

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期
Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力	李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培 (5563)
汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策	王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平 (5574)
西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单	高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益 (5585)
新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析	陈军辉, 冯小琼, 李媛, 王书肖 (5594)
基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM _{2.5} 浓度估算	吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖迪 (5602)
《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思 (5616)
洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析	孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹 (5624)
北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素	曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭 (5633)
天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析	王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (5644)
沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性	杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜 (5656)
典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析	葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正 (5663)
南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估	张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟 (5673)
基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征: 以郑州市高新区为例	任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄 (5687)
我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响	高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小栓 (5698)
VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析	王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿 (5713)
山东省 O ₃ 时空分布及影响因素分析	张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨 (5723)
2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性	钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政 (5736)
基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建	郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇 (5747)
三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析	张凯, 吴凤平, 成长春 (5757)
长江流域总氮排放量预测	丁肇慰, 郑华 (5768)
1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征	姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江 (5777)
黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布	韩谔, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明 (5786)
基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源	邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅 (5796)
水源水库真核微生物种群结构季相演替特征	张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容 (5804)
达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异	李文宝, 郭鑫, 张博尧, 杜蕾, 田雅楠 (5814)
尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制	王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞 (5826)
武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估	张坤峰, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军 (5836)
上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系	徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮 (5848)
曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素	李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇 (5857)
水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除	赵伟, 范增增, 杨新萍 (5865)
木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响	孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报 (5876)
黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮	魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英 (5884)
玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响	南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒 (5896)
饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径	周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (5905)
污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势	曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高 (5912)
阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应	高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕 (5921)
典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	李强, 曹莹, 何连生, 王耀峰, 龚成, 何书涵 (5930)
我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价	王耀峰, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健 (5938)
浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险	王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜雯雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军 (5949)
北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探	管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华 (5958)
典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价	强瑞, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫 (5967)
雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应	周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌 (5977)
铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划	朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波 (5988)
干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响	黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧 (5997)
铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除	王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郅红建, 叶新新 (6006)
稻田灌溉河流 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及影响因素	吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文 (6014)
节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房 (6025)
有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N ₂ O 的排放特征及微生物特性	王楷, 史雷, 马龙, 王书婷, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年 (6038)
不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响	孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖 (6047)
氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响	杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧 (6058)
化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响	向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明 (6067)
浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量	王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛 (6078)
《环境科学》第42卷(2021年)总目录	(6091)
《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)	

基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源

邢子康^{1,2,3}, 余钟波^{1,2,3}, 衣鹏^{1,2,3*}, 钱睿智⁴, 王嘉毅⁵

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学全球变化与水循环国际合作联合实验室, 南京 210098; 3. 长江保护与绿色发展研究院, 南京 210098; 4. 江苏省水文水资源勘测局扬州分局, 扬州 225000; 5. 河海大学水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 随着城市化的进程和人类活动强度的增加, 过高的硝酸盐污染负荷对地表水水质安全构成极大威胁。当前针对地表水体的硝酸盐源解析仅强调了来源的季节性变化特征, 而鲜见考虑降雨事件对区域污染源组成的影响。本文以扬州市江都区通扬运河为研究对象, 利用氮氧同位素技术和基于 R 语言的稳定同位素模型 (stable isotope analysis in R) 定量评价了各类型污染源在不同降雨条件下对水体硝酸盐污染的贡献。结果表明: ①通扬运河各区段污染物浓度具有很强的空间变异性。 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 具有相似的空间分布特征, 表现为: 中游区 > 下游区 > 上游区, 中游区较高的城市化水平带来的人类活动加剧了氮污染的输入。②降雨增加了各河段污染物浓度的不确定性, 降雨带来的冲刷和稀释效应总体上增加了水体中的 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 、 $\rho(\text{Cl}^-)$ 和 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 。③在无雨和低降雨的条件下, 通扬运河水体 NO_3^- 主要来源于大气沉降 (贡献率为 27%~47%) 和土壤有机氮 (贡献率为 21%~29%); 在降雨事件影响下, 化肥 (贡献率为 16%~34%) 成为了最主要的污染源。降雨造成的污染源变化具有空间差异性, 下游区 (农业区) 化肥和土壤有机氮贡献率的增加较中上游区更加明显。④下游区存在较强的反硝化作用, 且低降雨条件下更容易发生硝化和反硝化。

关键词: 硝酸盐污染; 氮氧同位素; 基于 R 语言的稳定同位素模型 (SIAR); 通扬运河; 源解析

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5796-08 DOI: 10.13227/j.hjkx.202104052

Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values

XING Zi-kang^{1,2,3}, YU Zhong-bo^{1,2,3}, YI Peng^{1,2,3*}, QIAN Rui-zhi⁴, WANG Jia-yi⁵

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Joint International Research Laboratory of Global Change and Water Cycle, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Yangzhou 225000, China; 5. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Due to the process of urbanization and the increase in human activities, high nitrate pollution poses a great threat to the surface water quality. Recent analyses of nitrate sources have only emphasized the seasonal variation of the source, rarely considering the impact of precipitation events on the composition of pollution sources. This study selected the Tongyang Canal in Jiangdu District, Yangzhou City, as the research object. Nitrogen and oxygen isotope technology and the stable isotope analysis in R (SIAR) model were used to calculate the contributions of different nitrate sources under different precipitation conditions. The results showed that: ① The concentration of pollutants in each section of the Tongyang Canal had strong spatial variability. The concentration of NO_3^- and NH_4^+ had a similar spatial distribution (middle > downstream > upstream). The high level of urbanization in the middle reach increased the input of nitrogen. ② Precipitation increased the uncertainty of the concentration in various sections, and the erosion and dilution effects brought via precipitation generally increased $\rho(\text{NO}_3^-)$, $\rho(\text{NH}_4^+)$, $\rho(\text{Cl}^-)$, and $\rho(\text{SO}_4^{2-})$. ③ Under the conditions of no and low rainfall, the NO_3^- of the Tongyang Canal mainly came from atmospheric deposition (contribution rate of 27% to 47%) and soil organic nitrogen (contribution rate of 21% to 29%). Influenced by rainfall events, chemical fertilizers (with a contribution rate of 16% to 34%) became the most important source. The changes in pollution sources caused by rainfall were spatially different. The contribution rate of chemical fertilizers and soil organic nitrogen in the downstream reach (agricultural area) increased more significantly than that in the upper and middle reach. ④ There was strong denitrification in the downstream area, and nitrification and denitrification were more likely to occur under low rainfall conditions.

Key words: nitrate pollution; nitrogen and oxygen isotopes; stable isotope analysis in R (SIAR); Tongyang Canal; source analysis

近年来,随着人口的增加、社会经济的发展 and 城市化的扩张,导致了人为氮排放的增加和城市河道硝酸盐(NO_3^-)浓度明显上升,从而引发了水体富营养化并威胁饮用水安全^[1~4]。目前,水体硝酸盐污染已经成为全国面临的主要水环境问题之一^[5~7]。开展硝酸盐来源解析对水污染控制和污染物迁移转化过程有重要意义。

受硝酸盐迁移转化过程复杂性和城市地区污染

源分散隐蔽的影响,硝酸盐来源定量解析一直存在高度的不确定性^[2,8]。随着同位素技术的发展,水体 NO_3^- 氮氧同位素联合测定在识别水体 NO_3^- 来源上显示出优越性^[9~11]; 基于 R 语言的稳定同位素模

收稿日期: 2021-04-06; 修订日期: 2021-06-01

基金项目: 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金项目

作者简介: 邢子康(1995~),男,博士研究生,主要研究方向为水环境化学, E-mail: xzk@hhu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: pengyi1915@163.com

型(stable isotope analysis in R, SIAR)的引入也弥补了传统质量平衡模型没有考虑污染源同位素比值不确定性的问题^[12,13]。目前为止,研究者已利用氮氧同位素和统计模型定量计算了不同特征水体的 NO_3^- 来源,有效判別了氮输入与流域特征和水文情势等的关系。崔玉环等^[14]的研究利用同位素和SIAR模型对人口/农业集约区和森林集约区的地表水体硝酸盐污染进行了源解析,发现贡献率较大的硝酸盐来源具有较大的不确定性,贡献率与流域土地利用、生活污染源分布及土壤理化性质的空间差异有关。王静等^[15]的研究利用同位素示踪技术解析巢湖支流硝酸盐污染源可能来源,结果表明粪肥污水、土壤有机氮和化肥是水体硝酸盐的主要来源,其贡献率与河流空间特征和水文情势有关。Soto等^[16]的研究利用硝酸盐双同位素评估了硝酸盐源,发现温尼伯湖流域的人为氮输入随时间而增加,且 NO_3^- 主要来源于废水和化肥。之前的研究表明,降雨驱动的面源污染已成为硝酸盐进入地表水体的重要途径。然而,已有的硝酸盐源解析研究大都没有考虑降雨事件对污染源组成的影响,仅考虑了不同水文情势(汛期和非汛期)影响下硝酸盐污染源的差异性。

