

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年3月

第43卷 第3期
Vol.43 No.3

目次

2000~2020年天津PM _{2.5} 质量浓度演变及驱动因子分析	蔡子颖,郝国,韩素芹,唐颖潇,杨旭,樊文雁,姚青,邱晓滨(1129)
天津市PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及来源分析	肖致美,徐虹,高璟,蔡子颖,毕温凯,李鹏,杨宁,邓小文,戴运峰(1140)
基于随机森林模型的武汉市城区大气PM _{2.5} 来源解析	张志豪,陈楠,祝波,陶卉婷,成海容(1151)
华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析	任秀龙,胡伟,吴春苗,胡偲豪,高娜娜,张崇崇,岳亮,王金喜,樊景森,牛红亚(1159)
“大气十条”实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征	吴安南,黄小娟,何仁江,李金建,叶林麟,吴涛,肖智丹,刘子锐,王跃思,张小玲,张军科(1170)
郑州市典型污染过程PM ₁₀ 中重金属浓度、来源及健康风险评估	翟诗婷,王申博,张栋,赵孝因,杨洁茹,刘洋,陈红阳,张瑞芹(1180)
长江经济带PM _{2.5} 空间异质性和驱动因素的地理探测	王丽丽,刘笑杰,李丁,孙颖琦(1190)
长三角地区PM _{2.5} 浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应	周丽霞,吴涛,蒋国俊,张建珍,濮励杰,徐飞,解雪峰(1201)
“2+26”城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析	朱媛媛,王晓斐,汪巍,刀语,王帅,陈善荣(1212)
基于小波变换的山西省PM _{2.5} 污染特征及影响因素	张可可,胡冬梅,闫雨龙,彭林,段小琳,尹浩,王凯,邓萌杰(1226)
中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估	赵楠,卢毅敏(1235)
湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别	刘妍妍,杨雷峰,谢丹平,泽仁央宗,黄志烟,杨俊,赵鹏,韩静磊,贾文超,袁自冰(1246)
山东半岛近地面O ₃ 浓度时空变化及潜在源区解析	李乐,刘旻霞,肖仕锐,王思远,米佳乐(1256)
COVID-19疫情期间雄安新区VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析	刘新军,王淑娟,刘程,范莉茹,付翠轻,齐堃,宿文康(1268)
淄博市城区臭氧超标期间的VOCs污染特征与来源解析	王帅,王秀艳,杨文,王雨燕,白瑾丰,程颖(1277)
淄博市夏季城区与背景点VOCs污染特征比较	秦涛,徐勃,王信梧,李丽明,杨文,王晓丽,耿春梅(1286)
四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单	钱骏,韩丽,陈军辉,王斌,姜涛,徐晨曦,李英杰,王成辉,王波(1296)
餐饮源气相与颗粒相多环芳烃排放特征	李源,吴爱华,童梦雪,栾胜基,李骞(1307)
堆肥厂不同工作区空气真菌的多样性与群落结构	于奥园,邢礼军,孙兴滨,仇天雷,王旭明,高敏(1315)
城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路	李廷昆,冯银厂,毕晓辉,张裕芬,吴建会(1323)
黄河干流水质评价与时空变化分析	刘彦龙,郑易安(1332)
典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析:以重庆市清水溪为例	王超,叶秋,贾伯阳,何文战,党超军,黄焱,杜浪(1346)
三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响	黄伟,张研,罗晓佼,张磊(1356)
派河及其支流溶解性有机质分子组成特征	詹亚,尹浩,冯景伟,冯艾荣,胡艳云,张刘,郑刘根(1365)
粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中Cd形态空间分布特征及其影响因素	崔新月,莫武秋,廖建波(1375)
骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评价	龚润强,赵华璋,高占欣,胡冠九,卜元卿,张圣虎,邱慧(1384)
宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估	李富娟,高礼,李凌云,郑兰香,陶红,杨桂钦(1394)
百年以来北方湖泊沉积物PAHs的变化特征及其对人类活动的响应	龚雄虎,赵中华,丁琪琪,张路,姚书春,薛滨(1404)
长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异	胡愈忻,张静,黄杰,段春建,李天翠,刘威,王英才,胡圣(1414)
河套平原灌溉间隙期乌梁素海水体细菌群落结构特征	史玉娇,李文宝,张博尧,姚国旺,史小红(1424)
不同空间尺度的景观结构对袁河浮游细菌群落的影响	舒旺,王鹏,丁明军,张华,黄高翔,聂明华(1434)
鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征	刘淑丽,简敏菲,邹龙,胡启武(1447)
微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响	陶辉,戚怡婷,于多,杨兰,顾颖,厉彦辉(1455)
乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律	刘禹,史小红,张生,郝若男,孙标,赵胜男(1463)
老化前后微塑料对富里酸的吸附	宋亚丽,俞娅,郝磊,汪华,朱文芳(1472)
天津市滨海河流N、O ₃ 扩散通量及控制因子	汤梦瑶,胡晓康,王洪伟,王云仓,常素云,王松庆,钟继承(1481)
铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响	陈鑫童,郝庆菊,熊艳芳,胡剑,江长胜(1492)
降雨径流污染风险等级识别与优化方法	齐小天,张质明,赵鑫,胡文翰,刘迪(1500)
基于贝叶斯网络的给水管网消毒副产物生成因素分析	江杉杉,王臻宇,高权,杨愿愿,高方舟,胡佩,应光国(1512)
聚硫代酰胺修饰活性炭对Au(Ⅲ)的选择性吸附效果与机制	赵文金,张顺,安晓强,兰华春,刘会娟,曲久辉(1521)
F/M对活性污泥微生物生态网络的影响	张冰,孙展翔,文湘华(1529)
城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例	刘书准,王德伟,施泽明,唐亮,章凤英,廖程,李晓雨,徐文斌(1535)
基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估	王蕊,陈楠,张二喜(1546)
湖南锡矿山周边土壤-农作物系统镉迁移转化特征及污染评价	张龙,宋波,黄凤艳,肖乃川,顿梦杰(1558)
生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土土壤中重金属的阻控效应	杨士,刘祖文,龙培,毕永顺,林苑,左华伟(1567)
溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤	闵涛,罗彤,陈丽丽,茹思博,李俊华(1577)
铁锰氧化物-微生物负载生物炭材料对镉和砷的吸附机制	连斌,吴骥子,赵科理,叶正钱,袁峰(1584)
不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异	刘畅,徐应明,黄青青,陶雪莹,王林,孙约兵,赵立杰(1596)
镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性	任超,任成仲,王浩,朱利文,李竞天,杜倩倩,李萍(1606)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响	刘坤和,薛玉琴,竹兰萍,徐飞,朱志豪,张拓,张富斌(1620)
蚯蚓/钾锰改性生物炭对As污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响	苏倩倩,李莲芳,朱昌雄,叶婧,刘雪,耿兵,田云龙,黄晓雅(1630)
DA-6和EDDS施用对龙葵生长、Cd吸收和土壤细菌群落结构的影响	罗洋,孙丽,刘方,任军,郭金梅,闫修民(1641)
地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响	胡志娥,肖谋良,王双,童瑶瑶,鲁顺保,陈剑平,葛体达(1649)
增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响	王兴,钟泽坤,朱玉帆,王佳懿,杨改河,任成杰,韩新辉(1657)
秸秆还田、地膜覆盖及施氮对冬小麦田N ₂ O和N ₂ 排放的影响	彭毅,李惠通,张少维,阳婷,王筱斐,周春菊,王林权(1668)
基于Meta分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤氮挥发的影响	赵政鑫,王晓云,田雅洁,王锐,赵青,蔡焕杰(1678)
施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析	冉继伟,肖琼,黄敏,蔡岸冬,张文菊(1688)

华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析

任秀龙¹, 胡伟², 吴春苗¹, 胡偲豪¹, 高娜娜¹, 张崇崇¹, 岳亮³, 王金喜¹, 樊景森¹, 牛红亚^{1*}

(1. 河北工程大学地球科学与工程学院, 邯郸 056038; 2. 天津大学地球系统科学学院, 天津 300072; 3. 河北省邯郸生态环境监测中心, 邯郸 056001)

摘要: 为探究华北南部地区重污染城市邯郸市北部地区冬季大气颗粒物的化学组分及来源, 于2020年11月23日至12月12日采集了PM₁和PM_{2.5}样品并进行了分析。观测期间日平均 $\rho(\text{PM}_1)$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为114.53 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和124.25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, PM₁/PM_{2.5}比值的变化范围为83.3%~95.3%, 明显高于京津冀其他城市, 表明邯郸地区细颗粒物尤其是亚微米颗粒物污染严重。与清洁天相比, 重污染期间PM₁中SNA(SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺)增加14.5%, PM_{2.5}中SNA增加15.2%, 尤其氮氧化率(NOR)在重污染天增长3倍; 随着污染程度的加深, PM₁和PM_{2.5}中二次有机碳(SOC)占比增加22.0%和12.5%, SOC易在粒径小的颗粒物中聚集, 而PM₁中一次有机碳(POC)和元素碳(EC)占比下降15.4%和6.6%, PM_{2.5}中POC和EC占比下降8.2%和4.3%。上述结果表明二次形成对颗粒物重污染具有重要贡献。随着污染程度的加重, 颗粒物中液态含水量增加, 硫氧化率(SOR)和氮氧化率(NOR)均升高, 表明液相化学反应对二次无机盐的生成具有重要贡献。随着污染程度的加深, 无机元素呈上升趋势; 无机元素中Se、As、Pb和Zn富集程度较高。根据主成分分析法(PCA)源解析结果, 二次源、工业源、机动车源和生物质燃烧源是PM₁和PM_{2.5}主要的来源。潜在源贡献因子分析(PSCF)结果表明, SO₄²⁻、NO₃⁻、EC、OC和无机元素的高值区域都主要来自观测区域的北方向和西南方向。

