

目次

“大气十条”实施期间南京市 PM _{2.5} 化学组成与来源的演变特征	陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)
河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位 PM _{2.5} 组分差异	王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)
廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)
天津市采暖季不同气团来向 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)
基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析	邓文博, 刘文娟 (38)
北京市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染数值响应解析	刘添强 (48)
长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单	田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李曼, 王鑫, 黄成 (58)
南京北郊工业乡村混合区秋季边界层 VOCs 垂直分布特征	王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)
广西柳城县 VOCs 组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性	吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 栗少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)
城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例	何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)
华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征	康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)
WRF 模式最优参数化方案在不同空气质量模式的应用	杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)
西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响	魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)
青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征	魏文淑, 祁建华, 常成 (127)
中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子	黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)
长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征	徐秋鸿, 刘曙光, 姜厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金字辰, 李鑫 (158)
人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共现性	秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)
我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估	何姝, 董慧岭, 任南琪 (180)
珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价	王思瑞, 张坤峰, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)
苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险	郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)
长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素	吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)
过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例	黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)
渭河微塑料污染现状与风险评价	山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)
不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响	王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)
苦草叶表附和和水体浮游细菌群落多样性格局及其影响因素	张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)
基于 16S rRNA 测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性	璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)
基于 eDNA 的硅藻群落时空异质性及生态健康评价	姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)
三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制	罗晓佼, 张钊, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)
自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征	宁嘉丽, 黄艳芬, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)
绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重远, 张文龙, 李华林 (303)
基于地理探测器的山西省 2000 ~ 2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析	邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究	徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)
青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性	胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)
四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素	刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)
宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析	陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪锦炉, 马进鹏, 梁翔宇 (356)
铜冶炼场地周边土壤重金属污染特征与风险评价	彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)
西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系	凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)
外源 Cd 在不同类型土壤中的稳定化特征	王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)
基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素	王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)
基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价	陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)
贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估	黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)
象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力	王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)
1 株高耐性肠杆菌的筛选及对铜、砷同步钝化	尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清 (436)
黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系	朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓妍, 韩新辉 (444)
设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素	方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)
优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益	王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)
缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响	侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)
黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能	南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)
红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应	管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)
半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征	赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)
基于 QMEC 分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力	张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)
中国主粮作物生物炭产量效应的 Meta 分析	于滨杭, 姬建梅, 王丽学, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)
生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的 Meta 分析	李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)
不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为	李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)
中国县城碳排放时空演变与异质性	宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)
近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移	向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)
中国 1991 ~ 2018 年突发环境事件时空特征及影响因素	余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)
季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应	张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)
《环境科学》征订启事(29) 《环境科学》征稿简则(57) 信息(443, 481, 530)	

河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位 $\text{PM}_{2.5}$ 组分差异

王申博¹, 王玲玲^{2*}, 范相阁³, 王楠², 马双良², 张瑞芹^{1*}

(1. 郑州大学生态与环境学院, 郑州 450001; 2. 河南省生态环境监测中心, 郑州 450046; 3. 河南省郑州生态环境监测中心, 郑州 450000)

摘要: 近年来,我国京津冀及其周边地区暴发了多次霾污染过程,受观测仪器等因素的限制,尚未有对河南省北部城市和农村霾污染的对比研究. 利用一系列在线高时间分辨率的观测仪器在河南省2个城市点位和3个农村点位对一次区域重污染过程(2018年1月12~25日)进行综合观测. 结果表明 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ (SNA) 是此次区域污染过程中5个点位 $\text{PM}_{2.5}$ 中占比最高的组分,位于53%~63%之间,以 NO_3^- 为主24%~32%,其次为 SO_4^{2-} (13%~17%). 相较于城市点位,农村点位 $\text{PM}_{2.5}$ 中有机物的占比更高,尤其是夜间. 随着污染的加重,SNA的占比上升,重污染时段可达67%. 此外,当区域受南部气团的传输影响时,5个点位 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NO_3^- 的占比增大;受北和东北部气团的传输影响时, $\text{PM}_{2.5}$ 中 SO_4^{2-} 和有机物的占比增大. 硝酸铵是导致霾过程中大气能见度下降最主要组分,并且硝酸铵和硫酸铵对城市点位的影响高于农村点位. 综上,城市和农村点位 $\text{PM}_{2.5}$ 组分差异显著,城市地区需继续加强对气态前体物的削减,农村地区需同时重视碳质气溶胶排放源的管控.

关键词: 河南省; 霾污染; 农村点位; 组分特征; 消光系数

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)01-0011-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202203047

Differences in $\text{PM}_{2.5}$ Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province

WANG Shen-bo¹, WANG Ling-ling^{2*}, FAN Xiang-ge³, WANG Nan², MA Shuang-liang², ZHANG Rui-qin^{1*}

(1. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Ecological Environment Monitoring Center of Henan Province, Zhengzhou 450046, China; 3. Zhengzhou Ecological Environment Monitoring Center of Henan Province, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In recent years, the Beijing-Tianjin-Hebei region and its surrounding areas have experienced multiple haze pollution processes. Owing to the limitation of observational instruments, there has not been a comparative study of haze pollution between urban and rural areas in northern Henan province. A series of high-time-resolution instruments were used during a regional heavy pollution process (January 12-25, 2018) at two urban sites and three rural sites. The results showed that SO_4^{2-} , NO_3^- , and NH_4^+ (SNA) were the components with the highest proportion in $\text{PM}_{2.5}$ at the five sites during the haze event with a range of 53%-63%, of which nitrate was the most important, accounting for 24%-32%, followed by sulfate, ranging from 13%-17%. Compared with urban sites, rural sites were more affected by organic matter, especially at night. With the aggravation of pollution, the proportion of SNA increased, reaching 67% during periods of heavy pollution. When the area was affected by the air mass transported from the south, the proportion of NO_3^- in $\text{PM}_{2.5}$ increased, and when the area was affected by the air transport in the north, the proportions of SO_4^{2-} and organic matter increased. Ammonium nitrate was the most important component that led to the decrease in atmospheric visibility during the haze process. Moreover, the contributions of ammonium nitrate and ammonium sulfate at the urban sites were higher than those at the rural sites. To summarize, there were significant differences in $\text{PM}_{2.5}$ components between the urban and rural sites. Urban areas need to continue to strengthen the reduction in gaseous precursors, and rural areas need to pay attention to the sources of carbonaceous aerosol.

Key words: Henan province; haze; rural site; chemical components; extinction coefficient

近年来,伴随着经济的高速发展,我国华北地区面临严峻的大气污染问题. 以 $\text{PM}_{2.5}$ (细颗粒物,即空气动力学当量直径小于或等于 $2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物)为首要污染物的秋冬季霾污染过程是影响我国空气质量的重要因素,也对人体健康、生态系统和大气能见度等造成显著影响^[1,2].