因此,本文选择南水北调东线水源区,扬州市江都区通扬运河作为研究对象,基于不同降雨事件采集水样,结合河道不同区段的土地利用类型和人类

活动特征,对比分析水化学离子和硝酸盐氮氧同位素值的时空分布特征,并利用SIAR模型解析 NO_3^- 来源的贡献比率,分析降雨事件对硝酸盐污染的影响,以期对氮污染有效控制提供理论指导,并为城市河道制定恰当的管理办法和有效的水质修复措施提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

通扬运河江都段位于扬州市江都区($32^\circ22' \sim 32^\circ35' \text{N}$, $119^\circ30' \sim 119^\circ46' \text{E}$),源于邵伯湖,向东先后进入泰州市和南通市,长28 km,集水面积为 343.5 km^2 (图1)。研究区属于亚热带季风性湿润气候向温带季风气候的过渡区,四季分明,雨量丰沛,多年平均降雨量 $1\,040 \text{ mm}$,降雨集中在6~9月。

通扬运河主要功能是农业灌溉、工业用水和航运。自1998年以来,该河被人为拦腰截断,水闸长期关闭,致使该河水流常年处于滞流状态,河流原有功能被人为破坏。再加上城市化进程的加快和人口的增加,大量的污水被排入沿河的村庄,并长时间积累,导致水质严重恶化。目前,通扬运河的水质低于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中的IV级。严重影响了沿河两岸的生态环境和居民的日常生活,且污水随时可能进入南水北调东线工程输水线路,成为南水北调工程的水质隐患^[17]。

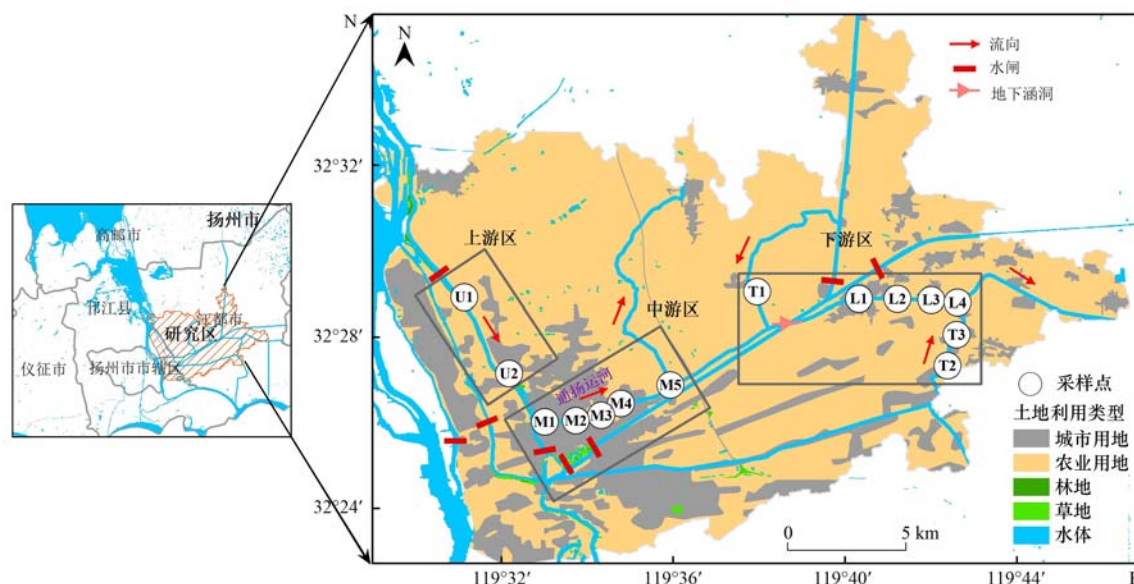


图1 研究区位置、土地利用类型和采样点分布示意

Fig. 1 Location, land use of the study area, and the distribution of sampling sites

1.2 样品采集与分析

本研究依据水文情况、土地利用和主要人类活动类型,将通扬运河分为3个部分,共设置采样点14个,从而进行河道水样采集:上游区(U1和U2)、

中游区(M1~M5)和下游区(L1~L4)。其中上游区位于严格限制污染物排放的邵伯湖水源保护区;中游区位于江都市区,主要土地利用类型为城镇用地,工业生产发达;下游区主要土地利用类型为农

业用地,农业活动频繁.此外,通扬运河支流顾圩河(T1)和白塔河(T2和T3)也设置了采样点.具体采样位置如图1所示.