关键词: 重污染; PM₁; PM_{2.5}; 来源解析; 后向轨迹; 潜在源区

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)03-1159-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202107166

Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China

REN Xiu-long¹, HU Wei², WU Chun-miao¹, HU Si-hao¹, GAO Na-na¹, ZHANG Chong-chong¹, YUE Liang³, WANG Jin-xi¹, FAN Jing-sen¹, NIU Hong-ya^{1*}

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Ecological Environment Monitoring Center of Handan City, Hebei Province, Handan 056001, China)

Abstract: In order to explore the chemical composition and source profiles of atmospheric particulate matter in winter in the northern area of Handan, a heavily polluted city in the southern part of North China, PM₁ and PM_{2.5} samples were collected and analyzed from November 23 to December 12, 2020. During the observation period, the daily average $\rho(\text{PM}_1)$ and $\rho(\text{PM}_{2.5})$ were 114.53 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and 124.25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively, and the ratio of PM₁/PM_{2.5} was 83.3%-95.3%, which was significantly higher than those of other cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region, indicating that air pollution of fine particulate matter, especially sub-micron particulate matter, was more serious in Handan. Compared with that during clean days, SNA (SO₄²⁻, NO₃⁻, and NH₄⁺) in PM₁ increased by 14.5% during heavy pollution, and SNA in PM_{2.5} increased by 15.2%; the nitrogen oxidation rate (NOR) in particular increased by three times on heavy pollution days. With the deepening of pollution, the proportion of secondary organic carbon (SOC) in PM₁ and PM_{2.5} increased by 22.0% and 12.5%, respectively. SOC tended to accumulate in small particles, whereas the proportion of primary organic carbon (POC) and elemental carbon (EC) in PM₁ decreased by 15.4% and 6.6%, and the POC and EC in PM_{2.5} decreased by 8.2% and 4.3%, respectively. The above results indicated that secondary formation played an important role in the heavy pollution of particulate matter. With the aggravation of air pollution, the liquid water content of the particles increased, and both the sulfur oxidation ratio (SOR) and nitrogen oxidation ratio (NOR) increased, indicating that the aqueous phase chemical reaction made an important contribution to the formation of secondary inorganics. With the deepening of pollution, inorganic elements were on the rise; Se, As, Pb, and Zn were highly enriched in inorganic elements. The results of principal component analysis (PCA) showed that secondary formation, industrial emissions, vehicle exhaust, and biomass burning emissions were the main sources of particulate pollutants. The results of potential source contribution factor analysis (PSCF) showed that the high value areas of SO₄²⁻, NO₃⁻, EC, OC, and inorganic elements were mainly from the north and southwest directions of the observation area.

Key words: heavy air pollution; PM₁; PM_{2.5}; source apportionment; backward trajectory; potential source

随着社会经济的发展、人们生活水平的提高, 大气环境污染防治及其影响备受关注。近年来大气

收稿日期: 2021-07-20; 修订日期: 2021-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807305); 河北省杰出青年科学基金项目(D2018402149); 河北省自然科学基金项目(D2021402004); 河北省高校百名优秀创新人才支持计划项目(SLRC2019021); 河北省重点研发计划项目(19273705D); 天津市自然科学基金绿色通道项目(18JCYBJC42200)

作者简介: 任秀龙(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气颗粒物理化特征, E-mail: 13231532392@163.com

* 通信作者, E-mail: niuhongya@hebeu.edu.cn

颗粒物污染事件已经成为京津冀地区的焦点, $\text{PM}_{2.5}$ (空气动力学当量直径小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物) 已经对大气能见度^[1]、人类健康^[2] 和气候^[3] 产生了严重影响. 尽管邯郸市及区县在“打赢蓝天保卫战”期间, 采取了一系列大气污染防治的管控措施, 并且在一定程度上减轻了大气颗粒物污染, 特别在冬季, 由于气象不利条件及人为活动造成的高强度排放, 雾-霾等大气细颗粒物污染事件屡见不鲜. 2020 年 11 ~ 12 月邯郸总共经历了 31 d 污染天, 占比 50.8%. 由此表明邯郸正在遭受细颗粒物的污染, 尤其是亚微米颗粒物 PM_1 , 有研究表明, PM_1 在长距离传输上扮演者重要的角色^[4]. 此外邯郸位于京津冀南部, 西临太行山脉, 与晋、豫、鲁三省接壤, 温带大陆性气候和地理位置会使污染物的区域传输和空气质量产生重要的影响. 因此研究华北南部地区细颗粒物变化及迁移特征有重要意义.

自 2013 年以来, 针对京津冀地区大气污染, 相关学者也做了大量研究. Gao 等^[5] 和 Xu 等^[6] 的研究对北京颗粒物来源进行了分析, 二次气溶胶占比最高 (35.4% ~ 42.4%). 在 1999 ~ 2018 年北京市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 及其组分的对比研究中发现, 2018 年冬季的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及碳质组分都达到近 20 年较低水平, 一次燃烧源对重污染的贡献较大, 且在重污染期间 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 受相对湿度和 NH_3 的影响较大^[7,8]. 在 2018 年秋冬季典型霾污染的研究中, $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子和碳组分是此次霾污染形成的主要原因, 同时 SNA 的暴发式增长抬高了颗粒物的浓度, 高湿对 SO_2 的液相氧化过程有着促进作用; 源解析发现燃煤源为石家庄市首要污染源^[9].

针对邯郸市 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组分特征、来源和区域贡献相应学者也做了大量的研究. 有研究表明, 2015 年邯郸市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度为 $122 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 当低温及相对湿度大于 60% 时, 二次转化更为明显, 同时风速小于 $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 且风向为南风 and 西南风时, 污染物更容易积累^[10]; Chen 等^[11] 的研究对邯郸市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 做了源解析, 发现二次源、生物质燃烧和工业排放是污染物主要的来源, 通过潜在源解析 (PSCF), 表明邯郸受南部区域的传输影响较为突出. 2017 年邯郸市 $\text{PM}_{2.5}$ 中 ρ [有机碳 (OC)] 和 ρ [元素碳 (EC)] 均值分别为 $17.09 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $4.11 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 道路扬尘、燃煤和机动车尾气是主要的污染来源^[12]. 但针对 PM_1 的研究不多, 相比城市关注度, 重污染城市周边区县的研究也就更为空缺.

本文以华北南部地区邯郸市鸡泽县为研究对象, 该地位于邯郸市东北部, 地势低, 有大量铸造企

业, 毗邻邯郸市永年区, 与邢台市交界, 污染严重, 2020 年在全省 167 区县中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度排名倒数第三. 因此研究该区域对污染物化学组分特征及来源将有更深入地了解, 可为大气污染区域联防联控提供科学的理论指导.

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样点位于邯郸市鸡泽县第一中学楼顶 (114.51°E , 36.93°N), 采样高度距地面约 15 m. 周围是居住区与教学区, 无明显的污染源, 基本能够代表所在区域的大气环境状况. 2020 年 11 月 23 日至 12 月 12 日, 使用滤膜采样器采集 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_1 样品各 20 个, 采集时间段为当日 20:00 ~ 次日 19:30, 共计 23.5 h, 采样滤膜均为石英膜.

1.2 质量控制

使用中流量采样器 (KB-120F) 采集 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物, 流量为 $16.67 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 采样器切割头的直径为 90 mm, PM_1 采用 (TE-Wilbur 型, TISCH, USA) 采样器, 流量为 $16.67 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 切割头直径为 47 mm. 在采样过程中, 仪器记录了平均温度、标况体积、采样时间等参数. 根据环保部发布的环境空气 $\text{PM}_{2.5}$ 的测定重量法 (GB/T15432) 对颗粒物质量浓度进行分析, 采样前将石英膜在 550°C 马弗炉中焙烧 5.5 h, 称重前将石英膜放在恒温箱 (温度 $25^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ 和湿度 $30\% \pm 5\%$) 中恒温 24 h 以上, 并在电子天平 (瑞士, XS205 dualrange, 0.01 mg) 上进行多次称量, 保证其中两次的偏差控制在 $\pm 20 \mu\text{g}$ 以内, 取这两次称重质量均值, 通过重量差来计算 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_1 的浓度.

1.3 样品分析

水溶性离子分析时, 加入 50 mL 去离子水, 其电阻率为 $18.2 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$, 在超声波内超声 1 h, 静置后进行过滤, 最后利用离子色谱仪 (Dionex ICS-1100) 测得 Ca^{2+} 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 Cl^- 共 8 种无机离子成分. OC/EC 的分析: 用元素碳与有机碳分析仪 (DRI Model 2001A, 美国沙漠所) 对样品中的碳组分进行分析. 无机元素分析: 使用 ICP/MS (Agilent7500a) 进行元素含量分析, 从而获得 Pb、Zn、Cd、As、Se、K、Na、Ca、Mg、Al、Mn 和 Fe 等元素的浓度^[13].

1.4 基于 ISORROPIA II 模型气溶胶液态含水量估算

气溶胶热力学模型 ISORROPIA II 常用来计算 Na^+ - K^+ - Ca^{2+} - Mg^{2+} - NH_4^+ - Cl^- - NO_3^- - SO_4^{2-} - H_2O 的平衡组分, 目前已经广泛应用到区域及全球大气模型

中,且现有的众多研究中用于大气和气溶胶的物理状态和组成中^[14,15]. 此模型分为正向和反向两种模式,正向模式是在给定气体和气体的总浓度时,计算平衡库分配的气溶胶种类,反向模式则基于温度、湿度和气溶胶浓度来计算,本研究采用反向模式计算. 此外 ISORROPIA II 模型提供“亚稳态”和“固态+液态”两种解决方案,考虑到采样期间相对湿度较高,于是选择前者^[16]. 由此计算出热力学平衡状态下 H^+ 和 ALWC 浓度.

