

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

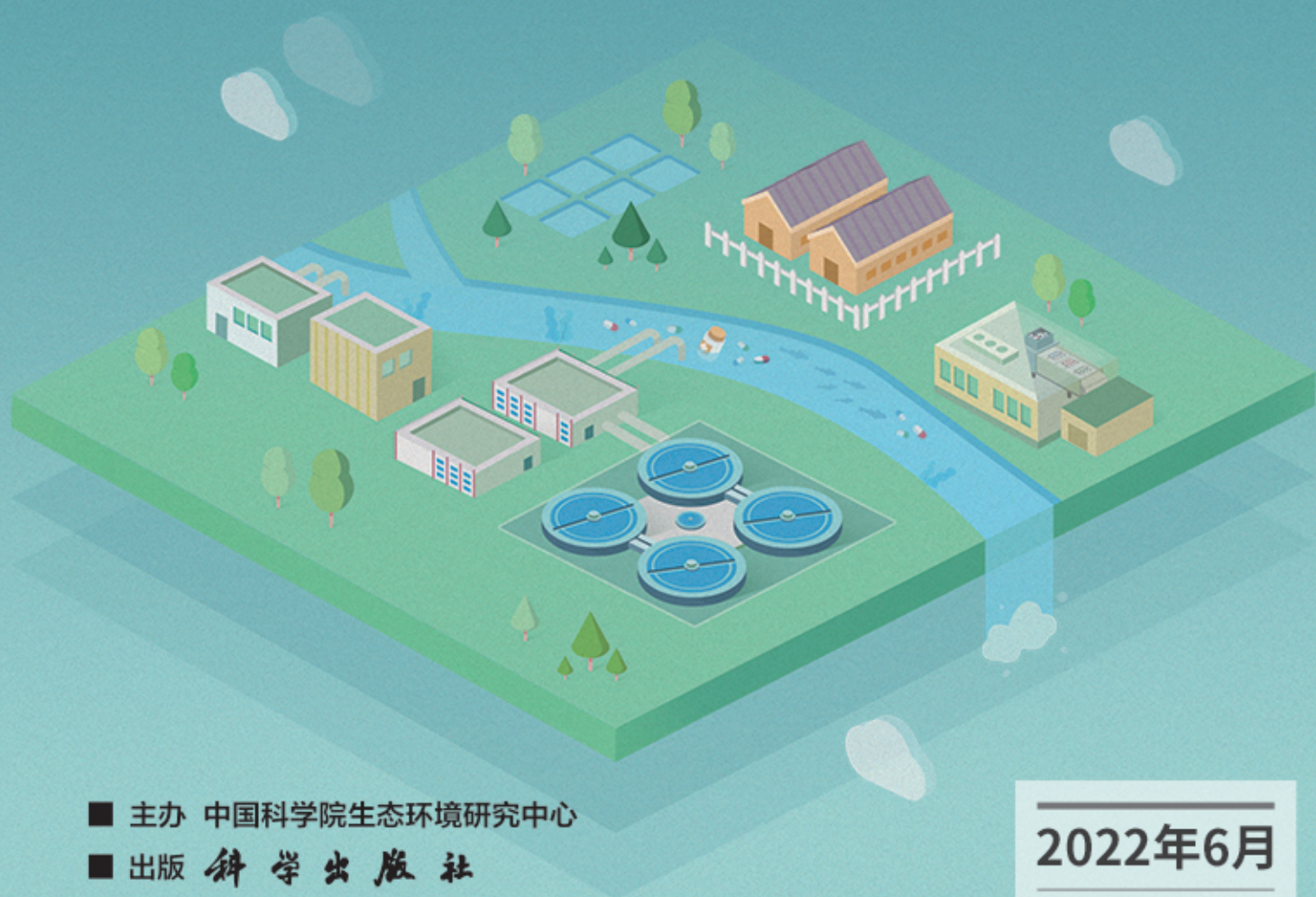
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期
Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM _{2.5} 浓度影响	邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 PM _{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响	黄兵役, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)
COVID-19 管控期间苏州市 PM _{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析	缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)
2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化	谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM _{2.5} 来源	彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)
保定市冬季 PM _{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析	吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)
南京江北新区 PM _{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源	关璐, 丁铖, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)
广西十万大山背景点 PM _{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析	邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例	张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因	唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)
天津市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及气象影响分析	肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)
2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析	周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化	晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响	赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源	苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)
运城市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁	范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价	武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险	张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制	宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)
高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素	李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析	张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价	赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险	刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价	张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析	陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应	陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)
2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子	屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系	王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析	葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制	谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法	顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化	陈旭东, 高良敏 (3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染	石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响	吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析	席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐蘇士, 荆红卫, 刘保献 (3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征	章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制	曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性	唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制	龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析	李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征	徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征	孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析	温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响	刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价	张倩, 韩贵琳 (3269)
南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析	董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价	严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)
石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复	许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响	谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应	罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应	罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响	靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征	廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征	廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应	梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)
《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)	

南京江北新区 PM_{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源

关璐¹, 丁铖¹, 张毓秀¹, 胡建林², 于兴娜^{1*}

(1. 南京信息工程大学中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 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)

摘要: 以南京江北新区 2019 年 4、7、11 和 12 月为代表分析了大气 PM_{2.5} 中水溶性有机氮 (WSON) 的季节变化特征, 探讨了 WSON 与水溶性无机氮 (WSIN) 的关系。结果表明, 南京江北新区 PM_{2.5} 中 WSON 的变化范围为 0.446 ~ 4.200 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均值为 2.04 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 略高于北京、上海和常州的观测结果。秋季 PM_{2.5} 中的 WSON 平均值最高 [(2.967 ± 0.643) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], 约为其他 3 个季节的 1.7 倍。南京细粒子中 WSON 对水溶性总氮 (WSTN) 的平均贡献率占到 25%, 并表现出夏秋高、冬春低的特点, 如冬季该占比仅为夏秋季的 50% 左右。WSON 与 WSIN 中的 NO₂⁻-N 相关性最高, 与 NO₃⁻-N 的相关性最低, 可能与夏季高温导致 NO₃⁻-N 的挥发有关。通过主成分分析 (PCA) 表明, 南京江北新区细粒子中 WSON 主要来源于二次转化、海盐、扬尘和生物质燃烧。

