

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)

交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)

基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 张江艳 (1888)

基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)

高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)

北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素 俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)

碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 吴雪萍 (1926)

中国城市PM_{2.5}和PM₁₀时空分布特征和影响因素分析 李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)

2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM_{2.5}和O₃时空变化特征及影响因素 陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)

疫情管控期西安PM_{2.5}和O₃污染特征及成因分析 原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)

苏南五市秋冬季PM_{2.5}化学组成特征和空间差异 冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)

湖北咸宁细颗粒物PM_{2.5}来源 罗怡, 朱宽广, 陈璞琬, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)

邢台氨减排对京津冀PM_{2.5}改善的溢出效益 边泽君, 闻超玉, 郎建垒, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)

聊城市冬季PM_{2.5}载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)

高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)

北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响 王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海滨, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)

高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)

水环境中抗病毒毒物的存在、行为与风险 葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)

黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)

藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素 李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)

西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)

基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 孟令华 (2096)

丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)

金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)

德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橹橹 (2129)

典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)

抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)

过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲子, 李大鹏, 黄勇 (2160)

矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张彤 (2171)

生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)

微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠军, 陈波 (2195)

紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)

土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应 郭善嵩, 胡思, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)

鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)

典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琼, 周瑞娟, 李霖 (2233)

污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)

宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)

大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)

基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)

秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)

长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)

土壤盐分变化对N₂O排放影响:基于Meta分析 黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)

基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 郑慧玲, 郑辉峰 (2321)

基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)

防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)

长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)

冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)

辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)

高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)

生物炭与不同类型氮肥施肥对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)

大岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)

基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 郇允兵 (2417)

基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)

西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)

重庆某铁矿周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)

金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)

赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)

施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

苏南五市秋冬季 PM_{2.5} 化学组成特征和空间差异

冯蔚¹, 丁峰², 尚玥³, 谢鸣捷^{1*}

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 南京 210044; 2. 江苏省南京环境监测中心, 南京 210013; 3. 商丘市气象局, 商丘 476000)

摘要: 于 2020 年 9 月至 2021 年 2 月在苏南五市(南京、苏州、无锡、常州和镇江)收集 PM_{2.5} 滤膜样品, 分析了各样品中的水溶性无机离子和碳质组分. 结果表明, 苏南五市 PM_{2.5} 各组分中 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 均为最高 $[(9.54 \pm 10.1) \sim (12.1 \pm 11.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$, 比其它目标组分高约 2 倍以上. 由于受更多道路扬尘和燃煤源的影响, 常州市 PM_{2.5} 中 Ca^{2+} 、 Cl^- 、OC 和 EC 的浓度平均值高于其它 4 个城市. 将所有目标组分浓度相加得到重构 PM_{2.5} ($\text{rPM}_{2.5}$) 浓度, 发现各城市 $\text{rPM}_{2.5}$ 浓度均由二次无机离子 (NH_4^+ 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} , SNA) 主导, 占比高达 $(59.2\% \pm 11.1\%) \sim (70.8\% \pm 9.72\%)$, 且 $\text{rPM}_{2.5}$ 浓度平均值在不同城市间无显著性差异 ($P > 0.05$). 苏南五市 $\rho(\text{rPM}_{2.5})$ 日均值 $> 35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的情形主要发生在冬季, 且出现的日期相同, 此期间 $\text{rPM}_{2.5}$ 中 NO_3^- 占比 $[(35.5\% \pm 6.64\%) \sim (43.3\% \pm 6.48\%)]$ 远高于其它时间 $[(23.7\% \pm 9.87\%) \sim (28.5 \pm 10.4\%)]$. 各目标组分在不同城市间的相关系数和离散系数计算结果表明, 受二次源主导化学组分的浓度在时间变化趋势和数值大小上均具有高度的空间相似性. 因此, 减少 PM_{2.5} 二次组分前体物的排放和加强区域间的联防联控是进一步改善苏南城市地区 PM_{2.5} 污染的重要途径.

关键词: 苏南城市; PM_{2.5}; 化学组分; 空间分布; 二次形成

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-1975-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.202305202

PM_{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter

FENG Wei¹, DING Feng², SHANG Yue³, XIE Ming-jie^{1*}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, School of Environmental Science & Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Nanjing Environmental Monitoring Center of Jiangsu Province, Nanjing 210013, China; 3. Shangqiu Bureau of Meteorology, Shangqiu 476000, China)

Abstract: PM_{2.5} filter samples were collected from the five cities of northern Jiangsu (Nanjing, Suzhou, Wuxi, Changzhou, and Zhenjiang) and analyzed for water-soluble ions and carbonaceous components. The results showed that NO_3^- was the most abundant component in PM_{2.5} of the five cities in southern Jiangsu $[(9.54 \pm 10.1) \sim (12.1 \pm 11.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$, approximately more than two times higher than the other target components. Due to the influences of dust and combustion sources, the average concentrations of Ca^{2+} , Cl^- , organic carbon, and elemental carbon in Changzhou were higher than those in the other four cities. The reconstructed PM_{2.5} ($\text{rPM}_{2.5}$) was calculated as the sum of all measured species concentrations, and we found that its concentrations were dominated by secondary inorganic ions (SO_4^{2-} , NO_3^- , and NH_4^+ , SNA), which accounted for $(59.2\% \pm 11.1\%) \sim (70.8\% \pm 9.72\%)$ of the $\text{rPM}_{2.5}$. The average concentrations of $\text{rPM}_{2.5}$ exhibited no significant differences ($P > 0.05$) between all city pairs. The situations in which the average daily concentrations of $\text{rPM}_{2.5}$ in the five cities of southern Jiangsu $> 35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ occurred mainly in winter and at the same time. During these periods, the proportions of NO_3^- in $\text{rPM}_{2.5}$ $[(35.5\% \pm 6.64\%) \sim (43.3\% \pm 6.48\%)]$ were much higher than those in other periods $[(23.7\% \pm 9.87\%) \sim (28.5 \pm 10.4\%)]$. The correlation coefficients and coefficients of divergence between different cities for individual species were calculated, and the results indicated that the concentrations of the components dominated by secondary sources had high spatial homogeneity in the temporal patterns and magnitude of the numerical values. Therefore, reducing precursor emissions of secondary PM_{2.5} components and strengthening joint prevention and control between regions are important ways to alleviate PM_{2.5} pollution in urban areas of southern Jiangsu.