1.5 后向轨迹模型

通过使用 HYSPLIT-4 模型观测气团 24 h 的后向轨迹,该模型适用计算和分析大气污染物输送和扩散轨迹,计算模式欧拉和拉格朗日,起始高度设置为 500m,每天计算 24 条轨迹,基于后向轨迹结果,模拟污染物输送的路径并进行聚类分析.

基于 HYSPLIT,潜在源解析(PSCF)可用于识别受体周围污染物的可能源区域^[1-3],在本研究中,它被用来识别采样点的 $PM_{2.5}$ 及其物种的潜在来源区域. PSCF 分析是基于 GIS 软件中的 TrsjStat 进行的. PSCF 的中心域是 $36.92^{\circ}N$, $114.87^{\circ}E$,水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. PSCF 值计算公式如式(1):

$$PSCF_{ij} = \frac{M_{ij}}{N_{ij}} \tag{1}$$

式中, N_{ij} 为落入 ij 单元内的端点数量, M_{ij} 为同一单元内源贡献值高于任意设置的阈值的端点数量. 为了减少有限点数的网格单元 N_{ij} 的不确定性, PSCF 值是通过其与 W_{ij} 相乘得到的. WPSCF 计算见式(2), W_{ij} 的计算见式(3):

$$WPSCF_{ij} = PSCF_{ij} \times W_{ij} \tag{2}$$

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00, & 80 < N_{ij}, \\ 0.70, & 20 < N_{ij} \leq 80, \\ 0.42, & 10 < N_{ij} \leq 20, \\ 0.05, & N_{ij} \leq 10. \end{cases} \tag{3}$$

2 结果与讨论

2.1 颗粒物浓度及水溶性离子特征

采样期间 $\rho(PM_{2.5})$ 均值为 $124.3 \mu g \cdot m^{-3}$,是我国《环境空气质量标准》中 $PM_{2.5}$ 二级标准限值($35 \mu g \cdot m^{-3}$)的 3.54 倍,说明此期间的 $PM_{2.5}$ 污染较为严重. 与国内其他城市相比,高于 2019 年驻马店市采暖季 ($117.0 \mu g \cdot m^{-3}$)^[17] 及郑州市 ($69.6 \mu g \cdot m^{-3}$)^[18]; 2018 年同期 $\rho(PM_1)$ 均值为 $77.6 \mu g \cdot m^{-3}$, 2020 年 PM_1 浓度变化范围为 $62.4 \sim 189.9 \mu g \cdot m^{-3}$,平均值为 $114.5 \mu g \cdot m^{-3}$,是 2018 年浓度的 1.5 倍. $PM_1/PM_{2.5}$ 的比值变化范围 83.3%~95.3%,高于秋季长江流域临安的 66.0%^[19] 和北京的 79.4%^[20]. 深入研究发现,表 1 中 $PM_1/PM_{2.5}$ 比值与湿度相关性较好 ($R=0.618$),但与风速的相关性较差 ($R=0.183$),表明高湿度、低风速条件下,促进二次离子形成,且在 PM_1 中较为突出,因此导致 $PM_1/PM_{2.5}$ 的比值升高. 颗粒物及气象因素的变化趋势如图 1 所示,其中平均风速为 $1.2 m \cdot s^{-1}$,相对湿度均值为 84%,平均温度为 $1.6^{\circ}C$, NO_2 均值为 $50 \mu g \cdot m^{-3}$,CO 均值为 $1.4 \mu g \cdot m^{-3}$,表明存在生物质和散煤燃烧.

表 1 气态污染物、温湿度、风速和 $PM_1/PM_{2.5}$ 比值的 Pearson's 相关性¹⁾

Table 1 Pearson's correlation among gaseous pollutants, temperature and humidity, wind speed, and $PM_1/PM_{2.5}$ ratio							
	SO ₂	NO ₂	CO	湿度	温度	风速	$PM_1/PM_{2.5}$
SO ₂	1						
NO ₂	0.550 *	1					
CO	-0.155	0.575 *	1				
湿度	-0.702 **	-0.055	0.617 *	1			
温度	-0.259	-0.186	-0.254	0.245	1		
风速	-0.343	0.076	-0.020	0.169	0.217	1	
$PM_1/PM_{2.5}$	-0.397	0.227	0.540 *	0.618 *	0.501	0.183	1

1) * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

根据《环境空气质量标准》(GB3095-2012),结合研究区大气污染水平,本研究中将日均 $\rho(PM_{2.5})$ 小于等于 $75 \mu g \cdot m^{-3}$ 为清洁阶段(C); $PM_{2.5}$ 的日均浓度在 $76 \sim 150 \mu g \cdot m^{-3}$ 为轻/中度污染阶段(S); $PM_{2.5}$ 的日均浓度在 $151 \sim 250 \mu g \cdot m^{-3}$ 为重污染阶段(H). 由图 2 可知, $PM_{2.5}$ 中 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 从清洁天、轻/中度污染天到重污染天浓度呈上升趋势, NO_3^- 和 SO_4^{2-} 在轻/中度污染天和重度污染天占比分别

为 43.4% 和 46.6%、27.2% 和 27.5%; PM_1 中 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 在轻/中度污染天和重度污染天占比分别为 40.3% 和 43.4%、24.9% 和 25.7%,占比较高, NH_4^+ 占比在轻/中度污染天和重污染天均高于清洁天,且 3 种离子占比较 2018 年同期均有所下降,可能与此阶段不利的气象条件以及气态前体物较高的二次转化率密切相关. 另外相对较高的 SO_4^{2-} 也可能与燃煤锅炉湿法脱硫过程中的直接排放有关,因

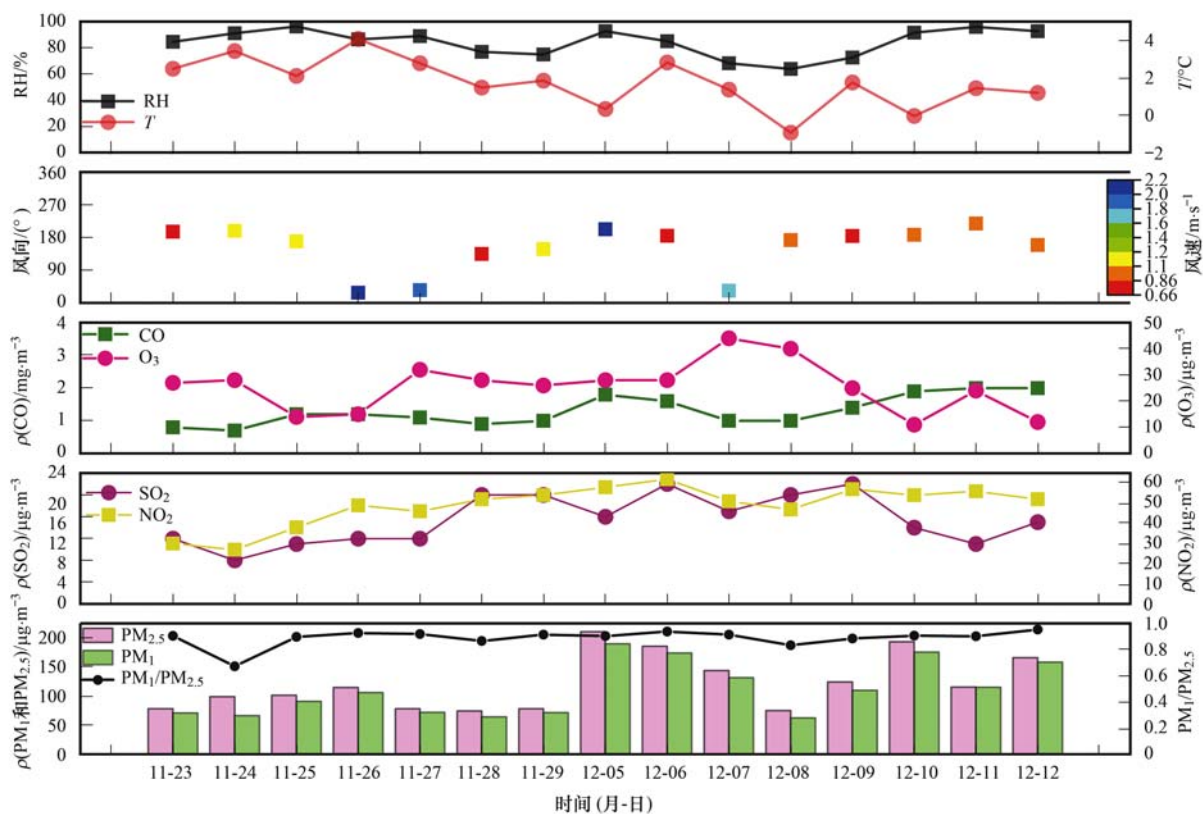


图1 大气颗粒物和气象条件变化趋势

Fig. 1 Time series of atmospheric particulate matter, gaseous pollutants and meteorological conditions

为环境空气中硫酸盐的前体物 SO_2 浓度较低(均值为 $16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。