为了分析硝酸盐污染对降雨事件的响应,于2016年9月至2017年9月,选择无雨、小雨和大雨这3种情形,于降雨结束之后的2 h内进行样品采集,在预定的采样点采集水体样本.降雨事件的相关信息见表1,采样点具体位置如图1所示.水样均采集于

流速较大处,距岸边距离大于2 m.采样时用河水润洗聚乙烯瓶,每次于水面下约50 cm处采集500 mL水样,现场用便携式水质参数仪(WTW multi3430, Germany)测定pH、溶解氧和电导率(EC)等易变参数.在实验室通过0.22 μm膜过滤器过滤后,使用自动流量分析仪(SKALAR Sans Plus Systems)分析营养物质(NH₄⁺和NO₃⁻)浓度.使用Dionex ICS-90(USA)通过离子色谱法测定阴离子(Cl⁻和SO₄²⁻)浓度.

表1 降雨事件相关信息
Table 1 Information on the four rainfall events

项目	降雨事件			
	1	2	3	4
日期	2016-09-12	2016-10-26	2017-08-07	2017-09-08
降雨量/mm	0	3.5	41.5	36.5
降雨历时	0 h	1 h 20 min	5 h 55 min	6 h 30 min

水体中硝酸盐氮和氧同位素均在中国自然资源部第三海洋研究所稳定同位素质谱实验室进行测量.测试方法为反硝化法^[18],NO₃⁻和NO₂⁻通过细菌反硝化作用转化为N₂O气体,然后由微量气体预浓缩器进行浓缩,最后通过同位素质谱仪测定氮氧同位素组成.采用USG32、USG34和USG35为标样,用两点校正的方法对所测定的气体进行校正,测定的同位素值分别与国际标准物质相对应:

$$\delta_{\text{sample}} = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中,δ_{sample}为硝酸盐中N和O同位素的相对比值,即样品同位素比值相对于参照标准的同位素比值的千分偏差;R_{sample}和R_{standard}分别为样本和标准的¹⁵N/¹⁴N或¹⁸O/¹⁶O. N同位素参照标准是标准大气N₂, O同位素参照标准为维也纳标准平均海水(Vienna standard mean oceanic water, V-SMOW).

1.3 基于R语言的稳定同位素模型(SIAR)

为了定量识别地表水体硝酸盐污染源,采用SIAR模型^[19]来求解质量平衡方程,估算水体中各硝酸盐来源的贡献率.目前,有研究已经证实了SIAR模型在计算地表水和地下水中多种硝酸盐来源贡献的可靠性和实用性^[6,20~22].该模型将地表水

视为“消费者”,将污染源视为“食物”,基于狄利克雷分布,使用贝叶斯框架构造逻辑先验分布,以确定每种来源对混合物的贡献率的概率分布.SIAR模型通过定义*k*个来源*N*个混合物的*j*个同位素值,模型可以表示为:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^k P_k (S_{jk} + C_{jk}) + \varepsilon_{jk} \quad (2)$$

$$S_{jk} \sim N(\mu_{jk}, \omega_{jk}^2) \quad (3)$$

$$C_{jk} \sim N(\lambda_{jk}, \tau_{jk}^2) \quad (4)$$

$$\varepsilon_{jk} \sim N(0, \sigma_j^2) \quad (5)$$

式中,X_{ij}为混合物*i*同位素*j*的δ值.其中*i*=1,2,3,⋯,*N*,*j*=1,2,3,⋯,*J*,*P_k*为来源*k*的比率,需要被模型估计;*S_{jk}*为来源*k*同位素*j*的δ值,服从均值为μ_{jk},方差为ω_{jk}²的正态分布;*C_{jk}*为来源*k*同位素*j*的分馏系数,服从均值为λ_{jk},方差为τ_{jk}²的正态分布;ε_{jk}为残余误差,表示其他各个混合物间无法量化的变异,其均值为0,标准差为σ_j.

本研究利用R语言程序包(SIAR 4.2)来量化4种主要的硝酸盐来源(粪肥污水MS、大气沉降NP、化学肥料CF和土壤有机氮SN)对通扬运河水体硝酸盐的贡献比重,其中4种来源的δ¹⁵N-NO₃⁻和δ¹⁸O-NO₃⁻数值范围见表2.其中粪肥污水的同位素值

表2 硝酸盐主要来源对应的δ¹⁵N-NO₃⁻和δ¹⁸O-NO₃⁻取值范围/‰
Table 2 Range of δ¹⁵N-NO₃⁻ and δ¹⁸O-NO₃⁻ corresponding to the nitrate sources/‰