Key words: city of southern Jiangsu; PM_{2.5}; chemical component; spatial distribution; secondary formation

近 20 年来, 空气动力学直径 $< 2.5 \mu\text{m}$ 的大气颗粒物 (PM_{2.5}) 一直是我国环境空气中的主要污染物之一^[1], 严重影响空气质量和公众健康^[2]. 特别在秋、冬季节, PM_{2.5} 浓度常因化石燃料使用增加及不利的气象条件迅速升高^[3]. 流行病学研究表明, PM_{2.5} 的长期或短期暴露和健康风险之间的联系取决于其来源和成分^[4,5]. 化石燃料燃烧在我国城市地区对 PM_{2.5} 相关的健康风险有显著影响^[6-9]. 然而, 不同流行病学研究中 PM_{2.5} 成分和来源的健康效应存在较大差异^[10]. 例如, 美国华盛顿市二次硫酸盐和燃煤源 PM_{2.5} 同各种疾病的总死亡率风险关系密切^[12], 而在

美国波士顿市, 交通排放 PM_{2.5} 的健康效应高于其它来源^[13]. 由于流行病学研究通常将 PM_{2.5} 组分浓度或源贡献的时间序列和健康效应数据建立联系, 同一城市不同采样点或同一区域不同城市间的空间差异是造成 PM_{2.5} 健康效应评估存在较大不确定性的的重要原因之一.

我国自 2013 年《大气污染防治行动计划》实施

收稿日期: 2023-05-23; 修订日期: 2023-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42177211)

作者简介: 冯蔚 (1999 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气气溶胶化学表征和来源解析, E-mail: 1095943196@qq.com

* 通信作者, E-mail: mingjie.xie@nuist.edu.cn

以来, 各城市的PM_{2.5}污染均得到显著改善. 以江苏省南京市为例, PM_{2.5}浓度从2013~2017年下降了46.8%^[14]. 在此期间, 南京本地也制定了严格的节能减排政策, 如火力发电厂燃煤的含硫量需低于0.6%, 冬季石化和钢铁等高排放企业减少15%产能, 以及全面禁止农业秸秆焚烧等^[15]. 但是, 从2017~2020年, 南京城市地区的PM_{2.5}浓度下降趋缓, 体现为PM_{2.5}中的主要成分, 包括硝酸盐(NO₃⁻)、硫酸盐(SO₄²⁻)、铵盐(NH₄⁺)和有机碳(organic carbon, OC)的浓度未发生明显改变^[15]. 由于南京地区PM_{2.5}中二次无机离子占比一直处于70%~80%之间, 二次组分前体物的减排成为进一步降低PM_{2.5}污染的关键. 因大气传输作用, 单个城市的节能减排措施对前体物排放的控制作用有限, 有必要在对区域内不同城市PM_{2.5}组成和来源了解的基础上建立长效的联防联控机制. 以往关于PM_{2.5}组成空间差异的研究主要基于同一城市不同位点的观测结果^[16-18], 对同一区域不同城市的同步观测研究较少. Gao等^[19]分析了2014年京津冀地区4个城市(北京、天津、廊坊和保定)的PM_{2.5}化学组成和来源, 发现不同城市的PM_{2.5}组分具有相似的季节变化, 但主要来源迥异. 2011年10~11月关于长三角地区5个城市(上海、苏州、南京、宁波和杭州)大气颗粒物的观测结果表明, 有机质是PM_{2.5}中浓度最高的组分, 二次形成过程、机动车排放和生物质燃烧是这些地区PM_{2.5}的主要来源^[20]. 在我国城市PM_{2.5}污染大幅改善之后, PM_{2.5}的化学组成和主要来源均发生较大改变. 例如, 2017~2020年二次硝酸盐已成为南京地区PM_{2.5}中的首要成分, 占比高达28.4%~37.1%^[15]. 但关于PM_{2.5}组成在区域内不同城市分布情况的研究还较为缺乏.

苏南五市(南京、苏州、无锡、常州和镇江)处于长三角中心地区, 占地面积仅为江苏省总面积的27%, 而国内生产总值超过全省的50%, 在经济迅速发展的同时也面临较大的环境压力. 为了解PM_{2.5}组分在苏南城市地区的浓度水平和分布, 本研究在2020年9月至2021年2月于苏南五市的城市位点收

集PM_{2.5}样品, 基于离线手段获得各样品中的水溶性无机离子和碳质组分浓度, 并分析这些组分的时间变化和空间差异. 本研究结果体现了苏南城市地区在《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》执行后污染多发季节PM_{2.5}组分的时空分布情况, 旨在从区域角度了解PM_{2.5}的污染特征和成因以及助力未来长三角地区污染控制对策的制定.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究选取的采样点在苏南五市的分布情况如图1所示, 均位于国控环境空气自动监测点或环境监测中心附近, 经纬度信息如表1所示. 各采样点距离地面高度12~20 m, 周边主要污染源为交通和生活排放. 每个位点使用武汉天虹四通道采样器(TH-16A)以16.7 L·min⁻¹的流速将PM_{2.5}颗粒物分别收集于两个特氟龙滤膜(poly tetra fluoroethylene, PTFE)和两个石英滤膜上, 滤膜直径均为47 mm. 各采样点从2020年9月1日至2021年2月28日每3 d同步采集一次, 采样时间为10:00至第二天09:00(23 h), 共获得304个样品(表1). 另外, 采样过程中每5次采样收集1个场地空白, 用于空白污染校正. 所有滤膜样品收集至实验室后于-20℃条件下密封保存直至分析.



地图来自江苏省自然资源厅标准地图服务网站
(<http://zrzy.jiangsu.gov.cn/jsbzdt/index.html>)

图1 苏南五市采样点位置示意

Fig. 1 Sampling sites in the five cities of southern Jiangsu

表1 采样信息和气象条件

Table 1 Information on sampling and meteorological conditions

城市	采样点位置	采样点经纬度	样本数量	平均温度/℃	平均湿度/%
南京	南京市草场门	118.75°E, 32.06°N	61	11.8	71
苏州	苏州市南门	120.64°E, 31.28°N	61	12.8	70
无锡	无锡市环境监测中心	120.32°E, 31.51°N	61	12.4	71
常州	常州市环境监测中心	120.02°E, 31.78°N	61	12.3	68
镇江	镇江市疾控中心	119.44°E, 32.19°N	60	11.3	72

1.2 化学组分分析

将PTFE滤膜剪碎置于洁净的玻璃容器中, 加

入25 mL超纯水(18.2 MΩ·cm)超声萃取30 min. 提取后采用一次性注射器和0.22 μm微孔滤膜过滤萃

取溶液, 去除不溶组分. 本研究分别采用 ICS-3000 和 ICS-2000 型(美国 Dionex)离子色谱仪测定提取液中的阳离子(NH₄⁺、K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺)和阴离子(NO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、F⁻). 制备六点校准曲线以外标法对各阴、阳离子进行定量. 获得初始校准曲线后, 每隔 20 个样品测试一个标准溶液, 确保检测结果漂移 < 10%. 各离子分析的方法回收率范围为 85% ~ 115%. 由于各采样点 F⁻ 和 Mg²⁺ 的检出率均较低 (< 10%), 本研究未给出这两种离子的浓度信息.