$\text{SNA}(\text{SO}_4^{2-}$ 、 NO_3^- 和 NH_4^+) 是 $\text{PM}_{2.5}$ 中重要的组分,通常对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率在 77.5% 左右^[21]。本研究,在轻/中度污染天和重污染天贡献分别为 44.2% 和 49.9%,明显高于清洁天(34.7%);对于 PM_1 而言,SNA 占比从清洁天的 34.2% 增加到污染天的 48.7%,由于 SO_2 和 NO_x 主要来自煤燃烧和机动车尾气的排放,因此用 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 能反映移动源和固定源的相对影响大小^[22],本研究轻/中度污染时段和重污染时段 $\text{PM}_{2.5}$ 中 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 值分别为 1.5 和 2.1, PM_1 中 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 值分别为 1.7 和 1.8,二者均远大于 0.5,此外污染时段 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_1 中 NO_3^- 和 NH_4^+ 较清洁天显著上升,分别是其 3.3 倍和 2.6 倍、3.3 倍和 2.9 倍,说明污染时段移动源对水溶性离子的贡献大于固定源,因此应严控机动车尾气排放。

2.2 碳组分分析

碳组分通常包括有机碳(OC)和元素碳(EC)。OC 由一次有机碳(POC)以及二次有机碳(SOC)组成。本文采用 Lim 等^[23]提出的元素碳示踪法计算 SOC 的浓度,计算公式为:

$$\text{POC} = \text{EC} \times (\text{OC}/\text{EC})_{\min} \quad (4)$$

$$\text{SOC} = \text{OC} - \text{POC} \quad (5)$$

式中, $(\text{OC}/\text{EC})_{\min}$ 为 OC/EC 浓度比值的最小值。

本研究期间 PM_1 中碳质组分 $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 均值分别为 $17.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $5.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 中碳质组分 $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 均值分别为 $15.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $4.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 高于郑州重污染期间 $\text{PM}_{2.5}$ 中 $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 为 $13.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $2.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[17], 低于山地型城市阳泉市 $\text{PM}_{2.5}$ 中的 $23.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $6.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[24]。计算得到 $\rho[\text{总碳}(\text{TC})]$ 分别为 $22.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $20.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 占 PM_1 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的 20% 和 17%; PM_1 和 $\text{PM}_{2.5}$ 中 $\rho(\text{SOC})$ 均值分别为 $5.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $7.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 占 OC 的 32% 和 47%, 说明 SOC 对 OC 的贡献较大。OC/EC 比值作为碳组分来源的依据,本研究中 PM_1 和 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC/EC 比值分别为 3.3 和 3.2, 大于 2, 同时也证明了 SOC 的污染较为严重; 另外机动车尾气和燃煤源的 OC/EC 比值通常为 1.0~4.2 和 2.5~10.5, 由此说明汽车尾气和煤燃烧是冬季重污染过程中颗粒物的重要来源。

通过进一步分析,从图 3 可知, $\text{PM}_{2.5}$ 及 PM_1 中 $\rho(\text{EC})$ 、 $\rho(\text{POC})$ 和 $\rho(\text{SOC})$ 浓度在清洁天分别为 4.3 、 8.2 和 $5.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 及 4.9 、 11.7 和 $1.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 重度污染天则分别达到 6.2 、 11.8 和 13.2

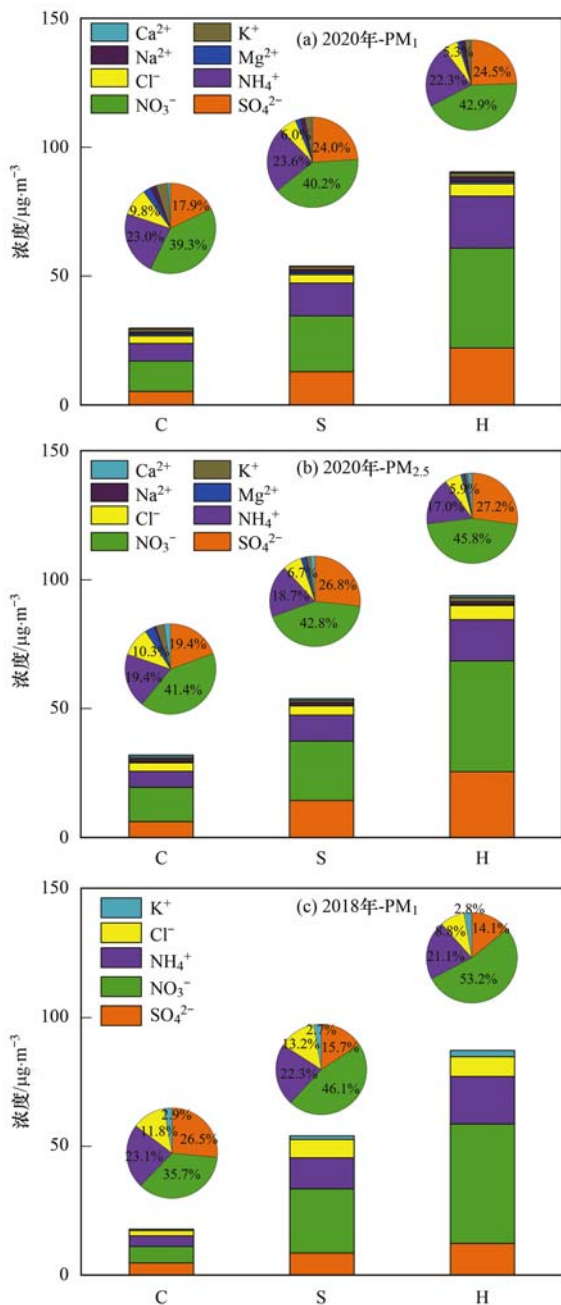


图2 清洁天(C)、轻/中度污染天(S)、重度污染天(H) $PM_{2.5}$ 和 PM_1 中水溶性离子浓度及占比变化特征

Fig. 2 Water-soluble ion concentration and proportion in $PM_{2.5}$ and PM_1 on clean (C), slight/medium pollution (S), and heavy pollution days (H)

$\mu g \cdot m^{-3}$ 及 7.1、16.6 和 $10.4 \mu g \cdot m^{-3}$, 由此说明随着污染程度的增加,一次排放和二次转化是重污染过程中颗粒物的重要组分.但从占比情况分析,与水溶性离子浓度占比随污染程度的加剧的趋势不同, $PM_{2.5}$ 中 EC 和 POC 占比分别从清洁天的 24.1% 和 46.0% 下降到重度污染过程的 19.8% 和 37.8%, PM_1 中 EC 和 POC 占比分别从清洁天的 27.4% 和 64.2% 下降到重度污染过程的 20.8% 和 48.8%; 相反, PM_1 和 $PM_{2.5}$ 中 SOC 则从 24.1% 和 8.4% 上

升至 42.4% 和 30.4%,进一步侧面印证了重污染过程中二次污染是重要的来源.

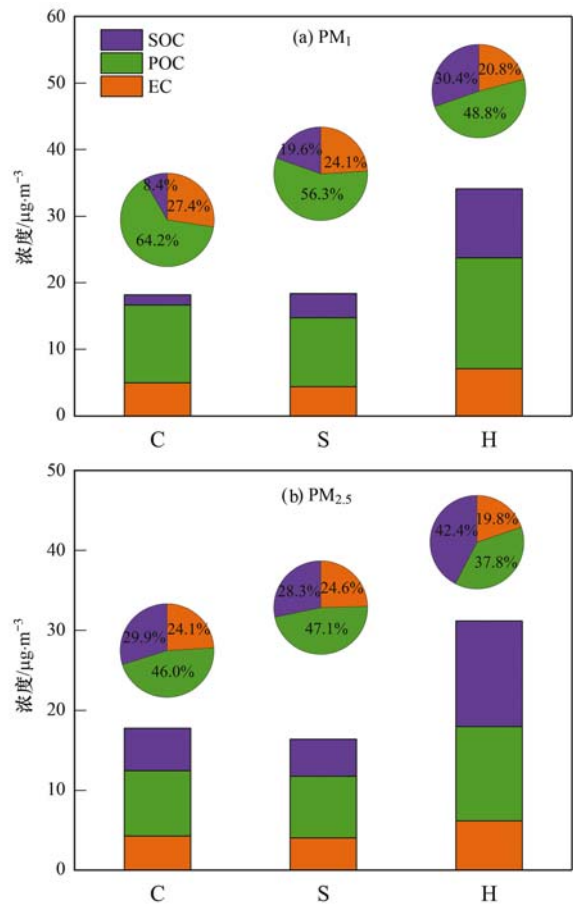


图3 清洁天(C)、轻/中度污染天(S)、重度污染天(H) 颗粒物中碳组分浓度及占比变化特征

Fig. 3 Concentration and proportion of carbonaceous components in particulate matter on clean (C), slight/medium pollution (S), and heavy pollution days (H)

2.3 硫酸盐和硝酸盐的二次转化机制

硫酸盐和硝酸盐分别由 SO_2 和 NO_2 通过非均相反应生成.因此本研究利用硫氧转化率(SOR)和氮氧转化率(NOR)评价气态污染物二次转化程度^[25~27].计算公式如下:

$$SOR = c(SO_4^{2-}) / [c(SO_4^{2-}) + c(SO_2)] \quad (6)$$

$$NOR = c(NO_3^-) / [c(NO_3^-) + c(NO_2)] \quad (7)$$

式中, $c(X)$ 为物种的浓度.

SO_4^{2-} 的形成主要有两种形式:① SO_2 通过气相反应被 OH 自由基氧化;② Fe 和 Mn 催化反应与溶解的 H_2O_2 或 O_2 反应,形成硫酸盐^[28].此外,煤炭燃烧也能直接生成 SO_4^{2-} .

NO_3^- 的形成主要通过两个均相反应,① NO_2 与 OH 反应生成 HNO_3 ,随后 HNO_3 与 NH_3 反应形成硝酸盐,该反应在白天占主导地位;②在夜间, NO_2 首先与硝酸根自由基(主要有 O_3 产生)反应,然后与 N_2O_5 反应,最后 N_2O_5 在遇水生成 HNO_3 ,进一步产

生 NO_3^- . 前人研究表明, NO_3^- 的形成对白天的 NO_2 和 O_3 浓度较为敏感, 此外, NH_3 可能会促使 HNO_3 分解并改变气溶胶酸度, 从而影响 N_2O_5 的吸收^[29~31].

