

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铎, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期
Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析	刘春景, 吕建毅, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳 (3375)
基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟	庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏 (3386)
基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨	王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰 (3396)
厦门港大气 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平 (3404)
南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征	张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇 (3416)
晋中盆地主要城市冬季 PM _{2.5} 传输特征分析	王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣 (3423)
鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析	孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳峰 (3439)
济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP	王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋 (3451)
长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析	罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧 (3463)
2019 年 7 月石家庄市 O ₃ 生成敏感性控制策略解析	朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇 (3473)
华北平原 AOD 时空演化与影响因素	郭霖, 孟飞, 马明亮 (3483)
基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系	郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康 (3494)
基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征	王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威 (3508)
近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析	陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏 (3523)
高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素	杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强 (3532)
三峡水库不同支流库湾蓄水期溶解氧分层特性及差异性	纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽 (3543)
典型喀斯特城市湖泊溶解性有机质成分特征及来源解析	倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康 (3552)
骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估	黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕 (3562)
千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素	王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军 (3575)
泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征	张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮 (3587)
降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响	周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕 (3597)
典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价	储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏 (3608)
筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响	王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜 (3623)
天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识	刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德 (3635)
地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制	彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪 (3645)
北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析	门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵 (3656)
微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响	胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明 (3664)
不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响	任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟 (3672)
微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd ²⁺ 吸附机制	马文艳, 裴鹏刚, 高歌, 孙约兵 (3682)
不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素	连宁海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水 (3692)
Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能	印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨根, 何世颖, 薛利红 (3699)
一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析	李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送 (3708)
丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性	高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程阳阳, 彭永臻 (3718)
2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测	徐勇, 郑志威, 郭振东, 宴世卿, 黄雯婷 (3730)
近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估	陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明 (3741)
土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响	何宇, 盛茂根, 王轲, 王霖娇 (3752)
长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价	张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁 (3763)
煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性	尚誉, 桑楠 (3773)
燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价	李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚 (3781)
广州市南沙区第四剖面镉富集特征及生物有效性	王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏 (3789)
黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准	徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀 (3799)
土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测	张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南 (3811)
添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响	鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利 (3825)
不同稻作系统土壤的 CH ₄ 产生潜力与产生途径	沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华 (3835)
东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程	马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮 (3844)
同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐潞, 马飞 (3854)
岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较	肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛 (3865)
紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异响应	王智慧, 蒋先军 (3876)
有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响	肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全 (3884)
《环境科学》征订启事 (3403) 《环境科学》征稿简则 (3462) 信息 (3493, 3655, 3834)	

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜*, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇

(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)

摘要: 基于2019~2020年在南京北郊收集的大气降水进行降水pH、电导率和化学组分分析, 研究南京北郊大气降水pH值和电导率的季节变化规律, 分析了降水中水溶性无机氮(WSIN)和水溶性有机氮(WSON)的污染水平和沉降特征。结果表明, 观测期间南京北郊大气降水发生酸雨($\text{pH} < 5.6$)的频率达到37.18%, 降水酸化在秋冬季节较严重, pH值随季节表现出春季>夏季>秋季>冬季的变化趋势。降水电导率平均值为 $29.49 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 春季出现高pH和电导率与该季节大气中含量较高的扬尘有关。降水中WSIN和WSON的季节差异较大, 最高和最低 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N浓度分别出现在春季和夏季; WSON浓度则表现为秋季($2.63 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)最高。降水中WSON与水溶性总氮(WSTN)浓度平均比值约为0.47, 说明WSON对总氮研究具有重要意义。WSIN和WSON湿沉降通量的平均值分别为 $12.10 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 和 $11.13 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 其中无机氮沉降量主要以 NH_4^+ -N为主。

关键词: 大气降水; 酸雨; 水溶性无机氮; 水溶性有机氮; 氮沉降

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3416-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202111060

Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing

ZHANG Jia-ying, YU Xing-na*, ZHANG Yu-xin, DING Cheng, HOU Si-yu

(Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on atmospheric precipitation collected in the northern suburbs of Nanjing from 2019 to 2020, the pH, conductivity, and chemical components of precipitation were analyzed. The seasonal variation in pH and conductivity of atmospheric precipitation in the northern suburbs of Nanjing were studied. The pollution levels and deposition characteristics of water-soluble inorganic nitrogen (WSIN) and organic nitrogen (WSON) in precipitation were also analyzed. The frequency of acid rain ($\text{pH} < 5.6$) in atmospheric precipitation in the northern suburbs of Nanjing reached 37.18% during the observation period. Precipitation acidification was more serious in autumn and winter, and the pH value showed a variation trend of spring > summer > autumn > winter. The average conductivity of precipitation was $29.49 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; high pH and conductivity in spring were related to the high dust content in the atmosphere. The seasonal difference between WSIN and WSON in precipitation was significant. The highest and lowest concentrations of NO_3^- -N and NH_4^+ -N appeared in spring and summer, respectively. The concentration of WSON was the highest in autumn ($2.63 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). The average concentration ratio of WSON to water-soluble total nitrogen (WSTN) in precipitation was approximately 0.47, indicating that WSON played an important role in the study of total nitrogen. The average wet deposition fluxes of WSIN and WSON were $12.10 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ and $11.13 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, respectively, in which the inorganic nitrogen deposition was mainly NH_4^+ -N.