污染源	δ ¹⁵ N-NO ₃ ⁻			δ ¹⁸ O-NO ₃ ⁻		
	最大值	最小值	平均值±偏差	最大值	最小值	平均值±偏差
大气沉降(NP)	6.6	-3.9	3.2±2.4	61.4	26.3	44.0±9.1
化肥(CF)	4.7	-6.1	0.9±2.5	5.6	-2.9	-2.0±0.5
土壤有机氮(SN)	7.2	1.4	4.0±1.5	5.6	-0.9	4.1±0.3
粪肥污水(MS)	23.1	7.4	16.3±5.7	12.3	2.8	7.0±2.7

为实测数据结合文献[23,24]得到,其他数据依据文献[22,25]得到。

2 结果与讨论

2.1 水体水化学与同位素特征空间分布

图2显示了通扬运河从上游到下游各采样点水样的水化学和同位素参数特征(包括平均值、最大值和最小值)。图2(a)显示,通扬运河的氮污染呈现出很强的空间变异性,与 $\rho(\text{总磷, TP})$ $0.08 \sim 0.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 相比,氮污染是通扬运河重要污染形式。水体 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 和 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 的范围分别为 $0.09 \sim 4.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.76 \sim 5.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。上游区、中游区和下游区的 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 都要明显高于 $\rho(\text{NH}_4^+)$,表明 NO_3^- 污染是影响通扬运河水质状况的首要因素。

$\rho(\text{NO}_3^-)$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 表现出相似的空间分布特征,表明 NO_3^- 和 NH_4^+ 具有相同的来源。河道不同区域的 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 表现为:中游区 > 下游区 > 上游区。中游区 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 最高,分别 $1.31 \sim 5.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.15 \sim 4.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。中游区为城市化程度最高的区域,该区域较高的 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 表明城市化带来的人类活动加剧了氮污染的输入;较大的浓度标准差表明中游区氮污染受降雨事件的影响显著,原因可能是下垫面硬化加剧了雨水径流带来的氮源输入。下游区的高 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 受

夏季农业施肥的影响较大,其原因在于下游区集约农业发达,养殖污水及农业面源污染远大于其他区域。

图2(b)中显示, $\rho(\text{Cl}^-)$ 和 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 空间分布趋势具有一致性,表明 Cl^- 和 SO_4^{2-} 具有相似的来源。上游区的 $\rho(\text{Cl}^-)$ 和 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 逐渐增加,中游区出现波动。 Cl^- 具有化学惰性,在水环境中相对稳定,仅能通过混合过程改变其浓度。在地表水中,高浓度的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 可能来源主要是生活污水、工业废水和人畜粪便等人为污染源。一般来说,低 $\rho(\text{Cl}^-)$ 和高 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 水样表示 NO_3^- 的主要来源是粪肥或生活污水(M4和M2处)。

溶解氧(DO)是衡量水体自净能力的重要参数。图2(b)表明通扬运河 $\rho(\text{DO})$ 范围为 $1.31 \sim 7.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,所有采样点DO值均高于反硝化反应的阈值($1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),且DO分布呈上中游大于下游的特点。

图2(c)显示,通扬运河水体呈中性偏弱碱性,pH值空间分布呈中下游($7.33 \sim 7.88$)高于上游($6.82 \sim 7.83$)的特点。研究区降雨和路面径流水样的pH值为弱碱性($7.95 \sim 8.87$),因此,大气降雨的输入和路面的冲刷可能是中下游pH值较高的原因。