关键词: PM_{2.5}; 水溶性有机氮; 季节变化; 污染特征; 来源

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-2888-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110026

Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM_{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing

GUAN Lu¹, DING Cheng¹, ZHANG Yu-xiu¹, HU Jian-lin², YU Xing-na^{1*}

(1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of High Technology for Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The seasonal variation characteristics of water-soluble organic nitrogen (WSON) in PM_{2.5} were analyzed in the Nanjing Jiangbei new area. The relationship between WSON and water-soluble inorganic nitrogen (WSIN) was also discussed. The results showed that the variation range of WSON in PM_{2.5} was 0.446 to 4.200 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, with an average value of 2.04 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. This value was slightly higher than the observed results in Beijing, Shanghai, and Changzhou. The average value of WSON was the highest in autumn [(2.967 ± 0.643) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], which was approximately 1.7 times that of the other three seasons. The average contribution ratio of WSON to water-soluble total nitrogen (WSTN) in fine particles of Nanjing accounted for 25%, with high ratios in summer-autumn and low ratios in winter-spring. For example, the proportion of WSON/WSTN in winter was only approximately 50% of that in summer and autumn. WSON had the highest correlation with NO₂⁻-N and the lowest correlation with NO₃⁻-N in WSIN, which may be related to the volatilization of NO₃⁻-N caused by high temperatures in summer. Principal component analysis (PCA) showed that WSON of PM_{2.5} in Nanjing was mainly derived from secondary transformation, sea salt, dust, and biomass combustion.

Key words: PM_{2.5}; water-soluble organic nitrogen; seasonal variation; pollution characteristics; source

近年来,由化石燃料燃烧、含氮化肥的大量生产和使用以及畜牧业和工业发展等人类活动向大气中排放的含氮化合物浓度加速上升^[1,2]。据估计,人类活动产生的活性氮由 1860 年的 15 Tg·a⁻¹ 攀升到 1995 年的 156 Tg·a⁻¹,直至 2005 年的 187 Tg·a⁻¹,约为全球氮素临界负荷 (100 Tg·a⁻¹) 的 1.8 倍^[3]。其中,60%~80% 的氮素又通过干湿沉降的形式回到陆地和海洋生态系统^[4,5]。大气氮沉降的大幅增加,导致陆地和海洋生态系统土壤和水体酸化、富营养化以及生物多样性降低^[6,7]。因此,大气活性氮成分的污染与沉降特征成为国内外研究学者和公众广泛关注的热点问题。

随经济快速发展,城市大气活性氮组分的排放量及其浓度水平呈现持续升高的趋势。然而,以往研

究多主要集中在无机氮污染上,而对大气有机氮 (ON) 的研究非常有限。由于没有同时获得无机氮和有机氮的观测数据,导致活性氮沉降量经常被低估。据报道,气溶胶中 ON 对总氮的贡献可以达到 12%~64%^[8~12]。与日本以及欧美发达国家相比,中国关于大气有机氮 (ON) 的研究报道并不多。Duan 等^[13]提出北京市大气颗粒物中有机氮能占到总氮的 30%,主要来源于燃煤燃烧、生物质燃烧、土壤腐殖质和二次生成。广州市颗粒物中的有机氮主要集中

收稿日期: 2021-10-07; 修订日期: 2021-11-14

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC0214604); 国家自然科学基金项目 (41775154); 江苏省“六大人才高峰”项目 (JNHB-057)

作者简介: 关璐 (1999~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为颗粒物化学, E-mail: 785519855@qq.com

* 通信作者, E-mail: xnyu@nuist.edu.cn

在细颗粒物上,而且各个粒径段有机氮的来源不同,例如光化学氧化二次生成过程是 0.49 ~ 1.5 μm 粒径段上 ON 的主要来源,而本地化石燃料的燃烧排放是小于 0.49 μm 粒径的主要来源^[14]. 上海市 PM_{2.5} 中有机氮占总氮的 18%,有机氮浓度表现出夏秋季较低、冬春季较高的特征,人为源污染物的二次转化是其主要来源^[15]. 西安市大气 PM_{2.5} 中有机氮在总氮中所占比例能达到 43%,生物质燃烧、腐殖质和农业活动等为有机氮的主要来源^[16]. 在城市开展颗粒物中有机氮研究,为进一步认知有机氮对二次有机气溶胶(SOA)形成、氮循环及对人体健康的影响以及细颗粒物污染控制都有重要意义.

南京作为国家重要的区域中心城市,虽然进行了长期的大气污染治理,但大气污染依旧不容乐观,尤其是大气细颗粒物污染. 有机氮既是细颗粒物的重要组成部分,又是二次有机气溶胶(SOA)的重要组成部分,而 SOA 与霾的形成有关^[15]. 通过对南京江北新区大气 PM_{2.5} 中有机氮的污染特征和来源进行研究,可以填补南京市大气 PM_{2.5} 中有机氮的研究空白,以期为进一步了解 SOA、有机氮单体和氮沉降提供科学理论依据.

1 材料与方法

1.1 观测地点及观测时间

气溶胶样品采集点位于南京江北新区的南京信息工程大学气象楼顶(32°03'N, 118°46'E),海拔为 62 m. 采样点东面大约 500 m 为宁六路主干道,南面为龙王山景区,北面为居民生活区,约 3 km 处为扬子工业区. 该地区具有一定区域污染特性. 采样时间为 2019 年 4 月(春季)、7 月(夏季)、11 月(秋季)和 12 月(冬季),每个样品采集时间约为 23 h.