石英滤膜样品中的 OC 和元素碳 (elemental carbon, EC) 浓度采用 DRI-2015 OC/EC 分析仪(美国 Atmoslytic)在 IMPROVE-A 温度条件下测定. 分析过程简单概括为: 取 ~ 0.5 cm² 负载有颗粒物的滤膜进行分析, OC 组分在纯氦气环境下经四步升温至 580 °C, 每步升温散逸出的有机组分经氧化炉转化成 CO₂; EC 在含 2% 氧气的氦气环境下, 逐步加热转化为 CO₂. 上述各升温步骤释放 OC 和 EC 形成的 CO₂ 由非色散红外 (nondispersive infrared, NDIR) CO₂ 检测器进行分析. 考虑到加热过程中部分 OC 发生碳化, 设备将滤膜样品透射激光 (λ = 633 nm) 信号在分析 EC 过程中恢复至初始强度的时刻作为裂解碳和 EC 的分界. 定期采用蔗糖标准溶液对仪器进行校准, 每天用单个蔗糖浓度溶液 (10 μL) 对检测结果进行日常检验. 将所有场地空白样品中水溶性离子和碳质组分检测结果的中位值用于空白校正.

1.3 不同采样点组分对比

本研究分别采用 Student's *t*-test (*t* 检验)、Pearson's 相关系数 (*r*) 和离散系数 (coefficient of divergence, COD) 参数化 PM_{2.5} 各组分在两个不同城市采样点间的差异. 其中 *r* 常用于评估同种组分在不同采样点变化趋势的相似性; COD 则代表同种组分在不同采样点浓度大小的一致性, 其定义如下:

$$\text{COD}_{jk} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_{ij} - X_{ik}}{X_{ij} + X_{ik}} \right)^2} \quad (1)$$

式中, X_{ij} 和 X_{ik} 分别为某组分 *X* 在 *j* 和 *k* 采样点第 *i* 个样品中的浓度, *n* 为样本数. COD 值接近 0 和 1 分别表示高度的一致性和完全不同^[21,22]. 已有研究常将 0.20 作为是否存在显著空间差异的临界值^[23,24].

2 结果与讨论

2.1 苏南五市 PM_{2.5} 组成概述

如表 2 所示, 苏南五市秋、冬季 PM_{2.5} 丰量组分中 ρ(NO₃⁻) 最高 [(9.54 ± 10.1) ~ (12.1 ± 11.3) μg·m⁻³], 在所有水溶性离子中的占比为 (40.2% ±

13.8%) ~ (44.1% ± 12.8%), 约为另外两种二次无机离子 (NH₄⁺ 和 SO₄²⁻) 的两倍. 从浓度平均值上看, SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ (sulfate-nitrate-ammonium, SNA) 在各城市之间均无显著性差异 (*t* 检验, *P* 为 0.15 ~ 0.99). 环境空气 PM_{2.5} 中的 SO₄²⁻ 主要来自人为排放 SO₂ 的液相和非均相过程^[25, 26]; 白天 NO₂ 经气相氧化生成 HNO₃, 再和空气中的 NH₃ 中和生成硝酸盐, 而夜间 NO₃ 主要来自与 NO₃ 和 N₂O₅ 形成相关的化学反应. 由 NH₄⁺ 与 NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 的当量比值可知 [A/(S + N), 表 2], 苏南五市 PM_{2.5} 中的 NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 几乎完全以铵盐的形式存在 [NH₄NO₃ 和 (NH₄)₂SO₄]. 同 A/(S + N) 相比, 总阳离子和阴离子之间的当量比更接近 1.0, 说明观测结果可靠且未检出和报道的离子组分可忽略.

PM_{2.5} 中的 K⁺ 常用于评估生物质燃烧的影响^[27,28], 而 Cl⁻ 在秋、冬季主要来自燃煤和生物质燃烧^[29]. 南京、无锡、常州和镇江的 ρ(K⁺) 平均值接近 [(0.39 ± 0.21) ~ (0.43 ± 0.20) μg·m⁻³] 且无显著性差异 (*P* 为 0.27 ~ 0.90), 但都显著 (*P* < 0.05) 高于苏州 [(0.31 ± 0.18) μg·m⁻³]. ρ(Cl⁻) 则在常州达到最高 [(1.19 ± 0.99) μg·m⁻³], 依次为镇江 [(0.98 ± 0.87) μg·m⁻³] 和无锡 [(0.94 ± 0.77) μg·m⁻³], 并显著 (*P* < 0.05) 高于苏州和南京 (表 2). 根据以上结果推测苏州观测点收集的 PM_{2.5} 比其它城市观测点较少受到生物质燃烧的影响, 燃煤一次排放对常州、镇江和无锡观测点 PM_{2.5} 的贡献比苏州和南京高. 另外, 常州观测点 PM_{2.5} 中 ρ(Ca²⁺) 平均值 [(0.40 ± 0.30) μg·m⁻³] 显著 (*P* < 0.01) 高于其它 4 个城市 [(0.21 ± 0.11) ~ (0.23 ± 0.12) μg·m⁻³], Na⁺ 浓度平均值在不同城市的分布和 Ca²⁺ 一致 (表 2). 因此, 常州观测点 PM_{2.5} 中含有更多来自道路扬尘的贡献.