$\text{PM}_{2.5}$ 中主要化学组分包括水溶性离子、碳组分和金属元素等. Wang 等^[3]对我国27个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 组分的综述结果表明,硫酸根 (SO_4^{2-})、硝酸根 (NO_3^-) 和铵根 (NH_4^+) 离子 (SNA) 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的占比最高,约为6%~50%,其次是有机物 (organic matter, OM)、地壳物质 (crustal matter, CM) 和元素碳

(elemental carbon, EC). 我国华北地区秋冬季霾污染过程中,随着 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的增加,各化学组分的浓度明显上升,其中 SNA 浓度的增幅最大^[4]. 相较于清洁时段,天津市霾污染过程中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度分别上升4倍和2倍^[5];在北京市霾污染过程中, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的占比分别从8.9%、13.2%和7.2%上升到19.2%、18.5%和

收稿日期: 2022-03-05; 修订日期: 2022-04-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0212403); 郑州市 $\text{PM}_{2.5}$ 与 O_3 协同控制监测项目 (20210641A)

作者简介: 王申博 (1993~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分特征, E-mail: shibwang@zzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: lindaw2007@163.com; rqzhang@zzu.edu.cn

12.6%,而OM的占比从63.5%下降至37.7%,相似的变化趋势也发生在淄博、邯郸等城市的典型霾污染过程中^[6~8].此外,农村点位霾污染过程PM_{2.5}中SNA的占比也可达40%以上^[9~11].在长三角和西安地区的研究发现,农村点位PM_{2.5}中SNA的占比低于城市点位,而有机组分的占比更高,主要排放源差异的影响^[10,11].其中,生物质燃烧用于炊事和取暖是农村点位PM_{2.5}的典型贡献源^[11].此外,西安霾污染过程中农村地区受传输影响大于城市,而城市点位特征则相反^[10].综上,开展城市和农村点位霾污染过程中PM_{2.5}化学组分的对比研究,能够有效识别本地污染源特征.工业和农业发展并重的河南省北部城市如郑州、安阳、新乡和濮阳等是我国PM_{2.5}污染的高值区,也是京津冀传输通道上的重点城市^[12].在高排放和不利气象条件影响下,秋冬季重污染事件频发^[13,14].受观测仪器等因素的限制,河南省北部的大气霾污染的研究起步较晚,并且尚未有对该地区城市和农村地区的对比研究.

本文利用一系列在线高时间分辨率的观测仪器在河南省2个城市点位和3个农村点位对一次区域重污染过程进行连续观测,分析PM_{2.5}的组分特征,深入探究不同时段、不同污染程度和不同污染阶段的组分变化规律.本研究能够帮助人们深入了解河南省北部地区城市和农村点位区域霾污染过程中PM_{2.5}的组分特征,通过识别重污染形成的主要诱发因素,从而更好制定重污染应急管控措施.

1 材料与方法

1.1 采样时间和地点

本文在该地区布设5个点位进行综合观测,包含2个城市点位和3个农村点位,采样点位坐标见图1.观测时间为一次区域重污染过程,时段为2018年1月12~25日.郑州市城市观测点(U-ZZ)位于郑州大学新校区资源与材料协同创新中心6号楼楼顶(34.82°N,113.54°E),观测高度距离地面约20 m,周边以生活区为主.安阳市城市观测点(U-AY)位于河南安阳生态环境监测中心楼顶(36.09°N,114.41°E),距离地面约15 m,周边以生活区为主,安阳钢铁集团有限公司位于点位以西8 km左右.安阳市农村观测点(R-AY)位于安阳市柏庄镇辛店北街的大气综合观测站(36.22°N,114.39°E);新乡农村点位(R-XX)位于新乡市延津县班枣乡中学的大气综合观测站(35.38°N,114.30°E);濮阳市农村点位(R-PY)位于南乐县梁村乡的大气综合观测站(36.15°N,115.10°E),上述农村点位周边以乡镇和农田为主.

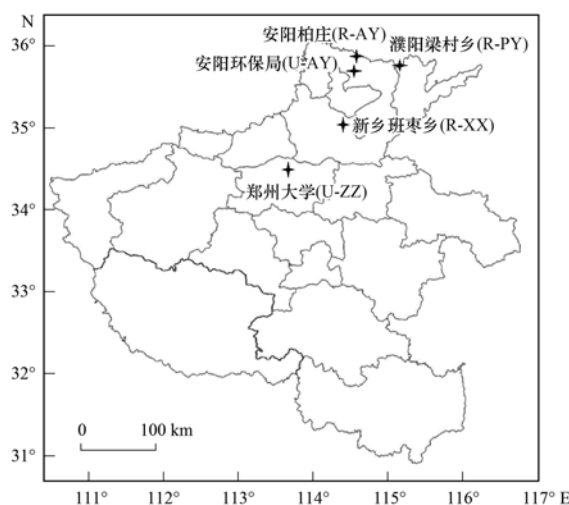


图1 采样点位分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites

1.2 采样仪器

U-ZZ点位和其它4个点位分别使用Xact-625i和Xact-625型环境空气金属在线分析仪(Cooper Environment Services, 美国)检测PM_{2.5}中元素浓度,如Al、Si、K、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、Ga、As、Se、Cd、Sn、Ba和Pb等.在U-ZZ点位使用大气中气溶胶及气体组分在线离子色谱监测系统(URG-9000D, Thermo Fisher Scientific, 美国)以及在其他4个点位使用气溶胶和气体检测仪(MARGA, Metrohm, 瑞士)分析PM_{2.5}中的水溶性离子,如Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、Cl⁻、NO₃⁻和SO₄²⁻.PM_{2.5}中EC和有机碳(organic carbon, OC)浓度采用美国沙漠研究所研制的碳分析仪(Model 4, Sunset Laboratory Inc, 美国).本研究中的PM₁₀、PM_{2.5}、NO₂、SO₂、CO和O₃监测仪器采用美国Thermo Fisher Scientific公司系列仪器.利用智能气象站(LUFFT-WS500, Sutron Corporation, 德国)同步观测气象参数,如气压、温度(temperature, T)、湿度(relative humidity, RH)、风向(wind direction, WD)和风速(wind speed, WS).具体仪器原理和质控措施见文献[12,15,16].

1.3 分析方法

1.3.1 分歧系数和相关系数

分歧系数(coefficients of divergence, CD)被广泛应用于评估不同点位颗粒物中组分数据之间的相似和差异程度^[17],计算公式如下:

$$CD = \sqrt{\frac{1}{m} + \sum_{i=1}^m \left(\frac{x_{ij} - x_{ik}}{x_{ij} + x_{ik}} \right)^2} \quad (1)$$

式中, x_{ij} 和 x_{ik} 分别表示j和k点位的i组分浓度; m表示组分数据的个数.当CD值接近0或者低于0.2时,可以认为两个点位之间的数据高度相似,

当 CD 值接近 1 时,表明点位之间数据差异性较大.

