

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)

“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¹, 黄小娟^{1*}, 何仁江², 李金建¹, 叶秣麟³, 吴涛⁴, 肖智丹⁴, 刘子锐⁵, 王跃思⁵, 张小玲¹, 张军科⁶

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225; 2. 西南医科大学公共卫生学院, 泸州 646000; 3. 内江市气象局, 内江 641000; 4. 宜宾市气象局, 宜宾 644000; 5. 中国科学院大气物理研究所, 大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 6. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 611756)

摘要: 为了解《大气污染防治行动计划》(“大气十条”)实施结束后川南城市群大气 PM_{2.5} 的污染状况, 于2018年11月7~19日在内江、自贡、宜宾和泸州这4个城市同步采集 PM_{2.5} 样品, 结合天气形势分析了秋季 PM_{2.5} 及主要水溶性离子的污染特征, 并利用后向轨迹聚类分析探讨了区域输送对该地区大气污染的影响。结果表明, 川南城市群秋季大气平均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $(67.2 \pm 38.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 泸州最高而内江最低; SNA (SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+) 在 PM_{2.5} 中占比为 33.3%, 其中 NO_3^- 为首要离子组分; 由“大气十条”实施中期(2015年)至实施结束(2018年), 内江、宜宾和泸州秋季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别增加了 13.8%、47.2% 和 69.1%, 自贡持平; 由于大气中 $\rho(\text{SO}_2)$ 大幅减少而 $\rho(\text{NO}_2)$ 减幅较小甚至增加, 且缺乏对 NH_3 排放的控制, 从 2015~2018 年各城市秋季 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 增加了 36.7%~116.0%, $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 降低了 19.8%~40.2%, $\rho(\text{NH}_4^+)$ 则变化较小; 霾天, 表观氮氧化率 NOR 增加了 60.0%~118.2%, 而表观硫氧化率 SOR 增幅较小甚至下降, $\rho(\text{NO}_3^-)$ 增加显著, 是清洁天 2.7~3.0 倍, $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值也上升至 1.7~1.9, 说明硝酸盐的二次生成是此次霾污染过程形成的主要化学机制; 霾天川南城市群主要受四川盆地内区域输送(尤其是经过重庆的东北气流)的影响。

关键词: PM_{2.5}; 水溶性离子; 川南城市群; 霾; 后向轨迹

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)03-1170-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202106019

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-nan¹, HUANG Xiao-juan^{1*}, HE Ren-jiang², LI Jin-jian¹, YE Mo-lin³, WU Tao⁴, XIAO Zhi-dan⁴, LIU Zi-rui⁵, WANG Yue-si⁵, ZHANG Xiao-ling¹, ZHANG Jun-ke⁶

(1. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. College of Public Health, Southwest Medical University, Luzhou 646000, China; 3. Neijiang Meteorological Office, Neijiang 641000, China; 4. Yibin Meteorological Office, Yibin 644000, China; 5. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 6. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: To investigate the PM_{2.5} pollution in the southern Sichuan urban agglomeration after the implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan (APPCAP), PM_{2.5} samples were simultaneously collected in four cities (Neijiang, Zigong, Yibin, and Luzhou) from November 7 to 19, 2018. The pollution characteristics of PM_{2.5} and main water-soluble ions were analyzed in combination with the synoptic situation, and the influence of regional transport on atmospheric pollution was also discussed in this study. The results showed that the mean $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in this region was $(67.2 \pm 38.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, being highest in Luzhou and lowest in Neijiang. The proportion of SNA (SO_4^{2-} , NO_3^- , and NH_4^+) in PM_{2.5} was 33.3%, among which NO_3^- was dominant. From the intermediate stage (2015) to the end (2018) of the implementation of APPCAP, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ values were increased by 13.8%, 47.2%, and 69.1% in Neijiang, Yibin, and Luzhou, respectively, though unchanged in Zigong. Due to the significant reduction in $\rho(\text{SO}_2)$ but slight decrease or increase in $\rho(\text{NO}_2)$, as well as the lack of controlling NH_3 emissions, from 2015 to 2018, $\rho(\text{NO}_3^-)$ had increased by 36.7%~116.0%, whereas $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ decreased by 19.8%~40.2%, and $\rho(\text{NH}_4^+)$ changed slightly in four cities. On haze days, the nitrogen oxidation rate (NOR) increased by 60.0%~118.2%, whereas the sulfur oxidation rate (SOR) increased slightly or decreased, leading to a significant increase in $\rho(\text{NO}_3^-)$ (2.7~3.0 times that on clean days) and $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ mass ratios (1.7~1.9 on haze days). These values indicated that the secondary formation of nitrate was the dominant chemical mechanism in this haze process. On haze days, the PM_{2.5} pollution in this region was mainly affected by the regional transport within Sichuan Basin, particularly by the northeasterly air masses passing through Chongqing.

Key words: PM_{2.5}; water-soluble ions; southern Sichuan urban agglomeration; haze; backward trajectory

收稿日期: 2021-06-02; 修订日期: 2021-08-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0210000); 四川省重大科技专项(2018SZDX0023); 国家自然科学基金项目(41805095); 四川省科技计划项目(2019YFS0476, 2018SZ0288); 成都信息工程大学科研基金项目(KYTZ201722)

作者简介: 吴安南(1999~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气物理与大气环境, E-mail: wuannan321@163.com

* 通信作者, E-mail: xjhuang@cuit.edu.cn

水溶性离子是大气细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)的重要组成部分,其中二次离子(SNA,即 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+)是最主要化学组分^[1],SNA可通过直接或间接辐射强迫对气候产生影响^[2],通过显著降低大气能见度和酸沉降影响环境^[3],且容易引发人体呼吸系统疾病从而危害人体健康^[4]。此外,SNA的生成在霾污染的发生和发展过程中起着重要作用^[5]。对水溶性离子(尤其是SNA)的研究对于揭示霾污染特征、形成机制和制定相应地减排措施具有重要意义。自2013年中国出台《大气污染防治行动计划》(“大气十条”)以来,全国开展了严格的污染控制措施,减排成效显著。Zheng等^[6]的研究显示,2017年中国人为排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_x 相比于2013年分别下降33%、59%和21%。同期,中国人口加权年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度从 $67.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至 $45.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,下降幅度达32%^[7]。从化学组分来看,我国不同地区 $\text{PM}_{2.5}$ 中各化学组分浓度呈现出差异化的变化趋势,2013~2017年间,我国东部地区人口加权平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降了21%,各化学成分浓度也出现不同程度的降低,其中,SNA的降幅较大,尤其是 SO_4^{2-} (40%)和 NH_4^+ (22%),大于有机物(15%)和黑碳(17%),而 NO_3^- 降幅较小,仅5%^[8]。王跃思等^[9]的研究也显示,京津冀、珠三角、成渝和汾渭平原的 SO_4^{2-} 都出现降低,尤其在秋冬季重污染期间的降幅最大,而 NO_3^- 降幅小,甚至在成渝地区不降反升。可见,SNA浓度及其组成在近年来发生很大变化,且具有明显的地区差异性,研究这些组分在特定地区的污染特征及其变化有助于评估污染控制措施的效果,同时也为当地污染减排政策的下一步制定提供参考和指导。

