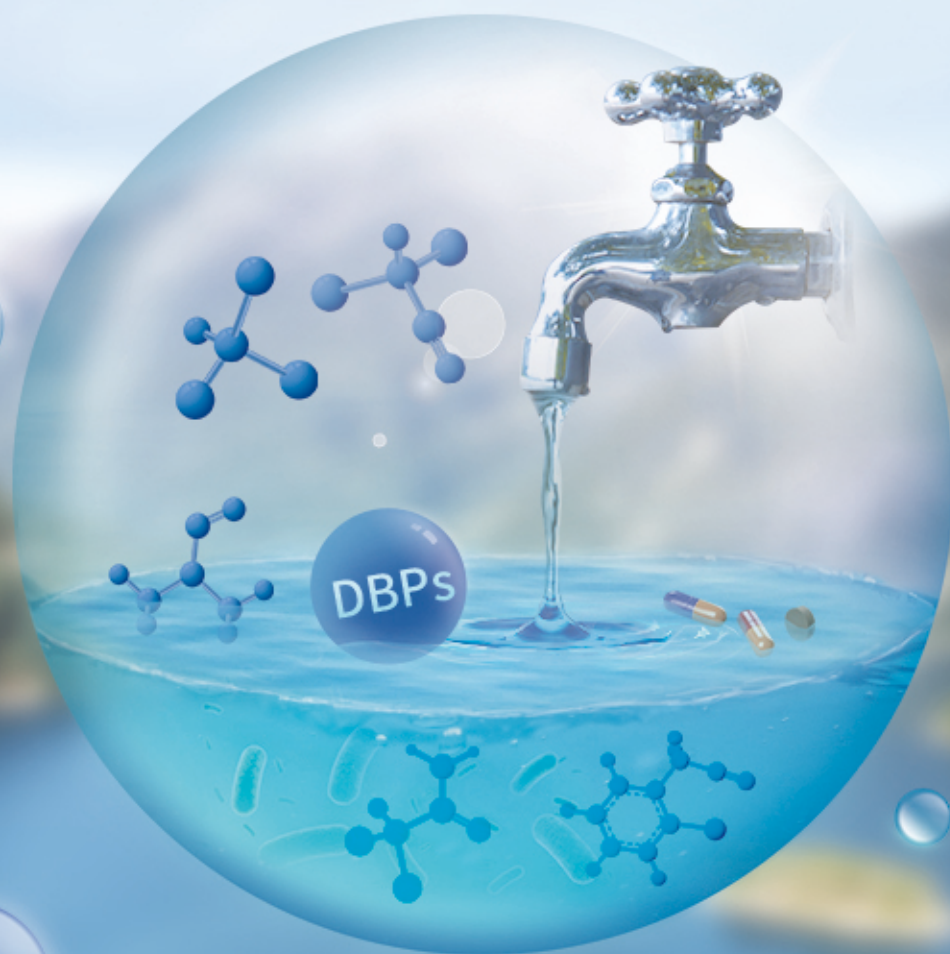
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期
Vol.42 No.11

目次

综述与专论

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

研究报告

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

石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区

聂赛赛¹, 王帅¹, 崔建升^{1*}, 刘大喜¹, 陈静², 田亮¹, 贺博文¹, 沈梦宇²

(1. 河北科技大学环境科学与工程学院, 石家庄 050018; 2. 石家庄市气象局, 石家庄 050081)

摘要: 为系统研究石家庄市季节性典型污染物的重污染传输特征, 基于 2018 年 12 月 ~ 2019 年 11 月 46 个环境监测站 ($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 、 NO_2 、 SO_2 和 CO) 及 17 个气象站 (温度、湿度和风速) 的小时监测数据, 利用插值 (IDW) 和相关方法, 分析污染物的季节性时空特征; 并结合 GDAS 数据, 采用后向轨迹方法, 研究污染物的季度传输格局和潜在源区。结果表明: ①不同季节具有典型的污染物, 季节性典型污染物和污染率依次为: 春季 (PM_{10} , 48.91%)、夏季 (O_3 , 81.97%)、秋季 (PM_{10} 和 $PM_{2.5}$, 47.54% 和 32.79%) 和冬季 ($PM_{2.5}$, 74.44%), 其与气象条件变化有显著联系; ②春季 PM_{10} 与风速呈负相关, 呈西北高、东南低的空间格局, 主要传输方向为南向 (53.32%), 潜在源区 ($WPCWT_{ij} \geq 160 \mu g \cdot m^{-3}$) 为河北 (冀) 中南、河南 (豫) 中北及山西 (晋) 中部, 且山东 (鲁) 西和陕西 (陕) 西北部的传输也会贡献 ($WPSCF_{ij} \geq 0.3$) 市域的 PM_{10} 浓度; ③夏季 O_3 与温度呈正相关, 与湿度呈负相关, 传输通道方向为东南-南向 (54.24%), 其潜在源区呈以石家庄市为中心, 沧州和菏泽为两翼的新月形区域; ④秋季和冬季 $PM_{2.5}$ 与湿度呈正相关, 冬季呈西低、东高态势分布, 输送方向为: 秋季 (东北-东南, 74.75%), 冬季 (西北, 55.47%), 主要污染源区 ($WPCWT_{ij} \geq 180 \mu g \cdot m^{-3}$) 集中在冀中南、豫北和晋中西部。

关键词: 大气污染物; 季度变化; 时空演变; 拉格朗日混合单粒子轨道模型 (HYSPLIT); 潜在源区; 石家庄

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2021) 11-5131-12 DOI: 10.13227/j.hjkk.202102120

Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang

NIE Sai-sai¹, WANG Shuai¹, CUI Jian-sheng^{1*}, LIU Da-xi¹, CHEN Jing², TIAN Liang¹, HE Bo-wen¹, SHEN Meng-yu²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. Shijiazhuang Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: In order to systematically study the transmission characteristics of seasonal and typical pollutants in Shijiazhuang, hourly data of ground-level pollutants ($PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , NO_2 , SO_2 , and CO) from 46 state-and provincial-controlled stations, and meteorological (temperature, humidity, and wind speed) data from 17 counties in Shijiazhuang City from December 2018 to November 2019 was analyzed. The interpolation (IDW) and correlation analysis were applied to seasonal and temporal spatial patterns of pollutant concentration. The backward trajectories analysis was performed to explore the seasonal transmission pattern and potential source areas of pollution in Shijiazhuang by combining with the global data assimilation system (GDAS). The results indicate that the different seasons have characteristic pollutants, as follows: spring (PM_{10} , 48.91%), summer (O_3 , 81.97%), autumn (PM_{10} and $PM_{2.5}$, 47.54% and 32.79%), and winter ($PM_{2.5}$, 74.44%), which are related to the variation of meteorological conditions. Furthermore, the PM_{10} (spring) concentration correlated negatively with the wind speed, presenting a high distribution in the northwest and low in the southeast, with a southerly transmission direction (53.32%). Central and southern Hebei, central and northern Henan, and central Shanxi are the potential sources of pollution ($WPCWT_{ij} \geq 160 \mu g \cdot m^{-3}$), impacting western Shandong and northwest Shanxi ($WPSCF_{ij} \geq 0.3$) with PM_{10} . Moreover, the O_3 (summer) concentration correlated positively with temperature, and negatively with humidity. The southeast-south (54.24%) is the source direction of the transmission, and the potential source of O_3 pollution is an arc area with Shijiazhuang in the center and Cangzhou and Heze as the double wings. Lastly, the $PM_{2.5}$ (autumn and winter) concentration correlated positively with humidity, and the winter concentration shows an increasing gradient from west to east. The trajectories of $PM_{2.5}$ clustered the source directions: autumn (northeast-southeast, 74.75%), winter (northwest, 55.47%); central and southern Hebei, central and western Shanxi and northern Henan are the concentrated sources of potential pollution ($WPCWT_{ij} \geq 180 \mu g \cdot m^{-3}$).

Key words: atmospheric pollutant; seasonal variation; spatio-temporal evolution; hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory (HYSPLIT); potential source areas; Shijiazhuang

大气污染物 ($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 、 NO_2 、 SO_2 和 CO) 是环境空气质量标准 (GB 3095-2012) 中规定用于城市空气质量评价的 6 项污染物^[1]。据统计, 石家庄市 2019 年度除 SO_2 和 CO 的年均浓度达标外, 其他大气污染物的年均值均未达标, O_3 呈不降反升的态势 (<https://sthjj.sjz.gov.cn>), 且高浓度的 O_3 和 $PM_{2.5}$ 均会影响到植物生长^[2]、人体健康^[3]、生态环境^[4,5] 及气候变化^[6]。有研究表明, 石家庄市颗粒物 (PM_{10} 和 $PM_{2.5}$) 的空间分布呈西部优于东南部^[7],

而 O_3 则呈中西高、外围区域低的空间格局^[8,9]。气象因素上, 石家庄市 $PM_{2.5}$ 主要与湿度呈正相关^[10], O_3 与温度呈显著正相关^[11], 此外 NO_x 与温度和湿度也有一定的联系^[12]。颗粒物^[13] (PM_{10} 和 $PM_{2.5}$) 和 O_3 ^[8] 的潜在源区的研究表明, 冀中南、豫北、鲁西

收稿日期: 2021-02-19; 修订日期: 2021-04-21

基金项目: 河北省重点研发计划项目 (18273705D)

作者简介: 聂赛赛 (1996 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境监测与评价, E-mail: Saisai10282020@163.com