碳质组分中 EC 主要来自生物质和化石燃料的不完全燃烧过程^[30], OC 除来自各种一次排放源外, 还产生于挥发性有机物经光化学反应生成的低挥发性物质^[31]. 基于无机元素和有机示踪物的受体模型源解析结果均表明, 道路扬尘是南京城区 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的主要贡献源之一^[14,32]. Xie 等^[33] 发现南京城区 EC 的粒径分布和颗粒物质量浓度一致, 主要分布在粗粒子 ($D_p > 2.1 \mu\text{m}$) 中. 来自机动车尾气的 OC 和 EC 沉降至路面和尘土混合后, 可通过由机动车行驶引发的再悬浮过程进入空气. 和 Ca²⁺ 相似, 本研究中 ρ(OC) 和 ρ(EC) 平均值均在常州达到最高 [(8.09 ± 5.17) μg·m⁻³ 和 (2.97 ± 2.47) μg·m⁻³], 其中 OC 显著高于其它 4 个城市 (*P* < 0.01). 此外, OC 和 EC 浓度平均值在苏南五市的分布情况和 Cl⁻ 一致 (表 2), 说明常州观测点处道路扬尘和燃煤对 PM_{2.5} 的贡

表2 苏南五市PM_{2.5}化学组分的浓度平均值及特征比值Table 2 Average concentrations and characteristic ratios of PM_{2.5} components in the five cities of southern Jiangsu

类型	项目	南京	苏州	无锡	常州	镇江
无机离子 ¹⁾	NH ₄ ⁺	5.22 ± 3.86	4.32 ± 3.51	4.61 ± 3.45	4.58 ± 2.99	4.92 ± 3.98
	K ⁺	0.40 ± 0.19	0.31 ± 0.18	0.39 ± 0.21	0.42 ± 0.20	0.43 ± 0.20
	Ca ²⁺	0.23 ± 0.12	0.22 ± 0.15	0.21 ± 0.11	0.40 ± 0.30	0.22 ± 0.15
	Na ⁺	0.19 ± 0.10	0.21 ± 0.15	0.21 ± 0.10	0.33 ± 0.18	0.21 ± 0.11
	NO ₃ ⁻	12.1 ± 11.3	9.54 ± 10.1	10.0 ± 10.1	10.8 ± 9.15	10.9 ± 11.4
	SO ₄ ²⁻	5.57 ± 3.24	4.69 ± 3.33	5.01 ± 3.15	5.05 ± 3.06	5.42 ± 3.41
	Cl ⁻	0.64 ± 0.61	0.69 ± 0.69	0.94 ± 0.77	1.19 ± 0.99	0.98 ± 0.87
	A/(S+N) ²⁾	0.94 ± 0.17	0.97 ± 0.16	1.00 ± 0.17	0.92 ± 0.14	0.96 ± 0.16
碳质组分	[阳离子] ³⁾ /[阴离子] ⁴⁾	1.00 ± 0.15	1.01 ± 0.15	1.02 ± 0.16	1.01 ± 0.14	1.00 ± 0.16
	OC	4.81 ± 2.64	5.03 ± 2.70	5.37 ± 3.12	8.09 ± 5.17	5.48 ± 2.50
	POC	3.18 ± 2.20	3.11 ± 2.43	3.44 ± 2.59	4.94 ± 4.10	3.29 ± 1.94
	SOC	1.66 ± 0.98	1.96 ± 1.05	1.96 ± 0.94	3.20 ± 2.10	2.23 ± 1.29
	S/OC ⁵⁾ /%	37.3 ± 16.8	43.3 ± 17.1	39.6 ± 15.9	42.2 ± 16.3	42.5 ± 17.7
	EC	1.92 ± 1.33	1.95 ± 1.53	2.26 ± 1.70	2.97 ± 2.47	2.49 ± 1.47
重构PM _{2.5}	OC/EC	2.79 ± 0.95	3.09 ± 1.13	2.73 ± 0.96	3.11 ± 1.01	2.44 ± 0.77
	rPM _{2.5} ⁶⁾	30.9 ± 21.2	26.8 ± 20.2	28.8 ± 20.8	33.7 ± 21.3	30.8 ± 21.9
	S/PM ⁷⁾ /%	70.8 ± 9.72	65.7 ± 9.65	65.5 ± 9.23	59.2 ± 11.1	64.3 ± 10.5
	SS/PM ⁸⁾ /%	78.2 ± 7.05	75.9 ± 6.73	74.3 ± 7.12	70.4 ± 9.01	73.8 ± 8.50

1)浓度单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 比值单位无量纲; 2)[NH₄⁺]/(2×[SO₄²⁻] + [NO₃⁻]); 3)[阳离子] = [NH₄⁺] + [K⁺] + 2×[Ca²⁺] + [Na⁺]; 4)[阴离子] = [NO₃⁻] + 2×[SO₄²⁻] + [Cl⁻]; 5)S/OC = SOC/OC×100%; 6)重构PM_{2.5}(reconstructed PM_{2.5}) = NH₄⁺ + K⁺ + Ca²⁺ + Na⁺ + NO₃⁻ + SO₄²⁻ + Cl⁻ + OC + EC; 7)S/PM = (NH₄⁺ + NO₃⁻ + SO₄²⁻)/rPM_{2.5}×100%; 8)SS/PM = (SNA + SOC)/rPM_{2.5}×100%

献在苏南五市中最高。

OC/EC > 2.0 常用于指示二次有机碳(secondary OC, SOC)贡献的存在^[34,35]。如表2所示, 苏南五市秋、冬季的OC/EC均值[(2.44 ± 0.77) ~ (3.11 ± 1.01)]表明SOC形成对有机气溶胶的贡献不可忽略。因此, 本研究采用OC/EC最小比值法^[36]分别计算各城市一次OC(primary OC, POC)和SOC的浓度平均值。和OC的分布相似, ρ (POC)在常州达到最高[(4.94 ± 4.10) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 表2], 其它4个城市之间无显著性差异(P 为0.47 ~ 0.86)。除常州外, SOC浓度平均值在不同城市间仍存在较大差异, 例如, 镇江观测点处 ρ (SOC) [(2.23 ± 1.29) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]显著($P < 0.01$)高于南京[(1.66 ± 0.98) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], 可归结于镇江市OC/EC最小值(1.32)明显低于其它4个城市(1.52 ~ 1.66)。然而, 从SOC在OC中占比(S/OC)上看, 苏南五市秋、冬季S/OC均值范围为(37.3% ± 16.8%) ~ (43.3% ± 17.1%)(表2), 同Wang等^[37]综述报道的我国PM_{2.5}中S/OC均值(41% ± 26%)相一致, 且各城市之间无显著性差异($P > 0.05$)。

已有研究通过对比PM_{2.5}浓度和丰量组分的连续观测结果, 发现水溶性无机离子、OC和EC的浓度之和可重构出PM_{2.5}的浓度^[14,15]。本研究中苏南五市重构PM_{2.5}(rPM_{2.5})的浓度为表2中所有目标组分(NH₄⁺、K⁺、Ca²⁺、Na⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、OC和EC)浓度之和。各城市rPM_{2.5}与中国空气质量在线监测分析平台