京津冀、长三角、珠三角和四川盆地是我国四大霾易发和频发区,我国对于 $\text{PM}_{2.5}$ 的研究多分布在前3个地区,四川盆地的相关研究开展较晚且较少。不利的地形条件是造成严重霾污染的重要原因^[10],与京津冀地区西北高东南低的三面环山地形相比,四川盆地四周由东边的巫山,南边大娄山,北边大巴山和西边的横断山脉环绕而成闭塞地形,地形条件更为不利,盆地内盛行下沉气流,水汽积聚导致湿度大,常发生地形逆温而形成稳定的强逆温层结,全年风速低,空气停滞事件频发,导致污染物难以扩散而污染严重^[11]。四川盆地内 $\text{PM}_{2.5}$ 高浓度区域主要位于盆地西北部和南部地区^[12],但目前在四川盆地内有关 $\text{PM}_{2.5}$ 的研究主要集中在特大中心城市成都^[13,14](盆地西北部)和重庆^[15](盆地东南部),对处于盆地南部的川南城市群(包括内江、自贡、宜

宾和泸州这4个城市)的研究较少。且有研究发现,盆地中北部霾日逐年减少,南部则逐年增多^[16],表明川南城市群的污染状况不容忽视。仅有少量研究指出,“大气十条”实施后期内江市 $\text{PM}_{2.5}$ 中 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 和 NO_3^- 较前期分别降低了47%、35%和25%^[17],实施结束后的总体减排效果还不可知,同处于川南城市群的其他城市的状况也还不清楚,这不利于该区域未来有效减排政策的制定。因此,本研究于2018年(“大气十条”实施结束)秋季在川南城市群进行大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的同步观测,与2015年(“大气十条”实施中期) $\text{PM}_{2.5}$ 和水溶性离子的浓度进行比较,并分析这些污染物在区域典型霾污染过程中的变化特征,探讨区域输送对污染的影响,这对该区域大气污染控制策略的制定具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集和测定

采样点设置在内江、自贡、宜宾和泸州市城区,采样点介绍如表1所示。使用武汉天虹TH-150C系列智能中流量大气采样器进行大气 $\text{PM}_{2.5}$ 采集,采样流量设定为 $100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,观测时间为2018年11月7~19日,共计13 d,每天采样2次(08:00~19:30,20:00~次日07:30),每次采集时长为11.5 h,共获得102组有效样品,其中内江缺少11月10日的观测数据。采样膜为PALL石英纤维滤膜,滤膜直径为90 mm,滤膜采样前先置于马弗炉中在500℃条件下焙烧5 h。采样前后均将滤膜置于恒温恒湿箱[温度 $(20\pm 1)^\circ\text{C}$,相对湿度 $(45\pm 5)\%$]中平衡48 h再使用精度为0.01 mg的电子天平称重,称重后样品在 -20°C 条件下保存至分析。使用离子色谱仪(Dionex ICS-2000)分析阳离子(NH_4^+ 、 K^+)和阴离子(NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^-)。阳离子测定使用CS12A分离柱,CSRS抑制器,淋洗液为 $22 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的甲基磺酸溶液;阴离子使用AS14A分离柱,ASRS抑制器,淋洗液为 $3.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Na_2CO_3 和 $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaHCO_3 混合溶液。样品测定过程中,质量保证与控制严格按照实验室监测相关技术规范执行。

1.2 后向轨迹分析

使用TrajStat软件进行后向轨迹聚类分析,以每天的00:00(世界时,下同)和12:00作为模拟的起始时间,计算48 h后向轨迹,轨迹起始点高度设为200 m,采用角距离法进行聚类分析。

1.3 数据来源

选用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的

表 1 4 个采样点及城市特点

Table 1 Four sampling sites and their characteristics

城市	采样点	经纬度(°E, °N)	城市特点
内江	内江市气象局	105.06, 29.58	省中南部,地势西北高、东南低,省第二大交通枢纽,制糖、食品和种猪业发达
自贡	四川轻化工大学汇北校区	104.77, 29.35	省南部,地势西北高、东南低,以公路交通为主,省粮食和经济作物主要产区
宜宾	宜宾市气象局	104.61, 28.80	省南部,地势西南高、东北低,水陆空交通枢纽城市,以电力、造纸、化工和酿酒工业著称
泸州	西南医科大学城北校区	105.42, 28.91	省东南部,地势南高北低,国家公路枢纽城市,以化工、工程机械和酿酒工业著称

空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 时间分辨率为 1 h 的再分析数据 (ERA5) (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/?type=dataset>), 选取 500 hPa 和 850 hPa 的位势高度场、风场和温度场以及地面气压场和风场进行天气形势分析. 气象数据(包括温度、相对湿度、风速风向和降雨量)来自四川省气象局, 时间分辨率为 1 h. SO_2 和 NO_2 浓度数据来源于全国空气质量实时发布平台(<http://106.37.208.233:20035>), 时间分辨率为 1 h. 后向轨迹使用的数据为美国国家环境预报中心(NCEP)提供的 GDAS 气象数据(<ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1/>), 该数据空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 时间分辨率为 6 h.

2 结果与讨论

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 和水溶性离子浓度水平

2.1.1 $\text{PM}_{2.5}$ 污染与天气形势概况

采样期间川南地区典型天气图见图 1. 在 11 月 8 日 08:00 的 500 hPa 高空上[图 1(a)], 亚欧中高纬为一槽一脊的环流形势, 川南地区受槽后脊前西北气流控制. 地面上[图 1(c)], 川南地区处于弱高压后部, 低压前部, 等压线稀疏, 地面风速微弱, 平均风速为 $1.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 静稳天气形势有利于污染物积累并最终发展为霾污染过程. 图 2(g) 显示, 11 月 7 ~ 13 日, 4 个城市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 呈上升趋势, 于 11 月 12 ~ 13 日夜间达到峰值, 泸州 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 峰值 ($172.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 出现在 11 月 12 日夜间, 宜宾、自贡和内江出现在 11 月 13 日夜间, 分别为 149.5、128.1 和 $96.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 宜宾 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 表现出“锯齿状”的昼夜变化, 在夜间达到高值, 白天浓度下降, 通过分析温度垂直廓线图(图 3, 以 11 月 14 日为例), 相比于白天, 宜宾易在夜间形成逆温层(主要在 800 ~ 700 hPa 高度), 污染物垂直扩散条件差, 使得夜间 $\text{PM}_{2.5}$ 污染突出. 同时, 随着 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 升高, 城市间 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 差异增大, 可能是由于霾天静稳天气形势下各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 更多受到本地生成影响, 如宜宾和泸州更高的 $\rho(\text{SO}_2)$ 和 $\rho(\text{NO}_2)$ 会导致生成更多的硫酸盐和硝酸盐, 从而 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 更高. 11 月 15 日 08:00