Key words: precipitation; acid rain; water-soluble inorganic nitrogen; water-soluble organic nitrogen; nitrogen deposition

活性氮是生物圈和大气圈中具有生物、光化学或辐射活性的含氮化合物, 一般不会转化成 N_2 , 而是通过沉降或者直接被植物吸收等方式重新返回到生态系统中^[1]。随经济快速发展, 由于人类活动如机动车尾气、畜牧业养殖和工业过程等导致大气活性氮的排放水平呈持续升高趋势^[2~4]。大气活性氮浓度的持续升高导致大气氮沉降量的明显增加, 过多的氮沉降将引起水体富营养化、土壤酸化和生物多样性减少等多种不良生态环境效应, 同时也极大干扰了氮循环^[5~7]。

我国关于氮沉降的观测自90年代后期陆续开展, 并主要集中在农田氮素湿沉降的监测。如沈善敏^[8]的研究在全国16个试验点的观测结果表明, 每年由降水带入农田的氮量为 $4\sim 23 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 江西红壤地区农田大气氮素湿沉降通量平均值达到了 $30.7 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ ^[9]。后来由于工业和交通业的迅

速发展, 城市地区也观测到很高的氮沉降量, 如北京2003~2004年的年均湿沉降量为 $32.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[10]; 上海^[11]和大连^[12]地区氮素湿沉降量也分别达到 $58.1 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $41.6 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。大气氮湿沉降作为氮沉降的主要方式之一, 在城市生态系统的氮沉降研究中并不多, 而且以往多数集中在无机氮上^[13~15]。由于有机氮在认识上存在争议, 导致在氮沉降研究中经常忽略有机氮的观测^[16, 17]。有机氮是大气颗粒物和雨水中重要的氮组分, 其通过改变雨水、气溶胶的缓冲能力和酸碱度来影响降水和气溶胶理化性质, 对深入研究活性氮沉降和氮循环

收稿日期: 2021-11-05; 修订日期: 2021-11-19

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: 张佳颖(1999~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为氮沉降, E-mail: 987532407@qq.com

* 通信作者, E-mail: xnyu@nuist.edu.cn

有着重要意义.有研究表明,从偏远地区到城市有机氮在总沉降量中均占有相当比例^[18].Cornell 等^[19]的研究认为世界各地湿沉降中水溶性有机氮所占比例为 11%~56%,Neff 等^[18]的研究估计全球大气有机氮沉降量为 10~50 Tg·a⁻¹,约占沉降总量平均值的 20%~30%.Zhang 等^[20]的研究对 2005~2009 年中国 32 个站点的降水样品分析表明,中国年均可溶性有机氮沉降量为 6.84 kg·hm⁻²,对混合氮沉降的贡献为 28%.

南京由于人口集中且工业发达,城市机动车拥有量不断上升,为了解城市生态系统中大气氮湿沉降特征,在南京开展大气降水酸度和含氮化合物的污染和沉降研究,对有效解决城市氮沉降的环境问题和充分利用氮素养分具有重要意义,以期为推进氮沉降调控措施以改善环境状况等提供一定的科学依据.

1 材料与方法

1.1 观测地点与样品收集

采样地点为南京北部的南京信息工程大学校内,采样时间为 2019 年 4 月至 2020 年 12 月之间共计 78 次降水,其中有 1 次降雪,其余都是降雨.2020 年 2~3 月因为疫情未进行采样.2019 年春季、夏季、秋季和冬季各采集了 7 次、12 次、4 次和 9 次降水,2020 年春季、夏季、秋季和冬季各采集了 2 次、31 次、12 次和 1 次降水.

降水利用采样桶收集,每次降雨/雪时,立即将采样桶放在空旷处,取每次降水开始至结束之间的全过程样,如果同一天内发生了多次不连续的降水,那么就统一为一次降水样本(非降水期间,盖上盖子,防止干沉降的影响),若有连续几天的降水,则收集 08:00 至第二天 08:00 的降水为一个样品进行测定.将收集到的样品分为两份,第一份放入冰箱密封保存,第二份无需过滤,倒入烧杯中用于测量电导率和 pH 值.

1.2 样品分析

1.2.1 pH 和电导率的测定

在实验室分析降水样品时,先对第二份倒入烧杯的样品,使用 pH 和电导率检测仪器进行现场检测.首先用天平称量降水样品并将样品平衡至室温,再用酸度计测量样品的 pH 值,最后用电导率仪测量样品的电导率.

1.2.2 水溶性无机氮(water-soluble inorganic nitrogen, WSIN)分析

样品中的水溶性阴阳离子采用瑞士万通离子色谱仪在恒温 25℃ 下进行测定,定量方法为外标法,在相同的色谱条件下分别对标准溶液和样品溶液进

行测定,并将得到的色谱峰面积进行比较,从而得到样品溶液中各种离子的含量.阴离子色谱柱型号为 Metrosep A Supp5-150,阴淋洗液为 3.2 mmol·L⁻¹ Na₂CO₃ 和 1 mmol·L⁻¹ NaHCO₃ 混合溶液,流速为 0.7 mL·min⁻¹;阳离子色谱柱型号 Metrosep C4-150,阳淋洗液为 5.6 mmol·L⁻¹ HNO₃ 溶液,流速为 0.9 mL·min⁻¹.抑制液为 H₂SO₄ 溶液(5 mL 浓 H₂SO₄ 用超纯水定容至 1 L).每 10 个样品对应加 2~3 个空白样.

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

首先进行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 mg·L⁻¹ KNO₃ 标准溶液,220 nm 和 275 nm 下标准溶液吸光度采用紫外分光光谱仪进行测定,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^[21]:

$$A_s = A_{s,220} - 2A_{s,275} \quad (1)$$

$$A_b = A_{b,220} - 2A_{b,275} \quad (2)$$

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

式中, $A_{s,220}$ 和 $A_{s,275}$ 分别为 220 nm 和 275 nm 下标准溶液的吸光度, $A_{b,220}$ 和 $A_{b,275}$ 分别为 220 nm 和 275 nm 下零浓度溶液的吸光度.标准曲线根据 A_r 和标准溶液浓度进行绘制,保证总氮浓度与吸光度相关系数达到 0.999 以上.