相关系数(r)是指变量之间的线性相关关系,可以用来研究两组数据是否具有相同的变化趋势.本文中相关系数采用 SPSS 21.0 软件计算的 Pearson 相关系数.

1.3.2 组分重构方法

PM_{2.5}中 CM 和 OM 的重构方法主要利用以下公式^[18]:

CM = 2.2 × [Al] + 2.49 × [Si] + 1.63 × [Ca] + 1.94 × [Ti] + 2.41 × [Fe] (2)

OM = f × [OC] (3)

式中,[Al]、[Si]、[Ca]、[Fe]、[Ti]和[OC]分别表示这些组分在 PM_{2.5}中的浓度($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).本文重构的 CM 理论上表示地壳物质以 Al₂O₃、SiO₂、CaO、Fe₂O₃/FeO、TiO₂ 和 K₂O 存在,最后所有氧化物浓度之和再乘 1.16 用来表示加上其它物质的总和^[18].为了计算未检测有机物中 H、O、N 和 S 等元素的浓度,通常使用公式(3)重构 OM 浓度,其中 f 是 OC 的折算系数.理论上在不同点位不同时段 OM 的氧

化程度和二次有机气溶胶生成量不同, f 的取值应有差异,选择范围可能从 1.2(新鲜的气溶胶)至 2.6(老化的气溶胶)^[18].我国 14 个城市的 OM/OC 比值的研究表明,我国北部城市冬季平均 f 值为 1.59 ± 0.18 ,因此本文中采用 1.6 作为 5 个点位的 f 值^[19].

1.3.3 消光系数估算

大气消光系数(b_{ext})是可见光在大气中传播单位距离时的相对衰减率($10^{-6}\cdot\text{m}^{-1}$, Mm^{-1}),本文采用 IMPROVE 推荐的消光系数计算公式估算重污染过程中各组分对大气消光系数的贡献^[20],计算公式如下:

$b_{\text{ext}} = 3f(\text{RH})[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{NH}_4\text{NO}_3] + 4[\text{OM}] + 10[\text{EC}] + [\text{CM}] + 0.6[\text{粗颗粒}]$ (4)

式中,3、4、10、1 和 0.6 分别表示各自组分对应的干散射效率($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$). $f(\text{RH})$ 指吸湿增长因子,其与 RH 的对应关系见表 1.式中 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 = 1.375[\text{SO}_4^{2-}]$, $\text{NH}_4\text{NO}_3 = 1.39[\text{NO}_3^-]$,OM 为重构的有机物浓度,EC 为观测的元素碳浓度,CM 为重构的地壳元素浓度,粗颗粒 = $\text{PM}_{10} - \text{PM}_{2.5}$.

表 1 不同 RH 范围下的吸湿增长因子 $f(\text{RH})$

Table 1 Hygroscopic growth factors $f(\text{RH})$ under different RH ranges

RH/%	1 ~ 40	40 ~ 45	45 ~ 50	50 ~ 55	55 ~ 60	60 ~ 65
$f(\text{RH})$	1	1.22	1.27	1.33	1.38	1.45
RH/%	65 ~ 70	70 ~ 75	75 ~ 80	80 ~ 85	85 ~ 90	>90
$f(\text{RH})$	1.55	1.65	1.83	2.1	2.46	3.17

2 结果与讨论

2.1 污染过程概述

2018 年 1 月 12 ~ 25 日我国暴发了一次典型的以河南北部城市为污染中心、覆盖整个华北平原且持续时间较长的重污染过程.以 PM_{2.5}为分析对象计算了污染过程中 5 个点位之间的分歧系数(CD)和 Pearson 相关系数(r)见表 2,可以看出 5 个点位 PM_{2.5}浓度的 r 值均高于 0.5,并且 PM_{2.5}的时间序列(图 2)也表明污染过程中 5 个点位 PM_{2.5}浓度变化趋势有明显相关性.点位之间 PM_{2.5}浓度

的 CD 值在 0.1 ~ 0.28 范围内,只有 U-ZZ 和 R-PY 点位与其他点位的 CD 值略大于 0.2,表明 PM_{2.5}浓度的空间分布差异较小.上述结果表明在此次区域污染过程中 5 个点位的 PM_{2.5}浓度变化趋势相似,可能是由于区域受相似的气象条件影响(图 2).但是,从污染过程中 PM_{2.5}浓度平均值来看(表 3),5 个点位 PM_{2.5}浓度值存在差异,其中 R-AY 点位 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最高 [$(227.3 \pm 130.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$],U-ZZ 点位 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最低 [$(175 \pm 110.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$],可能主要受点位周边排放源等因素的影响.

表 2 污染过程 5 个点位之间 PM_{2.5}的分歧系数(CD)和相关性(r)

Table 2 Coefficients of divergence (CD) and correlation coefficient (r) of PM_{2.5} among the five sites during the haze episode

点位	CD/ r			
	U-ZZ	U-AY	R-AY	R-XX
U-AY	0.25/0.55			
R-AY	0.25/0.58	0.1/0.97		
R-XX	0.24/0.69	0.17/0.86	0.19/0.88	
R-PY	0.28/0.73	0.2/0.80	0.24/0.84	0.23/0.71

结合表 3 中其它污染物浓度来看,U-AY 和 R-AY 点位的一次气态污染物 NO₂、SO₂ 和 CO 浓度平均值明显高于其它点位,其中 U-AY 点位的 $\rho(\text{NO}_2)$ 和 $\rho(\text{SO}_2)$ 分别达到 $(77 \pm 29.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(42.2 \pm 22.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,NO₂ 是国家年均二级标准的 1.9 倍,SO₂ 是国家年均一级标准的 2.1 倍;R-AY 点位

$\rho(\text{CO})$ 达到 $(3.8 \pm 1.7) \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,接近日均二级标准. R-XX 点位的气态污染物浓度最低,但是 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{SO}_2)$ 和 $\rho(\text{CO})$ 仍达到 $(54.7 \pm 24.5) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $(18.7 \pm 12.7) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(1.9 \pm 1.1) \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 综上可见,除颗粒物外,此次霾污染过程中还富含高浓度的气态污染物.