通扬运河水体中硝酸盐中氮、氧同位素的平均值和标准偏差的空间分布如图2(d)所示。其中,地

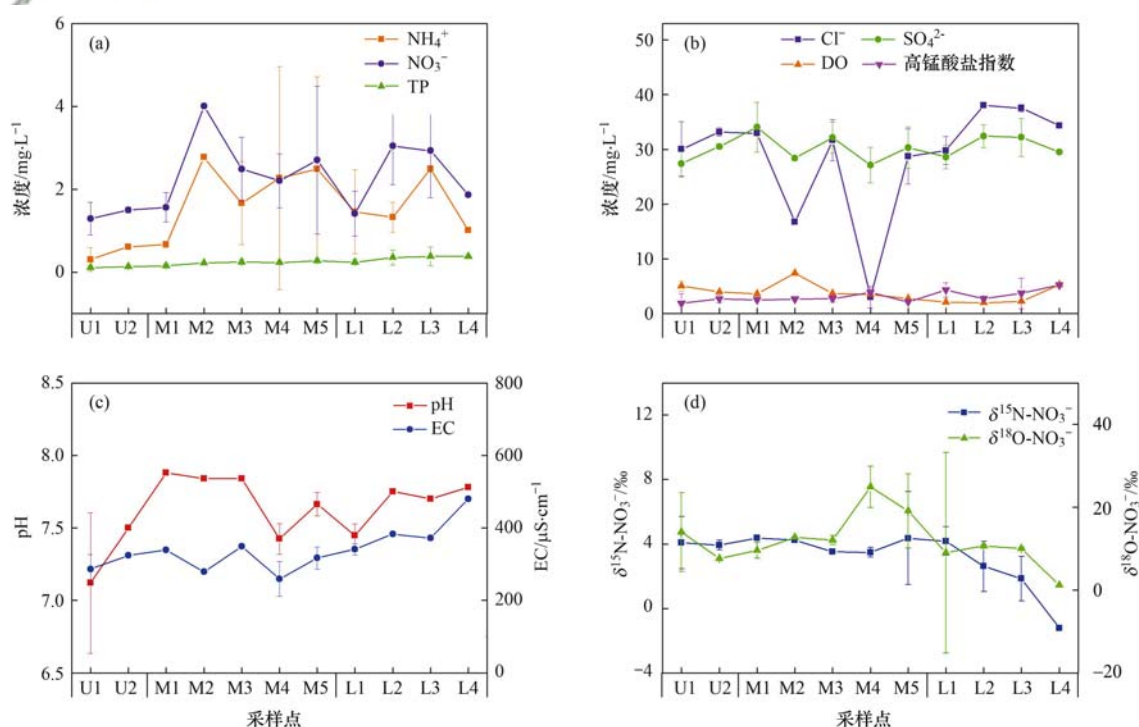


图2 通扬运河水体水化学和同位素特征空间分布

Fig. 2 Spatial variation in chemistry and isotopic characteristics in Tongyang Canal

表水样的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 比重表现为:上游区 > 中游区 > 下游区。 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 比重表现为:中游区 > 上游区 > 下游区. 同时,与中上游相比,下游区 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 的变化范围较大.

2.2 不同降雨条件下的水化学和同位素特征

图3显示了在无雨条件下(降雨事件1)和3次降雨事件(2~4)下采集水样的氮氧同位素值和主要化学成分的分布,4次采样期间的降雨信息见表1. 与无雨情形下的浓度相比,降雨条件下各指标具有更大的范围,表明降雨增加了各采样点污染物浓度的不确定性. 水体中的 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 、 $\rho(\text{Cl}^-)$ 和 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$,相对于无雨期内(均值分别为1.73、0.22、21.16和26.91 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),在降雨期

内有较高的均值(分别为2.09、1.88、30.53和29.87 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 降雨事件3和4中较大的雨强(>35 mm)和较长的降雨历时(>5 h)带来的冲刷导致地表灰尘随地表径流大量排入运河,大量的降雨同时也稀释了河道中的水体污染物. 在冲刷和稀释两种效应下,降雨最终导致了河道污染物浓度的上升. 尤其是中游区段位于市区,多为水泥路面,植被覆盖率低,无雨日地表污染物随强烈地人类活动大量富集,最终受降雨的驱动排入水体. 事件2中降雨量较少(3.5 mm),降雨造成的稀释效应不明显,而短历时的降雨冲刷造成部分污染物排入河道,导致了 $\rho(\text{Cl}^-)$ 和 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 的显著提高.