用移液枪取 5 mL 降水样品于 25 mL 具塞磨口玻璃比色管中,加入 5 mL 碱性过硫酸钾溶液(40 g 过硫酸钾 + 15 g 氢氧化钠配成 1 L),拧紧管塞,放入高压蒸汽灭菌器中在 121℃ 下消解 1 h,自然冷却、开阀放气,移去外盖,取出比色管冷却至室温,加入 1 mL HCl(1+9),定容至 25 mL 并混合均匀.使用岛津 3600 型紫外分光光度计测定 220 nm 和 275 nm 下样品溶液的吸光度,样品溶液的吸光度 A 按照式(4)进行计算,最后将吸光度 A 代入标准曲线中即可得到样品溶液浓度.

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

1.2.4 水溶性有机氮(water-soluble organic nitrogen, WSON)计算

降水样品中水溶性有机氮浓度为水溶性总氮浓度减去水溶性无机氮浓度,即 $WSON = WSTN - WSIN$ ^[22],其中 $WSIN$ 包括 NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N.

2 结果与讨论

2.1 降水 pH 值和电导率

在南京北郊 2019 年 4 月至 2020 年 12 月间共

计 78 次降水中,降水 pH 值变化范围在 4.16 ~ 7.44 内,平均值为 5.9;最低和最高 pH 值分别发生在 2020 年 1 月 10 日和 2019 年 5 月 30 日.大多数降水 pH 值高于 5.6,其中 pH 值高于 7.0 的降水有 4 次;但 pH 值低于 5.6 的降水达到了 29 次,发生强酸雨 ($\text{pH} \leq 4.5$) 有 3 次,说明南京北郊大气降水酸化较为严重.从季节差异上看(图 1),春夏季节的 pH 值明显高于秋冬季,其中春季降水 pH 平均值高出冬季的 18.5%.秋季和冬季降水 pH 平均值分别为 5.6 和 5.2,结合图 2 看出,pH 值低于 5.6 的降水在秋季和冬季分别占到 50% 和 80%,且 pH 值低于 4.5 的强酸雨只在冬季出现.秋冬两季出现低值的现象与福州市^[23]相同,可能是因为南京秋冬季受冷高压系统的影响, SO_2 和 NO_x 等污染物不易扩散,且秋冬季降水频率低,酸性污染物不易稀释,导致南京秋冬季酸雨现象更为严重.

大气降水的电导率是对降水导电能力大小的度量,可以表征大气降水的污染程度.污染程度越高, SO_2 和 NO_x 等污染物进入降水后形成的可溶性离子越多,从而导致电导率的增大.2019 年和 2020 年南京北郊大气降水的电导率平均值分别为 $38.12 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $24.66 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,说明 2020 年大气降水中的污染物总量明显下降.观测期间降水的最小电

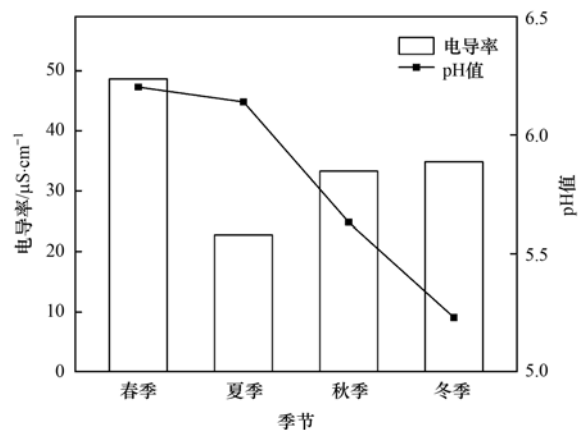


图1 2019~2020年南京北郊降水 pH 和电导率季节分布

Fig. 1 Seasonal distribution of pH and conductivity of precipitation in the northern suburbs of Nanjing from 2019 to 2020

导率出现在 2019 年 8 月 28 日,仅为 $4.49 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,这与夏季较高的降水量 (435.2 mm) 以及降水频率 (12 次) 有关;最大电导率发生在 2019 年 4 月 16 日,达到了 $151.7 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,这是由于 2019 年 4 月初出现的大范围沙尘天气,空气中夹杂着大量的碱性沙尘气溶胶,导致降水电导率的增大,同时该日降水 pH 值也达到了 7.4 的高值.南京北郊降水电导率平均值为 $29.49 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,与珠海市^[24] ($25.8 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) 和重庆郊区^[25] ($24.4 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) 相似,但明显低于西安市^[26] ($36.9 \sim 195 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).由图 1