图 4 结果显示, 在不同污染阶段, PM_1 和 $\text{PM}_{2.5}$ 中 $\rho(\text{EC})$ 与 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 、SOR 和 NOR 有着明显的不同. 随着污染程度的加剧, PM 中 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 和 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 均显著增加, $\text{PM}_{2.5}$ 中的 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 从清洁阶段到重度污染过程由 $6.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加至 $25.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{NO}_3^-)$ 由 $13.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加至 $42.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; PM_1 中 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 从清洁阶段到重度污染过程由 $5.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加至 $22.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{NO}_3^-)$ 由

$11.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加至 $38.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 由此说明重污染天气下 NO_3^- 变化较为明显, 且 NO_3^- 在 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_1 中的占比与 SO_4^{2-} 相比较, 同时 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NOR 由清洁天的 0.2 增加至重度污染过程的 0.4, PM_1 中 NOR 由清洁天的 0.2 增加至重度污染过程的 0.7, 说明重污染期间氮氧化物的转化率较高, 且在 PM_1 中尤为突出. 从清洁天到重污染天, 随着 NO_3^- 浓度的增加, NO_3^-/EC 的比值同样显著增加, 其中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_1 中的 NO_3^-/EC 在重度污染期间均值分别为 7.1 和 5.4, 分别是清洁天的 2.2 倍和 2.3 倍. 在重污染期间, 气溶胶液态含水量 (ALWC) 和相对湿度较高, 对 EC 浓度的影响较大^[11].

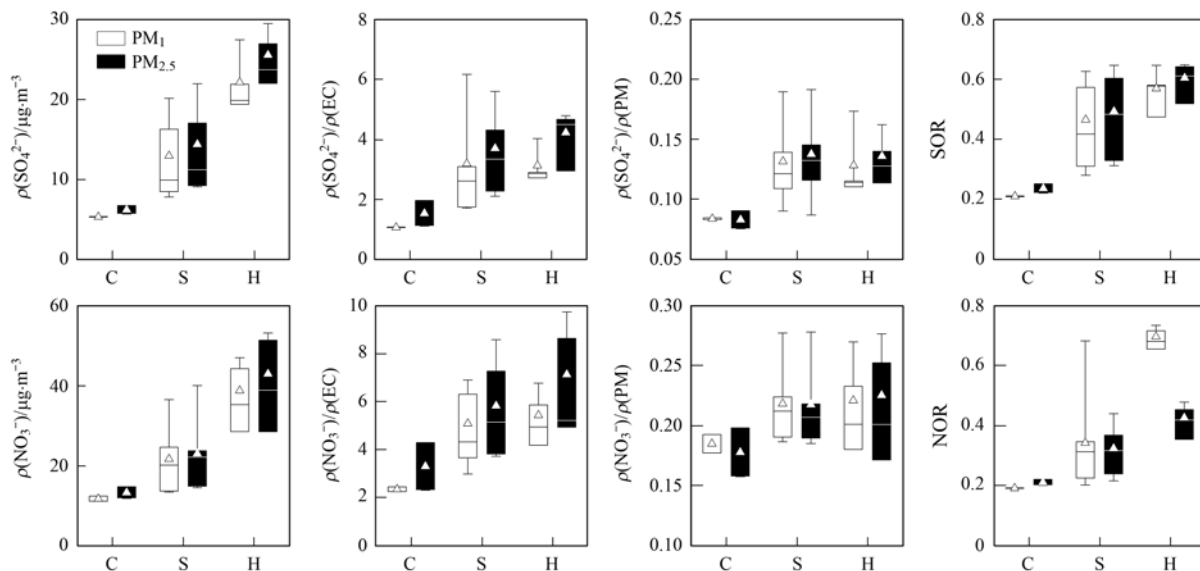


图 4 PM_1 和 $\text{PM}_{2.5}$ 中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 $\text{SO}_4^{2-}/\text{EC}$ 、 NO_3^-/EC 、SOR 和 NOR 箱线图

Fig. 4 Box plots of SO_4^{2-} , NO_3^- , $\text{SO}_4^{2-}/\text{EC}$, NO_3^-/EC , SOR and NOR in PM_1 and $\text{PM}_{2.5}$

从图 5 和图 6 可知, 随着污染程度的加深, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_1 中 ALWC 随之增加, 其中 $\text{PM}_{2.5}$ -ALWC 均值为 $107.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_1 -ALWC 均值为 $118.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 随着 ALWC 和湿度的增加, SO_2 的转化速率要快于 NO_2 . 因此, ALWC 的增加会促进气态污染物的二次转化. 有研究表明, 当湿度较高时, 促进 SO_2 向 SO_4^{2-} 转化, SOR 会明显地增加^[32]; 然而对于 NO_3^- 而言, 高湿度条件下, 水在颗粒物上的反应一定程度上会抑制硝酸盐的生成^[33]. 除此之外, 冬季 NO_2 与 $\cdot\text{OH}$ 在白天的反应是生成 NO_3^- 的主要途径, 因此, 在高 ALWC 的情况下, NO_3^- 的生成也因光照条件不足从而受到抑制^[11]. 总之, ALWC 会提高气态污染物的二次转化速率, 尤其是 SO_2 向 SO_4^{2-} 的转化, 表明液相反应对硫酸盐的生成起着重要的作用.

2.4 无机元素分析

本研究中, 无机元素的浓度从高到低顺序依次

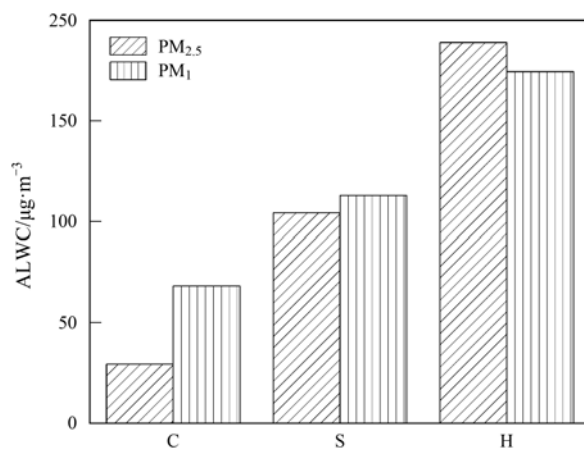


图 5 不同污染程度下 PM_1 和 $\text{PM}_{2.5}$ 中 ALWC 的水平

Fig. 5 Content of ALWC in PM_1 and $\text{PM}_{2.5}$ at different pollution levels

为: $\text{Al} > \text{Ca} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ti} > \text{Ni} > \text{Mn} > \text{As} > \text{Cr} > \text{Se}$, 发现 Al、Ca 和 Fe 等地壳元素浓度较高. 富集因子法可以衡量颗粒物中无机元素的来源, 富集因子

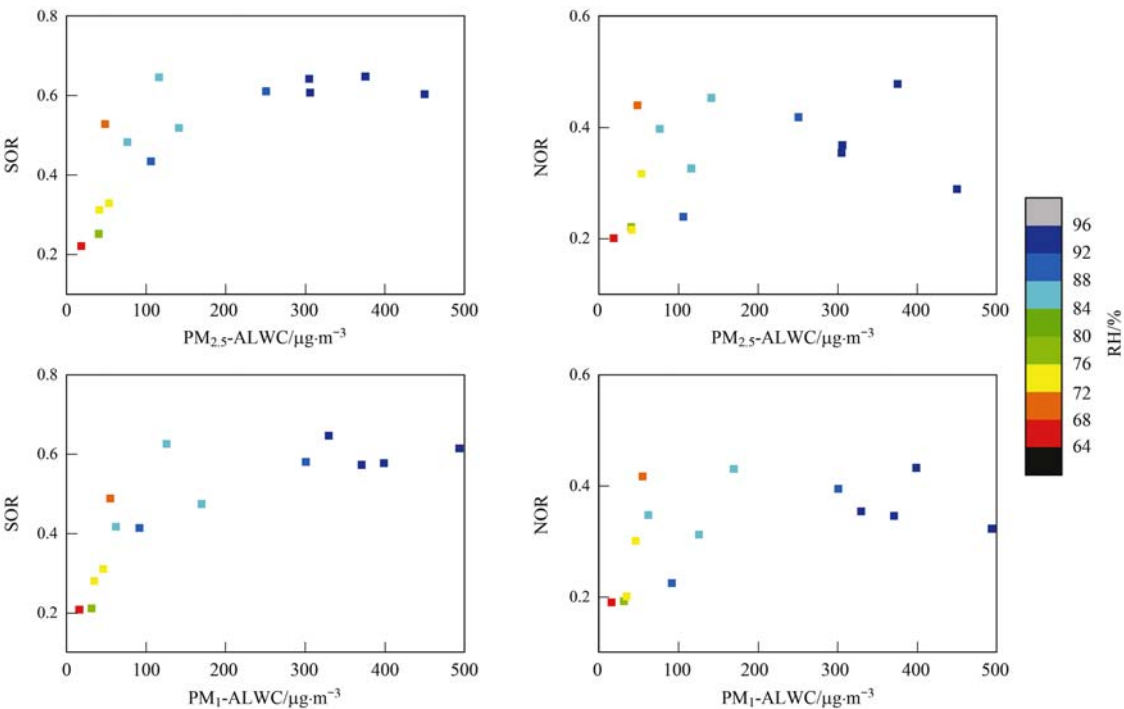


图6 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_1 中 ALWC 与 SOR 和 NOR 的散点图

Fig. 6 Scattering plots of ALWC and SOR, NOR in $\text{PM}_{2.5}$ and PM_1 colored by relative humidity