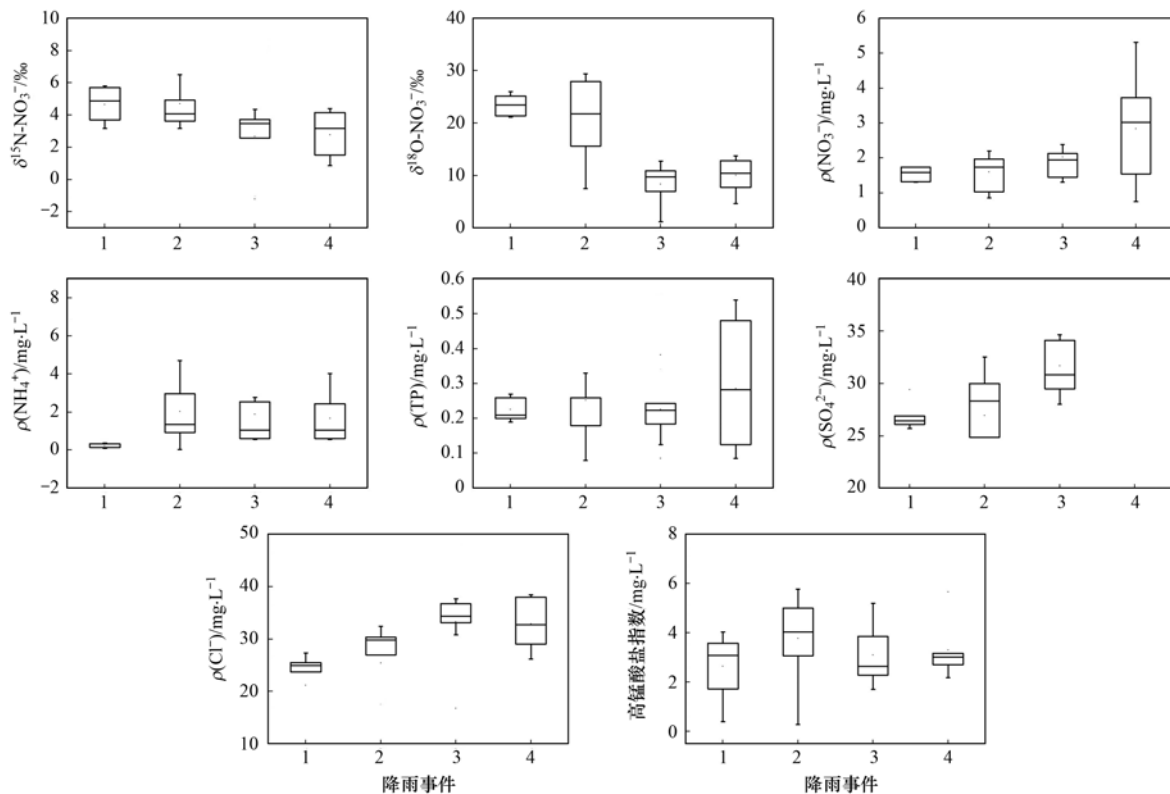


图3 不同降雨事件下水体水化学及同位素特征箱型图

Fig. 3 Boxplot of chemistry and isotopic characteristics under different rainfall events

2.3 不同降雨条件下水体硝酸盐来源定量解析

本研究考虑到不同降雨条件对硝酸盐来源的影响,利用SIAR模型对3个子区域的水样进行硝酸盐来源解析,以分析通扬运河水体中各硝酸盐来源的贡献率(图4). 其中4类污染源分别为大气沉降(NP)、化肥(CF)、土壤有机氮(SN)和粪肥污水(MS),各污染源的初始同位素特征的均值和方差见表2.

根据模型输出结果,在不同的降雨条件下,4类污染源对通扬运河水体 NO_3^- 贡献率呈现出显著

的差异性. 在无雨和低降雨的条件下(降雨事件1和2),通扬运河水体 NO_3^- 主要来源于大气沉降,贡献率为27%~47%;其次为土壤有机氮,贡献率为21%~29%;化肥和粪肥污水的贡献率较小,均值低于25%. 在降雨事件(3和4)的影响下,主要污染源组成发生了显著变化,综合各区域来看,化肥成为了主要污染源,贡献率为16%~34%;其次为土壤有机氮,贡献率为20%~32%;大气沉降仅在上游区占主导地位,在中下游区的贡献率显著降低. 降雨虽然使得来源于大气沉降的 NO_3^- 有所增加,但是雨水

冲刷使得化肥和土壤有机氮的比例大幅上升,其增加的幅度超过了大气沉降源,因此化肥和土壤有机氮在降雨事件下贡献了最多的 NO_3^- 。

由于通扬运河不同区域具有不同的空间特征,降雨事件对上、中和下游的硝酸盐污染源占比组成有不同的影响. 由于上游区水体来源于邵伯湖水源,水质较高,且水源地保护区内工农业活动较少,潜在污染源少,因此上游区的污染来源贡献率变化不显著,化肥和土壤有机氮的贡献率随降雨有略微增加. 中游区受降雨驱动影响较大的污染源为大气沉降、化肥和粪肥污水,影响主要体现在化肥污染源比例的增加和大气沉降源比例的减少. 在下游区,受降雨的影响,化肥和土壤有机氮的污染源贡献率得到了显著提高,而大气沉降和粪肥污水的污染源占比显著下降. 由于下游区存在大面积农田,大量的农

业活动增加了化肥和土壤有机氮潜在污染源,在降雨的驱动下,下游区化肥和土壤有机氮贡献率的增加较中游区更加明显. 总之,在降雨集中的月份,通扬运河应重点防控下游区面源污染输入的农田污水,防止化肥和土壤中的硝酸盐通过雨水径流进入通扬运河.