* 通信作者, E-mail: cui1603@163.com

和晋中北部地区是石家庄市主要的污染源区。综上,现有研究多基于单一类别污染物^[14]或多物种^[15]的时空变化、气象因素及潜在源区分析,而通过对各季节大气污染物的综合分析,识别不同季节的特征污染物,分析传输通道和潜在源区,精细化联防联控各季节的大气污染物成为迫切解决的问题。

大气污染物空间传输特征研究的工具主要是空间插值方法和后向轨迹模式,以其数据获取方便及容易掌握等特点,被国内外广泛应用。空间插值方法常用于解析多空间尺度的环境、气象因子分布特征,如中国^[16]、京津冀^[17]、长三角^[18]、珠三角^[19]、山东^[20]和河南^[21]等时空研究均表明,污染物的空间演替具有显著差异。拉格朗日混合单粒子轨道模型(hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory, HYSPLIT)主要用于城市(单点位)污染物的空间溯源^[22~24],主要方法体系^[25]包括后向轨迹模拟、轨迹聚类^[26]、潜在源贡献因子分析^[27~29](potential source contribution function, PSCF)及浓度权重轨迹分析^[30,31](concentration weighted trajectory, CWT)。温哥华^[22]、北京^[28]和南京^[29]等地的研究表明,不同季节具有不同的污染物传输路径和潜在污染源区。

石家庄市系统分析不同季节大气污染物的污染时段传输研究较少。因此,本研究基于2018年12月~2019年11月石家庄市时空环境和气象数据,利用相关性分析、空间插值和HYSPLIT模式,细致地分析了石家庄市不同季度大气污染物的时空格局、潜在源区及其与气象要素的关系等内容,以期为市域内不同季度典型污染物的联防联控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与环境空气质量监测站点

石家庄市域(37°30'~38°50'N, 113°30'~115°30'E)位于河北省中南部^[15],西临山西省阳泉市,东、南、北分别与衡水、邢台和保定市相接,邻接城市均为京津冀大气污染传输通道“2+26”城市^[1]。西部地貌多为森林,地势较高(1 000 m),市区及中东部各区域均为平原,地势低平(30~100 m)。取市域国控(7个)和省控(39个)共46个环境监测站进行研究(图1);为与其他城市进行比较,按照考核要求,市区环境质量评价仅取国控点数据进行统计。研究中环境数据插值点为46个,气象插值点在环境监测点中选取,即与环境监测点位置一致,为17个(图1)。

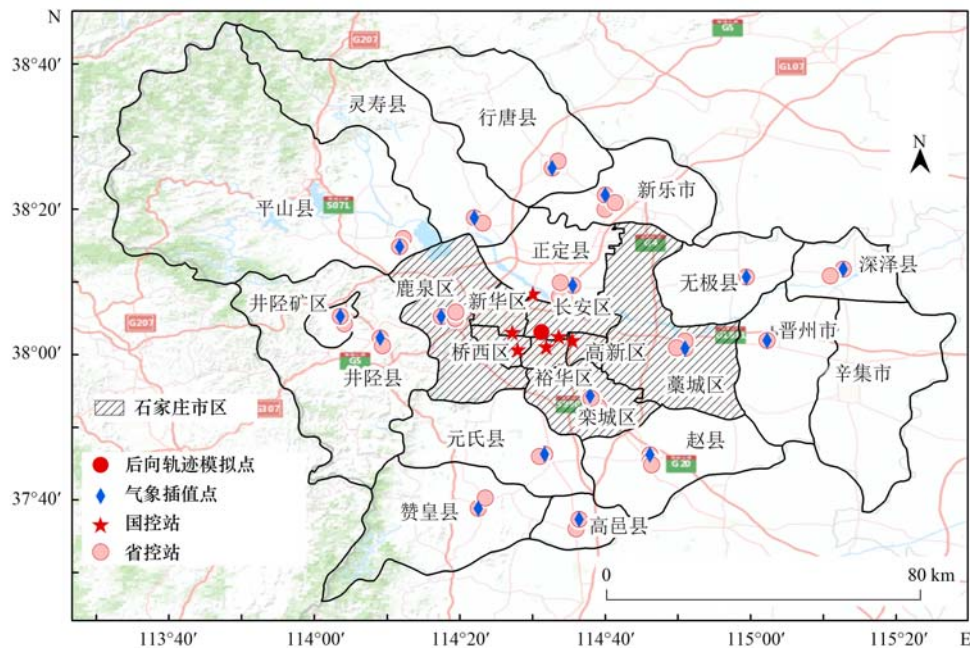


图1 石家庄市域监测点位分布示意

Fig. 1 Distribution of monitoring points in Shijiazhuang City

1.2 数据来源及处理

数据主要是研究期(2018年12月~2019年11月)内的大气污染物($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 、 NO_2 、 SO_2 和CO)数据和气象要素(温度、压强、湿度、风速、风向、降水、日照时数和能见度)资料。大气污染物数据是研究期内市域46个环境监测站的逐小时质

量浓度数据,其中 O_3 包含1 h平均($O_3-1 h$)和8 h滑动平均($O_3-8 h$)数据,总有效数据量为2 804 452 h,源自中国环境监测总站(<http://www.cnemc.cn/>);气象要素资料为市域17个气象站点的逐日数据,及石家庄市的逐小时气象数据,总有效数据量分别为30 998 d(17个站点)和43 051 h(仅

石家庄市),为石家庄市气象局提供.辛集市的环境及气象监测数据缺失,故市域统计范围均不含辛集市.此外,拉格朗日多粒子模式数据采用美国国家环境预报中心(NCEP)提供的同期全球资料同化系统(GDAS)气象数据(<ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1/>),时间范围为2018年11月~2019年12月.

数据处理过程首先删除由于仪器故障产生的负值、零值等异常数据.Excel VBA用于统计环境和气象数据的分季节逐时、逐日和逐月变化;SPSS 24和R-GUI联合用于不同季节环境和气象要素相关性的计算.ArcGIS 10.3主要用于各季节环境和气象要素的空间插值及地图可视化;结合GDAS数据,并综合采用MetaInfo Map^[25]和Origin 2018 pro等软件实现后向轨迹的计算.数据处理符合环境空气质量指数技术规定(试行)(HJ 633-2012)、环境空气质量标准(GB 3095-2012)及其修改单.

1.3 空间插值方法

利用空间插值方法选择符合污染物分布的反距离加权(inverse distance weighted, IDW)插值,其是基于大气污染物和气象要素的位置和浓度进行的一种插值运算.一般公式如下^[32]:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (1)$$

$$\lambda_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}}, \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (2)$$

式中, $\hat{Z}(s_0)$ 为污染物(气象)插值点 s_0 处的预测值; N 为 s_0 周围污染物监测点(气象插值点) s_i 的数量; λ_i 为空间距离权重; $Z(s_i)$ 为 s_i 处的污染物(气象)的数据值; p 为 IDW 值,取 2; d_{i0} 为 s_0 与 s_i 间的欧氏距离.

1.4 HYSPLIT 模式

HYSPLIT 模式是由美国海洋与大气研究中心(NOAA)和澳大利亚气象局(BOM)共同研发的大气微气团轨迹模拟(后向或前向)及聚类的工具.在 HYSPLIT 模拟出的后向轨迹基础上,经过聚类运算(Angle 和 Euler 等),可将多条来源类似的后向轨迹聚成主要的传输通道;结合污染物数据,经过数学运算(WPSCF 和 WCWT)^[29,30],可设置浓度限值定性得到潜在区域对目标点的污染贡献(PSCF),不设限值可定量得到潜在区域对目标点的相对权重浓度贡献值(CWT).以上过程通过 TrajStat 模块^[25]实现.

1.4.1 PSCF

石家庄市 PSCF 的模拟过程中,后向轨迹选择

的目标点为石家庄市人民会堂(38°03' N, 114°31' E)站点^[8],其位于石家庄的中心位置,能反映周围区域受后向轨迹的影响.不同季度典型污染物的起始均为高度 100 m,模拟轨迹时长根据污染物进行调整(表 1),一般而言,PM_{2.5}和 PM₁₀多采用 48 h^[30]和 72 h^[31],O₃以近距离传输为主,多采用 36 h^[22],时间分辨率均为 1 h,聚类类型均为 Angle Distance 算法.其中污染轨迹是在 TrajStat 运行后向轨迹后,结合(GB 3095-2012)中大气污染物的二级限值(PSCF 限值),大于二级限值浓度的轨迹,并利用 ArcGIS 进行污染轨迹处理,处理基础为 TrajStat 与 ArcGIS 均可以对 shp 格式进行编辑.