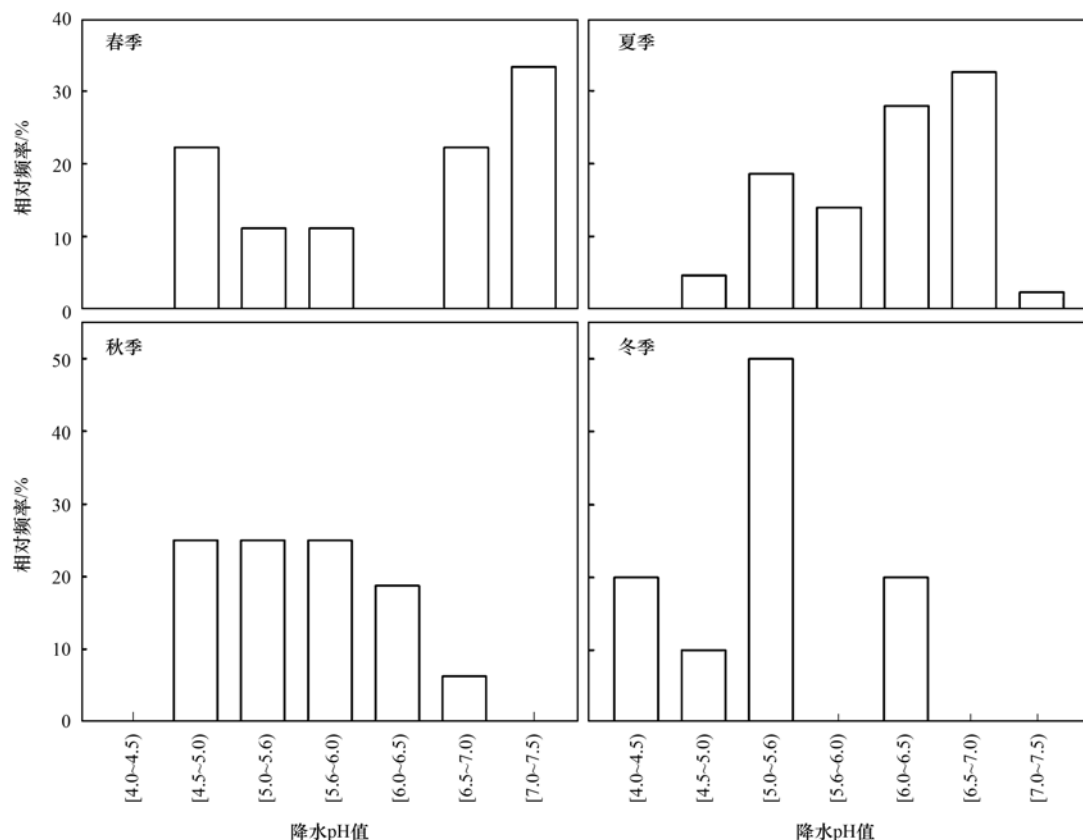


图2 2019~2020年南京北郊各季节降水 pH 的频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of pH of precipitation in different seasons in the northern suburbs of Nanjing from 2019 to 2020

可以看出,电导率随季节呈现出先下降后上升的趋势,春季、夏季、秋季和冬季的平均值分别为 48.65 、 22.43 、 33.31 和 $34.89 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. 结合图 3, 夏季和秋季降水电导率低于 $30 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的占比最高,约占 70%; 高于 $90 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的降水最多出现在

春季,占到 22%. 总的来说,春季的高 pH 值和电导率是由于春季大量含碱性的扬尘造成; 除夏季外, 其他 3 个季节较高的电导率是由于降水频率低、降水时间间隔长、污染物排放量高和天气形势等原因造成.

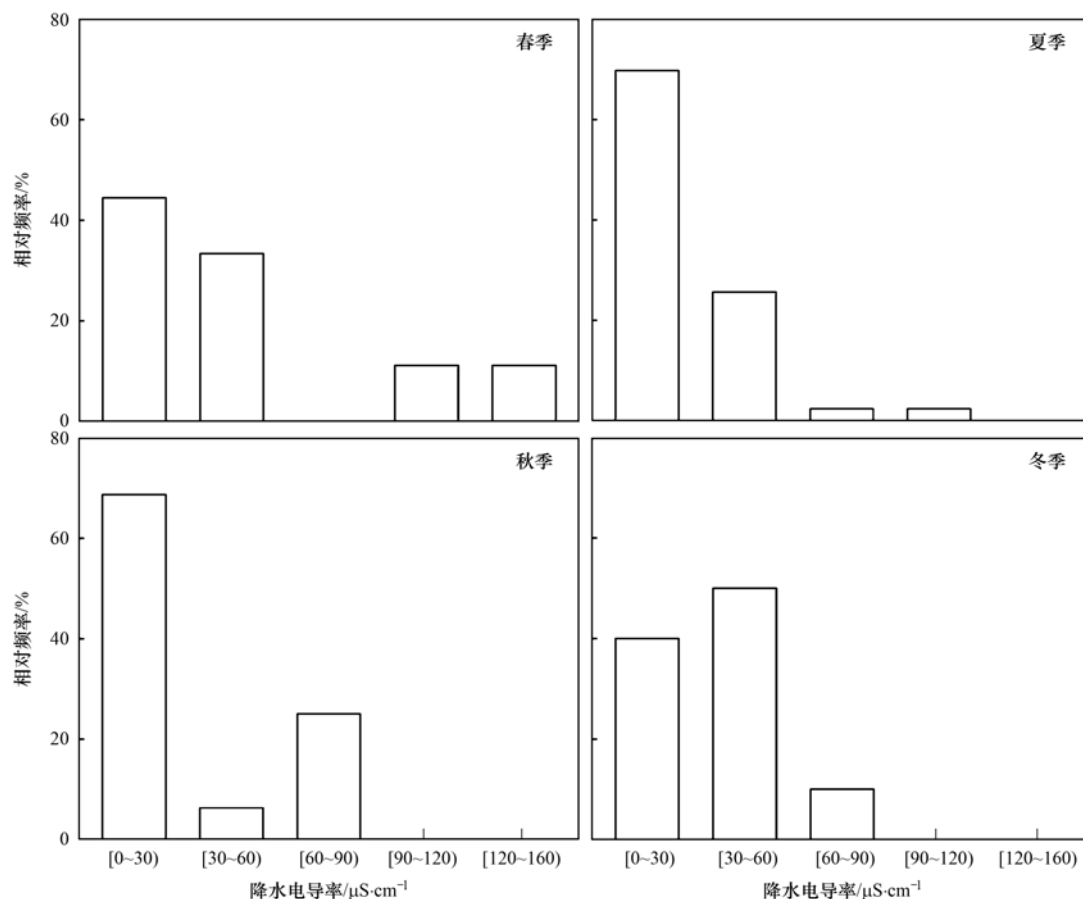


图 3 2019 ~ 2020 年南京北郊各季节降水电导率的频率分布

Fig. 3 Frequency distribution of conductivity of precipitation in different seasons in the northern suburbs of Nanjing from 2019 to 2020