的 500 hPa 高度上[图 1(d)], 我国东北以北地区存在一低槽, 配合有明显的冷温槽, 形成 -40°C 的冷中心, 且温度槽落后于高度槽, 使得低槽发展加强. 850 hPa 上的低压中心较 500 hPa 偏东, 配合有 -24°C 的冷中心[图 1(e)], 冷平流不断向我国输送. 图 1(f) 显示川南地区地面为一致的偏北风, 受冷空气南下影响, 该地区于 11 月 15 ~ 17 日自北向南出现一次降温降水天气过程, 气温持续下降 $4 \sim 6^{\circ}\text{C}$, 各城市转为 3 ~ 6 级偏北风, 其中宜宾 11 月 17 日最大风速达 $10.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 各城市降雨量于 11 月 15 日夜间达到最大, 其中宜宾和泸州达到中雨级别, 气象条件有利于污染物的稀释、扩散和清除, 此次霾污染过程趋于结束. 4 个城市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 从 11 月 15 日开始显著降低, 降速为: 宜宾 > 泸州 > 自贡 > 内江, 且夜间快于白天, 各城市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 于 11 月 17 日降至最低且相近. 11 月 18 日 08:00 的 500 hPa 高度上[图 1(g)], 川南地区处于平直西风气流中, 850 hPa 高度上的冷中心消失[图 1(h)], 冷空气影响结束, 图 1(i) 显示川南地区位于地面高压前部, 气压梯度小, 平均风速减小至 $2.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风向较为零乱, 水平扩散条件差, 导致 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{SO}_2)$ 和 $\rho(\text{NO}_2)$ 又逐步升高.

采样期间, 川南城市群 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的变化较为一致[图 2(g)], 城市间 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的相关系数均达到 0.8 以上, 变异系数为 23.5%, 这表明 $\text{PM}_{2.5}$ 具有区域性污染特征, 同时又呈现一定的局地差异. 郭振东等^[18] 对长三角地区的研究也表明, 在同一天气系统影响下, 大范围区域污染物浓度变化基本一致, 在没有大的区域输送的静稳天气下, 各站点离子浓度易受到局地源影响. 4 个城市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为: $(76.1 \pm 46.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (泸州) > $(72.0 \pm 40.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (宜宾) > $(69.5 \pm 34.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (自贡) > $(51.0 \pm 24.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (内江). $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 超标率为: 53.8% (泸州和宜宾) > 38.5% (自贡) > 16.7% (内江), 其中泸州 11 月 13 日 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $160.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 达到重度污染级别. 川南城市群区域平均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $(67.2 \pm 38.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 与中国典型区域同期研究结果相比(表 2), 该区域 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 高于同处于四川

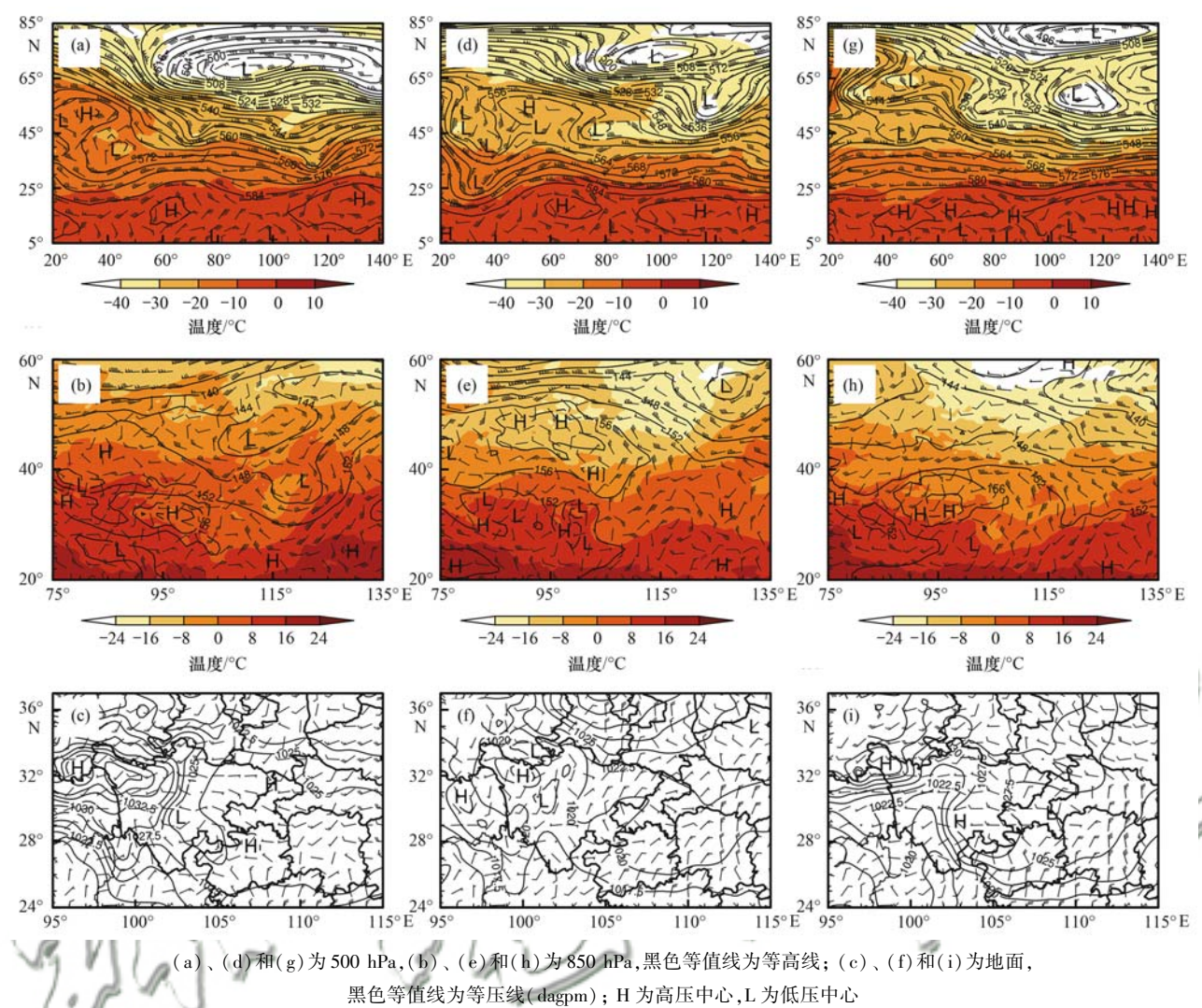


图1 2018年11月的8、15和18日08:00的500 hPa、850 hPa和地面天气形势

Fig. 1 The 500 hPa, 850 hPa, and surface synoptic situation at 08:00 on November 8, 15, and 18, 2018