表 1 石家庄市不同季度特征污染物的 HYSPLIT 参数表

Table 1 Seasonal HYSPLIT parameter table of characteristic

pollutants in Shijiazhuang City				
季节 ¹⁾	污染物	PSCF 限值 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	后推时间 /h	高度 /m
春(3~5月)	PM ₁₀	150	48	100 ^[8]
			72	
夏(6~9月)	O ₃	160	36	
	NO ₂	40	36	
秋(10~11月)	PM _{2.5}	75	48	
	PM ₁₀	150	48	
冬(2018年12月~ 2019年2月)	PM _{2.5}	75	48	

1) 春季和冬季是依据气象学划分;夏季主要研究 O₃ 污染特征,9月 O₃ 为首要污染物的天数为 21 d, PM₁₀ 和 PM_{2.5} 污染天数分别为 2 d 和 1 d, O₃ 在 9 月污染严重,而 PM_{2.5} 污染不明显,因此把 9 月归为夏季

PSCF 的限值根据(GB 3095-2012)确定(表 1),其分析范围与各季节后向轨迹的矢量范围一致,空间分辨率为 0.25°.为减少 PSCF 条件概率分析的不确定性,将 PSCF 结果乘以权重因子(w_{ij}),计算公式如下所示.

$$\text{PSCF}_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \quad (3)$$

$$w_{ij} = \begin{cases} 1.00, & 80 < n_{ij} \\ 0.72, & 20 < n_{ij} \leq 80 \\ 0.42, & 10 < n_{ij} \leq 20 \\ 0.05, & n_{ij} \leq 10 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{WPSCF}_{ij} = w_{ij} \times \text{PSCF}_{ij} \quad (5)$$

式中, PSCF_{ij} 是栅格 ij 的污染源潜在贡献值; m_{ij} 为经过栅格 ij 的污染轨迹数; n_{ij} 为经过栅格 ij 的总轨迹数; w_{ij} 为按 n_{ij} 分级的权重因子; WPSCF_{ij} 是减少不确定性后的 PSCF 值(无量纲),即最终结果.

1.4.2 PCWT

石家庄市污染轨迹^[8] CWT (polluted trajectory CWT, PCWT) 分析是在不同季度典型污染物的污染

轨迹的处理基础上,进行的 CWT 分析,即设置限值的 CWT 分析. PCWT 分析范围也与后向轨迹范围一致,空间分辨率为 0.25° . 此外,为减少不确定性,PCWT 计算后的结果也乘以权重因子(w_{ij}),计算公式如下:

$$PCWT_{ij} = \frac{1}{\sum_{i=1}^M \tau_{ijl}} \sum_{l=1}^M c_l \tau_{ijl} \quad (6)$$

$$WPCWT_{ij} = w_{ij} \times PCWT_{ij} \quad (7)$$

式中,PCWT_{ij}是栅格 ij 上的污染轨迹的平均权重浓度; M 是污染轨迹总数; l 是某一污染轨迹; τ_{ijl}是 l 在栅格 ij 上停留的时间; c_l是 l 经过某一栅格 ij 所对应的季节性典型污染的浓度; w_{ij}为按 n_{ij}分级的权重因子; WPCWT_{ij}是减少不确定性后的 PCWT 值 (μg·m⁻³),即最终结果.

2 结果与讨论

2.1 石家庄市不同季节的特征污染物分析

石家庄市冬季(2018 年 12 月~2019 年 2 月)大气污染物 PM₁₀、PM_{2.5}、NO₂、O₃、SO₂ 和 CO 的浓

度均值为(201 ± 101) μg·m⁻³、(122 ± 74) μg·m⁻³、(67 ± 27) μg·m⁻³、(42 ± 24) μg·m⁻³、(30 ± 13) μg·m⁻³和(1.9 ± 0.9) mg·m⁻³,其中 PM_{2.5}在冬季污染尤为严重,作为首要污染物的天数(67 d)最多,说明冬季采暖期对 PM_{2.5}的浓度影响较大^[33],即采暖锅炉(17%)和居民取暖(6.7%)占比较大^[15](表 2). 市区春季(2019 年 3~5 月)PM₁₀作为首要污染物的天数(45 d)最多,其次为 O₃(28 d)和 PM_{2.5}(16 d); 因此,制约春季的主要污染物是 PM₁₀,与春季多风易造成沙尘污染有关^[34]. 市区夏季(2019 年 6~9 月)的 O₃[(169 ± 56) μg·m⁻³]质量浓度和首要污染物频数(100 d)最高,O₃污染天数占夏季总天数(污染率)的 81.97%,其余污染物浓度和作为首要污染的天数较少,这与夏季的高温低湿强辐射利于高浓度 O₃的生成有关^[8,11]. 市区秋季(2019 年 10~11 月)PM₁₀[(119 ± 57) μg·m⁻³]和 PM_{2.5}[(61 ± 37) μg·m⁻³]质量浓度最高,其中 PM₁₀作为首要污染物的天数(29 d)最多,其次是 PM_{2.5}(20 d)为首要污染物的天数,由于秋季大气层结高度不稳定,易造成颗粒物(PM₁₀和 PM_{2.5})污染.

表 2 石家庄市 2018 年 12 月~2019 年 11 月大气污染物不同季节统计

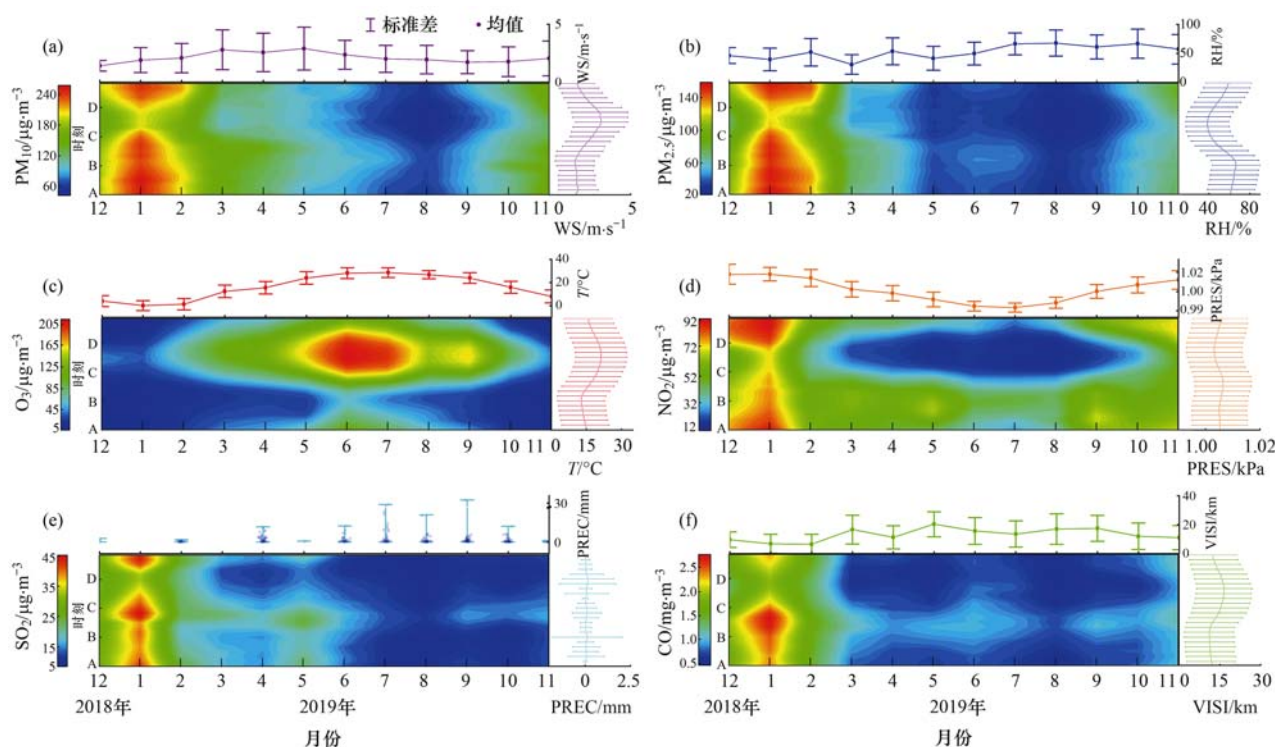
Table 2 Seasonal statistics of atmospheric pollutant in Shijiazhuang urban areas from December 2018 to November 2019

污染物	统计值	冬季	春季	夏季	秋季
	季节总天数/d	90	92	122	61
PM _{2.5}	均值 ± 标准差/μg·m ⁻³	122 ± 74	50 ± 37	34 ± 14	61 ± 37
	变化幅度/μg·m ⁻³	27~354	12~225	9~77	13~186
	首要污染物频数/d	67	16	5	20
	污染率/%	74.44	17.39	4.10	32.79
PM ₁₀	均值 ± 标准差/μg·m ⁻³	201 ± 101	111 ± 53	73 ± 25	119 ± 57
	变化幅度/μg·m ⁻³	64~486	35~328	25~128	21~294
	首要污染物频数/d	21	45	4	29
	污染率/%	23.33	48.91	3.28	47.54
O ₃	均值 ± 标准差/μg·m ⁻³	42 ± 24	123 ± 38	169 ± 56	57 ± 41
	变化幅度/μg·m ⁻³	5~117	39~254	34~310	9~214
	首要污染物频数/d	—	28	100	3
	污染率/%	—	30.43	81.97	4.92
NO ₂	均值 ± 标准差/μg·m ⁻³	67 ± 27	40 ± 15	33 ± 12	54 ± 17
	变化幅度/μg·m ⁻³	15~122	11~82	12~62	17~97
	首要污染物频数/d	2	—	3	7
SO ₂	均值 ± 标准差/μg·m ⁻³	30 ± 13	17 ± 7	12 ± 4	12 ± 5
	变化幅度/μg·m ⁻³	9~58	4~35	5~25	5~25
CO	均值 ± 标准差/mg·m ⁻³	1.9 ± 0.9	0.8 ± 0.3	0.7 ± 0.2	0.9 ± 0.4
	变化幅度/mg·m ⁻³	0.5~4.9	0.3~2.2	0.3~1.2	0.2~2.0