1.2 采样方法

采样前,将石英纤维滤膜放入马弗炉内 450℃ 烘烤 4 h,以去除有机杂质,然后放置在恒温恒湿干燥皿中平衡至少 24 h,干燥皿内温度为 25℃,湿度为 40%. 使用精度为 0.1 μg 的微量天平(瑞士 Mettler Toledo MX5)在恒温恒湿下称重,每张石英纤维滤膜至少称量 3 次,选取称量差在 0.000 2 g 内的 3 次求取平均值,然后放在干燥皿中保存. 采用武汉市天虹仪器表有限责任公司生产的智能中流量采样器(TH-150C)以 0.1 $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 流量采集 PM_{2.5} 样品,所用滤膜为石英纤维滤膜(直径 90 mm, Whatman),每月放置两张空白样品,采样结束后,记录采样开始时间、累积时间和累计体积等信息,采集好的样品同上述方式称量,称量完成后放入 -4℃ 冰箱中低温储存等待分析. PM_{2.5} 的浓度根据采样膜称量前后

质量差 Δm 和累计体积 V 计算^[17],其公式为: $c = \Delta m/V$. 为保证实验结果的准确性,每月一次对中流量采样器进行流量校准,检查仪器的累积工作时间,确保能够及时更换碳刷,对取样管件和过滤器进行除尘通气处理,过脏的用无水乙醇浸泡清洗^[18];在进行样品测定的同时进行空白样品和平行样品的测定,保证平行样和样品的测定结果偏差小于 10%,空白样测定的离子浓度低于检测限,且保证分析使用的标准曲线达到 5 个点以及相关系数均 ≥ 0.99 .

1.3 样品预处理

取四分之一石英纤维滤膜放入 15 mL 塑料密封瓶中,加入 10 mL Mili-Q 超纯水(电阻率为 18.2 $\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$),超声提取 0.5 h,超声后振荡 1 h,然后再超声提取 0.5 h,静置 24 h^[19]. 每次分析前,需用注射器取约 7 mL 样品上清液,经 0.22 μm 微孔滤膜过滤后才能进行水溶性离子和总氮分析.

1.4 水溶性无机氮分析

采用瑞士万通离子色谱仪在恒温 25℃ 下测定样品中水溶性阴阳离子. 阴离子和阳离子色谱柱型号分别为 Metrosep A Supp5-150 和 Metrosep C4-150,抑制液为 H_2SO_4 溶液(5 mL 浓 H_2SO_4 用超纯水定容至 1 L),阴淋洗液为 3.2 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 和 1 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHCO_3 混合溶液,流速为 0.7 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$;阳淋洗液为 5.6 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ HNO_3 溶液,流速为 0.9 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$. 3 种离子的保留时间和检出限如表 1 所示,它们的浓度之和作为水溶性无机氮浓度(water-soluble inorganic nitrogen, WSIN).

表 1 10 种水溶性离子保留时间以及检出限

离子	保留时间/min	检出限/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
NH_4^+	5.64	0.02
NO_2^-	5.97	0.04
NO_3^-	8.14	0.006

1.5 水溶性总氮(water-soluble total nitrogen, WSTN)分析

(1) 总氮标准曲线的绘制 配制浓度梯度为 0、0.1、0.2、0.5、0.7、0.8、1.0、2.0 和 5.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ KNO_3 标准溶液,采用紫外分光光度计测定 220 nm 和 275 nm 下标准溶液吸光度,标准溶液的校正吸光度(A_s)、零浓度溶液的校正吸光度(A_b)和两者差值(A_r)的计算公式如下^[20]:

$$A_s = A_{s220} - 2A_{s275} \quad (1)$$

$$A_b = A_{b220} - 2A_{b275} \quad (2)$$

$$A_r = A_s - A_b \quad (3)$$

式中, A_{s220} 和 A_{s275} 分别为 220 nm 下标准溶液的吸光

度和 275 nm 下标准溶液的吸光度, A_{1220} 和 A_{1275} 分别为 220 nm 下零浓度溶液的吸光度和 275 nm 下零浓度溶液的吸光度. 标准曲线根据 A_t 与标准溶液浓度来绘制, 标准曲线采用的是最小二乘法, 保证总氮浓度与吸光度相关系数达到 0.999 以上.

(2) 总氮分析 用移液枪取 5 mL 样品于比色管中, 加入 5 mL 碱性过硫酸钾 (40 g 过硫酸钾 + 15 g 氢氧化钠配成 1 L), 放入高压灭菌器中在 121℃ 下消解 1 h, 待样品冷却后, 再加入 1 mL HCl (1 + 9), 定容至 25 mL, 混匀. 使用紫外分光光度计测定 220 nm 和 275 nm 下样品溶液的吸光度, 样品溶液吸光度 A 计算公式如下:

$$A = A_{220} - 2A_{275} \quad (4)$$

将吸光度 A 代入标准曲线中即可得到样品溶液浓度.

水溶性总氮分析方法主要参考中华人民共和国国家环境保护标准 HJ 636-2012^[21], 试剂过硫酸钾和氢氧化钠的含氮量均小于 0.000 5%, 每批样

品对应做一个空白试验并测定 10% 的加标样品, 保证空白样品的校正吸光度小于 0.030, 加标回收率在 90% ~ 110% 之间, 空白样与样品同时进行处理分析, 所有样品各项数据均减去空白样的平均值.

1.6 水溶性有机氮分析

$PM_{2.5}$ 中水溶性总氮浓度与水溶性无机氮浓度之差即为有机氮 (water-soluble organic nitrogen, WSON) 浓度^[22], 即 $WSTN - WSIN = WSON$, 其中 WSIN 包括 NO_2^- -N、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N.