(<https://www.aqistudy.cn/historydata/>)公布的PM_{2.5}实测浓度呈强相关($r > 0.85$), 线性相关曲线的斜率均在1.0附近(0.91 ~ 1.13), 说明rPM_{2.5}可合理反映各城市PM_{2.5}的浓度数值和时间变化趋势。如表2所示, 虽然常州rPM_{2.5}平均浓度比其它城市高近10%, 但各城市间均无显著性差异(P 为0.069 ~ 0.99)。这是因为苏南五市的rPM_{2.5}均由SNA主导, SNA在rPM_{2.5}中的占比(S/PM)范围为(59.2% ± 11.1%) ~ (70.8% ± 9.72%)。若考虑SOC对rPM_{2.5}的贡献, 苏南五市rPM_{2.5}中二次组分的贡献率(SS/PM)高达(70.4% ± 9.01%) ~ (78.2% ± 7.05%)。因此, 减少SNA和SOC人为源相关的前体物排放, 包括NO_x、SO₂、NH₃和挥发性有机物(volatile organic compound, VOC), 是进一步降低苏南城市地区PM_{2.5}污染的潜在重要途径。

2.2 苏南五市PM_{2.5}组成的时间变化

苏南五市各采样点PM_{2.5}化学组成在秋、冬季随时间的变化情况如图2所示。尽管表2中各城市 ρ (rPM_{2.5})均未超过环境空气质量二级标准要求(< 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), ρ (rPM_{2.5})日均值> 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的情况仍时有发生, 特别是在冬季(12月至次年2月)。各城市 ρ (rPM_{2.5})> 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的样本在冬季占比范围为40.0% ~ 56.7%。在北方开始集中采暖(2020年11月15日)之前, 每个城市 ρ (rPM_{2.5})接近或> 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的样本仅有2 ~ 3个, 但出现的时间不完全一致。苏州、无锡和常州 ρ (rPM_{2.5})> 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的现象同时出现在2020

年的9月19日和11月6日；南京和镇江 $\rho(rPM_{2.5})$ 同时接近或 $> 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的日期为2020年的9月10日和11月28日。另外，南京和镇江在两次 $rPM_{2.5}$ 浓度轻度升高时S/PM $[> 80.0\%$ (南京)和 $> 75.0\%$ (镇江)]均远高于均值(表2)，体现SNA形成加剧的影响。苏州、

无锡和常州在2020年11月6日的S/PM(57.8%~67.0%)和各自的均值接近， $rPM_{2.5}$ 浓度升高由各组分同步增大造成。这些结果表明苏南五市在秋季因受不同气团控制，PM_{2.5}浓度升高的现象在时间和形成机制上不完全一致。

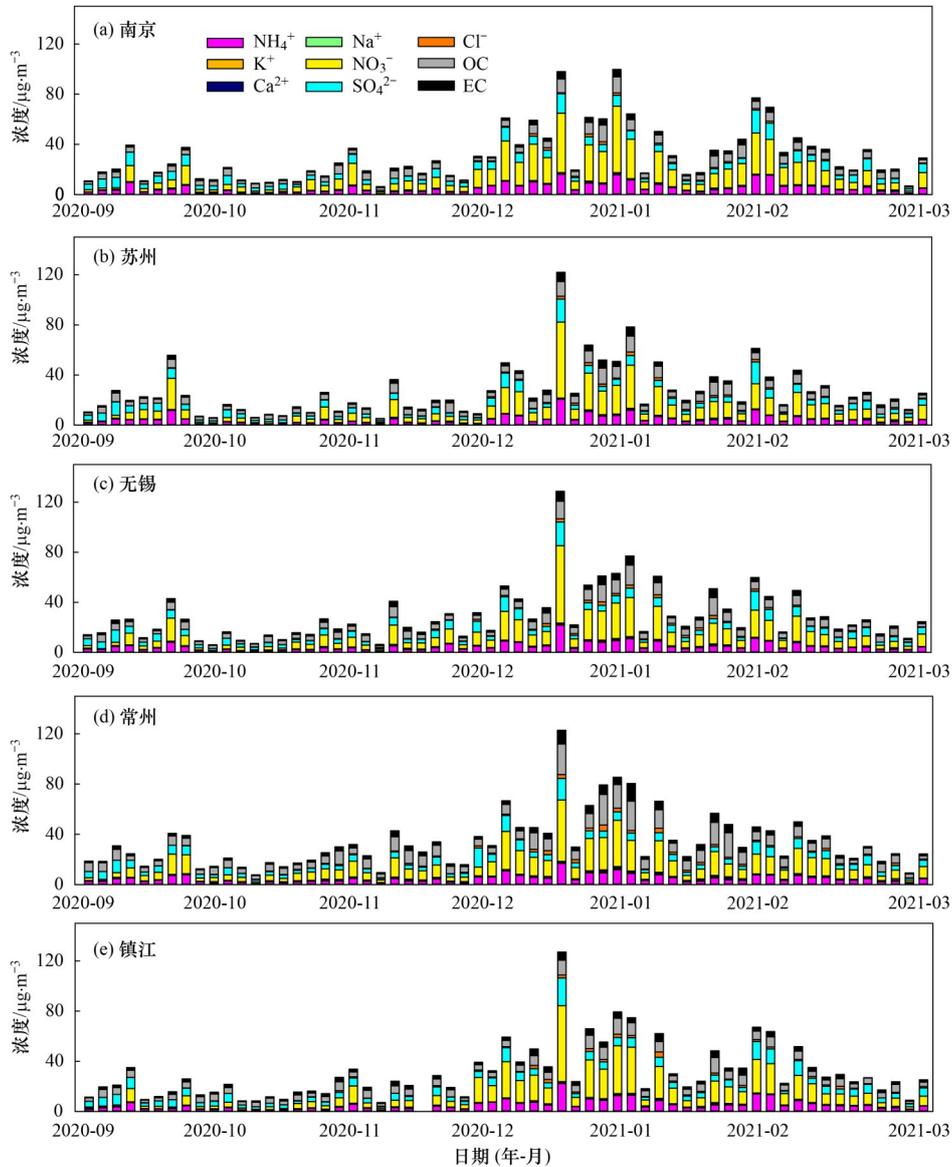


图2 PM_{2.5}化学组成在南京、苏州、无锡、常州和镇江观测点的时间变化

Fig. 2 Temporal variations in PM_{2.5} composition at the sampling sites in Nanjing, Suzhou, Wuxi, Changzhou, and Zhenjiang

当北方地区进入采暖期后，苏南五市 $\rho(rPM_{2.5})$ 显著升高，甚至达到轻、中度污染的程度(75~150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。各城市出现PM_{2.5}污染的时间和程度均高度一致。例如，苏南五市 $\rho(rPM_{2.5})$ 的极大值均出现在2020年12月12日(图2，98.0~129 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)，在该极大值前后各有一次PM_{2.5}污染过程(2020年11月27日至12月9日和2020年12月18~27日)，并且在1月中旬再次出现PM_{2.5}峰值。从组成上看，在 $\rho(rPM_{2.5}) > 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 期间，苏南五市 $rPM_{2.5}$ 中NO₃⁻占比[(35.5% ± 6.64%) ~ (43.3% ± 6.48%)]远高于其它时间