表 3 污染过程中 5 个点位大气污染物和气象参数

项目	U-ZZ	U-AY	R-AY	R-XX	R-PY
$\rho(\text{PM}_{2.5})/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	175.0 ± 110.7	212.4 ± 121.6	227.3 ± 130.3	215.3 ± 114.4	179.7 ± 107.3
$\rho(\text{PM}_{10})/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	211.3 ± 104.2	272.2 ± 134.2	257.0 ± 142.4	219.8 ± 112.7	219.8 ± 115.5
$\rho(\text{NO}_2)/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	67.1 ± 23.4	77.0 ± 29.4	74.8 ± 26.3	54.7 ± 24.5	61.9 ± 24.7
$\rho(\text{SO}_2)/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	25.6 ± 11	42.2 ± 22.4	33.3 ± 19.1	18.7 ± 12.7	25.5 ± 12.1
$\rho(\text{O}_3)/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	20.2 ± 18.9	24.1 ± 17.7	9.0 ± 11.9	19.1 ± 18.1	29.2 ± 19.1
$\rho(\text{CO})/\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	2.0 ± 0.8	3.0 ± 1.5	3.8 ± 1.7	1.9 ± 1.1	2.1 ± 0.9
$T/^\circ\text{C}$	1.9 ± 3.3	0.5 ± 3.5	-1.3 ± 3.2	-0.6 ± 3.6	-1.1 ± 3.7
RH/%	65.9 ± 12	62.1 ± 11.6	59.3 ± 10.8	62.5 ± 11.3	63.8 ± 12.1
WS/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1.2 ± 1	1.7 ± 0.8	1.3 ± 0.8	2.2 ± 1.5	1.3 ± 0.8

污染过程中的气象参数的变化趋势见图 2,此次污染过程 5 个点位具有相似的气象条件,可分为污染积累阶段(1 月 12 ~ 14 日)、污染持续阶段(1 月 14 ~ 21 日)和污染消散阶段(1 月 21 ~ 25 日). 在污染积累阶段 5 个点位的 T 和 RH 呈上升趋势,风向均以南风为主,PM_{2.5} 浓度持续上升. 在污染持

续时段大气 T 和 RH 值较高,同时风速降低到 $2 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,风向不定. 在污染消散阶段区域风速增大,风向转为北或东北风,RH 和 T 呈下降趋势,PM_{2.5} 浓度在急剧下降后持续缓慢降低. 可见,此次区域霾污染形成的气象条件特征是高湿、低风速和风向不定.

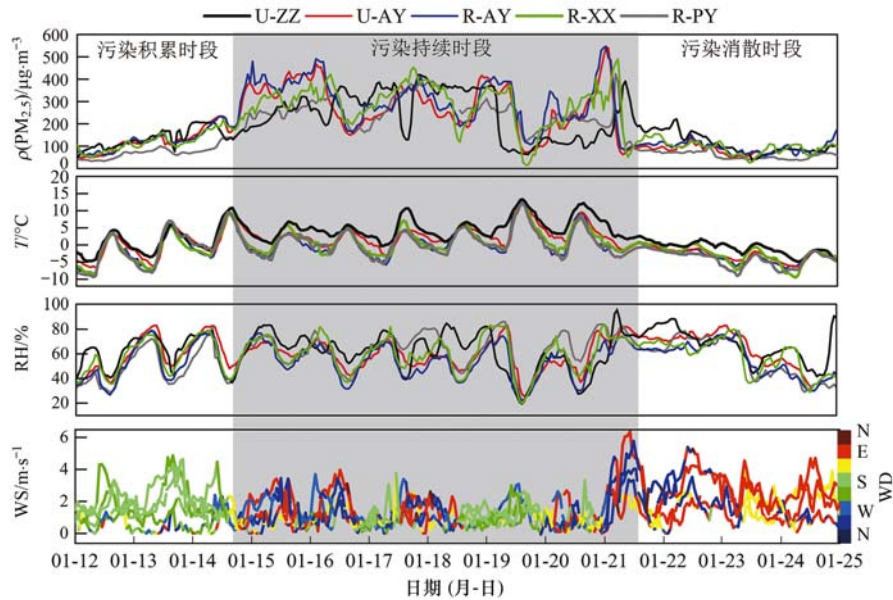


图 2 污染过程中 5 个点位的 PM_{2.5} 浓度和气象参数时间序列

Fig. 2 Temporal variations in PM_{2.5} concentration and meteorological parameters during the haze episode at the five sites

2.2 污染过程 PM_{2.5} 组分特征

2.2.1 组分浓度及与其它城市对比

霾污染过程中城市和农村点位 PM_{2.5} 主要组分的浓度见表 4. 两个城市点位中 NO₃⁻ 的浓度最高, 其次是 OM、SO₄²⁻ 和 NH₄⁺. U-ZZ 和 U-AY 点位 PM_{2.5} 中 NO₃⁻ 的占比分别为 32% 和 25%, SO₄²⁻ 占比

为 17% 和 15%, 总 SNA 占比分别达到 63% 和 55%. 上述结果表明 SNA 是此次 2 个城市点位霾污染过程中 PM_{2.5} 最主要的化学组分. 相较于 U-AY 点位, U-ZZ 点位 NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 的浓度和占比更高, 而 EC 和 OM 的浓度较低, 可见 U-ZZ 点位 PM_{2.5} 浓度受 SNA 生成的影响高于 U-AY 点位. 对比分析郑州和

安阳市污染源排放特征来看,2018 年郑州市机动车保有量 347.8 万辆,显著高于安阳市的 99 万辆^[21,22]. 机动车排放是城市大气中 NO_x 的主要贡献源,因此高强度的 NO_x 排放可能导致 U-ZZ 点位 PM_{2.5} 中 NO₃⁻ 浓度增加^[23]. 此外,安阳市是典型的重工业城市,其钢铁和焦化行业是颗粒物中 OM 的重要排放源,可能导致 U-AY 点位 PM_{2.5} 中 OM 的浓度升高^[24].

相较于 2015 年 1 月和 12 月 U-ZZ 点位 PM_{2.5} 的组分数据,此次污染过程 PM_{2.5} 中 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 的占比明显增大,其中 NO₃⁻ 的占比是 2015 年的 2 倍多;

表 4 城市和农村点位 PM_{2.5} 主要化学组分浓度/μg·m⁻³

Table 4 Summary of chemical components of PM_{2.5} in urban and rural sites/μg·m⁻³

组分	U-ZZ	U-AY	R-AY	R-XX	R-PY
NO ₃ ⁻	56.3 ± 32.3	42.9 ± 23.1	54.8 ± 28.4	47.3 ± 23	46.8 ± 27.2
NH ₄ ⁺	25.3 ± 12.2	25.9 ± 14.5	32.8 ± 18.6	24.9 ± 13.2	28.2 ± 18.1
SO ₄ ²⁻	29.3 ± 17.2	26.2 ± 14.3	32.2 ± 20.2	23.2 ± 13.9	28.1 ± 17
EC	5.6 ± 3.3	9.6 ± 6.1	9.6 ± 6.1	9.7 ± 5.6	7.3 ± 7.1
OM	32.6 ± 15.6	37.1 ± 27.3	61.0 ± 43.4	46.3 ± 24.3	60.3 ± 39.3