(EF)计算公式如下：

$$EF = (c_i/c_o)_{\text{样品}} / (c_i/c_o)_{\text{环境}} \quad (8)$$

式中， c_i 表示元素 i 的浓度， c_o 表示参比元素的浓度。EF 中参比元素选择 Al，研究显示，当 $EF \leq 1$ 时，微量富集； $1 < EF \leq 10$ ，为轻度富集； $10 < EF \leq 100$ ，为中度富集； $100 < EF \leq 1\,000$ ，为高度富集； $EF > 1\,000$ ，为超富集^[34]。表 2 为不同污染程度下无机元素的 EF 值，由表可知，随着污染程度的加深，10 种无机元素均呈上升趋势。Cr、Ni、Pb、Zn 和 As 通常来自机动车刹车片和汽车尾气，Zn、As 和 Pb 为中度富集。Ca 为轻度富集，主要来自于扬尘。Ni 和 Cr 为化石燃料的标志物，均为轻度富集。Se 为超富集，主要与工业生产有关。

表 2 无机元素在不同污染程度下的富集因子变化

Table 2 Enrichment factor of inorganic elements under different pollution levels

无机元素	C	S	H
Ti	0.03	0.05	0.06
Cr	1.03	1.50	2.06
Mn	0.10	0.13	0.23
Fe	0.09	0.11	0.15
Ni	2.08	3.01	3.55
Ca	1.28	1.89	2.01
Zn	17.82	24.27	38.79
As	51.85	67.74	86.00
Se	678.07	1 199.29	1 898.25
Pb	23.41	33.84	61.18

(表 3)，主要包括水溶性离子、碳组分和无机元素共计 23 种，特征值大于 1 的因子共 2 个。对于 $\text{PM}_{2.5}$ ，因子 1 中 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、OC、 K^+ 、 Cl^- 、Zn、Cd 和 Pb 载荷较高， NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 主要来

表 3 主成分旋转矩阵

Table 3 Rotated component matrix of principal component analysis

组分	$\text{PM}_{2.5}$		PM_1	
	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2
OC	0.779	0.020	0.805	0.006
EC	0.744	-0.117	0.849	0.012
Na^+	0.497	-0.229	0.305	-0.268
NH_4^+	0.934	0.258	0.926	0.275
K^+	0.899	0.040	0.788	0.056
Mg^{2+}	0.388	-0.185	0.243	-0.019
Ca^{2+}	-0.072	-0.242	-0.005	-0.231
Cl^-	0.878	0.043	0.798	0.057
NO_3^-	0.889	0.250	0.859	0.361
SO_4^{2-}	0.881	0.334	0.871	0.387
Al	-0.017	0.893	-0.024	0.784
Ti	0.126	0.525	0.242	0.556
Cr	0.168	0.935	0.197	0.977
Mn	0.262	0.598	0.296	0.426
Fe	0.456	0.834	0.499	0.802
Ni	-0.016	0.956	-0.014	0.961
Ca	-0.162	0.761	-0.127	0.754
Zn	0.851	0.372	0.863	0.252
As	0.152	0.044	0.143	0.036
Se	0.424	0.685	0.502	0.740
Cd	0.880	-0.055	0.877	-0.096
Ba	0.431	0.676	0.341	0.514
Pb	0.842	0.262	0.890	0.163
方差贡献/%	37.06	28.76	35.07	30.59

2.5 源解析

本研究利用主成分分析法 (PCA) 进行源解析

自二次转化, K^+ 、 Cl^- 和 OC 主要被认为是生物质和煤炭燃烧示踪物^[11], Zn、Cd 和 Pb 与工业生产有关^[18], 方差贡献 37.06%, 因此因子 1 被识别为二次源、燃烧源和工业源的综合源; 因子 2 中 Cr 和 Ni 载荷较高, Cr 和 Ni 主要与机动车尾气有关^[35], 方差贡献 28.76%, 因此被识别为机动车源. 对于 PM_{10} , 因子 2 机动车源贡献率高于 $PM_{2.5}$, 说明粒径越小, 对机动车尾气的贡献越大. 综上所述, 主要受二次源、工业生产、燃烧源和机动车源的影响.

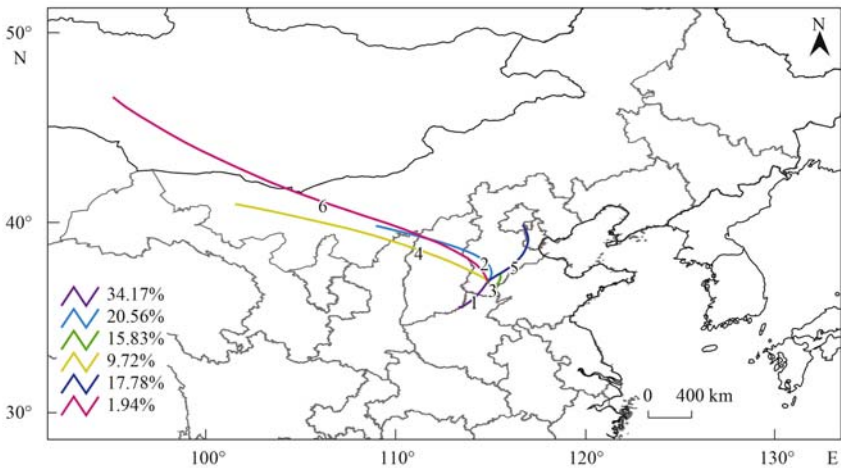
2.6 后向轨迹分析

污染物的来源通常有两部分组成, 一是本地排放; 二是来自于区域传输污染, 识别了该地区污染物的潜在源区, 可以为大气污染联防联控提供科学依据. 有研究表明, 京津冀地区的 $PM_{2.5}$ 受区域传输污染较为严重, 占比在 30%~40% 之间^[36,37]. 本研究将 24 h 后向轨迹总共聚类为 6 类, 结果如表 4 和图 7 所示. Cluster 1 (C1) 为短距离传输, 主要来自山

西省、河北省和河南省, 如晋城市、安阳市和邯郸市. C1 占比为 34.2%, 且 $\rho(PM_{2.5})$ 均值为 $94.0 \mu g \cdot m^{-3}$, 无机元素在该轨迹浓度最高为 $1.8 \mu g \cdot m^{-3}$; Cluster 2 (C2)、Cluster 4 (C4) 和 Cluster 6 (C6) 主要来自于西北部, 均为长距离传输, 占比分别为 20.6%、9.7% 和 1.9%, $\rho(PM_{2.5})$ 均值分别为 123.4、129.8 和 $116.8 \mu g \cdot m^{-3}$, 且 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、EC 和 OC 在 C2、C4 和 C6 中均值较高, 表明与生物质燃烧有直接的联系^[38]; SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度较高可能归因于矿物气溶胶的较大表面积, 为 NO_x 和 SO_2 提供了非均相反应的条件, 同时有可能来自于西北部地区的大气流动, 导致区域传输污染, 从而抬高了污染物的浓度均值. 总体来说, 此区域受西北方向的传输影响较为明显. Cluster 3 (C3) 和 Cluster 5 (C5) 主要来自东北地区, 如北京市、天津市、沧州市和衡水市, 占比分别为 15.8% 和 17.8%, 此时 $\rho(PM_{2.5})$ 均值分别为 $82.5 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $60.2 \mu g \cdot m^{-3}$.

表 4 不同轨迹下大气颗粒物及主要组分的平均浓度/ $\mu g \cdot m^{-3}$

Table 4 Average concentration of atmospheric particulate matter and main components under different trajectories/ $\mu g \cdot m^{-3}$						
轨迹	$\rho(PM_{2.5})$	$\rho(SO_4^{2-})$	$\rho(NO_3^-)$	$\rho(EC)$	$\rho(OC)$	$\rho(\text{无机元素})$
C1	94.0	15.9	27.9	4.3	16.6	1.8
C2	123.4	18.4	32.9	5.1	17.8	1.5
C3	82.5	16.2	23.2	3.9	11.3	1.6
C4	129.8	18.6	26.7	5.5	17.5	1.3
C5	60.2	10.8	18.6	3.9	11.7	1.7
C6	116.8	26.9	28.5	5.8	21.8	1.1



1~6 表示 C1~C6

图 7 后向轨迹图

Fig. 7 Backward trajectory diagram

图 8 显示了 $PM_{2.5}$ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、EC、OC 和无机元素的 WPSCF 分布. 总体来看, 污染物的潜在源分布主要集中在中国内部, 且集中在邯郸西南部、东北部和西北部. 其中邯郸南部地区 WPSCF 值高, 原因可能是南部地区空气质量较为严重, 且很大程

度上受重工业排放的污染物影响. 其它高值区域还有东北部 (石家庄市、邢台市和北京市) 和西北地区 (如山西省太原市等). SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、EC、OC 和无机元素的 WPSCF 高值区域都主要来自观测区域的东北方向和西南方向, 这与 Zhang^[39] 的研究结果类似.