2.2 大气污染物的时序变化及其与气象因素的关系

为研究石家庄市大气污染物的季度及日变化特征,取各污染物的逐时浓度均值,采用等值线法制作了分月逐时污染物浓度变动(图 2). 从颗粒物的逐月浓度特征看[图 2(a)和图 2(b)],高浓度颗粒物主要集中于秋季和冬季,但是 PM₁₀造成的污染可

以持续到春季,与春季石家庄市主要以多风低湿的沙尘气象条件有关,而 PM_{2.5}在春季非采暖期时的浓度则较低^[10]. O₃和 NO₂的质量浓度变化趋势呈显著的反相关性,即 NO₂浓度显著较低时臭氧浓度随之增高,且主要集中于夏季 12:00~18:00 时段. 此外 SO₂和 CO 的浓度高值均集中于冬季,SO₂和 CO 是化石能源和生物质燃烧的重要成分,而采暖期取



T 表示温度, $PRES$ 表示压强, RH 表示湿度, WS 表示风速, $VISI$ 表示能见度, $PREC$ 表示降水量, 下同;

A 表示 00:00; B 表示 06:00; C 表示 12:00; D 表示 18:00

图2 石家庄市2018年12月~2019年11月大气污染物浓度月际和日变化

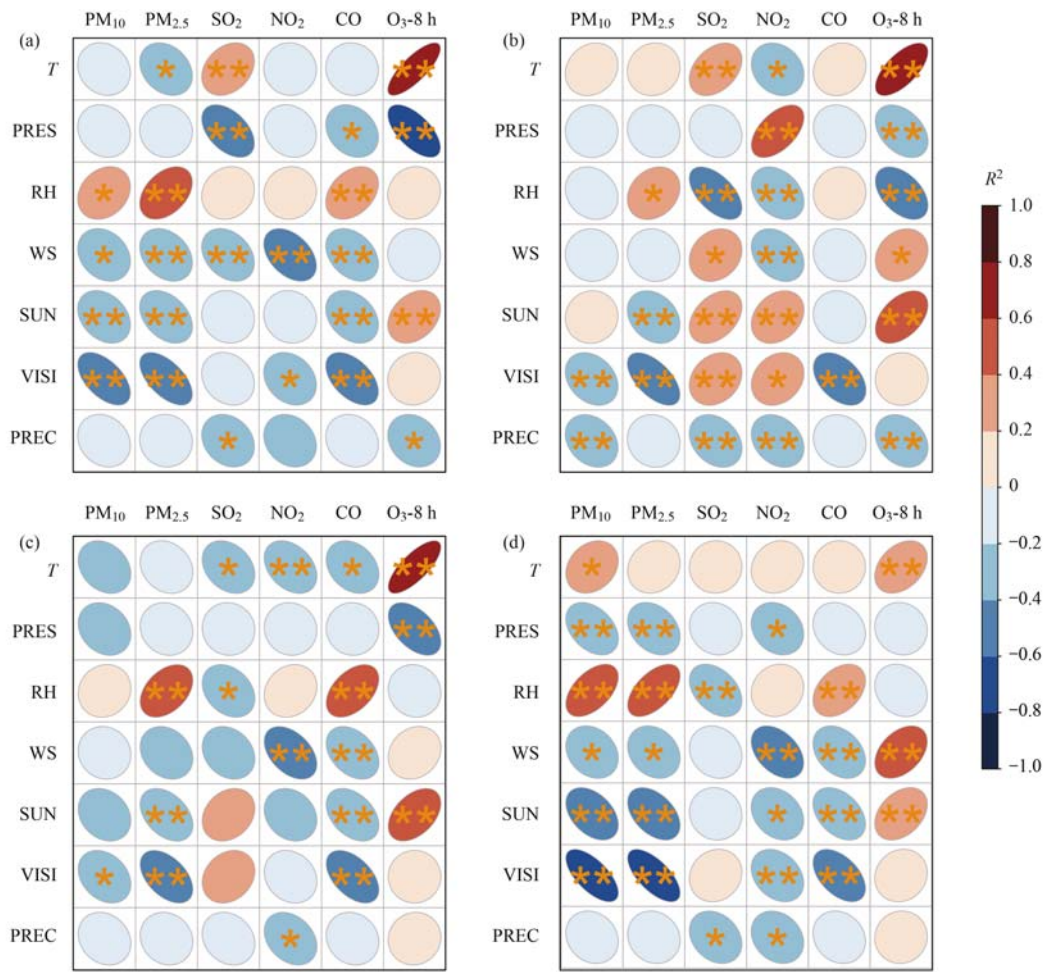
Fig. 2 Monthly and diurnal variations of atmospheric pollutant concentration in Shijiazhuang urban area from December 2018 to November 2019

暖会造成二者浓度较高。

为探讨石家庄市各季节大气污染物与气象要素的关系,取不同季节污染物和气象因子的逐日数据进行相关性分析(图3)。石家庄市春季的典型污染物是 PM_{10} [表2和图2(a)],其与湿度($P < 0.05$)、风速($P < 0.05$)、日照时数($P < 0.01$)和能见度($P < 0.01$)呈显著相关[图3(a)],由于湿度较高时有助于二次气溶胶(SA)的转化,造成 $PM_{2.5}$ 浓度较高(即雾-霾天),进而抬高 PM_{10} 的质量浓度,而风速较高时可能有助于 PM_{10} 的扩散至市域外,从而导致 PM_{10} 浓度下降。 O_3 是夏季的典型污染物[表2和图2(c)],其与温度($P < 0.01$)、风速($P < 0.05$)和日照时数($P < 0.01$)呈显著正相关,而与压强($P < 0.01$)、湿度($P < 0.01$)和降水($P < 0.01$)呈显著负相关[图3(b)],即温度升高、日照时间长、湿度较低以及较少降水时,会促进 O_3 的转化,且风速较大时会造成臭氧的传输作用导致臭氧污染。秋季和冬季的典型污染物均是颗粒物[表2、图2(a)和图2(b)],其中冬季细颗粒物($PM_{2.5}$)污染较重,即与湿度($P < 0.01$)呈显著正相关,与压强($P < 0.01$)、风速($P < 0.05$)、日照时数($P < 0.01$)和能见度($P < 0.01$)呈显著负相关[图3(c)和图3(d)],与冬季易出现静稳状态、大气层结稳定,即高湿弱风,会造成 $PM_{2.5}$ 的二次转化有关。

2.3 污染物的空间演替特征

为研究石家庄市不同季度大气污染物的空间变化及其与气象要素关系,取研究期内17个区县各季度污染物浓度和气象要素的均值数据,进行空间插值,得到污染物和气象要素的季节变动(图4和图5)。 PM_{10} 在春季和冬季空间特征明显[图4(a)],春季呈现西北高-东南低的空间格局,冬季呈西部低-东部高的空间变化,春季湿度变化(38%~54%)特征与 PM_{10} 空间分布相一致,而春季的风速($1.6 \sim 3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)显著高于其他季节,且西北向的风速较大, PM_{10} 浓度较高[图5(c)、图5(d)和图5(e)],说明春季 PM_{10} 的空间特征受湿度和风速的影响。冬季的 $PM_{2.5}$ 空间格局明显[图4(b)],呈由西到东质量浓度逐渐增高,其与冬季湿度(43%~59%)、风向(西北-东南)和风速($0.8 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)空间变化特征相一致[图5(c)、图5(d)和图5(e)],与湿度有助于SA转化和风速的扩散作用有关,即湿度和风速驱动了冬季 $PM_{2.5}$ 的空间分布。 O_3 在夏季的空间分布显著[图4(c)],并与温度($25 \sim 27^\circ\text{C}$)、降水($1.7 \sim 4 \text{ mm}$)、湿度(58%~68%)和风速($0.9 \sim 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)呈非线性关系(图5),即温度作用下形成 O_3 的基本格局后,在降水、湿度及风速风向的单一或共同作用下将形成中西高、外围区域低的空间分布状态^[9]。此外 NO_2 的空间特征在秋季和冬季较



(a)春季,(b)夏季,(c)秋季,(d)冬季; SUN 表示日照时数; 椭圆的短半径表示相关性(R^2)的程度,短半径越小,相关性越强; 单黄星表示 $P < 0.05$, 双黄星表示 $P < 0.01$

图3 石家庄市不同季度大气污染物与气象要素的相关性

Fig. 3 Correlation between atmospheric pollutants and meteorological elements in different seasons in Shijiazhuang urban area

明显,SO₂ 和 CO 在冬季的空间格局显著[图 4(d)、图 4(e)和图 4(f)].

2.4 不同季度的典型污染物的传输通道分析

为探讨石家庄市域各季节典型污染物的传输通道和来源方向,取不同季节污染物的污染轨迹($\geq$ PSCF 限值),采用后向轨迹聚类的方法得到污染物的聚类轨迹(图 6).春季根据 PM₁₀(48 h)聚类出了 5 个污染传输通道,其主要污染来源方向为西北部(轨迹 1、4 和 5,共 39.31%)和南部(轨迹 3),与 72 h 聚类方向一致[图 6(a)].源自山东东部途经邯郸和邢台的春季 PM₁₀ 轨迹 3 污染比重较大(53.32%),其轨迹上 PM₁₀ 的浓度(223.90 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)最大,PM_{2.5} 的浓度(129.58 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)次之(表 3),由于 PM_{2.5} 的传输间接抬升 PM₁₀ 浓度.此外,来自俄罗斯途经蒙古的轨迹 1 污染频率(3.19%)最低,但其轨迹上 PM₁₀ 的质量浓度(273.62 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)较高,这与石家庄市春季风向主要是来自西北-北^[13],且风速较大有关.