[(23.7% ± 9.87%) ~ (28.5% ± 10.4%)]. 如图3所示，各城市A/(S+N)一直处于1.0附近，且变化幅度较低，NO₃⁻和SO₄²⁻几乎完全以铵盐形式存在。因此，NH₄NO₃的大量生成是导致苏南五市冬季PM_{2.5}污染形成的重要原因，同来自北方大气污染物的区域传输以及不利的气象条件(例如，边界层高度降低、低温和高湿等)均有关联^[38,39]。

由于二次无机组分，特别是NH₄NO₃，在 $\rho(rPM_{2.5}) > 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时期的占比进一步升高，S/PM和SS/PM之间的差异，即SOC的相对贡献在此期间

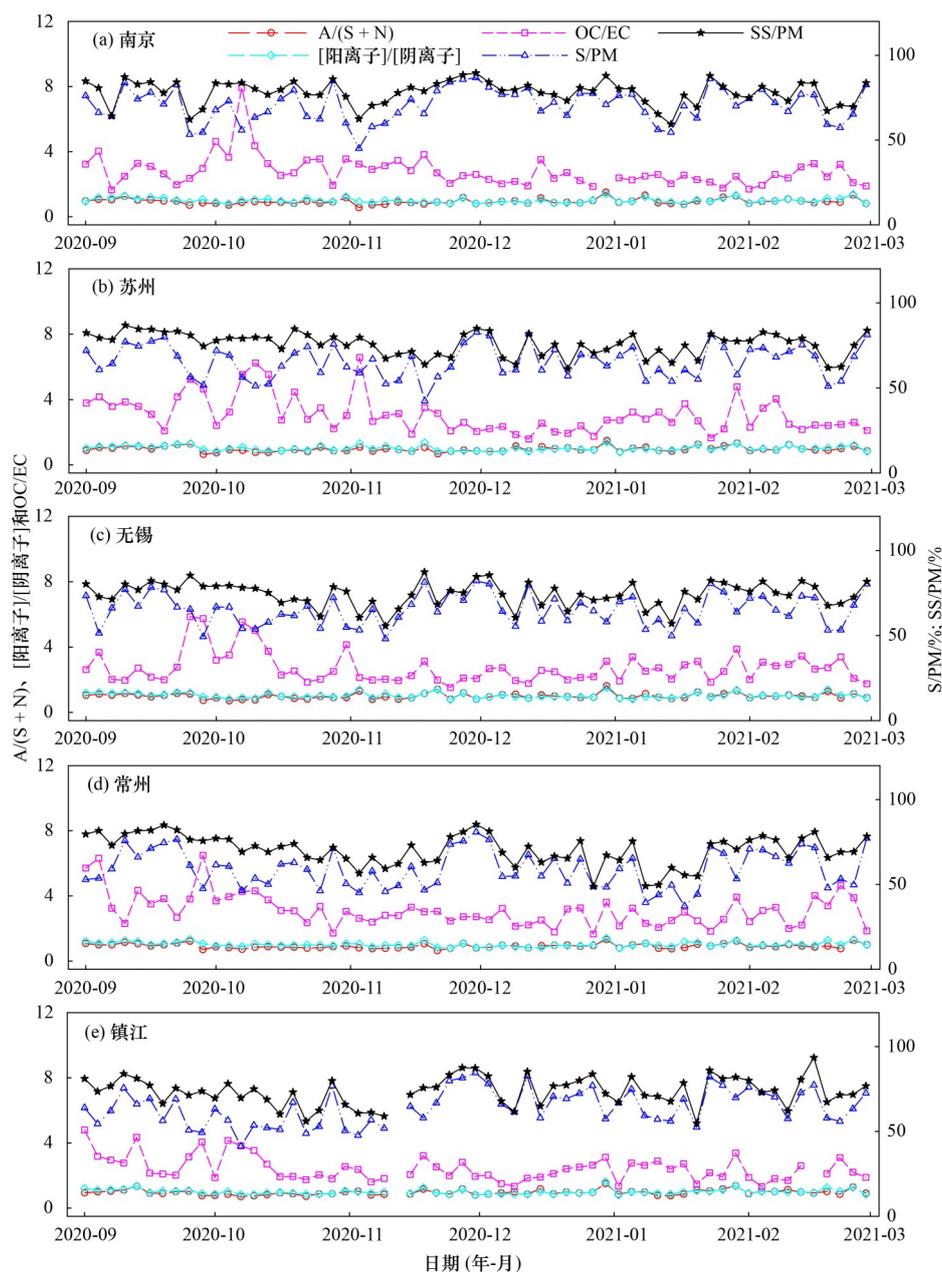


图3 $PM_{2.5}$ 丰量组分特征比值和SNA、SNA + SOC占比在南京、苏州、无锡、常州和镇江观测点的时间变化

Fig. 3 Temporal variations in characteristic ratios of $PM_{2.5}$ bulk components and the proportions of SNA and SNA + SOC at the sampling sites in Nanjing, Suzhou, Wuxi, Changzhou, and Zhenjiang

$[(3.27\% \pm 2.23\%) \sim (7.46\% \pm 4.55\%)]$ 比其余时期 $[(9.54\% \pm 5.54\%) \sim (13.4\% \pm 6.85\%)]$ 明显下降(图3). 从图3还可看出, S/PM 和 SS/PM 差异较大的时期(9~11月)对应于较高的 OC/EC 值, 即 SOC 贡献升高. 如 2.1 节中所述, 常州市的 POC 和 SOC 浓度均显著高于其它城市 ($P < 0.01$). 在 $\rho(rPM_{2.5}) > 35 \mu g \cdot m^{-3}$ 期间, 常州市 OC 和 SOC 在 $rPM_{2.5}$ 中的平均占比(13.4% 和 7.46%) 也显著 ($P < 0.05$) 高于其它城市(9.54% ~ 11.9% 和 3.27% ~ 4.96%). 根据以上结果, 苏南城市地区在冬季的 $PM_{2.5}$ 污染具有区域性特征, 凸显区域联防联控的必要性; 常州市同其它苏南城市在有机气溶胶贡献上的差异体现了

局部地区源排放对 $PM_{2.5}$ 污染的影响, 还有待进一步从分子组成角度探索这些城市在有机气溶胶来源上的区别.