从表 4 中可以看出, R-XX 点位霾污染过程 PM_{2.5} 中 NO₃⁻ 的浓度仍是最高,而 R-AY 和 R-PY 点位 OM 的浓度最高. 相较于城市点位,3 个农村点位 SNA 的占比 (53% ~ 57%) 均低于 U-ZZ 点位 (63%),仅有 R-PY 点位 SNA 的占比 (57%) 略高于 U-AY 点位 (56%). 此外,农村点位 PM_{2.5} 中 OM 的占比 (26% ~ 34%) 均高于城市点位 (19% ~ 22%). 上述结果表明河南省北部农村点位霾污染过程中, PM_{2.5} 浓度受 SNA 生成的影响低于城市点位,受 OM 的影响高于城市点位,与长三角的观测结果一致^[32]. 相较于其它农村点位,本文 3 个农村点位 PM_{2.5} 中 NO₃⁻ 的占比均高于济南跑马岭 (22%)^[31]、南京东山 (26%)^[32] 和广州天湖 (7%)^[33]; NH₄⁺ 的占比相近; SO₄²⁻ 的占比均低于其它地区. 可见,河南省北部农村点位霾污染过程中, PM_{2.5} 浓度受 NO₃⁻ 生成的影响高于其它地区.

2.2.2 组分日变化特征

受污染源和气象条件等因素的影响, PM_{2.5} 组分具有显著的日变化特征. 分析 PM_{2.5} 重构组分占比的日变化特征见图 3,可以看出 5 个点位全天所有时段 SNA 在 PM_{2.5} 中的占比均最高. 此外, SNA 占比呈白天高夜间低的日变化特征,峰值主要集中在 13:00 ~ 17:00 之间,其中 U-ZZ 点位 SNA 的峰值占比最高达 70% 以上. 另一方面,2 个城市点位全天所有时段中 NO₃⁻ 的占比均高于 SO₄²⁻ 和 NH₄⁺,进一步证明 NO₃⁻ 是城市霾污染过程中 SNA 的最主要组分. OM 的日变化特征与 SNA 相反,夜间占比高于白天,与

EC 和 OM 的占比下降,并且 SO₄²⁻ 的占比也低于 2015 年 12 月^[25,26]. 这可能是由于近 3 年郑州市政府采取了燃煤替代、生物质禁燃、重污染预警等一系列管控措施,有效降低了碳质气溶胶及 SO₂ 的排放^[27]. 相较于我国其它重点城市, U-ZZ 点位 PM_{2.5} 中 NO₃⁻ 的占比均高于北京 (10% 和 13%)^[28,29]、天津 (14%)^[30]、济南 (16%)^[31] 和南京 (27%)^[32],并且 U-AY 点位 PM_{2.5} 中 NO₃⁻ 的占比也仅低于南京^[32]. 上述结果表明相较于往年以及其它地区,河南省北部城市点位霾污染过程中, PM_{2.5} 浓度受 NO₃⁻ 生成的影响更加显著,尤其是 U-ZZ 点位.

西安城市和农村点位观测的特征相似^[41]. 此外,农村点位夜间 OM 的占比可达 25% 以上,并且个别时段 OM 的占比高于 NO₃⁻,成为 PM_{2.5} 中占比最高的组分.

2.2.3 不同污染程度下组分特征

为研究不同 PM_{2.5} 浓度下组分变化特征,本文根据 PM_{2.5} 小时浓度值将污染过程分为 $\rho(\text{PM}_{2.5}) \leq 75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的清洁时段, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 在 $75 \sim 150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 范围内的污染时段和 $\rho(\text{PM}_{2.5}) > 150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的重污染时段. 不同污染程度下 5 个点位 PM_{2.5} 组分占比见图 4(a),随着污染的加重, U-ZZ 点位 SNA 的占比均呈上升趋势, NO₃⁻、SO₄²⁻ 和 NH₄⁺ 的占比从清洁时段的 25.7%、14.1% 和 14.2% 分别上升至重污染时段的 33.8%、17.6% 和 14.6%, SNA 占比达到 66%. 而 OM 和 CM 的占比均呈下降趋势,表明二次无机气溶胶,尤其是二次硝酸盐生成是此次重污染过程中 U-ZZ 点位 PM_{2.5} 浓度上升的主要贡献源,与我国其它城市重污染过程相似,比如北京、淄博和邯郸^[6~8]. 在 U-AY 点位,污染时段和重污染时段的 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 的占比略高于清洁时段,但是重污染时段相比污染时段的占比反而轻微下降. 此外,随着污染的加重, SO₄²⁻ 的占比下降,总的 SNA 占比在不同时段分别为 57.6%、61% 和 58.3%. 与之相反, EC 和 OM 的占比逐渐上升,重污染时段的占比分别达 6.3% 和 25.4%,明显高于 U-ZZ 点位的 3.4% 和 15.4%. 因此,虽然此次污染过程中 SNA 在 U-AY 点位 PM_{2.5} 中占比较高,但碳质气溶胶对 PM_{2.5} 浓度的