表2 川南城市群与其他区域的PM _{2.5} 和水溶性离子浓度 ¹⁾ /μg·m ⁻³									
Table 2 Concentrations of PM _{2.5} and water-soluble ions in the southern Sichuan urban agglomeration and other regions/μg·m ⁻³									
区域	城市	观测日期(年-月-日)	ρ(PM _{2.5})	ρ(NO ₃ ⁻)	ρ(SO ₄ ²⁻)	ρ(NH ₄ ⁺)	ρ(K ⁺)	ρ(Cl ⁻)	文献
川渝	内江	2018-11-07 ~ 2018-11-19	51.0	8.6	6.0	4.0	1.0	1.0	本研究
	自贡		69.5	10.8	7.0	5.5	1.5	1.3	本研究
	宜宾		72.0	10.8	7.3	5.2	1.3	0.8	本研究
	泸州		76.1	11.2	7.7	5.5	1.5	1.1	本研究
	成都	2017-09 ~ 2017-11	58.8	15.2	10.0	6.7	1.2	2.8	[19]
	重庆	2017-09 ~ 2017-11	68.8	7.5	10.9	4.9	0.7	0.7	[20]
京津冀	北京	2018-09 ~ 2018-11	58.1	14.5	6.0	—	—	—	[21]
	唐山	2017-09 ~ 2017-11	61.0	11.5	9.8	11.1	2.0	—	[22]
	张家口	2019-10-17 ~ 2019-11-16	43.0	5.3	2.6	2.1	—	0.3	[23]
长三角	南京	2017-10	85.0	14.4	11.5	10.0	1.1	2.7	[24]
	杭州	2019-09 ~ 2019-11	70.8	14.7	8.6	6.6	0.7	0.8	[25]
华中	武汉	2016-10 ~ 2016-11	76.7	6.2	6.7	6.5	0.3	0.6	[26]
	长沙	2017-09 ~ 2017-11	56.3	10.6	10.5	5.6	0.8	0.7	[27]
珠三角	广州	2014-09 ~ 2014-11	48.0	1.0	11.4	4.4	0.6	0.1	[28]
	珠海	2016-09 ~ 2016-11	—	1.4	8.8	4.4	0.4	0.1	[29]

1) “—”表示文献中没有相关数据

盆地的成都而和重庆相近,高于京津冀地区,低于长三角地区,高于华中地区的长沙而低于武汉,且高于珠三角地区,可见川南城市群 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 在全国处于较高水平.

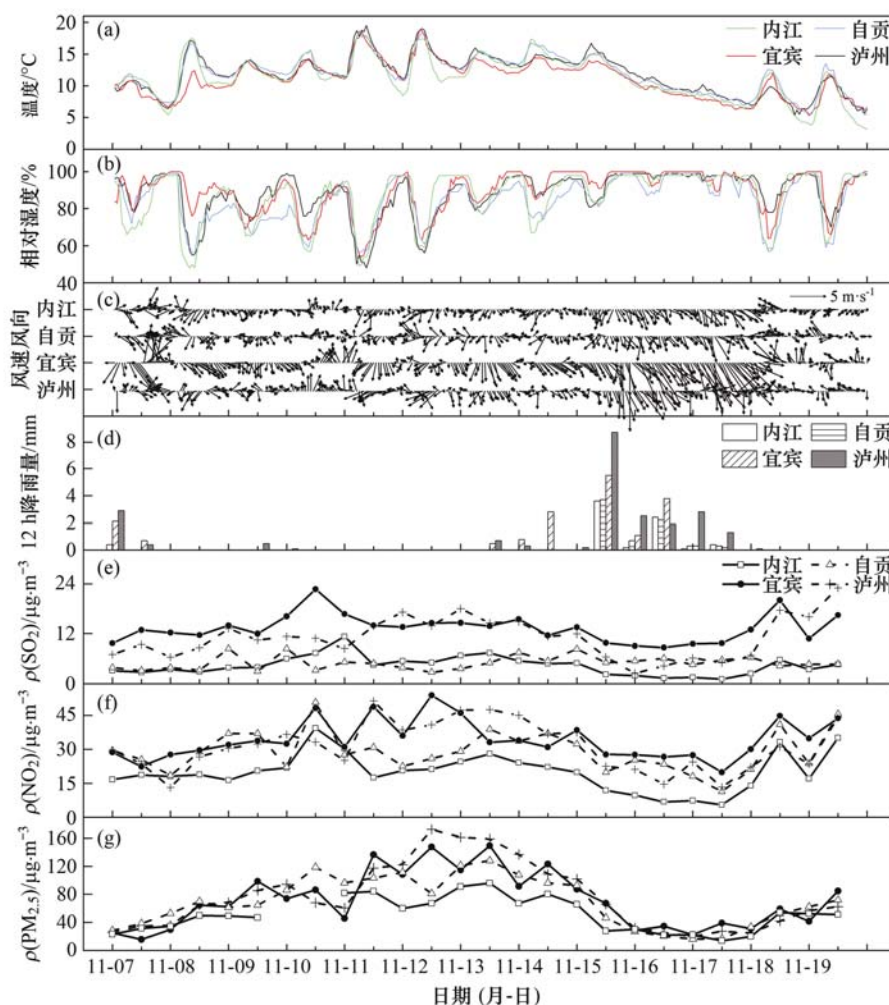


图2 采样期间温度、相对湿度、风速风向、12 h 降雨量、 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的时间变化

Fig. 2 Time series of temperature, humidity, wind, 12 h precipitation, $\rho(\text{SO}_2)$, $\rho(\text{NO}_2)$, and $\rho(\text{PM}_{2.5})$ during sampling period

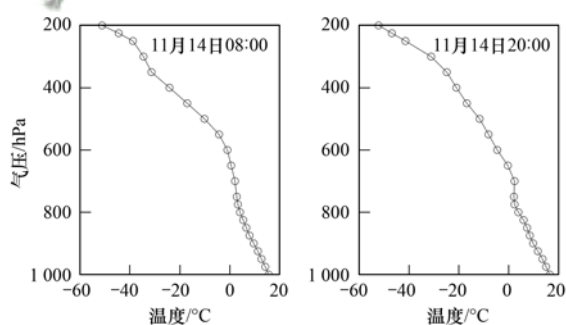


图3 宜宾2018年11月14日08:00和20:00的温度垂直廓线

Fig. 3 Vertical profiles of temperature at 08:00 and 20:00 in Yibin on November 14, 2018