2.3 苏南五市 $PM_{2.5}$ 组分浓度的空间差异

图4展示了 $PM_{2.5}$ 各组分在不同城市两两之间的相关系数和 COD 值分布. 水溶性离子中 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的相关系数主要分布在 0.75 ~ 0.95 之间, 其均值 (r 为 0.86 ~ 0.90) 明显高于其它一次源组分 [r 为 0.61 ~ 0.78, 图 4(a)], 进一步表明秋、冬季苏南城市 SNA 对 $PM_{2.5}$ 污染形成的影响具有区域性特征. K^+ 和 Cl^- 浓度的时间变化趋势在不同城市间的相似性比扬尘源相关组分高(例如, Ca^{2+}), 可归结于 $PM_{2.5}$

中K⁺和Cl⁻由燃烧源主导,更容易受到区域间传输的影响.由于OC的来源比EC多样且受到老化作用的影响,OC浓度在不同城市间的相关性($r = 0.86 \pm 0.048$)稍高于EC($r = 0.82 \pm 0.074$),和已有研究的

观测结果一致^[24,40].SNA、SNA + SOC和rPM_{2.5}由二次无机离子组成或主导,它们浓度的时间变化趋势在不同城市间均表现出高度的相似性(r 为0.89~0.90).

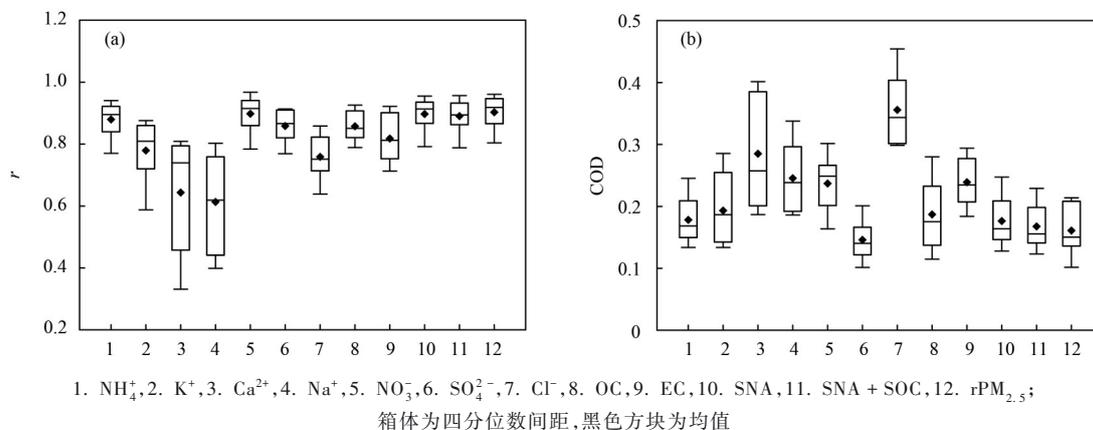


图4 苏南五市之间PM_{2.5}组分的相关系数(r)和离散系数(COD)分布
Fig. 4 Distributions of Pearson correlation coefficients(r)and coefficient of divergence(COD)for PM_{2.5} components in the five cities of southern Jiangsu

如图4(b)所示, NH₄⁺和SO₄²⁻在不同城市间的COD值主要分布在0.20以下,体现出较高的空间一致性.而NO₃⁻的COD值分布(0.16~0.30)则和EC接近(0.18~0.30),其空间差异高于NH₄⁺和SO₄²⁻.华楠等^[41]通过研究疫情管控前后PM_{2.5}的化学组成变化,推测本地交通排放的NO_x对NO₃⁻形成有重要贡献.因此,NO₃⁻和EC浓度的空间差异和各城市观测点周围交通排放强度不同有关.OC的COD值因常州市OC浓度显著高于其它城市部分分布在0.20以上.其它一次源相关水溶性离子(K⁺、Ca²⁺、Na⁺和Cl⁻)的COD值范围(0.13~0.46)均高于受二次形成主导的NH₄⁺、SO₄²⁻、SNA、SNA + SOC和rPM_{2.5}(0.10~0.25).由此推断,来自本地排放和区域外传输前体物的化学转化过程促进了苏南城市地区秋、冬季PM_{2.5}二次组分的形成和浓度升高.

3 结论

(1)苏南五市秋、冬季PM_{2.5}中二次组分占主导地位,减少前体物排放是进一步降低苏南城市PM_{2.5}污染的重要途径.道路扬尘和燃煤这两种一次源对常州市PM_{2.5}的贡献高于其它4个城市.

(2)由于北方进入采暖期后苏南城市地区的PM_{2.5}污染高度同步,且均以硝酸盐的大量形成为特征,苏南五市的PM_{2.5}污染为区域性污染,有必要加强区域间的联防联控.受局部源排放的影响,有机气溶胶对常州市PM_{2.5}污染的贡献更为突出.

(3)二次组分浓度在苏南不同城市之间随时间变化的相似性、以及在数值上的空间一致性均高于

一次组分,来自本地和外源前体物的二次过程是造成苏南城市秋、冬季PM_{2.5}浓度升高的主要原因.

参考文献:

- [1] 罗毅,邓琼飞,杨昆,等.近20年来中国典型区域PM_{2.5}时空演变过程[J].环境科学,2018,39(7):3003-3013.
Luo Y, Deng Q F, Yang K, et al. Spatial-temporal change evolution of PM_{2.5} in typical regions of China in recent 20 years[J]. Environmental Science, 2018, 39(7): 3003-3013.
- [2] Lu X C, Lin C Q, Li W K, et al. Analysis of the adverse health effects of PM_{2.5} from 2001 to 2017 in China and the role of urbanization in aggravating the health burden [J]. Science of the Total Environment, 2019, 652: 683-695.
- [3] Yan D, Lei Y L, Shi Y K, et al. Evolution of the spatiotemporal pattern of PM_{2.5} concentrations in China - A case study from the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Atmospheric Environment, 2018, 183: 225-233.
- [4] Ostro B, Roth L, Malig B, et al. The effects of fine particle components on respiratory hospital admissions in children [J]. Environmental Health Perspectives, 2009, 117(3): 475-480.
- [5] Bell M L, Ebisu K, Leaderer B P, et al. Associations of PM_{2.5} constituents and sources with hospital admissions: Analysis of four counties in Connecticut and Massachusetts (USA) for persons ≥ 65 years of age [J]. Environmental Health Perspectives, 2014, 122(2): 138-144.
- [6] Cao J J, Xu H M, Xu Q et al. Fine particulate matter constituents and cardiopulmonary mortality in a heavily polluted Chinese city [J]. Environmental Health Perspectives, 2012, 120(3): 373-378.
- [7] Qiao L P, Cai J, Wang H L, et al. PM_{2.5} constituents and hospital emergency-room visits in Shanghai, China [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(17): 10406-10414.
- [8] Wu S W, Deng F R, Wei H Y, et al. Association of cardiopulmonary health effects with source-appointed ambient fine particulate in Beijing, China: A combined analysis from the healthy volunteer natural relocation (HVNR) study [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(6): 3438-3448.
- [9] Wang J D, Wang S X, Voorhees A S, et al. Assessment of short-term PM_{2.5}-related mortality due to different emission sources in the Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2015, 123: 440-448.