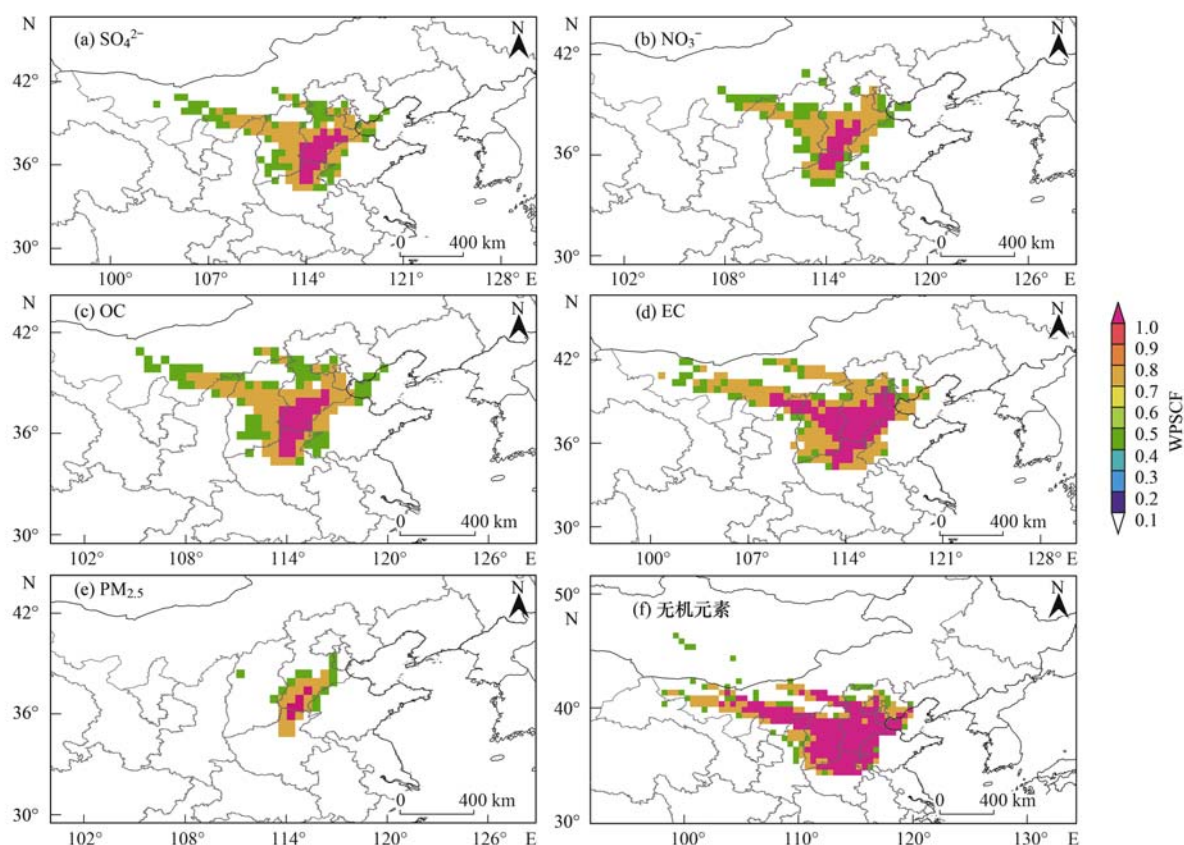


图8 潜在源贡献因子分析 (WPSCF)

Fig. 8 Potential source contribution factor analysis results

3 结论

(1) $\rho(\text{PM}_{10})$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值分别为 $114.53 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $124.25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 高于 2018 年冬季 $\rho(\text{PM}_{10})$ 均值 $77.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ 的比值变化范围 83% ~ 95%, 占比较高。另外 SNA 是 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中主要的水溶性离子, 且 PM_{10} 中 SNA、OC、EC 占比较高, 表明污染物更容易在细小颗粒物中积累。与清洁天相比, NOR 在重污染期间增长 3 倍, 表明 NO_2 二次转化明显。

(2) $\text{PM}_{2.5}$ 中 SOC 占比随污染程度的加深上升 12.5%, PM_{10} 中 SOC 上升 22%, 而 EC 和 POC 下降, 表明二次污染是重污染过程中颗粒物的重要组成部分; ALWC 对 SOR 和 NOR 的转化速率有促进作用。

(3) 随着污染程度的加深, 无机元素浓度增加。富集因子显示, Se 为超富集, Zn、As 和 Pb 为中度富集。

(4) 主成分分析显示主要受二次源、机动车源、燃烧源和工业源影响, 且粒径越小对机动车源的贡献越大。HYSPLIT 结果显示 6 类轨迹对颗粒物和化学组分有显著的影响。 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、EC、OC 和无机元素的 WPSCF 主要高值区域都主要来自观测区域的东北方向和西南方向, 如河南 (安阳和郑州) 和河

北 (石家庄和邢台) 等。

参考文献:

- [1] Sun Y L, Wang Z F, Du W, *et al.* Long-term real-time measurements of aerosol particle composition in Beijing, China: seasonal variations, meteorological effects, and source analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15** (17): 10149-10165.
- [2] Tian M, Wang H B, Chen Y, *et al.* Characteristics of aerosol pollution during heavy haze events in Suzhou, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16** (11): 7357-7371.
- [3] Tian S L, Pan Y P, Wang Y S. Size-resolved source apportionment of particulate matter in urban Beijing during haze and non-haze episodes [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16** (1): 1-19.
- [4] Rattanavaraha W, Canagaratna M R, Budisulistiorini S H, *et al.* Source apportionment of submicron organic aerosol collected from Atlanta, Georgia, during 2014-2015 using the aerosol chemical speciation monitor (ACSM) [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **167**: 389-402.
- [5] Gao J J, Wang K, Wang Y, *et al.* Temporal-spatial characteristics and source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ as well as its associated chemical species in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **233**: 714-724.
- [6] Xu H, Xiao Z M, Chen K, *et al.* Spatial and temporal distribution, chemical characteristics, and sources of ambient particulate matter in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **658**: 280-293.
- [7] 张蒙, 韩力慧, 刘保献, 等. 北京市冬季重污染期间 $\text{PM}_{2.5}$ 及其组分演变特征 [J]. *中国环境科学*, 2020, **40** (7): 2829-

- 2838.
- Zhang M, Han L H, Liu B X, *et al.* Evolution of $PM_{2.5}$ and its components during heavy pollution episodes in winter in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(7): 2829-2838.
- [8] 李欢, 唐贵谦, 张军科, 等. 2017~2018年北京大气 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4364-4373.
- Li H, Tang G Q, Zhang J K, *et al.* Characteristics of water-soluble inorganic ions in $PM_{2.5}$ in Beijing during 2017-2018[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4364-4373.
- [9] 宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 等. 2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 4755-4763.
- Su W K, Bao X L, Ni S Y, *et al.* Characteristics of haze pollution episodes during autumn and winter in 2018 in Shijiazhuang[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4755-4763.
- [10] Yang S, Ma Y L, Duan F K, *et al.* Characteristics and formation of typical winter haze in Handan, one of the most polluted cities in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **613-614**: 1367-1375.
- [11] Chen C R, Zhang H X, Li H Y, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment of ambient $PM_{1.0}$ and $PM_{2.5}$ in a polluted city in North China plain [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **242**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117867.
- [12] 薛凡利, 牛红亚, 武振晓, 等. 邯郸市 $PM_{2.5}$ 中碳组分的污染特征及来源分析[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(5): 1885-1894.
- Xue F L, Niu H Y, Wu Z X, *et al.* Pollution characteristics and sources of carbon components in $PM_{2.5}$ in Handan City[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(5): 1885-1894.
- [13] 孙颖, 潘月鹏, 李杏茹, 等. 京津冀典型城市大气颗粒物化学成分同步观测研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2732-2740.
- Sun Y, Pan Y P, Li X R, *et al.* Chemical composition and mass closure of particulate matter in Beijing, Tianjin and Hebei Megacities, Northern China[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(9): 2732-2740.
- [14] Guo H, Xu L, Bougiatioti A, *et al.* Fine-particle water and pH in the southeastern United States[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(9): 5211-5228.
- [15] Shi G L, Xu J, Peng X, *et al.* pH of aerosols in a polluted atmosphere: source contributions to highly acidic aerosol [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(8): 4289-4296.
- [16] Liu M X, Song Y, Zhou T, *et al.* Fine particle pH during severe haze episodes in northern China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(10): 5213-5221.
- [17] 刁刘丽, 李森, 刘保双, 等. 驻马店市区采暖季 $PM_{2.5}$ 时间和空间来源解析研究[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(1): 79-91.
- Diao L L, Li S, Liu B S, *et al.* Temporal and spatial source apportionment during the heating period in Zhumadian [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(1): 79-91.
- [18] 陈慕白, 袁明浩, 林秋菊, 等. 郑州市 $PM_{2.5}$ 组分季节性特征及来源研究[J]. *中国环境监测*, 2020, **36**(4): 61-68.
- Chen M B, Yuan M H, Lin Q J, *et al.* Seasonal characteristics and source apportionment of $PM_{2.5}$ components in Zhengzhou city [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, **36**(4): 61-68.
- [19] Li X R, Zhang R Y, Cong X G, *et al.* Characterization of the size-segregated inorganic compounds in Lin'an, a regional atmosphere background station in the Yangtze River delta region [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2015, **6**(6): 1058-1065.
- [20] Zhang Y Y, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Chemical composition and sources of PM_1 and $PM_{2.5}$ in Beijing in autumn[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **630**: 72-82.
- [21] Huang K, Zhuang G, Lin Y, *et al.* Typical types and formation mechanisms of haze in an Eastern Asia megacity, Shanghai[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(1): 105-124.
- [22] Arimoto R, Duce R A, Savoie D L, *et al.* Relationships among aerosol constituents from Asia and the North Pacific during PEM-West A [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, **101**(D1): 2011-2023.
- [23] Kleindienst T E, Jaoui M, Lewandowski M, *et al.* Estimates of the contributions of biogenic and anthropogenic hydrocarbons to secondary organic aerosol at a southeastern US location [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(37): 8288-8300.
- [24] 刘倬诚, 牛月圆, 吴婧, 等. 山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1306-1314.
- Liu Z C, Niu Y Y, Wu J, *et al.* Characteristics and cause analysis of heavy air pollution in a mountainous city during winter [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1306-1314.
- [25] Li X R, Wang L L, Ji D S, *et al.* Characterization of the size-segregated water-soluble inorganic ions in the Jing-Jin-Ji urban agglomeration: spatial/temporal variability, size distribution and sources[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **77**: 250-259.
- [26] Wang Y, Zhuang G S, Tang A H, *et al.* The ion chemistry and the source of $PM_{2.5}$ aerosol in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(21): 3771-3784.
- [27] Yang L X, Zhou X H, Wang Z, *et al.* Airborne fine particulate pollution in Jinan, China: concentrations, chemical compositions and influence on visibility impairment [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **55**: 506-514.
- [28] Mauldin III R L, Berndt T, Sipilä M, *et al.* A new atmospherically relevant oxidant of Sulphur dioxide[J]. *Nature*, 2012, **488**(7410): 193-196.
- [29] Bigi A, Bianchi F, De Gennaro G, *et al.* Hourly composition of gas and particle phase pollutants at a central urban background site in Milan, Italy[J]. *Atmospheric Research*, 2017, **186**: 83-94.
- [30] Pathak R K, Wu W S, Wang T. Summertime $PM_{2.5}$ ionic species in four major cities of China: nitrate formation in an ammonia-deficient atmosphere[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(5): 1711-1722.
- [31] Wen L, Xue L K, Wang X F, *et al.* Summertime fine particulate nitrate pollution in the North China Plain: increasing trends, formation mechanisms and implications for control policy [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(15): 11261-11275.
- [32] 王少博, 王涵, 张敬巧, 等. 邢台市秋季 $PM_{2.5}$ 及水溶性离子污染特征[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(5): 1877-1884.
- Wang S B, Wang H, Zhang J Q, *et al.* Characterization analysis of $PM_{2.5}$ and water-soluble ions during autumn in Xingtai City [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(5): 1877-1884.
- [33] Ponczek M, Hayeck N, Emmelin C, *et al.* Heterogeneous photochemistry of dicarboxylic acids on mineral dust [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **212**: 262-271.
- [34] 杨怀金, 杨德容, 叶芝祥, 等. 成都西南郊区春季 $PM_{2.5}$ 中元素特征及重金属潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4490-4503.