石家庄市夏季 O₃ 主要聚类出了 6 条污染轨迹,其主要的污染来源方向为东北(轨迹 1)和东南-南向(轨迹 2、3 和 4,共 54.24%),且与 O₃ 的前体物 NO₂ 污染来源方向较一致[图 6(b)].夏季源自渤海途经沧州和衡水的轨迹 1 所占频率(23.58%)最高,轨迹上 O₃ 的质量浓度是 199.15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,与沧州对市域 O₃ 的传输贡献有关^[35].轨迹 3 和 4 均经过邯郸和邢台,总占比为 40.88%,二者 O₃ 的平均浓度为 211.84 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,这是因为 O₃ 以近距离(<200 km)传输为主^[8],邯郸和邢台的主要污染源是钢铁和电力行业,这会产生较多的 O₃ 前体物^[36](VOCs 和 NO_x),并由轨迹 3 和 4 传输至石家庄.

石家庄市秋季 PM_{2.5} 聚类出 5 条污染轨迹[图 6(c)],其污染方向主要是东北-东南(轨迹 1、2 和 5)和西北(轨迹 4).秋季东北-东南向的污染频率较高(74.75%),污染轨迹频率占比依次为轨迹 2(36.89%)>轨迹 1(30.34%)>轨迹 5(7.52%),其中,轨迹 5 的 PM_{2.5} 浓度最高(153.48 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),

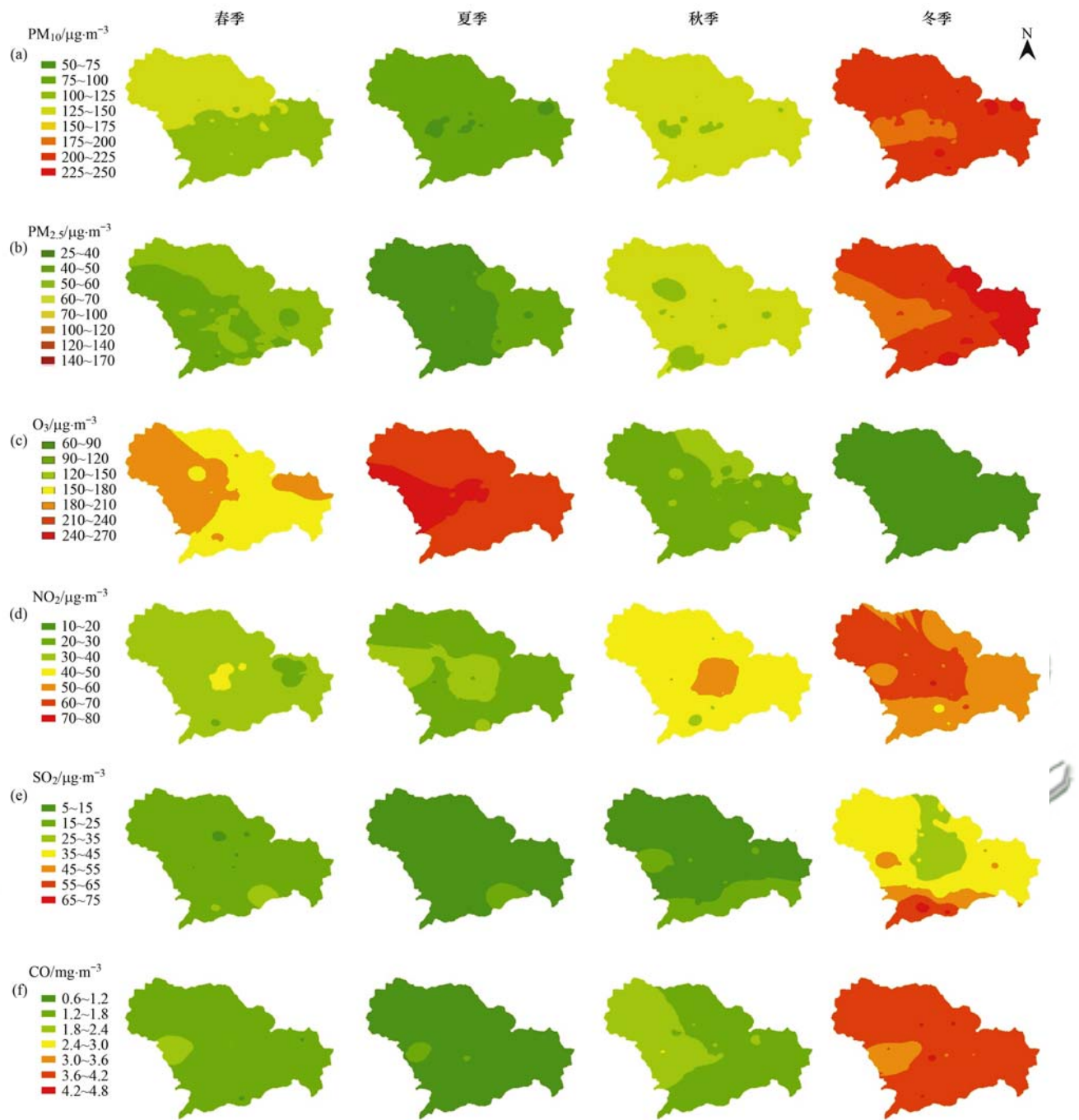
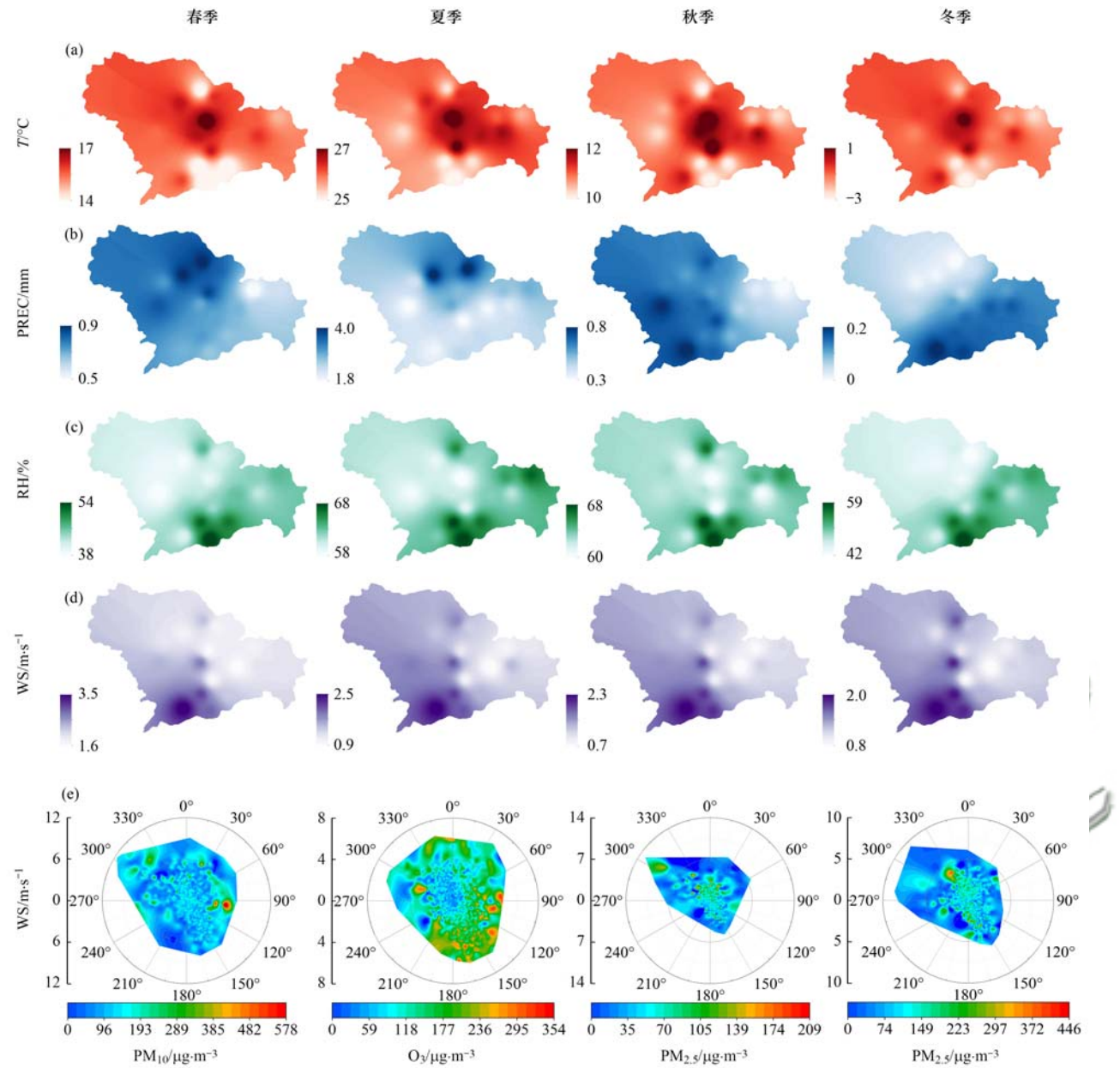


图 4 石家庄市域不同季度的大气污染物浓度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of atmospheric pollutants concentration in different seasons in Shijiazhuang City

且轨迹源自陕西北部,经过山西中部,到达河北省内后出现螺旋转向^[13],变为东北向,其成因主要是在高浓度污染时,大气环流以纬向环流为主,中纬度盛行偏西风,污染在偏西风的传输下越过太行山后下沉,在局地风场(秋季石家庄偏北风)的作用下向山前汇聚,致石家庄污染物浓度升高,另从该轨迹高度变化分析,轨迹 48~32 h 以 800~1 000 m 高空传输为主,之后逐渐下沉到近地面回流到石家庄,形成螺旋状结构. 污染轨迹 4 的 $PM_{2.5}$ 浓度 ($149.59 \mu g \cdot m^{-3}$) 较高, CO 浓度 ($1.72 mg \cdot m^{-3}$) 最高,这可能是由于轨迹经过以煤矿业为主的山西有关.