2.2 水溶性无机氮和水溶性有机氮污染水平

图 4 为 2019 ~ 2020 年南京北郊降水中 WSIN 和 WSON 浓度的季节变化. 从中可知, 水溶性总氮浓度根据季节可表现为春季 > 秋季 > 冬季 > 夏季的变化趋势. 夏季 WSTN 浓度最低主要是因为夏季降水量大且降水次数多, 对水溶性总氮有稀释作用. 无机氮和有机氮的季节差异较大, 例如 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度最高均出现在春季、最低值在夏季; 而 WSON 浓度表现为秋季 ($2.63 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 明显高于其他 3 个季节. 春季、夏季和冬季 WSIN 浓度要高于 WSON, 尤其是冬春季更为明显; 而秋季 WSON 浓度略高于无机氮. 这主要是因为冬春季大气污染较为严重, 加上温度较低, 使得无机氮含量得以累积; 但夏秋季的高温容易使得硝态氮挥发而导致 NO_3^- -N 浓度出现明显下降, 夏季降水的 NO_3^- -N 浓度仅为冬季的 60% 左右. 由南京北郊大气降水 NH_4^+ -N/

NO_3^- -N 的比值上分析, 发现该比值在夏季最高, 达到了 2.40, 是冬季的 1.6 倍 (1.50). 整个观测期间该比值为 2.05, 明显高于 2006 年邓君俊等^[27] 的观测结果 (0.628), 说明大气无机氮的主要来源已由工业排放和交通活动转变为以农业活动为主.

2.3 水溶性无机氮和水溶性有机氮湿沉降量

图 5 和图 6 为南京北郊不同形态氮素湿沉降量及其占比的季节变化. 2019 ~ 2020 年南京北郊总氮湿沉降量变化范围为 $12.63 \sim 22.20 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 其中 WSIN 和 WSON 的湿沉降量平均值分别占到总氮湿沉降量的 52.13% 和 47.87%. 通常来说, 在偏远的森林地区和施用有机肥的农业地区, 溶解性有机氮对溶解性总氮的贡献较高, 而位于城市站点该贡献降低, 主要是由于城市交通污染导致较高的 NO_3^- -N 浓度及其沉降量^[28]. Zhang 等^[20] 的研究通过全国 32 个站点的降水样品分析得出平均可溶性有机氮沉降对混合氮沉降的贡献率约

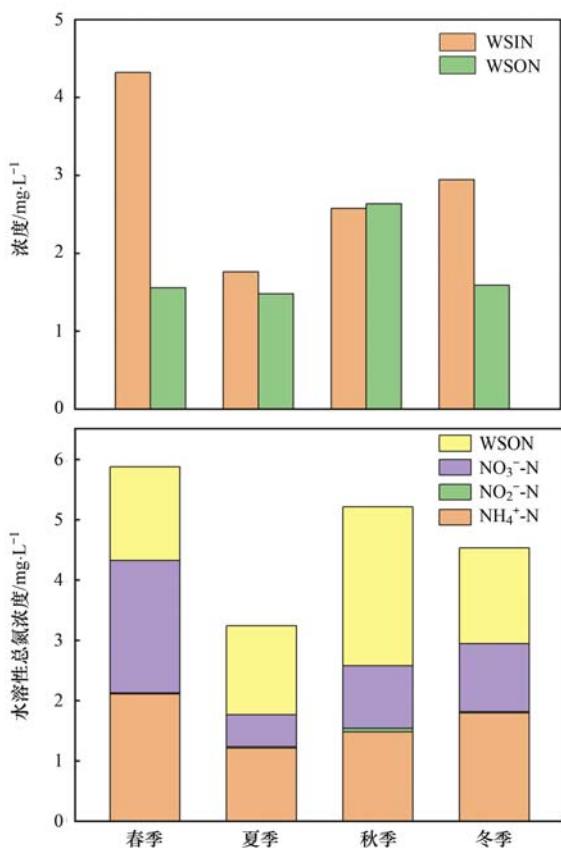


图4 2019~2020年南京北郊降水中WSIN和WSON浓度的季节变化

Fig. 4 Seasonal variations in WSIN and WSON concentrations in precipitation in the northern suburbs of Nanjing from 2019 to 2020

28%,南京北郊出现较高的WSON贡献可能与该站点城乡接合地的特殊地理位置以及测量仪器本身的误差等因素有关.南京北郊WSTN湿沉降量的平均值为 $23.22 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,高于我国的湿沉降量平均值 $[9.88 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}]^{[20]}$,表明南京市降水中氮污染较为严重.与邓君俊等^[27]于2005~2006年的结果相比,虽然WSIN和WSON湿沉降量占比与本研究结果相近,但本研究的总氮湿沉降量较低,说明近年来空气质量有所改善使得沉降量也表现出下降趋势.