- Yang H J, Yang D R, Ye Z X, *et al.* Characteristics of elements and potential ecological risk assessment of heavy metals in $PM_{2.5}$ at the southwest suburb of Chengdu in spring[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4490-4503.
- [35] 乔宝文, 刘子锐, 胡波, 等. 北京冬季 $PM_{2.5}$ 中金属元素浓度特征和来源分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 876-883.
- Qiao B W, Liu Z R, Hu B, *et al.* Concentration characteristics and sources of trace metals in $PM_{2.5}$ during wintertime in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 876-883.
- [36] Yang L X, Cheng S H, Wang X F, *et al.* Source identification and health impact of $PM_{2.5}$ in a heavily polluted urban atmosphere in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **75**: 265-269.
- [37] Wang L T, Wei Z, Yang J, *et al.* The 2013 severe haze over southern Hebei, China: model evaluation, source apportionment, and policy implications[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(6): 3151-3173.
- [38] Zhou Y, Xing X F, Lang J L, *et al.* A comprehensive biomass burning emission inventory with high spatial and temporal resolution in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(4): 2839-2864.
- [39] Zhang C Y, Wang L T, Qi M Y, *et al.* Evolution of key chemical components in $PM_{2.5}$ and potential formation mechanisms of serious haze events in Handan, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, **18**(7): 1545-1557.



CONTENTS

Analysis of Change and Driving Factors of PM _{2.5} Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020	CAI Zi-ying, HAO Jian, HAN Su-qin, <i>et al.</i>	(1129)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, <i>et al.</i>	(1140)
Source Analysis of Ambient PM _{2.5} in Wuhan City Based on Random Forest Model	ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, <i>et al.</i>	(1151)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China	REN Xiu-long, HU Wei, WU Chun-miao, <i>et al.</i>	(1159)
Characteristics of Water-soluble Ions in an Autumn Haze Process in the Southern Sichuan Urban Agglomeration After the Implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan	WU An-nan, HUANG Xiao-juan, HE Ren-jiang, <i>et al.</i>	(1170)
Concentration, Source, and Health Risk Assessment of PM ₁ Heavy Metals in Typical Pollution Processes in Zhengzhou	ZHAI Shi-ting, WANG Shen-bo, ZHANG Dong, <i>et al.</i>	(1180)
Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of PM _{2.5} in the Yangtze River Economic Belt	WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding, <i>et al.</i>	(1190)
Spatial Heterogeneity of PM _{2.5} Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region	ZHOU Li-xia, WU Tao, JIANG Guo-jun, <i>et al.</i>	(1201)
Analysis of Pollution Characteristics, Meteorological Impact, and Forecast Retrospective During the Spring Festival and the Lantern Festival in "2+26" Cities	ZHU Yuan-yuan, WANG Xiao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i>	(1212)
Pollution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} in Shanxi Province Based on Wavelet Transform	ZHANG Ke-ke, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i>	(1226)
Estimation of Surface Ozone Concentration and Health Impact Assessment in China	ZHAO Nan, LU Yi-min	(1235)
Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province	LIU Yan-yan, YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, <i>et al.</i>	(1246)
Temporal and Spatial Variation in O ₃ Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas	LI Le, LIU Min-xia, XIAO Shi-ni, <i>et al.</i>	(1256)
Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an	LIU Xin-jun, WANG Shu-juan, LIU Cheng, <i>et al.</i>	(1268)
Characteristics and Source Analysis of VOCs Pollution During the Period of Ozone Exceeding the Standard in Zibo City	WANG Shuai, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i>	(1277)
Comparison of VOCs Pollution Characteristics Between an Urban Site and a Background Site in Summer in Zibo	QIN Tao, XU Bo, WANG Xin-wu, <i>et al.</i>	(1286)
Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province	QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(1307)
Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants	YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, <i>et al.</i>	(1315)
Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, <i>et al.</i>	(1323)
Water Quality Assessment and Spatial-temporal Variation Analysis in Yellow River Basin	LIU Yan-long, ZHENG Yi-an	(1332)
Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing	WANG Chao, YE Qiu, JIA Bo-yang, <i>et al.</i>	(1346)
River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment	HUANG Wei, ZHANG Xing, LUO Xiao-jiao, <i>et al.</i>	(1356)
Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries	ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, <i>et al.</i>	(1365)
Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors	CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo	(1375)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers	GONG Run-qiang, ZHAO Hua-jin, GAO Zhan-qi, <i>et al.</i>	(1384)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i>	(1394)
Historical Changes and Responses to Human Activities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Sediments from Northern China During the Past 100 Years	GONG Xiong-hu, ZHAO Zhong-hua, DING Qi-qi, <i>et al.</i>	(1404)
Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, <i>et al.</i>	(1414)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangs Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain	SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i>	(1424)
Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River	SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, <i>et al.</i>	(1434)
Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the <i>Grus leucogeranus</i> Reserve of Poyang Lake	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, <i>et al.</i>	(1447)
Influence of Microplastics on the Development of <i>Proteus</i> Biofilm	TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, <i>et al.</i>	(1455)
Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangs Lake	LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1463)
Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics	SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, <i>et al.</i>	(1472)
Diffusive Fluxes and Controls of N ₂ O from Coastal Rivers in Tianjin City	TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, <i>et al.</i>	(1481)
Effects of Hematite and Biochar Addition on Wastewater Treatment Efficiency, Greenhouse Gas Emission, and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetland	CHEN Xin-tong, HAO Qing-ju, XIONG Yan-fang, <i>et al.</i>	(1492)
Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level	QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, <i>et al.</i>	(1500)
Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network	JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, <i>et al.</i>	(1512)
Selective Adsorption of Au(Ⅲ) by Activated Carbon Supported Polythioamides and Adsorption Mechanism	ZHAO Wen-jin, ZHANG Shun, AN Xiao-qi, <i>et al.</i>	(1521)
Impacts of F/M Ratio on Microbial Networks in Activated Sludge	ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, WEN Xiang-hua	(1529)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District	LIU Shu-huai, WANG De-wei, SHI Ze-ming, <i>et al.</i>	(1535)
Ecological and Health Risk Assessments Based on the Total Amount and Speciation of Heavy Metals in Soils Around Mining Areas	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi	(1546)
Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province	ZHANG Long, SONG Bo, HUANG Feng-yan, <i>et al.</i>	(1558)
Effect of Controlling Heavy Metals in Soil of Rare Earth Mining Area by Biochar Supported Graphene Oxide	YANG Shi, LIU Zu-wen, LONG Bei, <i>et al.</i>	(1567)
Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM	MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, <i>et al.</i>	(1577)
Novel Insight into the Adsorption Mechanism of Fe-Mn Oxide-Microbe Combined Biochar for Cd(Ⅱ) and As(Ⅲ)	LIAN Bin, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i>	(1584)
Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionic Traits Among Different Winter Wheat Varieties	LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i>	(1596)
Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress	REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, <i>et al.</i>	(1606)
Effect of Different Land Use Types on the Diversity of Soil Bacterial Community in the Coastal Zone of Jialing River	LIU Kun-he, XUE Yu-qin, ZHU Lan-ping, <i>et al.</i>	(1620)
Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil	SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i>	(1630)
Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by <i>Solanum nigrum</i> L. and on the Soil Bacterial Community Structure	LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, <i>et al.</i>	(1641)
Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, <i>et al.</i>	(1649)
Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i>	(1657)
Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N ₂ O and N ₂ Emission in a Winter Wheat Field	PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, <i>et al.</i>	(1668)
Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis	ZHAO Zheng-xin, WANG Xiao-yun, TIAN Ya-jie, <i>et al.</i>	(1678)
Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis	RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, <i>et al.</i>	(1688)