石家庄市冬季 $PM_{2.5}$ 主要存在 4 个主要的传输通道,污染来源方向与秋季较一致,即东北-东南(轨迹 1 和 2),西北向(轨迹 3 和 4),轨迹传输距离上,东北-东南向以近距离传输为主,而西北向的轨迹传输距离较远;冬季 CO 的传输通道与 $PM_{2.5}$ 方向较一致[图 6(d)]. 来自内蒙古途经山西的两条西北向的污染频率最大,所占比例分别为 32.80% 和 22.67%. 轨迹 2 的 $PM_{2.5}$ 浓度 ($178.75 \mu g \cdot m^{-3}$) 和 PM_{10} 浓度 ($250.90 \mu g \cdot m^{-3}$) 最高,这与该轨迹途经邢台,会输送较多的 $PM_{2.5}$ 和其前体物有关.



(a) 温度, (b) 降水, (c) 湿度, (d) 风速, (e) 风速风向

图 5 石家庄市域不同季度气象要素的空间格局

Fig. 5 Spatial pattern of meteorological elements in different seasons in Shijiazhuang City

2.5 不同季度典型污染物的来源解析

为研究石家庄市不同季度典型污染物的潜在源分布,取 PM_{10} (春季)、 O_3 (夏季)及 $PM_{2.5}$ (秋季和冬季)的后向轨迹进行 WPSCF 分析,得到各季度的污染源区贡献(图 7). 春季 PM_{10} 的潜在源区主要分布在河北中南部、河南中北部、山东西部、山西中部以及陕西西北部[图 7(a)]. 结合地形因素, $WPSCF_{ij} \geq 0.4$ 的主要城市为: 邢台、邯郸、沧州、安阳、鹤壁、新乡、濮阳和菏泽,这些区域主要以钢铁、炼油、化工和煤炭等支柱产业有关^[8]. 夏季 O_3 污染的潜在源区 ($WPSCF_{ij} \geq 0.3$) 呈以石家庄市为中心,沧州和山东菏泽为两翼的新月形区域[图 7(b)], 主要涉及沧州、衡水、邢台、邯郸、安阳、濮阳和荷

泽,这些城市的产业会产生较多的 O_3 前体物,在风驱动传输的作用下会对石家庄市污染产生影响. 秋季 $PM_{2.5}$ 的 PSCF 范围是 0.1 ~ 0.7, 其中 $WPSCF_{ij} \geq 0.6$ 的污染潜在源区主要涉及邢台、邯郸、保定、沧州、衡水、安阳、鹤壁和新乡[图 7(c)], 与夏季 O_3 污染的潜在源区基本一致; 且秋季的 WPSCF 的高值 ($WPSCF_{ij} \geq 0.5$) 主要集中在河北太行山东麓,表明地形因素对污染物输送有一定的阻隔作用. 冬季 $PM_{2.5}$ 的潜在源区空间范围显著大于秋季, $WPSCF_{ij} \geq 0.7$ 的主要区域集中在河北中南部、河南北部和山西西部[图 7(d)], 其中,山西的污染源区与石家庄冬季西北风频发,形成了西北向长距离传输通道有关^[13].

表 3 石家庄市域不同季度特征污染物的污染后向轨迹聚类统计

季节	轨迹	污染 轨迹数	频率/%	平均质量浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$					CO / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	$T/^{\circ}\text{C}$	RH/%	WS / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
				PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	NO ₂	O ₃ -8 h				
春季	1	13	3.19	273.62	60.00	7.54	17.82	79.23	0.50	20	63	2.5
	2	30	7.37	187.47	44.80	13.62	24.97	107.43	0.83	19	28	3.9
	3	217	53.32	223.90	129.58	25.72	57.34	66.91	1.35	15	53	2.3
	4	93	22.85	196.54	93.80	28.10	59.00	56.76	1.22	16	52	2.1
	5	54	13.27	203.24	91.96	18.09	53.63	60.41	0.99	18	49	2.4
夏季	1	150	23.58	74.50	48.83	13.06	19.01	199.15	0.86	29	52	2.2
	2	85	13.36	68.42	46.75	11.52	15.66	193.67	0.75	30	55	2.0
	3	134	21.07	63.77	37.76	16.40	17.33	210.37	0.70	31	44	2.7
	4	126	19.81	72.67	41.92	16.62	21.54	213.30	0.88	31	45	2.6
	5	63	9.91	76.03	43.06	16.94	24.06	196.24	0.98	31	49	2.6
	6	78	12.26	47.17	28.32	13.21	16.48	193.79	0.67	30	50	2.0
秋季	1	125	30.34	186.75	115.84	17.88	76.08	16.36	1.28	9	69	1.5
	2	152	36.89	165.61	106.85	17.00	67.15	25.62	1.27	11	69	1.5
	3	40	9.71	198.84	140.63	14.50	63.80	50.30	1.38	15	80	1.6
	4	64	15.53	215.66	149.59	15.63	67.41	16.58	1.72	10	83	1.3
	5	31	7.52	230.03	153.48	12.94	69.07	34.29	1.56	11	68	1.9
冬季	1	261	20.98	197.87	137.22	27.03	64.28	28.03	1.79	1	40	1.7
	2	293	23.55	250.90	178.75	34.56	82.04	24.36	2.37	2	43	1.7
	3	408	32.80	247.65	171.79	41.63	83.77	13.88	2.57	2	50	1.4
	4	282	22.67	244.07	171.10	39.99	84.70	17.25	2.62	0	51	1.6

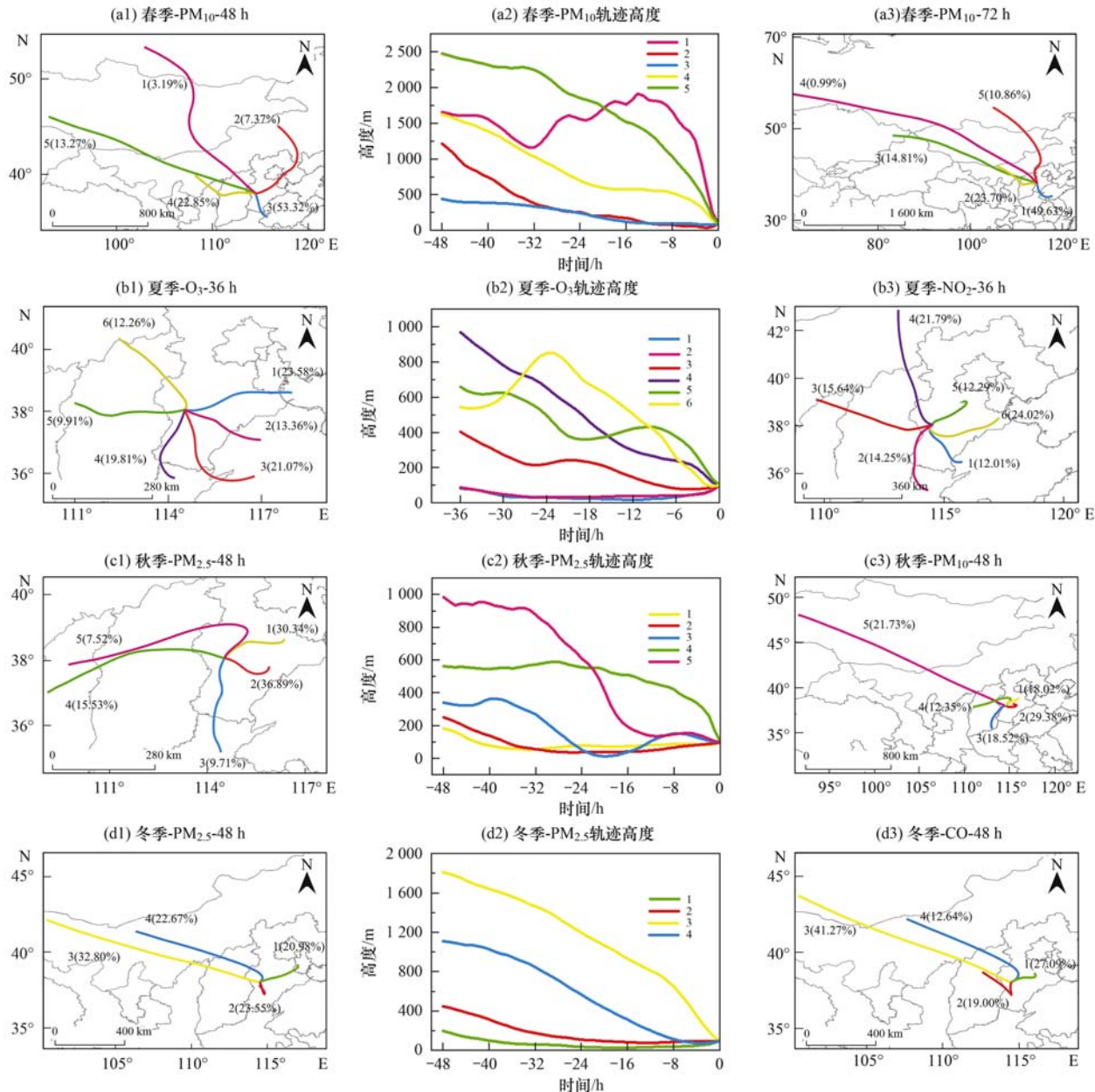


图 6 石家庄市不同季度的典型污染物后向轨迹聚类

Fig. 6 Backward trajectory clustering of typical pollutants in different seasons in Shijiazhuang City