1.7 数据质量评估

通过水溶性总氮 (WSTN) 与水溶性无机氮 (WSIN) 的浓度对比, 进行了数据质量的评估 (图 1). 可以看出, 各个季节大部分 WSTN 与 WSIN 浓度之比在 1:1 上, 说明各个季节 WSON 数据质量较好. 春夏秋冬 4 个季节分别获得了 30、46、38 和 44 个有效数据, 其中夏季和秋季的有效数据占总样品数的比例高于春季和冬季.

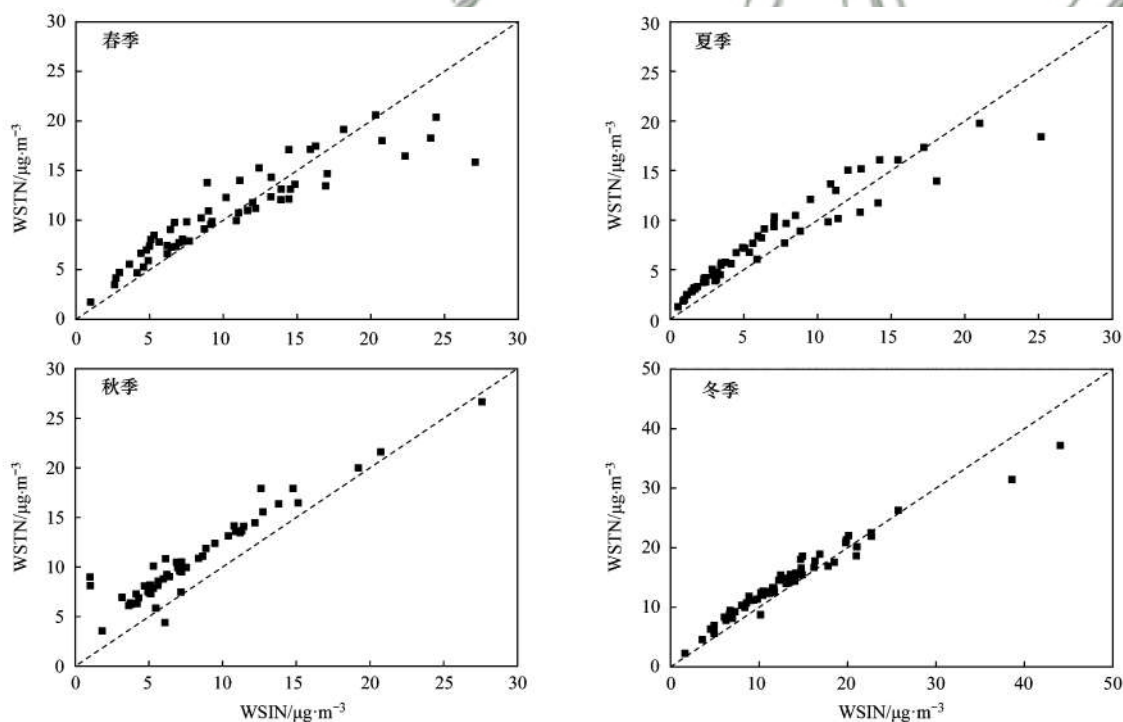


图 1 不同季节 $PM_{2.5}$ 中 WSTN 浓度与 WSIN 浓度的对比

Fig. 1 Comparison of WSTN concentration and WSIN concentration in $PM_{2.5}$ in different seasons

2 结果与讨论

2.1 水溶性有机氮的季节变化特征

表 2 列出了南京江北新区 $PM_{2.5}$ 中 WSTN、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 WSON 的季节变化特征. 可以看出, 南京秋季的 WSON 平均值最高, 是春季、夏季和冬季的 1.7 倍左右. 与 WSON 的季节变化不同, 水溶性总氮和水溶性无机氮的季节变化却

均表现为: 冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季的趋势. WSON 的最高浓度出现在 11 月 24 日, 达到 $4.200 \mu g \cdot m^{-3}$; 最低浓度出现在 7 月 5 日, 仅为 $0.446 \mu g \cdot m^{-3}$. 4 个季节的 WSIN 浓度均明显高于 WSON, 其倍数均在 2.0 倍以上, 尤其在冬季可以达到 6.4 倍. 值得注意的是, 虽然冬季和夏季 WSON 平均值相同, 但冬季无机氮平均值约为夏季的 2.1 倍. 表明南京细颗粒物主要以无机氮为主, 在冬季表现更为明

显,且主要以NO₃⁻-N和NH₄⁺-N两种形式存在.夏季 WSTN、WSON 和 WSIN 的平均值均低于其他 3 个季节,与夏季降雨量高、高温导致含氮化合物的挥发以及夏季盛行东南风有利于污染物的清除有关^[23].

表 2 南京江北新区 PM_{2.5} 中 WSTN、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和 WSON 的季节变化¹⁾/μg·m⁻³

Table 2 Seasonal variation in WSTN, NO ₂ ⁻ -N, NO ₃ ⁻ -N, NH ₄ ⁺ -N, and WSON in PM _{2.5} of Jiangbei new area, Nanjing/μg·m ⁻³												
组分	春季(n=30)			夏季(n=46)			秋季(n=38)			冬季(n=44)		
	Min	Max	Mean ± SD	Min	Max	Mean ± SD	Min	Max	Mean ± SD	Min	Max	Mean ± SD
WSTN	3.645	19.032	9.881 ± 4.359	1.624	14.533	7.044 ± 3.837	4.715	20.033	9.351 ± 3.513	3.409	20.908	12.920 ± 3.803
NO ₂ ⁻ -N	0.021	0.038	0.028 ± 0.005	0.008	0.028	0.019 ± 0.005	0.019	0.041	0.028 ± 0.006	0.017	0.063	0.027 ± 0.009
NO ₃ ⁻ -N	1.107	8.377	3.383 ± 2.182	0.348	6.835	2.283 ± 1.833	0.231	10.462	3.325 ± 2.230	1.272	10.808	5.658 ± 2.184
NH ₄ ⁺ -N	1.181	9.896	4.533 ± 2.302	0.259	6.050	3.015 ± 1.816	0.605	8.672	3.031 ± 1.996	1.311	8.808	5.509 ± 1.658
WSON	0.589	3.859	1.786 ± 0.916	0.446	3.120	1.726 ± 0.562	0.892	4.200	2.967 ± 0.643	0.770	3.013	1.726 ± 0.561