- [10] Stanek L W, Sacks J D, Dutton S J, *et al.* Attributing health effects to apportioned components and sources of particulate matter: An evaluation of collective results [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(32): 5655-5663.
- [11] Ito K, Christensen W F, Eatough D J, *et al.* PM source apportionment and health effects: 2. An investigation of intermethod variability in associations between source-apportioned fine particle mass and daily mortality in Washington, DC [J]. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 2006, **16**(4): 300-310.
- [12] Maynard D, Coull B A, Gryparis A, *et al.* Mortality risk associated with short-term exposure to traffic particles and sulfates [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2007, **115**(5): 751-755.
- [13] Gou Y F, Qin C, Liao H, *et al.* Measurements, gas/particle partitioning, and sources of nonpolar organic molecular markers at a suburban site in the west Yangtze River Delta, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, **126**(19), doi: 10.1029/2020JD034080.
- [14] Yu Y Y, Ding F, Mu Y F, *et al.* High time-resolved PM_{2.5} composition and sources at an urban site in Yangtze River Delta, China after the implementation of the APPCAP [J]. *Chemosphere*, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127746.
- [15] Xie M J, Lu X Y, Ding F, *et al.* Evaluating the influence of constant source profile presumption on PMF analysis of PM_{2.5} by comparing long- and short-term hourly observation-based modeling [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **314**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.120273.
- [16] 王晓军, 陈倩, 董韶妮, 等. 烟台市 PM_{2.5} 空间分布特征与来源解析 [J]. *中国环境监测*, 2020, **36**(4): 53-60.
Wang X J, Chen Q, Dong S N, *et al.* Spatial distribution characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Yantai city [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, **36**(4): 53-60.
- [17] Wang P, Cao J J, Shen Z X, *et al.* Spatial and seasonal variations of PM_{2.5} mass and species during 2010 in Xi'an, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **508**: 477-487.
- [18] Li M R, Hu M, Du B H, *et al.* Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} chemical composition in a coastal city of Southeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **605-606**: 337-346.
- [19] Gao J J, Wang K, Wang Y, *et al.* Temporal-spatial characteristics and source apportionment of 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.
- [20] Hua Y, Cheng Z, Wang S X, *et al.* Characteristics and source apportionment of PM_{2.5} during a fall heavy haze episode in the Yangtze River Delta of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **123**: 380-391.
- [21] 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.
- [22] Kim E, Hopke P K, Pinto J P, *et al.* Spatial variability of fine particle mass, components, and source contributions during the regional air pollution study in St. Louis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(11): 4172-4179.
- [23] Wilson J G, Kingham S, Pearce J, *et al.* A review of intraurban variations in particulate air pollution: Implications for epidemiological research [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(34): 6444-6462.
- [24] Krudysz M A, Froines J R, Fine P M, *et al.* Intra-community spatial variation of size-fractionated PM mass, OC, EC, and trace elements in the Long Beach, CA area [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(21): 5374-5389.
- [25] 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.
- [26] Wang G H, Zhang R Y, Gomez M E, *et al.* Persistent sulfate formation from London fog to Chinese haze [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, **113**(48): 13630-13635.
- [27] Li W J, Shao L Y, Buseck P R. Haze types in Beijing and the influence of agricultural biomass burning [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(17): 8119-8130.
- [28] Cheng Y, Engling G, He K B, *et al.* Biomass burning contribution to Beijing aerosol [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(15): 7765-7781.
- [29] Wang X H, Bi X H, Li H, *et al.* The role of sources and meteorology in driving PM_{2.5}-bound chlorine [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, **441**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129910.
- [30] Bond T C, Bergstrom R W. Light absorption by carbonaceous particles: An investigative review [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2006, **40**(1): 27-67.
- [31] Hallquist M, Wenger J C, Baltensperger U, *et al.* The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: Current and emerging issues [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(14): 5155-5236.
- [32] Xie M J, Peng X, Shang Y, *et al.* Collocated measurements of light-absorbing organic carbon in PM_{2.5}: Observation uncertainty and organic tracer-based source apportionment [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, **127**(5), doi: 10.1029/2021JD035874.
- [33] Xie M J, Feng W, He S Y, *et al.* Seasonal variations, temperature dependence, and sources of size-resolved PM components in Nanjing, east China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, **121**: 175-186.
- [34] Xu J Z, Zhang Q, Wang Z B, *et al.* Chemical composition and size distribution of summertime PM_{2.5} at a high altitude remote location in the northeast of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau: Insights into aerosol sources and processing in free troposphere [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(9): 5069-5081.
- [35] Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, *et al.* Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJAQS/AUSPEX [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(12): 2079-2112.
- [36] Lim H J, Turpin B J. Origins of primary and secondary organic aerosol in Atlanta: Results of time-resolved measurements during the Atlanta supersite experiment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(21): 4489-4496.
- [37] Wang L P, Zhou X H, Ma Y J, *et al.* Carbonaceous aerosols over China—review of observations, emissions, and climate forcing [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(2): 1671-1680.
- [38] Li M M, Huang X, Zhu L, *et al.* Analysis of the transport pathways and potential sources of PM₁₀ in Shanghai based on three methods [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **414**: 525-534.
- [39] Li M M, Wang T J, Xie M, *et al.* Formation and evolution mechanisms for two extreme haze episodes in the Yangtze River Delta region of China during winter 2016 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, **124**(6): 3607-3623.
- [40] Xie M J, Coons T L, Dutton S J, *et al.* Intra-urban spatial variability of PM_{2.5}-bound carbonaceous components [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **60**: 486-494.
- [41] 华楠, 尚玥, 谢鸣捷. 2020~2021年新冠疫情期间南京市 PM_{2.5} 化学组成与来源变化特征 [J]. *环境科学*, 2023, **44**(2): 593-601.
Hua N, Shang Y, Xie M J. Variations in PM_{2.5} composition and sources during 2020-2021 COVID-19 epidemic periods in Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(2): 593-601.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shandong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yan, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)