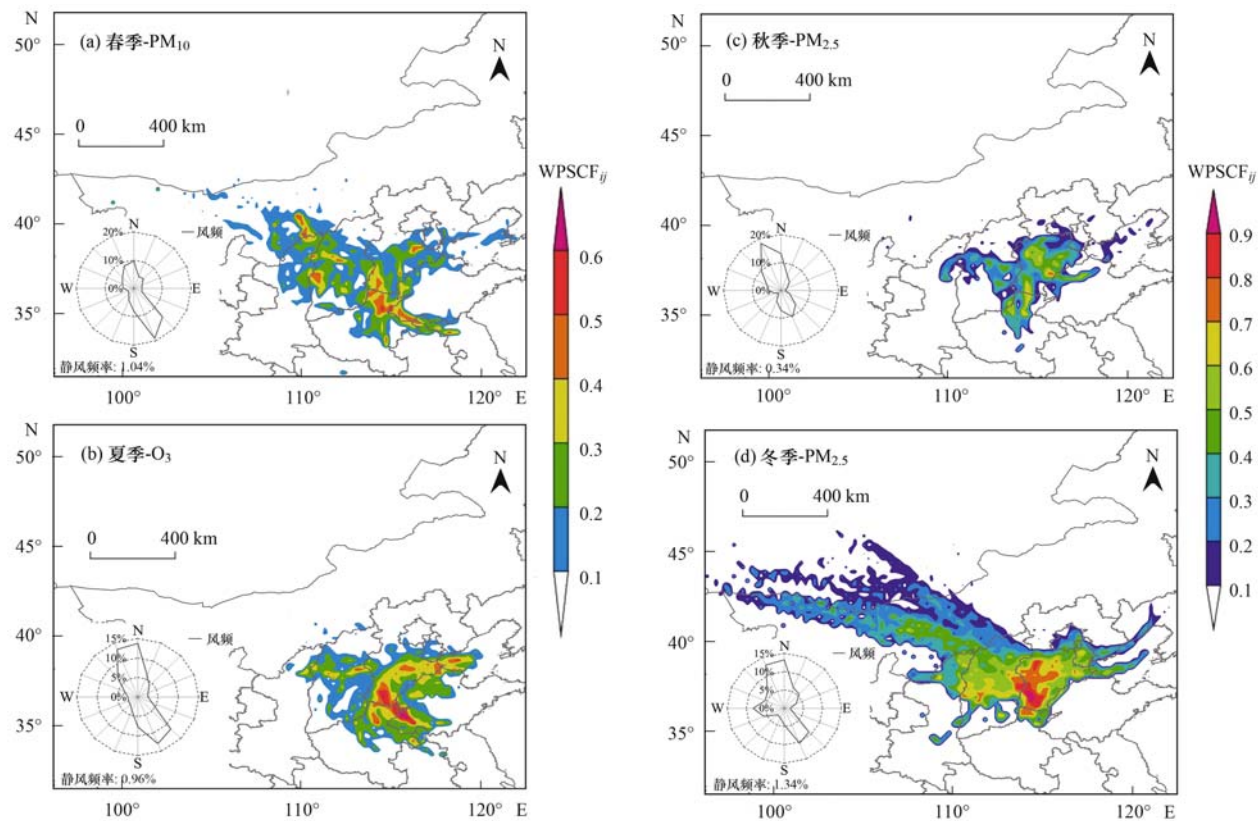


图7 石家庄市不同季度典型污染物的 WPCSF 分析

Fig. 7 WPCSF analysis of typical pollutants in different seasons in Shijiazhuang City

为定量探讨石家庄市域各季度典型污染物潜在源区的贡献程度,选取 PM_{10} ($\geq 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、 O_3 ($\geq 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和 $\text{PM}_{2.5}$ ($\geq 75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的污染轨

迹,进行 WPCWT 分析,得到污染物的权重贡献浓度值(图8).春季 PM_{10} 的权重浓度贡献高值($\text{WPCWT}_{ij} \geq 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)主要区域集中在河北中南部、河南

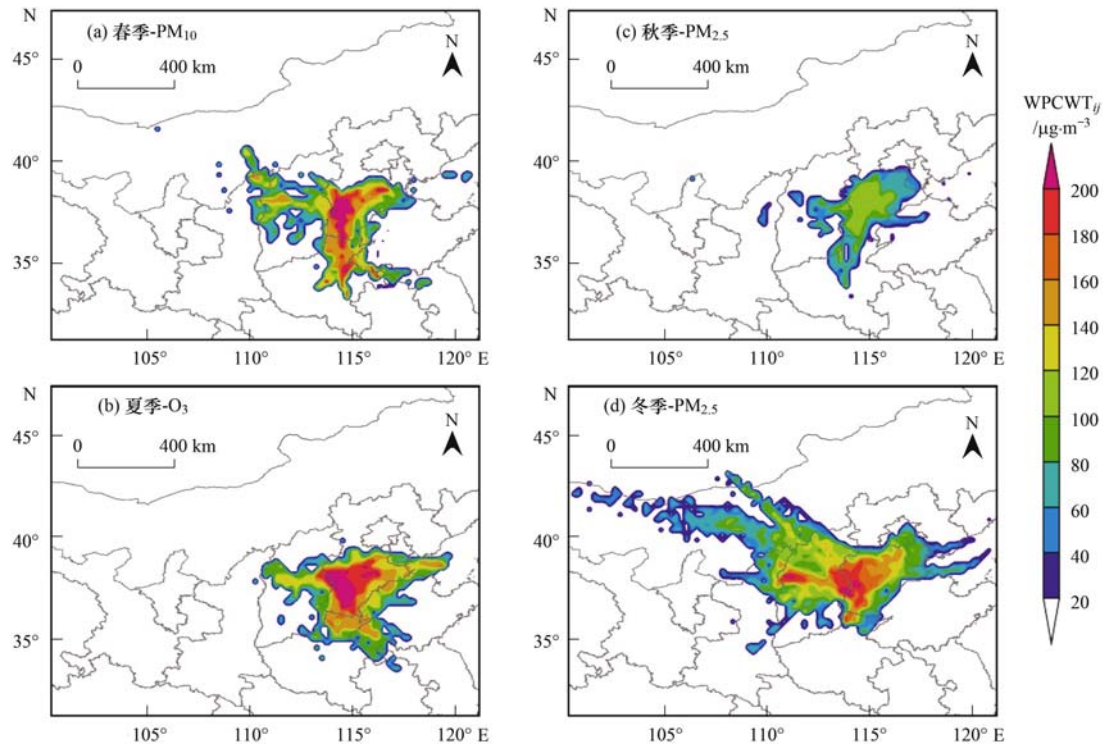


图8 石家庄市不同季度典型污染物的污染轨迹 WPCWT 分布

Fig. 8 Distribution of WPCWT of typical pollutants in different seasons in Shijiazhuang City

中北部和山西中部[图 8(a)],夏季 O_3 的权重浓度贡献高值($WPCWT_{ij} \geq 180 \mu g \cdot m^{-3}$)主要分布在河北中南部(邢台、邯郸和沧州)区域[图 8(b)]. $PM_{2.5}$ 的权重浓度贡献值呈冬季在范围和程度上显著高于秋季的特征[图 8(c)和图 8(d)],其中,冬季 $WPCWT_{ij} \geq 180 \mu g \cdot m^{-3}$ 的高值主要集中在河北中南部、山西中部和河南北部.因此,不同季度典型污染物的 WPCWT 和 WPCWT 分析结果较一致,污染源区的指向性与石家庄市域其他研究有较好的一致性.

3 结论

(1)石家庄市大气污染物具有典型的季节性污染特征,季节性典型污染物和污染率依次为:春季(PM_{10} 和 O_3 , 48.91% 和 30.43%)、夏季(O_3 , 81.97%)、秋季(PM_{10} 和 $PM_{2.5}$, 47.54% 和 32.79%)和冬季($PM_{2.5}$, 74.44%),季节性污染物的产生,除与污染源密切相关外,与各季节气象条件的变化也有重要联系.

(2)春季 PM_{10} 与风速为负相关($P < 0.05$)关系,呈西北高、东南低的空间格局,主要传输方向为西北向(共 39.31%)和南向(53.32%), PM_{10} 潜在源区($WPCWT_{ij} \geq 160 \mu g \cdot m^{-3}$)为河北(冀)中南、河南(豫)中北及山西(晋)中部,此外,山东(鲁)西和陕西(陕)西北部的传输也会贡献($WPCWT_{ij} \geq 0.3$)市域的 PM_{10} 浓度.