由图5看出, NH_4^+ -N、 NO_3^- -N和WSON的湿沉降量都表现出了明显的季节变化.可以看出,各种形态的氮素都与降水量呈现正相关,表明降水量对氮的湿沉降有重要作用.与污染水平不同,夏季的 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N和WSON湿沉降量均明显高于其他3个季节,例如夏季 NH_4^+ -N的湿沉降量是春季的4.83倍,WSON在夏季的湿沉降量达到 $5.16 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,是冬季的10.90倍. NH_4^+ -N和 NO_3^- -N湿沉降量的最高值都在7月,分别达到 $1.88 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{mon})^{-1}$ 和 $0.87 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{mon})^{-1}$,与大连的研究结果一致^[12],这与夏季高 NH_3 排放和降雨

量大有关.由不同形态氮素占比来看(图6),秋季湿沉降主要以WSON沉降为主,而冬春季以WSIN沉降为主,夏季两者占比相当,说明在降水化学组分分析中不能忽视有机氮,由于其占比较高,对研究生态系统的氮沉降具有重要意义.WSIN湿沉降中主要以 NH_4^+ -N为主,沉降量平均值达到 $8.00 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,是 NO_3^- -N的2.05倍,表明南京大气氨/铵污染比较严重.

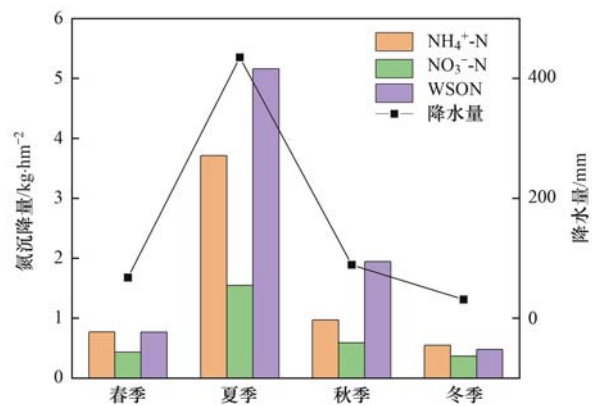


图5 2019~2020年南京北郊降水量以及降水中 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N和WSON沉降量的季节变化

Fig. 5 Seasonal variations in precipitation and NH_4^+ -N, NO_3^- -N, and WSON in precipitation in the northern suburbs of Nanjing from 2019 to 2020

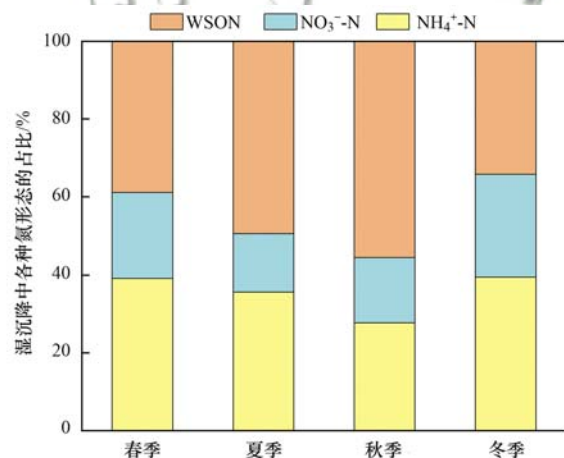


图6 2019~2020年南京北郊降水中不同形态氮素占比的季节变化

Fig. 6 Seasonal variation in wet deposition and proportion of different nitrogen forms in precipitation in the northern suburbs of Nanjing from 2019 to 2020

表1列举了中国部分地区降水中水溶性氮的沉降量和占比.观测期间南京北郊降水中WSTN的沉降量平均值为 $23.22 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,明显低于浙江奉化、广东韶关和南京的早期观测结果,高于西藏林芝和山西山阴,与大连和河南南阳的观测值相似;但南京WSON湿沉降量及其在WSTN中的占比却高于大连和南阳,说明南京大气降水中WSON的观

测对研究氮沉降非常重要. 韶关 WSTN 的湿沉降量高于南京, 与其较高的降水量有关. 大连、南阳、林芝和石匣的降水量与南京相似, 除林芝空气清洁导致 WSTN 湿沉降量明显很低外, 其他地区的湿沉降量都与南京相似. 由 WSIN 与 WSON 的比值来看, 各

地区湿沉降中的 WSIN 沉降通常略高于 WSON, 而大连和韶关仍以 WSIN 沉降占有明显优势. 除大连、福州和南京的早期结果外, 大部分地区降水中 NH_4^+ -N 的沉降量明显要高于 NO_3^- -N, 表明这些地区的农业源在氮湿沉降中占有主导地位.