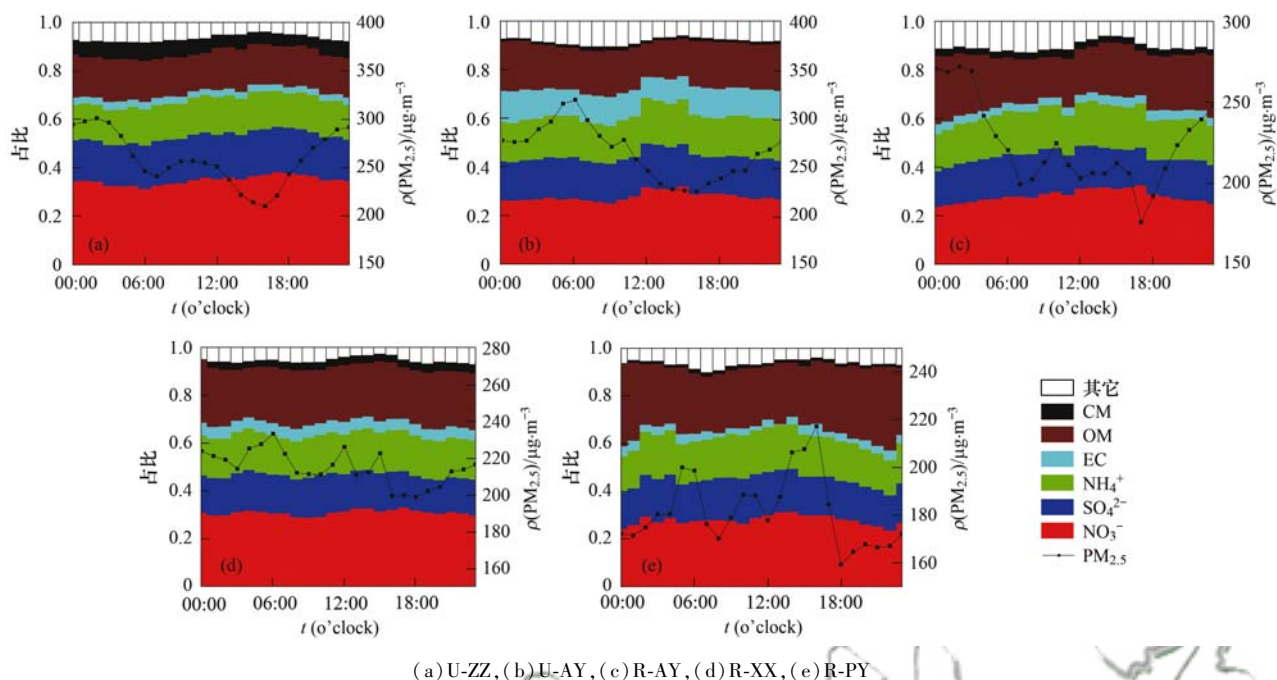


图3 污染过程期间5个点位化学组分的日变化特征

Fig. 3 Diurnal profiles of the chemical composition during the haze episode at the five sites

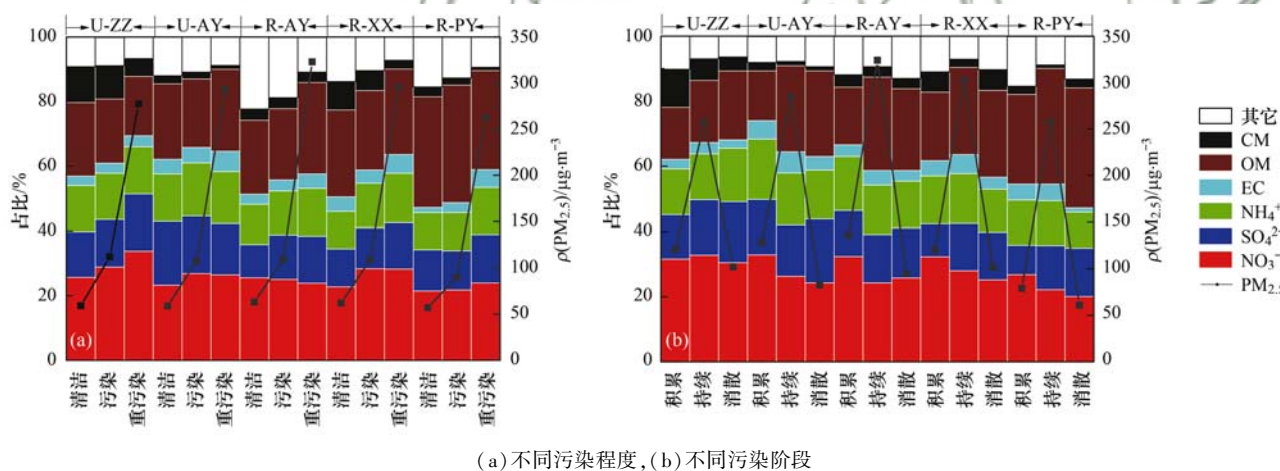


图4 不同污染程度和污染阶段下5个点位重构组分占比

Fig. 4 Fractions of the reconstructed chemical component at the five sites under different $PM_{2.5}$ concentrations and cases

上升贡献更显著,与2017年天津冬季污染特征相似^[30].

污染演变过程中3个农村点位的 $PM_{2.5}$ 组分变化存在显著差异.随着污染的加重,R-AY点位 NO_3^- 占比从25.6%轻微下降至23.9%, SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 占比则从清洁时段的10.2%和12.4%分别上升至14.5%和14.7%.另一方面,EC和OM的占比明显上升,其中OM从清洁时段的22.9%上升至重污染时段的28.3%,并且重污染时段OM的占比高于 NO_3^- ,成为 $PM_{2.5}$ 中最主要的组分.此外,R-AY点位重污染时段OM占比的增幅明显大于U-AY点位.可见,霾污染过程中R-AY点位 $PM_{2.5}$ 浓度的上升受碳质气溶胶的影响更显著,其原因可能是农村点位

周边的民用散煤和生物质燃烧排放大量的含碳组分^[32,33].随着污染的加重,R-XX和R-PY点位SNA在 $PM_{2.5}$ 中的占比增大,重污染时段分别达57.8%和53.4%, $PM_{2.5}$ 浓度的上升主要受SNA生成的影响.相较于R-PY点位,R-XX点位SNA在 $PM_{2.5}$ 中的占比更高,并且随着污染的加重,SNA的增幅大于R-PY点位,表明R-XX点位 $PM_{2.5}$ 浓度的上升受SNA生成的影响高于R-PY点位.

2.2.4 不同污染阶段组分特征

霾污染过程中不同污染阶段5个点位 $PM_{2.5}$ 浓度及其重构化学组分的占比如图4(b)所示.除U-ZZ点位外,污染积累阶段中其它4个点位 $PM_{2.5}$ 中 NO_3^- 的占比均高于污染持续阶段,并且5个点位

NO₃⁻ 的占比均明显高于污染消散阶段. 与之相反, 污染消散阶段 5 个点位 PM_{2.5} 中 SO₄²⁻ 和 OM 的占比均高于污染积累阶段. 由此可见, 南部的传输气团可能导致 PM_{2.5} 中 NO₃⁻ 的占比增大, 北和东北部的传输气团可导致 SO₄²⁻ 和 OM 的占比增大. 对比 2014 年郑州和平顶山市冬季的 PM_{2.5} 组分特征发现, 河南省南部平顶山市的 NO₃⁻ 占比为 15.8%, 明显高于郑州市的 13.9%^[25]. 此外, 当以东北风为主导风向时, 山东聊城市 PM_{2.5} 中 OM 的占比高达 38.8%, 显著高于本研究区域的结果^[34]. 上述现象可能是由于观测期间我国处于供暖期, 供暖分界线位于北纬 33° 附近的秦岭和淮河一带, 郑州市以南大部分区域不采取集中供暖^[35]. 因此, 研究区域以南地区受燃煤供暖等排放生成的 SO₄²⁻ 和 OM 影响较小, NO₃⁻ 在 PM_{2.5} 中的占比相应增大; 研究区域的北方和东北方城市气温低, 供暖需求大, 燃煤供暖、民用散煤、生物质燃烧等污染源的排放, 导致 PM_{2.5} 中 SO₄²⁻ 和 OM 的占比增大^[36].