(3)夏季 O_3 与温度呈正相关($P < 0.05$),与湿度呈负相关($P < 0.05$),空间分布呈中西高、外围区域低,传输通道方向为东北(23.58%)和东南-南向(54.24%),其潜在源区($WPCWT_{ij} \geq 0.3$)呈以石家庄市为中心,沧州和山东菏泽为两翼的新月形区域, O_3 的贡献高值区域($WPCWT_{ij} \geq 180 \mu g \cdot m^{-3}$)主要分布在冀中南部(邢台、邯郸和沧州)区域.

(4)秋季和冬季 $PM_{2.5}$ 与湿度呈正相关($P < 0.05$),而与能见度和风速呈反相关($P < 0.05$),冬季空间上由西至东逐渐升高分布,与冬季湿度(43%~59%)空间格局一致, $PM_{2.5}$ 输送方向分别为:秋季(东北-东南, 74.75%),冬季(西北, 55.47%).冬季 $PM_{2.5}$ 潜在源区的空间范围和影响程度均显著强于秋季,二者主要污染区域($WPCWT_{ij} \geq 0.7$, $WPCWT_{ij} \geq 180 \mu g \cdot m^{-3}$)集中在冀中南、豫北和晋中西部.

参考文献:

- [1] Xiao C C, Chang M, Guo P K, *et al.* Analysis of air quality characteristics of Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding air pollution transport channel cities in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **87**: 213-227.
- [2] Chen X, Zhong B Q, Huang F X, *et al.* The role of natural

factors in constraining long-term tropospheric ozone trends over southern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **220**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117060.

- [3] Li X, Chen Q, Zheng X Y, *et al.* Effects of ambient ozone concentrations with different averaging times on asthma exacerbations: a meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **691**: 549-561.
- [4] Karlsson P E, Klingberg J, Engardt M, *et al.* Past, present and future concentrations of ground-level ozone and potential impacts on ecosystems and human health in northern Europe[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **576**: 22-35.
- [5] Unger N, Zheng Y Q, Yue X, *et al.* Mitigation of ozone damage to the world's land ecosystems by source sector[J]. *Nature Climate Change*, 2020, **10**(2): 134-137.
- [6] Chen Z Y, Chen D L, Zhao C F, *et al.* Influence of meteorological conditions on $PM_{2.5}$ concentrations across China: A review of methodology and mechanism[J]. *Environment International*, 2020, **139**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105558.
- [7] 李秋芳, 王杨, 丁学英, 等. 基于 GIS 的石家庄市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 时空分布研究[J]. *中国环境监测*, 2020, **36**(2): 173-183.
- Li Q F, Wang Y, Ding X Y, *et al.* Temporal and spatial distribution of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Shijiazhuang based on GIS[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, **36**(2): 173-183.
- [8] 王帅, 冯亚平, 崔建升, 等. 石家庄市臭氧污染的时空演变格局和潜在源区[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(9): 3081-3092.
- Wang S, Feng Y P, Cui J S, *et al.* Spatio-temporal evolution patterns and potential source areas of ozone pollution in Shijiazhuang[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(9): 3081-3092.
- [9] 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 等. 石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演变特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 2679-2690.
- Wang S, Nie S S, Feng Y P, *et al.* Spatio-temporal evolution characteristics and source apportionment of O_3 and NO_2 in Shijiazhuang[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 2979-2690.
- [10] Xie Y Z, Liu Z R, Wen T X, *et al.* Characteristics of chemical composition and seasonal variations of $PM_{2.5}$ in Shijiazhuang, China: Impact of primary emissions and secondary formation[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **677**: 215-229.
- [11] Zhao W, Tang G Q, Yu H, *et al.* Evolution of boundary layer ozone in Shijiazhuang, a suburban site on the north China plain[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **83**: 152-160.
- [12] Liu Y C, Ni S Y, Jiang T, *et al.* Influence of Chinese New Year overlapping COVID-19 lockdown on HONO sources in Shijiazhuang[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **745**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141025.
- [13] 铃伟妙, 张艳品, 陈静, 等. 石家庄大气污染物输送通道及污染源区研究[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(9): 3438-3448.
- Qian W M, Zhang Y P, Chen J, *et al.* Air pollutant transport channels and its potential sources in Shijiazhuang[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(9): 3438-3448.
- [14] Guan Y N, Wang L, Wang S J, *et al.* Temporal variations and source apportionment of volatile organic compounds at an urban site in Shijiazhuang, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **97**: 25-34.
- [15] Zhang W H, Liu B S, Zhang Y F, *et al.* A refined source apportionment study of atmospheric $PM_{2.5}$ during winter heating

- period in Shijiazhuang, China, using a receptor model coupled with a source-oriented model [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **222**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117157.
- [16] 周明卫, 康平, 汪可, 等. 2016~2018年中国城市臭氧浓度时空聚集变化规律[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(5): 1963-1974.
- Zhou M W, Kang P, Wang K K, *et al.* The spatio-temporal aggregation pattern of ozone concentration in China from 2016 to 2018[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(5): 1963-1974.
- [17] Jiang L, He S X, Zhou H F. Spatio-temporal characteristics and convergence trends of PM_{2.5} pollution: a case study of cities of air pollution transmission channel in Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120631.
- [18] 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 等. 长江经济带PM_{2.5}分布格局演变及其影响因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1013-1024.
- Huang X G, Zhao J B, Cao J J, *et al.* Evolution of the distribution of PM_{2.5} concentration in the Yangtze river economic belt and its influencing factors [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1013-1024.
- [19] 赵伟, 高博, 卢清, 等. 2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 97-105.
- Zhao W, Gao B, Lu Q, *et al.* Ozone pollution trend in the Pearl River delta region during 2006-2019 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 97-105.
- [20] Yao Y R, He C, Li S Y, *et al.* Properties of particulate matter and gaseous pollutants in Shandong, China: Daily fluctuation, influencing factors, and spatiotemporal distribution[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 384-394.
- [21] Yu S J, Yin S S, Zhang R Q, *et al.* Spatiotemporal characterization and regional contributions of O₃ and NO₂: an investigation of two years of monitoring data in Henan, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **90**: 29-40.
- [22] Xiong Y, Du K. Source-resolved attribution of ground-level ozone formation potential from VOC emissions in metropolitan vancouver, BC[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **721**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137698.
- [23] Tyagi B, Singh J, Beig G. Seasonal progression of surface ozone and NO_x concentrations over three tropical stations in north-east India[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **258**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113662.
- [24] 王旭东, 尹沙沙, 杨健, 等. 郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 604-615.
- Wang X D, Yin S S, Yang J, *et al.* Characteristics, meteorological influences, and transport source of ozone pollution in Zhengzhou city[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 604-615.
- [25] Wang Y Q. Meteoinfo: GIS software for meteorological data visualization and analysis [J]. *Meteorological Applications*, 2014, **21**(2): 360-368.
- [26] 姚青, 马志强, 林伟立, 等. 天津夏季边界层低层大气中PAN和O₃的输送特征分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 67-75.
- Yao Q, Ma Z Q, Lin W L, *et al.* Transport characteristics of PAN and O₃ in the lower atmosphere of the boundary layer in Tianjin in summer[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 67-75.
- [27] 周学思, 廖志恒, 王萌, 等. 2013—2016年珠海地区臭氧浓度特征及其与气象因素的关系[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(1): 143-153.
- Zhou X S, Liao Z H, Wang M, *et al.* Characteristics of ozone concentration and its relationship with meteorological factors in Zhuhai during 2013—2016 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(1): 143-153.
- [28] Li C Q, Li Q Q, Tong D G, *et al.* Environmental impact and health risk assessment of volatile organic compound emissions during different seasons in Beijing[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **93**: 1-12.
- [29] 谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 等. 2017年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 88-96.
- Xie F J, Lu X B, Yang F, *et al.* Transport influence and potential sources of ozone pollution for Nanjing during spring and summer in 2017[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 88-96.
- [30] 段时光, 姜楠, 杨留明, 等. 郑州市冬季大气PM_{2.5}传输路径和潜在源分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 86-93.
- Duan S G, Jiang N, Yang L M, *et al.* Transport pathways and potential sources of PM_{2.5} during the winter in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 86-93.
- [31] 雷雨, 张小玲, 康平, 等. 川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3021-3030.
- Lei Y, Zhang X L, Kang P, *et al.* Analysis of transport pathways and potential sources of atmospheric particulate matter in Zigong, in south of Sichuan province [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3021-3030.
- [32] 汤国安, 杨昕. ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程 [M]. (第二版). 北京: 科学出版社, 2012. 442-444.
- [33] 王新, 聂燕, 陈红, 等. 兰州城区大气PM_{2.5}污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1619-1628.
- Wang X, Nie Y, Chen H, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Lanzhou City [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1619-1628.
- [34] 赵敬国, 王式功, 张天宇, 等. 兰州市大气重污染气象成因分析[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(5): 1547-1555.
- Zhao J G, Wang S G, Zhang T Y, *et al.* The analysis of meteorological factors causing heavy air pollution in Lanzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1547-1555.
- [35] 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 等. 京津冀地区典型月O₃污染输送特征[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(10): 3684-3691.
- Wang Y L, Xue W B, Lei Y, *et al.* Model-derived source apportionment and regional transport matrix study of ozone in Jingjinji [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(10): 3684-3691.
- [36] Jin X M, Fiore A, Boersma K F, *et al.* Inferring changes in summertime surface ozone-NO_x-VOC chemistry over U. S. urban areas from two decades of satellite and ground-based observations [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(11): 6518-6529.

CONTENTS

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