表 1 中国部分地区降水中水溶性氮的沉降量和占比比较

Table 1 Comparison of deposition and proportion of water-soluble nitrogen in precipitation in some areas of China									
采样点	采样日期 (年-月)	降水量 /mm·a ⁻¹	WSTN 沉降量 /kg·(hm ² ·a) ⁻¹	WSON 沉降量 /kg·(hm ² ·a) ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N 沉降量 /kg·(hm ² ·a) ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N 沉降量 /kg·(hm ² ·a) ⁻¹	WSON/WSTN /%	WSIN/ WSON	文献
南京北郊	2019-04 ~ 2020-12	623. 20	23. 22	11. 13	8. 00	3. 91	47. 87	1. 09	本研究
辽宁大连	2009	658. 89	22. 94	5. 27	7. 99	9. 68	22. 97	3. 35	[12]
重庆	2002 ~ 2016	1 122. 75	— ¹⁾	—	22. 33	8. 76	—	—	[25]
陕西西安	2000 ~ 2017	—	—	—	13. 14	4. 86	—	—	[26]
南京	2005-06 ~ 2006-05	—	66	33. 5	11. 7	19. 4	50. 70	0. 97	[27]
河南南阳	2018-11 ~ 2019-10	736. 95	24. 21	8. 80	11. 49	3. 92	36. 34	1. 75	[29]
浙江奉化	2004-12 ~ 2005-09	—	54. 01	23. 25	20. 07	10. 69	42. 82	1. 34	[30]
西藏林芝	2017-03 ~ 2017-10	625	28. 8	10. 94	—	—	38	1. 63	[31]
广东韶关	2012-04 ~ 2013-09	3 486. 40	53. 226	8. 3214	23. 832	21. 06	12. 49	7. 01	[32]
福建福州	2011 ~ 2013	1692. 60	—	—	10. 208	10. 528	—	—	[33]
北京石匣	2014-05 ~ 2015-01	661. 80	17. 19	7. 35	8. 44	1. 4	42. 76	1. 34	[34]
西宁青海	2014 ~ 2015	357. 00	—	—	7. 6	6. 2	—	—	[35]
山西山阴	2010-04 ~ 2011-03	360. 00	12. 43	4. 16	4. 17	4. 03	33. 47	1. 99	[36]
全国平均	—	—	9. 88	2. 77	—	—	28	—	[20]

1) “—”表示文章中没有相关数据

3 结论

(1) 观测期间南京北郊大气降水 pH 值变化在 4. 16 ~ 7. 44 范围内, 平均值为 5. 9. 春夏季的 pH 值明显高于秋冬季, 秋季和冬季降水 pH 平均值分别为 5. 6 和 5. 2. 电导率在 4 个季节的平均值分别为 48. 65、22. 43、33. 31 和 34. 89 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. 春季高 pH 值和电导率与当季大气中较高含量的扬尘有关; 而夏季降水 pH 值和电导率均处于较好的水平.

(2) 水溶性总氮从季节上表现为春季 > 秋季 > 冬季 > 夏季的变化趋势. WSIN 和 WSON 的季节差异较大, NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度最高值均出现在春季、最低值在夏季; 而 WSON 浓度表现为秋季 (2. 63 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 明显高于其他 3 个季节. WSON 在 WSTN 中的占比高于大连和南阳等地, 约占到 48%, 表明南京大气降水中有有机氮的观测非常重要.

(3) WSIN 和 WSON 的湿沉降量平均值分别达到 12. 10 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 和 11. 13 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 高于我国的氮湿沉降量平均值 9. 88 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 其中无机氮沉降量主要以 NH_4^+ -N 为主.

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] Liu M X, Huang X, Song Y, *et al.* Rapid SO₂ emission

reductions significantly increase tropospheric ammonia concentrations over the North China Plain [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18 (24): 17933-17943.

[4] Wang H Y, Zhang D, Zhang Y T, *et al.* Ammonia emissions from paddy fields are underestimated in China [J]. Environmental Pollution, 2018, 235: 482-488.

[5] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, *et al.* Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences [J]. Ecological Applications, 1997, 7 (3): 737-750.

[6] Paerl H W, Xu H, McCarthy M J, *et al.* Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu, China): the need for a dual nutrient (N & P) management strategy [J]. Water Research, 2011, 45 (5): 1973-1983.

[7] Liu M X, Huang X, Song Y, *et al.* Ammonia emission control in China would mitigate haze pollution and nitrogen deposition, but worsen acid rain [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116 (16): 7760-7765.

[8] 沈善敏. 氮肥在中国农业发展中的贡献和农业中氮的损失 [A]. 见: 氮素循环与农业和环境学术研讨会论文 (摘要) 集 [C]. 厦门: 中国土壤学会, 2001.

[9] 王体健, 刘倩, 赵恒, 等. 江西红壤地区农田生态系统大气氮沉降通量的研究 [J]. 土壤学报, 2008, 45 (2): 280-287.

Wang T J, Liu Q, Zhao H, *et al.* Atmospheric nitrogen deposition in agroecosystem in red soil region of Jiangxi Province [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (2): 280-287.

[10] 张颖, 刘学军, 张福锁, 等. 华北平原大气氮素沉降的时空变异 [J]. 生态学报, 2006, 26 (6): 1633-1639.

Zhang Y, Liu X J, Zhang F S, *et al.* Spatial and temporal variation of atmospheric nitrogen deposition in North China Plain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26 (6): 1633-1639.

[11] 张修峰. 上海地区大气氮湿沉降及其对湿地水环境的影响 [J]. 应用生态学报, 2006, 17 (6): 1099-1102.

Zhang X F. Atmospheric nitrogen wet deposition and its effects on wetland water environment of Shanghai area [J]. Chinese Journal