在污染持续阶段中静稳、高湿的天气条件下, PM_{2.5} 主要来自本地积聚和二次生成, 从而更能反映点位周边污染源的贡献情况^[37]. 从图 4(b) 中可以看出, U-ZZ 和 U-AY 点位 SNA 的占比分别为 63.8% 和 58%, 均高于农村点位. 与之相反, 城市点位 OM 的占比均低于农村点位, 并且 R-AY 和 R-PY 点位 OM 的占比分别达到 28.7% 和 35.6%, 超过 NO₃⁻ 成为 PM_{2.5} 中占比最高的组分. 上述结果表明点位周边 SNA 生成对城市 PM_{2.5} 的影响高于农村, 而农村点位受 OM 的影响更显著.

2.3 组分对消光系数的影响

利用 IMPORVE 方法计算 5 个点位污染过程中的消光系数, 结果见图 5, 总消光系数位于 730.7 ~ 871.1 Mm⁻¹ 之间. 从组分占比来看, NH₄NO₃ 的贡献

率最大为 35.3% ~ 46.4%, 并且显著高于 2011 ~ 2013 年郑州市^[38] 的 23% ~ 25% 和 2014 年北京市^[39] 的 33%. 此外, NH₄NO₃ 对城市点位消光系数的贡献率高于农村点位. 城市点位 (NH₄)₂SO₄ 的贡献率为 25.5% ~ 25.8%, 也高于农村点位的 20.3% ~ 23.1%. 上述结果表明 SNA 生成对霾污染过程中城市点位大气能见度的影响大于农村点位. OM 对农村点位消光系数的贡献率达到 25.4% ~ 29.1%, 仅次于 NH₄NO₃, 并且高于城市点位的 16.0% ~ 18.8%, 表明 OM 对农村点位能见度的下降影响突出. 虽然 EC 在 PM_{2.5} 中占比小, 但是由于其干散射效率高, EC 的消光系数贡献也可达到 6.9% ~ 13.3%.

3 结论

(1) PM_{2.5} 中 SNA 的占比最高, 位于 52% ~ 63% 之间. 随着污染的加重, SNA 的占比上升, 重污染时段可达 66%, 其中 NO₃⁻ 是最主要组分. SNA 占比呈白天高夜间低的日变化特征, 而 OM 则反之.

(2) 当区域受南部气团传输影响时, PM_{2.5} 中的 NO₃⁻ 的占比增大; 受北和东北部气团传输影响时, PM_{2.5} 中 SO₄²⁻ 和 OM 的占比增大.

(3) 硝酸铵是导致大气能见度下降最主要组分.

(4) 农村点位 PM_{2.5} 中 OM 的占比大于城市点位.

(5) 硝酸铵和硫酸铵对城市点位消光系数的贡献高于农村点位, 而 OM 则反之.

参考文献:

- [1] 夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 等. 2000 ~ 2019 年中国 PM_{2.5} 时空演化特征[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 4832-4843.
Xia X S, Wang J H, Song W D, et al. Spatio-temporal evolution of PM_{2.5} concentration during 2000-2019 in China [J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 4832-4843.
- [2] 张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 等. 2013 ~ 2017 年中国 PM_{2.5} 污染防治的健康效益评估[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 513-522.
Zhang M J, Su F C, Xu Q X, et al. Health impact attributable to the control of PM_{2.5} pollution in China during 2013-2017 [J]. Environmental Science, 2021, 42(2): 513-522.
- [3] Wang J D, Zhao B, Wang S X, et al. Particulate matter pollution over China and the effects of control policies [J]. Science of the Total Environment, 2017, 584-585: 426-447.
- [4] 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.
- [5] Han S Q, Wu J H, Zhang Y F, et al. Characteristics and formation mechanism of a winter haze-fog episode in Tianjin, China[J]. Atmospheric Environment, 2014, 98: 323-330.
- [6] Zheng G J, Duan F K, Ma Y L, et al. Exploring the severe winter haze in Beijing[J]. Atmospheric Chemistry and Physics

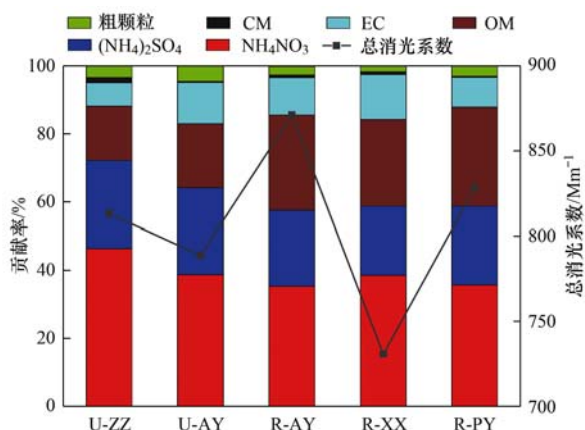


图 5 污染过程中 5 个点位不同组分对 PM_{2.5} 消光系数的贡献

Fig. 5 Extinction contributions of the individual components to PM_{2.5} during the haze episode at the five sites