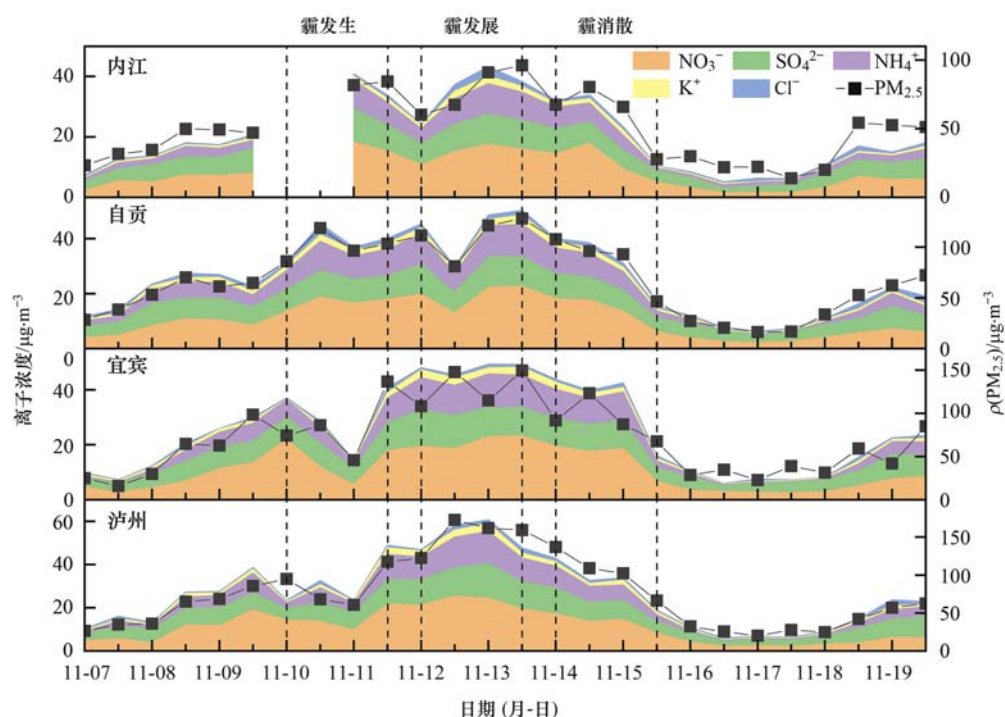
2.1.2 水溶性离子浓度水平

图4为川南城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 和水溶性离子浓度变化,各城市水溶性离子浓度变化较为一致且与其 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 呈同步变化.水溶性离子浓度相对大小为: $\rho(\text{NO}_3^-) > \rho(\text{SO}_4^{2-}) > \rho(\text{NH}_4^+) > \rho(\text{K}^+) = \rho(\text{Cl}^-)$ (内江)或 $> \rho(\text{Cl}^-)$ (泸州、自贡和宜宾). NO_3^- 是该区域大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中首要离子组分, $\rho(\text{NO}_3^-)$ 为 $8.6 \sim 11.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,在 $\text{PM}_{2.5}$ 占比为 $14.7\% \sim 16.9\%$.该

区域 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 高于重庆、张家口、武汉和珠三角地区,与唐山和长沙接近,低于成都、北京和长三角地区(表2).此外,与其他区域 $\rho(\text{K}^+)$ 普遍低于 $\rho(\text{Cl}^-)$ 不同,该区域 $\rho(\text{K}^+) \geq \rho(\text{Cl}^-)$,处于较高水平,仅次于 $\rho(\text{SNA})$,对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献为 $1.8\% \sim 2.2\%$,大于其他地区,这可能与该区域秋收季节生物质燃烧活动较强有关.秸秆露天焚烧是生物质燃烧的一种重要形式,有研究表明川南地区是四川省内秸秆焚烧排放的高值区^[30].川南城市群区域平均 $\rho(\text{SNA})$ 为 $(22.4 \pm 13.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,占 $\text{PM}_{2.5}$ 的比例为 33.3% ,该浓度高于张家口、武汉和珠三角地区,低于成都、唐山、长三角地区和长沙,与重庆相近(表2),在全国处于中等水平.4个城市 $\rho(\text{SNA})$ 为: $(24.4 \pm 15.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (泸州) $> (23.3 \pm 14.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (宜宾) $= (23.3 \pm 12.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (自贡) $> (18.6 \pm 11.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (内江),占 $\text{PM}_{2.5}$ 的比例分别为 32.1% 、 32.4% 、 33.5% 和 36.5% .

2.2 “大气十条”实施中期与结束对比

本研究比较了川南城市群2015年(“大气十

图4 川南城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 及水溶性离子浓度变化Fig. 4 Concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ and water-soluble ions in the southern Sichuan urban agglomeration

条”实施中期)和2018年(“大气十条”实施结束)秋季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{SNA})$ 、 $\rho(\text{SO}_2)$ 和 $\rho(\text{NO}_2)$ (表3). 2015年该区域秋季平均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $52.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[31],至2018年, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 增加了 $14.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (28.5%). 2015年,各城市秋季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)为:70.3(自贡)>48.9(宜宾)>45.0(泸州) $\approx$ 44.8(内江),2018年自贡同期 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 与2015年持平,而内江、宜宾和泸州 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别增加了13.8%、47.2%和69.1%,其中泸州 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 增幅最为明显,由2015年川南城市群中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最低城市转为2018年最高的城市.在内江,相比于“大气十条”实施前(2012年)秋季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ ($81.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[32],实施中期(2015年) $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 下降35.6%,而由实施中期至实施结束(2018年), $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 反而有所升高,这说明“大气十条”的实施对内江 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的控制具有显著成效,但随着减排措施的推进,进一步降低 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的难度越来越大. $\rho(\text{SNA})$ 的变化显示,相比于2015年,2018年各城市 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 增加了36.7%~116.0%, $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 则降低了19.8%~40.2%, $\rho(\text{NH}_4^+)$ 变化小,使得川南城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 污染由以 SO_4^{2-} 为主(2015年)转变为以 NO_3^- 为主(2018年). $\rho(\text{NO}_3^-)$ 的急剧增加表明,为减轻川南城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 污染,迫切需要控制 NO_x 的排放.耿冠楠等^[8]在我国东部地区的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中也发现, SO_4^{2-} 比例下降而 NO_3^- 比例升高,

SO_4^{2-} 的减少会释放出游离的 NH_3 ,且由于缺乏对 NH_3 排放的控制,大气中 NH_3 浓度较高,可以促进大气中硝酸盐的二次生成,从而部分抵消了 NO_x 减排带来的成效.许艳玲等^[33]通过中国 NH_3 减排对控制 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的敏感性的研究发现, NH_3 减排对硫酸盐的影响相对较小,但对控制 $\text{PM}_{2.5}$ 、硝酸盐和铵盐的敏感性较强,并指出,对于河北、河南和成渝等 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较重而 NH_3 排放量大的地区, NH_3 减排对控制 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的效果尤为突出.相比于2015年,2018年川南城市群 $\rho(\text{SO}_2)$ 均下降,降幅为26.7%~81.0%. $\rho(\text{NO}_2)$ 变化具有差异,内江 $\rho(\text{NO}_2)$ 降低,泸州无变化,自贡和宜宾分别升高3.6%和21.4%.但是,自贡和宜宾 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 的增幅明显高于 $\rho(\text{NO}_2)$ 增幅,内江 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 甚至不降反升,而各城市 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 降幅小甚至有所升高,这很可能与该区域较高的 NH_3 排放有关.因此,为更有效地控制 $\text{PM}_{2.5}$ 污染,未来在继续控制 NO_x 的基础上,还应加强对 NH_3 的减排工作.

2.3 霾过程中水溶性离子浓度变化

根据文献^[34],本研究将区域日均 $\rho(\text{PM}_{2.5}) > 75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的时段判定为霾污染过程(11月10~15日),并划分不同阶段,即 $\rho(\text{PM}_{2.5}) < 115 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时为霾发生阶段(11月10~11日), $\rho(\text{PM}_{2.5}) \geq 115 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时为霾发展阶段(11月12~13日), $\rho(\text{PM}_{2.5}) < 115 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 并最终 $< 75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的时段为霾消散阶段(11月14~15日).霾污染过程中,区

表 3 2015 与 2018 年 PM_{2.5}、水溶性离子、SO₂ 和 NO₂ 浓度对比/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 3 Comparison of PM_{2.5}, water-soluble ions, SO₂, and NO₂ between 2015 and 2018/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