- of Applied Ecology, 2006, **17**(6): 1099-1102.
- [12] 颜文娟, 史锟. 大连市大气氮湿沉降研究[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(3): 517-522.
- Yan W J, Shi K. Program on the nitrogen concentrations in rain water in Dalian city[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, **22**(3): 517-522.
- [13] Lin Y C, Zhang Y L, Yu M Y, *et al.* Formation mechanisms and source apportionments of airborne nitrate aerosols at a Himalayan-Tibetan plateau site: insights from nitrogen and oxygen isotopic compositions[J]. Environmental Science & Technology, 2021, **55**(18): 12261-12271.
- [14] Wang W, Xu W, Wen Z, *et al.* Characteristics of atmospheric reactive nitrogen deposition in Nyingchi city [J]. Scientific Reports, 2019, **9**(1), doi: 10.1038/s41598-019-39855-2.
- [15] Yu G R, Jia Y L, He N P, *et al.* Stabilization of atmospheric nitrogen deposition in China over the past decade[J]. Nature Geoscience, 2019, **12**(6): 424-429.
- [16] 常运华, 刘学军, 李凯辉, 等. 大气氮沉降研究进展[J]. 干旱区研究, 2012, **29**(6): 972-979.
- Chang Y H, Liu X J, Li K H, *et al.* Research progress in atmospheric nitrogen deposition[J]. Arid Zone Research, 2012, **29**(6): 972-979.
- [17] 郑利霞, 刘学军, 张福锁. 大气有机氮沉降研究进展[J]. 生态学报, 2007, **27**(9): 3828-3834.
- Zheng L X, Liu X J, Zhang F S. Atmospheric deposition of organic nitrogen: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, **27**(9): 3828-3834.
- [18] Neff J C, Holland E A, Dentener F J, *et al.* The origin, composition and rates of organic nitrogen deposition: a missing piece of the nitrogen cycle? [J]. Biogeochemistry, 2002, **57**(1): 99-136.
- [19] Cornell S E, Jickells T D, Cape J N, *et al.* Organic nitrogen deposition on land and coastal environments: a review of methods and data[J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(16): 2173-2191.
- [20] Zhang Y, Song L, Liu X J, *et al.* Atmospheric organic nitrogen deposition in China[J]. Atmospheric Environment, 2012, **46**: 195-204.
- [21] 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.
- [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] 郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 等. 1992~2012 年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素[J]. 环境科学, 2014, **35**(10): 3644-3650.
- Zheng Q P, Wang H, Chen B B, *et al.* Characteristics and the impact factors of acid rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012[J]. Environmental Science, 2014, **35**(10): 3644-3650.
- [24] 王国祯, 刘偲嘉, 于兴娜. 珠海市降水化学与沉降特征[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(7): 1612-1620.
- Wang G Z, Liu S J, Yu X N. Characteristics of precipitation chemistry and wet deposition in Zhuhai, China[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(7): 1612-1620.
- [25] 侯思宇, 于兴娜, 龚克坚, 等. 重庆市大气降水污染及其沉降特征[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(10): 4100-4107.
- Hou S Y, Yu X N, Gong K J, *et al.* Pollution and deposition characteristics of precipitation in Chongqing [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(10): 4100-4107.
- [26] 丁铤, 于兴娜, 侯思宇. 西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 647-655.
- Ding C, Yu X N, Hou S Y. Pollution and deposition characteristics of precipitation and its source apportionment in Xi'an City[J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 647-655.
- [27] 邓君俊, 王体健, 李树, 等. 南京郊区大气氮化物浓度和氮沉降通量的研究[J]. 气象科学, 2009, **29**(1): 25-30.
- Deng J J, Wang T J, Li S, *et al.* Study on atmospheric nitrogen oxidant and deposition flux in suburban of Nanjing[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2009, **29**(1): 25-30.
- [28] Lü C Q, Tian H Q. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: synthesis of observational data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, **112**(D22), doi: 10.1029/2006JD007990.
- [29] 郭晓明, 金超, 孟红旗, 等. 丹江口水库淅川库区大气氮湿沉降特征[J]. 生态学报, 2021, **41**(10): 3901-3909.
- Guo X M, Jin C, Meng H Q, *et al.* Atmospheric wet deposition characteristics of nitrogen in the Xichuan area of Danjiangkou reservoir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(10): 3901-3909.
- [30] Zhang Y, Zheng L, Liu X, *et al.* Evidence for organic N deposition and its anthropogenic sources in China [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(5): 1035-1041.
- [31] Wang W, Liu X J, Xu J, *et al.* Imbalanced nitrogen and phosphorus deposition in the urban and forest environments in southeast Tibet[J]. Atmospheric Pollution Research, 2018, **9**(4): 774-782.
- [32] 刘思言, 陈瑾, 卢平, 等. 广东韶关地区大气氮干湿沉降特征研究[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(9): 1445-1450.
- Liu S Y, Chen J, Lu P, *et al.* Dry and wet atmospheric deposition of nitrogen into Shaoguan, Guangdong Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(9): 1445-1450.
- [33] 杨道伟, 许稳, 唐傲寒, 等. 中国东部地区无机氮湿沉降: 南-北不同类型监测点的比较[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(10): 3205-3212.
- Yang D W, Xu W, Tang A H, *et al.* Inorganic nitrogen wet deposition in eastern China: Comparison of different land use-based monitoring sites in north and south regions [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(10): 3205-3212.
- [34] 王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 等. 小流域大气氮干湿沉降特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5365-5374.
- Wang H J, Pang S J, Wang X Y, *et al.* Dry and wet deposition of atmospheric nitrogen in small catchments [J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5365-5374.
- [35] 许稳, 金鑫, 罗少辉, 等. 西宁近郊大气氮干湿沉降研究[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1279-1288.
- Xu W, Jin X, Luo S H, *et al.* Dry and bulk nitrogen deposition in suburbs of Xining City[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1279-1288.
- [36] 刘平, 刘学军, 骆晓声, 等. 山西北部农村区域大气活性氮沉降特征[J]. 生态学报, 2016, **36**(17): 5353-5359.
- Liu P, Liu X J, Luo X S, *et al.* The atmospheric deposition characteristics of reactive nitrogen (Nr) species in Shuozhou area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(17): 5353-5359.

CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model	PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing	ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatial-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data	WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period	Ji Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths	WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst	HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province	XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil	XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)