- Discussions, 2014, **14**(12): 17907-17942.
- [7] Li H, Ma Y L, Duan F K, *et al.* Typical winter haze pollution in Zibo, an industrial city in China: characteristics, secondary formation, and regional contribution [J]. Environmental Pollution, 2017, **229**: 339-349.
- [8] Meng C C, Wang L T, Zhang F F, *et al.* Characteristics of concentrations and water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} in Handan City, Hebei province, China [J]. Atmospheric Research, 2016, **171**: 133-146.
- [9] Wu Y Y, Gu B J, Erisman J W, *et al.* PM_{2.5} pollution is substantially affected by ammonia emissions in China [J]. Environmental Pollution, 2016, **218**: 86-94.
- [10] Yang X C, Xiao H, Wu Q Z, *et al.* Numerical study of air pollution over a typical basin topography: source appointment of fine particulate matter during one severe haze in the megacity Xi'an[J]. Science of the Total Environment, 2020, **708**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135213.
- [11] Wei Y Q, Chen H, Sun H, *et al.* Nocturnal PM_{2.5} explosive growth dominates severe haze in the rural North China Plain[J]. Atmospheric Research, 2020, **242**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105020.
- [12] 王申博, 范相阁, 和兵, 等. 河南省春节和疫情影响情景下 PM_{2.5}组分特征[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(12): 5115-5123.
- Wang S B, Fan X G, He B, *et al.* Chemical composition characteristics of PM_{2.5} in Henan Province during the Spring Festival and COVID-19 outbreak [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(12): 5115-5123.
- [13] 苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 等. 中原城市群典型城市秋冬季大气 PM_{2.5} 污染特征及溯源[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 19-29.
- Miao Q Q, Jiang N, Zhang R Q, *et al.* Characteristics and sources of PM_{2.5} pollution in typical cities of the central plains urban agglomeration in autumn and winter[J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 19-29.
- [14] 翟诗婷, 王申博, 张栋, 等. 郑州市典型污染过程 PM₁ 中重金属浓度、来源及健康风险评估[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1180-1189.
- Zhai S T, Wang S B, Zhang D, *et al.* Concentration, source, and health risk assessment of PM₁ heavy metals in typical pollution processes in Zhengzhou [J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1180-1189.
- [15] 王申博, 余雪, 赵庆炎, 等. 郑州市两次典型大气重污染过程成因分析[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(7): 2425-2431.
- Wang S B, Yu X, Zhao Q Y, *et al.* Analysis of the formation of two typical atmospheric heavy pollution episodes in Zhengzhou, China[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(7): 2425-2431.
- [16] 杨留明, 王申博, 郝祺, 等. 郑州市 PM_{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 2977-2984.
- Yang L M, Wang S B, Hao Q, *et al.* Characteristics and source analysis of water-soluble ions in PM_{2.5} in Zhengzhou [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 2977-2984.
- [17] Wongphatarakul V, Friedlander S K, Pinto J P. A comparative study of PM_{2.5} ambient aerosol chemical databases [J]. Environmental Science & Technology, 1998, **32**(24): 3926-3934.
- [18] Chow J C, Lowenthal D H, Chen L W A, *et al.* Mass reconstruction methods for PM_{2.5}: a review [J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2015, **8**(3): 243-263.
- [19] Xing L, Fu T M, Cao J J, *et al.* Seasonal and spatial variability of the OM/OC mass ratios and high regional correlation between oxalic acid and zinc in Chinese urban organic aerosols [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(8): 4307-4318.
- [20] Sisler J F, Malm W C. Interpretation of trends of PM_{2.5} and reconstructed visibility from the IMPROVE network [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2000, **50**(5): 775-789.
- [21] 郑州市统计局. 2020 年郑州市国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. <http://tjj.zhengzhou.gov.cn/tjgb/4866162.jhtml>, 2022-04-01.
- [22] 安阳市统计局. 2020 安阳统计年鉴 [M]. 安阳: 安阳市统计局, 2020.
- [23] 路娜, 李治国, 周静博, 等. 2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 884-893.
- Lu N, Li Z G, Zhou J B, *et al.* Online source analysis of particulate matter (PM_{2.5}) in a heavy pollution process of Shijiazhuang city during heating period in 2015 [J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 884-893.
- [24] 孙有昌, 姜楠, 王申博, 等. 安阳市大气 PM_{2.5} 中水溶性离子季节特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 75-81.
- Sun Y C, Jiang N, Wang S B, *et al.* Seasonal characteristics and source analysis of water-soluble ions in PM_{2.5} of Anyang city[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 75-81.
- [25] Jiang N, Guo Y, Wang Q, *et al.* Chemical composition characteristics of PM_{2.5} in three cities in Henan, central China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2017, **17**(10): 2367-2380.
- [26] Yu F, Wang Q, Yan Q S, *et al.* Particle size distribution, chemical composition and meteorological factor analysis: a case study during wintertime snow cover in Zhengzhou, China [J]. Atmospheric Research, 2017, **202**: 140-147.
- [27] Gao J H, Woodward A, Vardoulakis S, *et al.* Haze, public health and mitigation measures in China: a review of the current evidence for further policy response [J]. Science of the Total Environment, 2017, **578**: 148-157.
- [28] Shao P Y, Tian H Z, Sun Y J, *et al.* Characterizing remarkable changes of severe haze events and chemical compositions in multi-size airborne particles (PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀) from January 2013 to 2016-2017 winter in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2018, **189**: 133-144.
- [29] 杨孝文, 周颖, 程水源, 等. 北京冬季一次重污染过程的污染特征及成因分析[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(3): 679-686.
- Yang X W, Zhou Y, Cheng S Y, *et al.* Characteristics and formation mechanism of a heavy winter air pollution event in Beijing [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(3): 679-686.
- [30] 元洁, 刘保双, 程渊, 等. 2017 年 1 月天津市区 PM_{2.5} 化学组分特征及高时间分辨率来源解析研究[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(3): 1090-1101.
- Yuan J, Liu B S, Cheng Y, *et al.* Study on characteristics of PM_{2.5} and chemical components and source apportionment of high temporal resolution in January 2017 in Tianjin urban area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(3): 1090-1101.
- [31] 夏志勇, 付华轩, 吕晨, 等. 重污染天气期间济南市城区和清洁对照点 PM_{2.5} 及其组分污染特征[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(5): 958-963.
- Xia Z Y, Fu H X, Lv C, *et al.* Pollution characteristics of PM_{2.5} and components during heavy air pollution period in Jinan urban area and clean air site [J]. Ecology and Environment Sciences,

- 2019, **28**(5): 958-963.
- [32] Haque M, Fang C, Schnelle-Kreis J, *et al.* Regional haze formation enhanced the atmospheric pollution levels in the Yangtze River Delta region, China: implications for anthropogenic sources and secondary aerosol formation [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **728**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138013.
- [33] Lai S C, Zhao Y, Ding A J, *et al.* Characterization of $PM_{2.5}$ and the major chemical components during a 1-year campaign in rural Guangzhou, Southern China [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **167**: 208-215.
- [34] 张敬巧, 王淑兰, 罗达通, 等. 聊城市冬季 $PM_{2.5}$ 及水溶性离子污染特征及来源分析 [J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(10): 1712-1718.
- Zhang J Q, Wang S L, Luo D T, *et al.* Characterization and source analysis of $PM_{2.5}$ and water-soluble ions during winter in Liaocheng city [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(10): 1712-1718.
- [35] Chen J Y, Shan M, Xia J J, *et al.* Effects of space heating on the pollutant emission intensities in “2 + 26” cities [J]. *Building and Environment*, 2020, **175**, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.106817.
- [36] 张璐, 王格慧, 王佳媛, 等. 西安供暖前后细颗粒物化学特征及棕碳吸光特性 [J]. *地球环境学报*, 2017, **8**(5): 451-458.
- Zhang L, Wang G H, Wang J Y, *et al.* Chemical composition of fine particulate matter and optical properties of brown carbon before and during heating season in Xi'an [J]. *Journal of Earth Environment*, 2017, **8**(5): 451-458.
- [37] 潘晨, 康志明. 2001 ~ 2019 年气象条件对江苏省 $PM_{2.5}$ 分布的影响 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 649-662.
- Pan C, Kang Z M. Impact of meteorological conditions on $PM_{2.5}$ in Jiangsu province from 2001 to 2019 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 649-662.
- [38] Wang J, Li X, Zhang W K, *et al.* Secondary $PM_{2.5}$ in Zhengzhou, China: chemical species based on three years of observations [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, **16**(1): 91-104.
- [39] Ma Q X, Wu Y F, Fu S L, *et al.* Pollution severity-dependent aerosol light scattering enhanced by inorganic species formation in Beijing haze [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **719**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137545.



CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-lan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)