1) Min 和 Max 分别表示各个组分在每个季节的最低和最高浓度,Mean ± SD 表示各个组分在每个季节的平均值加减标准偏差,n 为样品数量

图 2 给出了南京 PM_{2.5} 中 WSON 占比的季节分布.很明显,冬季 WSON 在 WSTN 中所占质量分数要比其他 3 个季节低得多,其质量分数仅为夏季和秋季的 50% 左右.冬季化石燃料燃烧生成 NO_x 等含氮化合物,形成的铵盐在低温条件下易存在于颗粒相,使得无机氮比重增加,导致冬季有机氮占比减小^[24]. WSON 所占比例在夏秋季较高,可能是因为夏季有机氮肥(如尿素)的施用以及较强的太阳辐射使得挥发性的含氮气体发生二次反应生成有机氮化合物^[25].

表 3 为不同地区大气气溶胶中的 WSON 浓度和 WSON 对总氮的贡献.可以看出,南京江北新区 PM_{2.5} 中 WSON 平均值为 2.04 μg·m⁻³,与金华以及胶州湾 TSP 中 WSON 浓度接近,略高于北京、上海和常州的观测结果,但明显要高于珠三角城市如广州和香港;南京的 WSON 浓度要比西安年均值低 44% 左右,仅仅是西安冬季期间 WSON 浓度的 17%.从 WSON 对 WSTN 的贡献来看,西安地区的

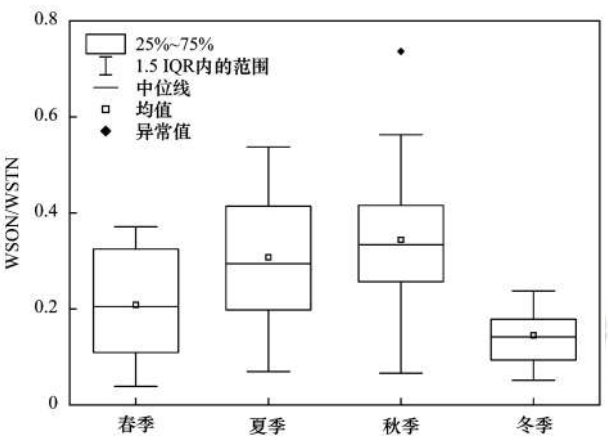


图 2 南京江北新区 PM_{2.5} 中 WSON/WSTN 的季节分布
Fig. 2 Seasonal distribution of WSON/WSTN in PM_{2.5} in Jiangbei new area, Nanjing

贡献最高,几乎能占到 WSTN 的一半;南京、金华和香港的贡献占到 1/3 ~ 1/4,说明以上地区的水溶性有机氮污染仍然较严重.

表 3 不同地区大气气溶胶中的 WSON 浓度和 WSON 对总氮的贡献

Table 3 Concentration of WSON and ratio of WSON to WSTN in atmospheric aerosols in different regions						
采样点	类型	采样时间(年-月)	WSON/μg·m ⁻³	WSON/WSTN	文献	
南京	PM _{2.5}	2019	2.04	0.25	本研究	
北京	PM _{2.5}	2013	1.49	0.20	[26]	
上海	PM _{2.5}	2013-05 ~ 2014-04	1.29	0.18	[15]	
金华	PM _{2.5}	2015	1.90	0.31	[27]	
常州	PM _{2.5}	2017-03 ~ 2017-05	1.50	0.13	[28]	
西安	PM _{2.5}	2008-07 ~ 2009-08	3.62	0.43	[16]	
西安	PM _{2.5}	2012-12	12.0	0.47	[22]	
广州	PM _{2.5}	2013 ~ 2014	0.50	0.13	[29]	
香港	PM _{2.5}	2011-08 ~ 2012-05	0.90	0.36	[30]	
胶州湾	TSP	2015-06 ~ 2016-03	2.11	0.16	[31]	

2.2 水溶性有机氮与水溶性无机氮浓度之间的关系

图 3 ~ 6 给出了南京江北新区不同季节大气 PM_{2.5} 中 WSON 与 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 和 WSTN 的相关性.可以看出,WSON 与 WSIN 和 WSTN 的相关性均较高,其中 WSON 与 NO₂⁻-N 的相关性最高,与 NO₃⁻-N 的相关性最低.例如,与 NO₃⁻-N 的相关性在夏季仅为 0.47,春秋季节为 0.49,这与夏季高温导致 NO₃⁻-N 的挥发有关.除 NO₂⁻-N 之外,WSON 与其他类

型含氮化合物的相关性均表现在冬季最高,与冬季较高浓度的 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 WSON 有关.4 个季节 WSON 和 WSTN 的相关性比较接近(R² 为 0.65 ~ 0.76),说明 WSON 以一种相对稳定的形态存在于 WSTN^[32].