项目	2015-09-14 ~ 2015-11-30 ^[31]				2018-11-07 ~ 2018-11-19 (本研究)			
	内江	自贡	宜宾	泸州	内江	自贡	宜宾	泸州
$\rho(\text{PM}_{2.5})$	44.8	70.3	48.9	45.0	51.0	69.5	72.0	76.1
$\rho(\text{NO}_3^-)$	4.5	7.9	5.0	5.2	8.6	10.8	10.8	11.2
$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	8.5	11.7	9.3	9.6	6.0	7.0	7.3	7.7
$\rho(\text{NH}_4^+)$	4.5	5.7	5.2	4.9	4.0	5.5	5.2	5.5
$\rho(\text{SO}_2)$	21	16	24	15	4	5	13	11
$\rho(\text{NO}_2)$	29	28	28	31	19	29	34	31

域平均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 达 $(97.1 \pm 32.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,内江、自贡、宜宾和泸州 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为 (72.2 ± 19.5) 、 (99.2 ± 21.9) 、 (102.7 ± 32.9) 和 $(114.3 \pm 38.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,是清洁天的 2.0、2.2、2.3 和 2.6 倍.霾天,4 个城市各水溶性离子浓度均大幅度升高(图 4),其中 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 的增幅最大,霾天是清洁天的 3.1~3.6 倍,其次是 $\rho(\text{NO}_3^-)$,为 2.7~3.0 倍, $\rho(\text{K}^+)$ 为 2.1~2.7 倍, $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 为 1.6~1.8 倍,最低是 $\rho(\text{Cl}^-)$,为 1.4~1.7 倍.在霾消散阶段,离子浓度显著下降,下降速率为 $\text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{K}^+ > \text{Cl}^-$,且夜间快于白天.相比于清洁天,4 个城市 SNA 中 NO_3^- 和 NH_4^+ 在霾天对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献均增强,其中 NO_3^- 由 12.3%~14.3%增加至 14.9%~19.4%,主要在霾发生阶段达到最大; NH_4^+ 由 5.1%~6.5%增加至 7.6%~9.5%,在霾发展阶段达到最大;而 SO_4^{2-} 的贡献均减弱,由 11.7%~13.2%

下降至 8.8%~11.1%.这导致内江、自贡、宜宾和泸州 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值分别由清洁天的 1.0、1.0、1.1 和 1.1,上升至霾天的 1.7、1.9、1.8 和 1.7,说明该区域霾天移动源对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的影响增大.这主要是由于霾天 $\rho(\text{NO}_2)$ 升高和其向 NO_3^- 的转化大大增强所致,表 4 显示,4 个城市表观氮氧化率 NOR [计算公式为 $[\text{NO}_3^-]/([\text{NO}_3^-] + [\text{NO}_2])$]由清洁天的 0.11~0.17 上升至霾天的 0.24~0.32,增加了 60.0%~118.2%. $\rho(\text{SO}_2)$ 虽有增加,但其向 SO_4^{2-} 的转化并无明显增强甚至出现下降,SOR [计算公式为 $[\text{SO}_4^{2-}]/([\text{SO}_4^{2-}] + [\text{SO}_2])$]在清洁天和霾天分别为 0.22~0.51 和 0.30~0.53,其中霾天内江 SOR 略有降低,其他 3 个城市增加了 13.3%~36.4%.说明硝酸盐的二次生成是此次霾污染过程形成的主要化学机制,这和在北京^[21]、成都^[13]和重庆^[15]的研究结果一致.

表 4 清洁天和霾天 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、SOR 和 NOR 值

Table 4 The $\rho(\text{SO}_2)$, $\rho(\text{NO}_2)$, SOR, and NOR on clean and haze days

城市	$\rho(\text{SO}_2)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$		$\rho(\text{NO}_2)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$		SOR		NOR	
	清洁天	霾天	清洁天	霾天	清洁天	霾天	清洁天	霾天
内江	3.0	5.9	17.0	23.5	0.51	0.49	0.17	0.32
自贡	4.8	5.3	27.6	30.9	0.44	0.53	0.14	0.29
宜宾	12.1	14.7	30.7	38.4	0.22	0.30	0.11	0.24
泸州	9.7	12.7	25.0	38.6	0.30	0.34	0.15	0.24

2.4 后向轨迹分析

对川南城市群秋季清洁天和霾天气流轨迹分别

进行聚类(图 5),并分析各类气流在霾天对川南城市群 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{SNA})$ 的影响(表 5).在清洁天,

表 5 霾天各类轨迹特征和对应的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 、 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+)$

Table 5 Trajectory paths, occurrence probabilities, and the corresponding $\rho(\text{PM}_{2.5})$, $\rho(\text{NO}_3^-)$, $\rho(\text{SO}_4^{2-})$, and $\rho(\text{NH}_4^+)$ on haze days

城市	轨迹	出现概率 /%	途经区域	$\rho(\text{PM}_{2.5})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{NO}_3^-)$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{NH}_4^+)$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
内江	1	25.0	绵阳、德阳、成都和资阳	81.8	18.3	10.8	9.5
	2	75.0	重庆、达州、广安和资阳	71.2	13.5	7.7	6.6
自贡	1	25.0	遂宁、德阳、成都、眉山和内江	100.5	16.3	8.8	8.6
	2	75.0	达州、广安、重庆、资阳和内江	98.8	16.8	8.7	8.6
宜宾	1	50.0	乐山和自贡	82.9	13.7	8.0	6.0
	2	50.0	广安、重庆、资阳、内江和自贡	122.5	20.2	11.0	11.1
泸州	1	33.3	攀枝花、凉山、昭通、宜宾和重庆	116.5	15.1	10.3	8.1
	2	66.7	广安和重庆	113.2	17.9	10.0	8.9