2.3 WSON 来源解析

为了了解南京江北新区采样期间及各个季节 PM_{2.5} 中 WSON 的来源,将 Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺、

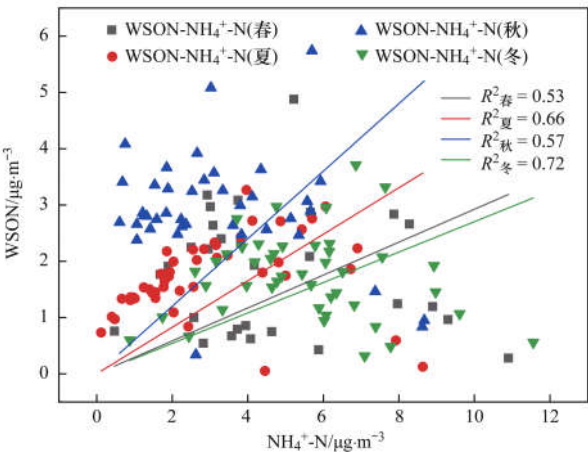


图3 不同季节 PM_{2.5} 中 WSON 与 NH₄⁺-N 的相关性

Fig. 3 Correlation between WSON and NH₄⁺-N in PM_{2.5} in different seasons

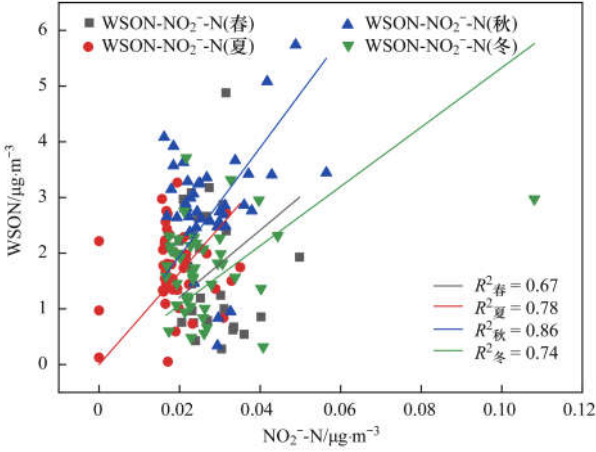


图5 不同季节 PM_{2.5} 中 WSON 与 NO₂⁻-N 的相关性

Fig. 5 Correlation between WSON and NO₂⁻-N in PM_{2.5} in different seasons

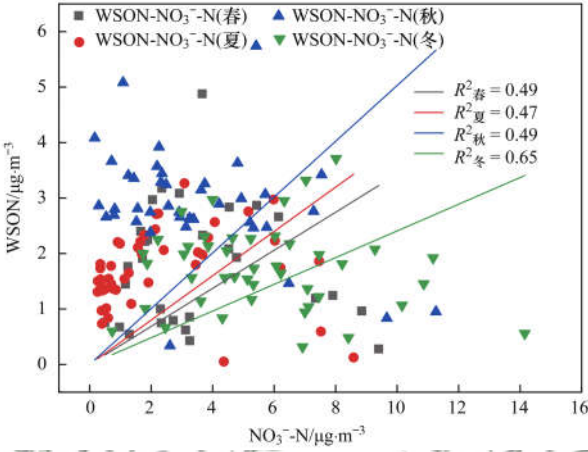


图4 不同季节 PM_{2.5} 中 WSON 与 NO₃⁻-N 的相关性

Fig. 4 Correlation between WSON and NO₃⁻-N in PM_{2.5} in different seasons

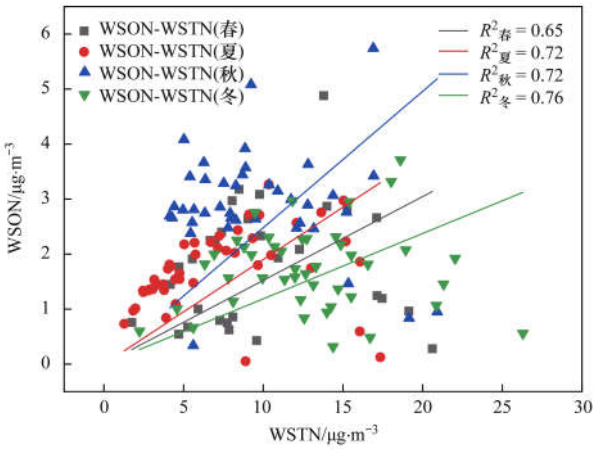


图6 不同季节 PM_{2.5} 中 WSON 与 WSTN 的相关性

Fig. 6 Correlation between WSON and WSTN in PM_{2.5} in different seasons

Ca²⁺、F⁻、Cl⁻、NO₂⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻ 和 WSON 进行了主成分分析,4 个季节的分析结果如表 4 所示,春

夏季分别得到 3 个因子,秋冬季分别得到 4 个因子。表中黑体字为载荷较高的值。

表 4 南京江北新区 4 个季节的主成分旋转因子载荷矩阵¹⁾

Table 4 Principal component rotation factor load matrix of four seasons in Jiangbei new area, Nanjing

项目	采样期间			春季			夏季			秋季				冬季			
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 1	因子 2	因子 3	因子 1	因子 2	因子 3	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
Na ⁺	-0.18	0.22	0.56	0.89	0.41	0.07	-0.51	0.50	0.61	-0.05	0.91	-0.03	-0.04	-0.43	0.17	0.22	0.77
NH ₄ ⁺	-0.10	0.93	0.19	0.16	0.97	-0.05	-0.20	0.92	-0.08	0.94	-0.07	-0.29	0.08	0.96	0.08	0.04	0.24
K ⁺	-0.01	0.50	0.63	0.70	0.51	0.31	-0.24	0.73	0.40	0.75	0.03	0.49	0.03	0.34	0.88	0.18	-0.02
Mg ²⁺	0.94	-0.12	0.01	0.86	0.35	0.16	0.89	-0.13	-0.25	-0.19	0.36	0.42	0.77	0.15	0.24	0.86	0.16
Ca ²⁺	0.91	-0.07	0.21	0.78	0.50	0.00	0.90	-0.17	-0.21	-0.12	0.12	0.75	0.56	0.43	0.11	0.81	-0.17
F ⁻	0.89	-0.13	-0.24	0.94	-0.10	-0.02	0.90	-0.33	-0.18	0.12	-0.13	0.92	0.09	0.77	0.30	0.30	-0.27
Cl ⁻	0.09	0.22	0.78	0.38	0.56	0.57	0.73	0.41	0.27	-0.19	0.90	-0.01	0.08	0.15	0.79	0.25	0.04
NO ₂ ⁻	0.12	0.04	0.67	0.59	-0.07	-0.61	0.14	0.07	-0.89	0.10	-0.35	0.14	0.79	-0.14	0.75	0.20	0.29
NO ₃ ⁻	-0.04	0.87	0.26	0.29	0.84	-0.10	-0.17	0.91	-0.19	0.95	-0.23	-0.04	0.10	0.95	0.04	0.12	-0.06
SO ₄ ²⁻	-0.35	0.59	-0.01	0.10	0.89	0.03	-0.51	0.64	0.41	0.57	0.37	-0.18	0.66	0.24	0.10	-0.01	0.91
WSON	-0.13	- 0.45	0.61	0.15	-0.19	0.86	0.17	0.61	0.19	- 0.74	0.17	-0.31	0.19	-0.10	0.34	0.70	0.15
特征值	3.55	2.50	1.57	5.89	1.91	1.51	5.38	2.36	1.26	3.61	2.85	1.96	1.19	4.23	2.52	1.38	1.04
贡献率/%	24.6	48.0	69.2	37.6	70.4	84.6	33.0	65.3	81.7	30.5	50.0	68.6	87.2	27.3	48.1	67.8	83.3

1) 黑体字表示载荷较高的值

春季因子 3 中载荷较高的是 Cl⁻ 和 WSON, Cl⁻ 主要与生物质燃烧和海盐有关^[33], 但 Na⁺ 载荷值仅为 0.07, 而生物质燃烧产生 K⁺ (载荷值为 0.31), 故认为南京春季的 WSON 可能来源于生物质燃烧. 夏季因子 2 中的 NH₄⁺、K⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻ 和 WSON 载荷较高, 其中 NH₄⁺、NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 是典型的二次转化产物, 因此因子 2 被认为是二次转化和生物质燃烧. 秋季因子 1 中 NH₄⁺ (0.94)、K⁺ (0.75)、NO₃⁻ (0.95) 和 WSON (-0.74) 载荷高, SO₄²⁻ (0.57) 也有较高的载荷, 认为秋季 WSON 主要来源于二次转化和生物质燃烧. 冬季因子 3 中 WSON (0.70)、Ca²⁺ (0.81) 和 Mg²⁺ (0.86) 的载荷较高, 故认为冬季 WSON 主要来源于扬尘. 对采样期间全部样本进行主成分分析发现, 因子 2 中 NH₄⁺、SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 WSON 是因子载荷中最大的 4 个成分, 因子 3 中载荷较大的为 K⁺、Cl⁻、Na⁺ 和 WSON, 说明南京 WSON 除了含氮化合物在大气中的二次转化外, 还有海洋源的贡献.

3 结论

(1) 南京江北新区春季、夏季、秋季和冬季 PM_{2.5} 中 WSON 的平均值分别为 1.786、1.726、2.967 和 1.726 μg·m⁻³, 年平均 WSON 值为 2.04 μg·m⁻³, 占 WSTN 的 25%. WSON 最高浓度出现在秋季, 达到了 4.200 μg·m⁻³, 最低浓度出现在夏季, 仅为 0.446 μg·m⁻³.

(2) 冬季和夏季 WSON 平均值相同, 但它们在 WSTN 中的比例却不同. WSON 对 WSTN 的贡献在春季、夏季、秋季和冬季平均值分别为 0.21、0.31、0.36 和 0.15, WSON 对 WSTN 的平均贡献率占到 25%. WSON 与 WSIN 和 WSTN 的相关性均较高, 其中与 NO₂⁻-N 的相关性最高, 与 NO₃⁻-N 的相关性最低.

(3) 通过主成分分析表明, 南京江北新区 PM_{2.5} 中 WSON 主要来源于海盐、扬尘、生物质燃烧和化石燃料燃烧.

参考文献:

- [1] Galloway J N, Aber J D, Erisman J W, *et al.* The nitrogen cascade[J]. *BioScience*, 2003, **53**(4): 341-356.
- [2] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2002, **31**(2): 64-71.
- [3] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, *et al.* Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions[J]. *Science*, 2008, **320**(5878): 889-892.
- [4] Moffat A S. Global nitrogen overload problem grows critical[J]. *Science*, 1998, **279**(5353): 988-989.
- [5] Goulding K W T, Bailey N J, Bradbury N J, *et al.* Nitrogen deposition and its contribution to nitrogen cycling and associated