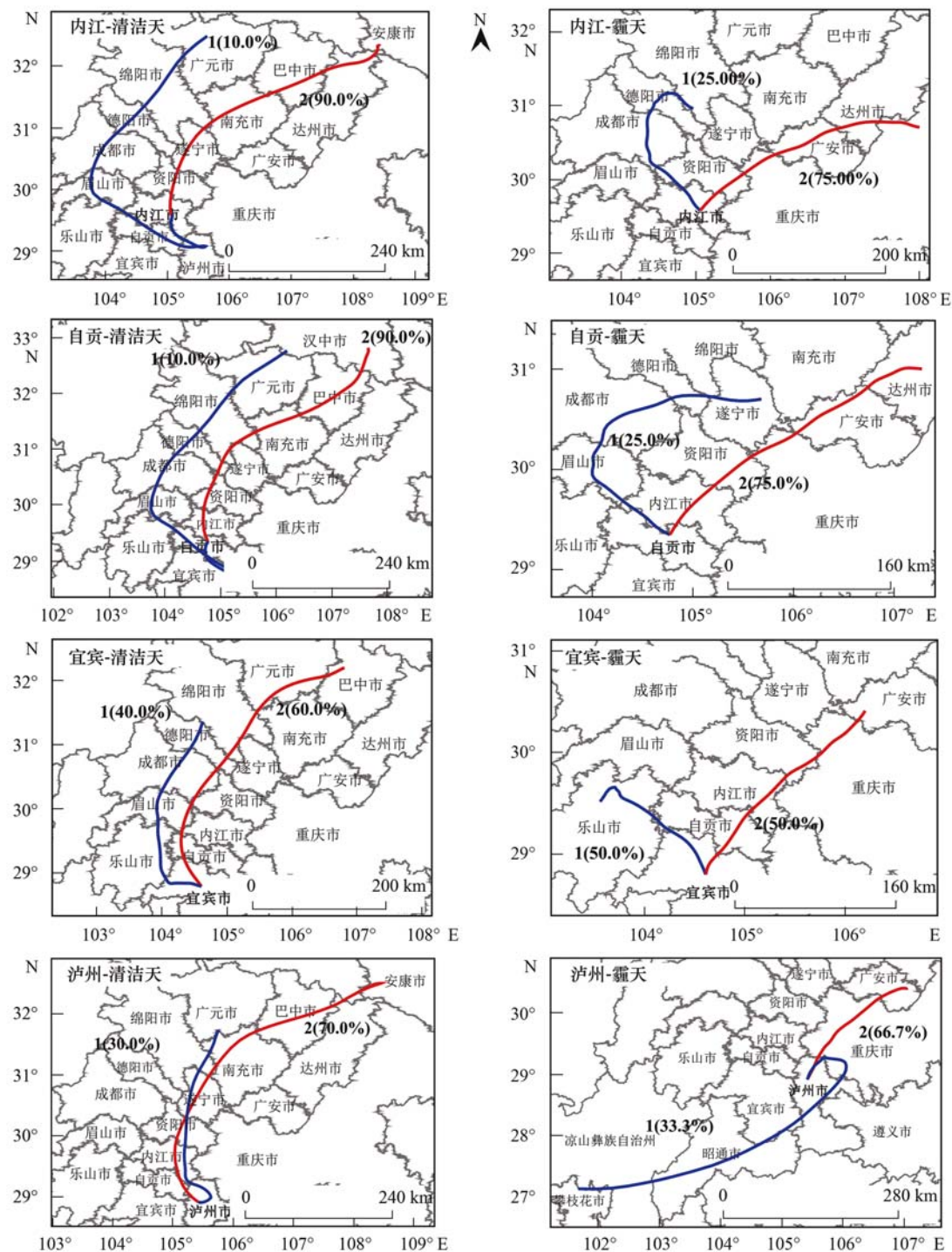


图5 清洁天和霾天48 h后向轨迹聚类

Fig. 5 The 48 h backward air-mass trajectories on clean days and haze days

4个城市的气流轨迹均来自东北方向,途经川东北和成都平原地区,其中主要源于陕西南部的轨迹2占比更高,轨迹更长,对应污染物浓度较低.在霾天,各城市的气流轨迹则来自偏西和东北两个方向,且由于霾天静稳的天气形势导致气流移动速度变慢和轨迹变短,霾天川南城市群主要受四川盆地内区域输送的影响.在内江和自贡,占比较低的偏西气流轨迹和占比较高的东北轨迹对应污染物浓度相近.在宜宾,两类轨迹占比相同,但东北方向轨迹2(途经

重庆等污染较为严重城市)对应污染物浓度明显高于西北方向轨迹1.与其他城市不同,泸州存在一类西南方向跨省气流轨迹,其来源于攀枝花,途经凉山、云南东北部、宜宾和重庆,其传输距离长,传输高度高,到达本地后气流下沉,污染物不易扩散,导致对应污染物浓度较高.4个城市在清洁天和霾天都受到占比较高的东北方向气流输送的影响,宜宾和泸州由于南部地势高(表1),会阻碍污染物向南输送导致污染物聚集.相比于清洁天,霾天东北方向

气流轨迹均经过重庆,易受到来自重庆的污染物输送的影响,且霾天各城市增加了偏西方向的气流轨迹,虽然其占比较低,但对应污染物浓度较高。

3 结论

(1)2018 年秋季川南城市群区域平均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $(67.2 \pm 38.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,在全国处于较高水平,泸州和宜宾 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较为严重,内江相对较轻;SNA 是该区域 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要组成,平均 $\rho(\text{SNA})$ 为 $(22.4 \pm 13.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,在 $\text{PM}_{2.5}$ 中占比为 33.3%,其中 NO_3^- 为首要离子组分。

(2)由“大气十条”实施中期(2015 年)至实施结束(2018 年),内江、宜宾和泸州秋季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别增加了 13.8%、47.2%和 69.1%,自贡持平;从 2015~2018 年,各城市秋季 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 增加了 36.7%~116.0%, $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 降低了 19.8%~40.2%, $\rho(\text{NH}_4^+)$ 变化较小,川南城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 由以 SO_4^{2-} 污染为主(2015 年)转为以 NO_3^- 污染为主(2018 年),为有效控制 $\text{PM}_{2.5}$ 污染,需继续加大对 NO_x 的控制,并在此基础上加强对 NH_3 的减排。

(3)霾天,各城市 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 显著增加,分别是清洁天的 1.6~1.8、2.7~3.0 和 3.1~3.6 倍, $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值由 1.0~1.1 (清洁天)上升至 1.7~1.9 (霾天),霾天川南城市群移动源对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的影响增大;同时表观氮氧化率 NOR 增加了 60.0%~118.2%,而表观硫氧化率 SOR 增幅较小甚至下降,说明硝酸盐的二次生成是此次霾污染过程形成的主要化学机制。

(4)霾天川南城市群主要受四川盆地内东北和偏西方向气流输送的影响,其中占比较高的东北方向气流轨迹均经过重庆,说明该区域易受到来自重庆的污染物输送的影响。

参考文献:

- [1] Cheng Y F, Zheng G J, Wei C, *et al.* Reactive nitrogen chemistry in aerosol water as a source of sulfate during haze events in China[J]. *Science Advances*, 2016, **2**(12), doi: 10.1126/sciadv.1601530.
- [2] Zhang R Y, Wang G H, Guo S, *et al.* Formation of urban fine particulate matter[J]. *Chemical Reviews*, 2015, **115**(10): 3803-3855.
- [3] Zhang Q, Quan J N, Tie X X, *et al.* Effects of meteorology and secondary particle formation on visibility during heavy haze events in Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **502**: 578-584.
- [4] Song C B, He J J, Wu L, *et al.* Health burden attributable to ambient $\text{PM}_{2.5}$ in China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 575-586.
- [5] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [6] 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.
- [7] 薛涛, 刘俊, 张强, 等. 2013~2017 年中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的快速改善及其健康效益[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, **50**(4): 439-452.
- Xue T, Liu J, Zhang Q, *et al.* Rapid improvement of $\text{PM}_{2.5}$ pollution and associated health benefits in China during 2013-2017[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, **62**(12): 1847-1856.
- [8] 耿冠楠, 肖清扬, 郑逸璇, 等. 实施《大气污染防治行动计划》对中国东部地区 $\text{PM}_{2.5}$ 化学成分的影响[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, **50**(4): 469-482.
- Geng G N, Xiao Q Y, Zheng Y X, *et al.* Impact of China's air pollution prevention and control action plan on $\text{PM}_{2.5}$ chemical composition over eastern China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, **62**(12): 1872-1884.
- [9] 王跃思, 李文杰, 高文康, 等. 2013~2017 年中国重点区域颗粒物质量浓度和化学成分变化趋势[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, **50**(4): 453-468.
- Wang Y S, Li W J, Gao W K, *et al.* Trends in particulate matter and its chemical compositions in China from 2013-2017 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, **62**(12): 1857-1871.
- [10] 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.
- [11] Liao T T, Gui K, Jiang W T, *et al.* Air stagnation and its impact on air quality during winter in Sichuan and Chongqing, southwestern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **635**: 576-585.
- [12] 汤宇磊, 杨复沫, 詹宇. 四川盆地 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 高分辨率时空分布及关联分析[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(12): 4950-4958.
- Tang Y L, Yang F M, Zhan Y. High resolution spatiotemporal distribution and correlation analysis of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} concentrations in the Sichuan Basin [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(12): 4950-4958.
- [13] Huang X J, Zhang J K, Luo B, *et al.* Water-soluble ions in $\text{PM}_{2.5}$ during spring haze and dust periods in Chengdu, China: Variations, nitrate formation and potential source areas [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **243**: 1740-1749.
- [14] 冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 等. 成都夏冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子污染特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3012-3020.
- Feng Y P, Zhang J K, Huang X J, *et al.* Pollution characteristics of water-soluble inorganic ions in Chengdu in summer and winter[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3012-3020.
- [15] Tian M, Wang H B, Chen Y, *et al.* Highly time-resolved characterization of water-soluble inorganic ions in $\text{PM}_{2.5}$ in a humid and acidic mega city in Sichuan Basin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **580**: 224-234.
- [16] 刘佳, 马振峰, 孙晟. 1981-2014 年四川不同强度霾时空特征及气候成因研究[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(12): 4328-4339.
- Liu J, Ma Z F, Sun Y. Spatial-temporal characteristics of haze days with different intensities in Sichuan during 1981-2014 and