- soil processes[J]. *New Phytologist*, 1998, **139**(1): 49-58.
- [6] 王小剑, 张海霞, 蔡昂祖, 等. 邯郸市大气氮干湿沉降特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(12): 104-111.
Wang X J, Zhang H X, Cai A Z, *et al.* Study on the nitrogen characteristics of atmospheric dry and wet deposition in Handan city[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(12): 104-111.
- [7] Liu X J, Duan L, Mo J M, *et al.* Nitrogen deposition and its ecological impact in China: an overview [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(10): 2251-2264.
- [8] Spokes L J, Yeatman S G, Cornell S E, *et al.* Nitrogen deposition to the eastern Atlantic Ocean. The importance of south-easterly flow[J]. *Tellus Series B-chemical and Physical Meteorology*, 2000, **52**(1): 37-49.
- [9] Cornell S, Mace K, Coeppicus S, *et al.* Organic nitrogen in Hawaiian rain and aerosol[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, **106**(D8): 7973-7983.
- [10] Mace K A, Kubilay N, Duce R A. Organic nitrogen in rain and aerosol in the eastern Mediterranean atmosphere: an association with atmospheric dust[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, **108** (D10), doi: 10.1029/2002JD002997.
- [11] Nakamura T, Ogawa H, Maripi D K, *et al.* Contribution of water soluble organic nitrogen to total nitrogen in marine aerosols over the East China Sea and western North Pacific[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(37): 7259-7264.
- [12] Benítez J M G, Cape J N, Heal M R, *et al.* Atmospheric nitrogen deposition in south-east Scotland: quantification of the organic nitrogen fraction in wet, dry and bulk deposition[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(26): 4087-4094.
- [13] Duan F K, Liu X D, He K B, *et al.* Measurements and characteristics of nitrogen-containing compounds in atmospheric particulate matter in Beijing, China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, **82** (3): 332-337.
- [14] 鲁慧莹, 彭龙, 张国华, 等. 广州大气颗粒物水溶性有机氮的粒径分布特征和来源分析[J]. *地球化学*, 2019, **48**(1): 57-66.
Lu H Y, Peng L, Zhang G H, *et al.* Size distribution and sources of water-soluble organic nitrogen associated with atmospheric particles in Guangzhou[J]. *Geochimica*, 2019, **48** (1): 57-66.
- [15] 徐玢花, 杜艳, 胡俊超, 等. 上海 PM_{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征[J]. *地球化学*, 2016, **45**(2): 190-198.
Xu B H, Du Y, Hu J C, *et al.* Characteristics of water-soluble organic nitrogen in PM_{2.5} in Shanghai[J]. *Geochimica*, 2016, **45**(2): 190-198.
- [16] 刘随心, 曹军骥, 何建辉, 等. 西安大气 PM_{2.5} 中有机氮和无机氮的理化特征[J]. *地球环境学报*, 2013, **4**(2): 1272-1279.
Liu S X, Cao J J, He J H, *et al.* Characteristics of water-soluble organic and inorganic nitrogen in atmospheric fine particles (PM_{2.5}) from Xi'an[J]. *Journal of Earth Environment*, 2013, **4** (2): 1272-1279.
- [17] 陈韵涛. 中国扬州城区 PM_{2.5} 及水溶性有机氮离线化学表征和来源分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
Chen Y T. Chemical characteristics of PM_{2.5} and water-soluble organic nitrogen in Yangzhou, China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2019.
- [18] 李连菊. 两种常用大气采样器的日常维护及常见故障维修[J]. *现代电子技术*, 2003(13): 44-46.

- Li L J. Daily safeguard and common troubleshooting of two kinds of air sampling-meter[J]. *Modern Electronics Technique*, 2003 (13): 44-46.
- [19] 张程. 南京北郊冬春季大气气溶胶理化特性研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
- Zhang C. Physicochemical properties of ambient aerosols during winter and spring in northern suburban of Nanjing[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2019.
- [20] 韩静. 不同天气条件对青岛大气气溶胶中有机氮和尿素浓度分布的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- Han J. Water-soluble organic nitrogen and urea in Qingdao aerosols: influence of different weather conditions[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [21] HJ 636-2012, 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法[S].
- [22] 程玉婷, 王格慧, 孙涛, 等. 西安冬季非灰霾天与灰霾天 $PM_{2.5}$ 中水溶性有机氮污染特征比较[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2468-2476.
- Cheng Y T, Wang G H, Sun T, *et al.* Characteristics of water-soluble organic nitrogen of $PM_{2.5}$ in Xi'an during wintertime non-haze and haze periods[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2468-2476.
- [23] Feng J L, Chan C K, Fang M, *et al.* Characteristics of organic matter in $PM_{2.5}$ in Shanghai[J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(8): 1393-1400.
- [24] 徐玢花. 上海 $PM_{2.5}$ 中水溶性有机氮的浓度特征和来源解析[D]. 上海: 上海大学, 2015.
- Xu B H. Characteristics and sources of water-soluble organic nitrogen in $PM_{2.5}$ in Shanghai, China[D]. Shanghai: Shanghai University, 2015.
- [25] Galloway J N, Dentener F J, Mamer E, *et al.* The environmental reach of Asia[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2008, **33**: 461-481.
- [26] 张倩. 北京 $PM_{2.5}$ 中有机氮的污染特征与来源研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- Zhang Q. Characterization and sources of organic nitrogen in $PM_{2.5}$ in Beijing[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [27] 赵博阳, 项成龙, 陈焕兵, 等. 金华市大气 $PM_{2.5}$ 中 WSON 的质量浓度及来源[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2018, **24**(3): 437-445.
- Zhao B Y, Xiang C L, Chen H B, *et al.* Concentration and sources of WSON in $PM_{2.5}$ in Jinhua[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2018, **24**(3): 437-445.
- [28] 李清, 黄雯倩, 马帅帅, 等. 常州春季 $PM_{2.5}$ 中 WSOC 和 WSON 的污染特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 94-103.
- Li Q, Huang W Q, Ma S S, *et al.* Characteristics and sources of water-soluble organic carbon/nitrogen in $PM_{2.5}$ during spring in Changzhou[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 94-103.
- [29] Yu X, Yu Q Q, Zhu M, *et al.* Water soluble organic nitrogen (WSON) in ambient fine particles over a megacity in South China: spatiotemporal variations and source apportionment[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, **122**(23): 13045-13060.
- [30] Ho S S H, Li L J, Qu L L, *et al.* Seasonal behavior of water-soluble organic nitrogen in fine particulate matter ($PM_{2.5}$) at urban coastal environments in Hong Kong[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2019, **12**(4): 389-399.
- [31] Xing J W, Song J M, Yuan H M, *et al.* Water-soluble nitrogen and phosphorus in aerosols and dry deposition in Jiaozhou Bay, North China: deposition velocities, origins and biogeochemical implications[J]. *Atmospheric Research*, 2018, **207**: 90-99.
- [32] 宋晟宇. 太原大气细颗粒物中水溶性有机氮污染特性研究[D]. 太原: 山西大学, 2019.
- Song S Y. Characteristics of water-soluble organic nitrogen of $PM_{2.5}$ in Taiyuan[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019.
- [33] Andreae M O, Andreae T W, Annegarn H, *et al.* Airborne studies of aerosol emissions from savanna fires in southern Africa: 2. Aerosol chemical composition[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, **103**(D24): 32119-32128.

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	 HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	 WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	 ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	 ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	 CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	 WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	 GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	 TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	 SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	 WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	 LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	 ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	 YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	 XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)