- their climate causes[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(12): 4328-4339.
- [17] 周杨, 罗彬, 杨文文, 等. 基于 2012—2018 年内江市 $PM_{2.5}$ 化学组分变化对《大气污染防治行动计划》实施效果的评估[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(3): 563-571.
- Zhou Y, Luo B, Yang W W, *et al.* Evaluation of effects of *Air pollution prevention and control action plan* based on variations of chemical components in $PM_{2.5}$ during 2012-2018 in Neijiang City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(3): 563-571.
- [18] 郭振东, 朱彬, 王红磊, 等. 长江三角洲霾天气 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子特征及来源解析[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(3): 928-938.
- Guo Z D, Zhu B, Wang H L, *et al.* Characteristics and source analysis of water-soluble ions in $PM_{2.5}$ in the haze weather over in Yangtze River Delta [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(3): 928-938.
- [19] Wu P, Huang X J, Zhang J K, *et al.* Characteristics and formation mechanisms of autumn haze pollution in Chengdu based on high time-resolved water-soluble ion analysis [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(3): 2649-2661.
- [20] 彭超, 张丹, 方维凯, 等. 重庆市不同粒径颗粒物中水溶性离子污染特征[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(10): 4529-4540.
- Peng C, Zhang D, Fang W K, *et al.* Characteristics of water-soluble ions in multi-size particles in Chongqing [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(10): 4529-4540.
- [21] Huang X J, Tang G Q, Zhang J K, *et al.* Characteristics of $PM_{2.5}$ pollution in Beijing after the improvement of air quality [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **100**: 1-10.
- [22] 彭猛, 崔璐璐, 王磊, 等. 唐山市大气 $PM_{2.5}$ 季节污染特征及来源分析[J]. *生态环境学报*, 2020, **29**(9): 1855-1861.
- Peng M, Cui L L, Wang L, *et al.* Seasonal characteristics and sources of $PM_{2.5}$ in Tangshan [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, **29**(9): 1855-1861.
- [23] Liu Y F, Li C L, Zhang C, *et al.* Chemical characteristics, source apportionment, and regional contribution of $PM_{2.5}$ in Zhangjiakou, Northern China: a multiple sampling sites observation and modeling perspective [J]. *Environmental Advances*, 2021, **3**, doi: 10.1016/j.envadv.2021.100034.
- [24] 王鑫, 安俊琳, 苏筱倩, 等. 南京北郊水溶性离子污染特征及其光学特性[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(2): 506-512.
- Wang X, An J L, Su X Q, *et al.* Characteristics and optical properties of water-soluble ion pollution in the northern suburbs of Nanjing [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(2): 506-512.
- [25] Jin Z F, Qian L J, Shi Y S, *et al.* Quantifying major NO_x sources of aerosol nitrate in Hangzhou, China, by using stable isotopes and a Bayesian isotope mixing model [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **244**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117979.
- [26] 程渊, 吴建会, 毕晓辉, 等. 武汉市大气 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子污染特征及来源[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(1): 189-196.
- Cheng Y, Wu J H, Bi X H, *et al.* Characteristics and source apportionment of water-soluble ions in ambient $PM_{2.5}$ in Wuhan, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(1): 189-196.
- [27] 丁新航, 梁越, 肖化云, 等. 长沙市秋季 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子特征及其来源解析[J]. *地球与环境*, 2019, **47**(2): 186-193.
- Ding X H, Liang Y, Xiao H Y, *et al.* Characteristics and sources of water soluble inorganic ions in fine particulate matter during autumn in Changsha [J]. *Earth and Environment*, 2019, **47**(2): 186-193.
- [28] Tao J, Zhang L M, Cao J J, *et al.* Source apportionment of $PM_{2.5}$ at urban and suburban areas of the Pearl River Delta region, south China-with emphasis on ship emissions [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 1559-1570.
- [29] 俞娟, 李明, 康辉, 等. 沿海城市珠海 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子特征及来源分析[J]. *地球环境学报*, 2020, **11**(2): 151-160.
- Yu J, Li M, Kang H, *et al.* Characteristics and sources of water-soluble ions in $PM_{2.5}$ in the coastal city of Zhuhai, China [J]. *Journal of Earth Environment*, 2020, **11**(2): 151-160.
- [30] 何敏, 王幸锐, 韩丽, 等. 四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1208-1216.
- He M, Wang X R, Han L, *et al.* Emission inventory of crop residues field burning and its temporal and spatial distribution in Sichuan province [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1208-1216.
- [31] 曹佳阳, 樊晋, 罗彬, 等. 川南四座城市 $PM_{2.5}$ 化学组分污染特征及其源解析[J]. *环境化学*, 2021, **40**(2): 559-570.
- Cao J Y, Fan J, Luo B, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of $PM_{2.5}$ in four urban environment of southern Sichuan [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(2): 559-570.
- [32] 陈源, 谢绍东, 罗彬. 内江市大气细颗粒物化学组成及其消光特征[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(2): 485-492.
- Chen Y, Xie S D, Luo B. Chemical characteristics of fine particle and its light extinction in Neijiang [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(2): 485-492.
- [33] 许艳玲, 薛文博, 雷宇, 等. 中国氨减排对控制 $PM_{2.5}$ 污染的敏感性研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(7): 2482-2491.
- Xu Y L, Xue W B, Lei Y, *et al.* Sensitivity analysis of $PM_{2.5}$ pollution to ammonia emission control in China [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(7): 2482-2491.
- [34] 王振彬, 刘安康, 卢文, 等. 霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5213-5223.
- Wang Z B, Liu A K, Lu W, *et al.* Change in characteristics of pollution gas and water-soluble ions at different development stages of haze [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5213-5223.

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)