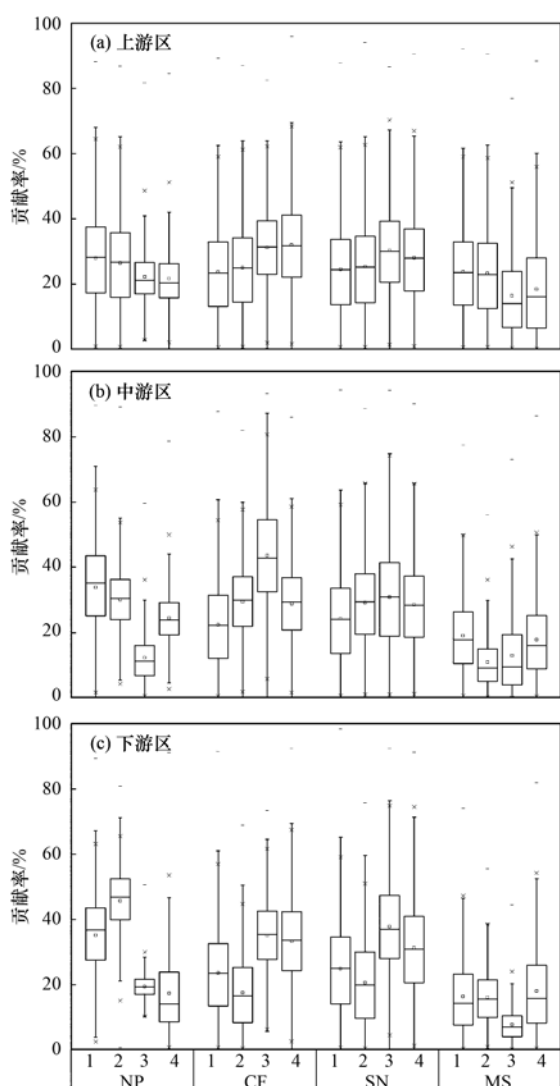
2.4 降雨驱动下的硝酸盐迁移转化过程

有研究表明,硝化和反硝化过程广泛存在于土壤、含水层和河岸带^[26]. $\rho(\text{NO}_3^-)$ 、 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 的变化及其关系是判断反硝化过程的重要依据. 反硝化过程中还原 NO_3^- 释放出分子态 N_2 或 N_2O 至大气,使得水体中 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 的比值向 1.3:1 ~ 2:1 靠近^[27-29].

从通扬运河 3 个区段的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 关系可以看出(图 5),下游区的同位素分布显示出最明显的线性正相关($R^2 = 0.745$),其次是中游区($R^2 = 0.262$)和上游区($R^2 = 0.263$),表明氮的转化过程存在很大的空间差异. 下游区 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 的比值约为 2:1,而上游区的比值为 3.13:1;中游区介于两者之间. $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 的线性相关性和比值的空间差异表明下游区存在很强的反硝化作用,而硝化作用却很弱;上游区和中游区硝化和反硝化作用都较弱.

从不同降雨事件下水体硝酸盐氮和氧同位素的关系可以得出类似的结论. 在降雨事件 1 和 2 中, $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 表现出很强的线性正相关,而在高降雨的情况下,其相关性不明显. 这表明由于长期稳定的环境为氮的转化提供了条件,在低降雨条件下更容易发生硝化和反硝化. 由于降雨减少了氮在土壤或地表停留的时间,降低了硝化和反硝化发生的可能性,降雨事件 3 和 4 下的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 的范围更大,反映出降雨导致的硝酸盐污染源的不确定性增加.

图 5 中标注的污染源的氮和氧同位素值区间来源于文献[30],所反映出的不同河流区段的主要污染源与 SIAR 模型定量解析的结果一致. 在下游农业区,硝酸盐肥料在硝酸盐来源中占相当大的比例,控制肥料的使用是减少氮负荷的有效方法. 中游城市地区的氮源组成相对复杂,受到多种污染源的共同影响. 在降雨的影响下, $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 的值都有所下降,表明化肥和土壤有机氮的影响增加. 降雨中的铵盐和化肥的同位素值范围有所重叠,其对通扬运河硝酸盐来源的影响需进一步研究.



1、2、3 和 4 表示降雨事件, NP、CF、SN 和 MS 表示大气沉降、化肥、土壤有机氮和粪肥污水

图 4 污染源对通扬运河水体 NO_3^- 的贡献率

Fig. 4 Contribution rate of nitrate sources to the water body of Tongyang Canal

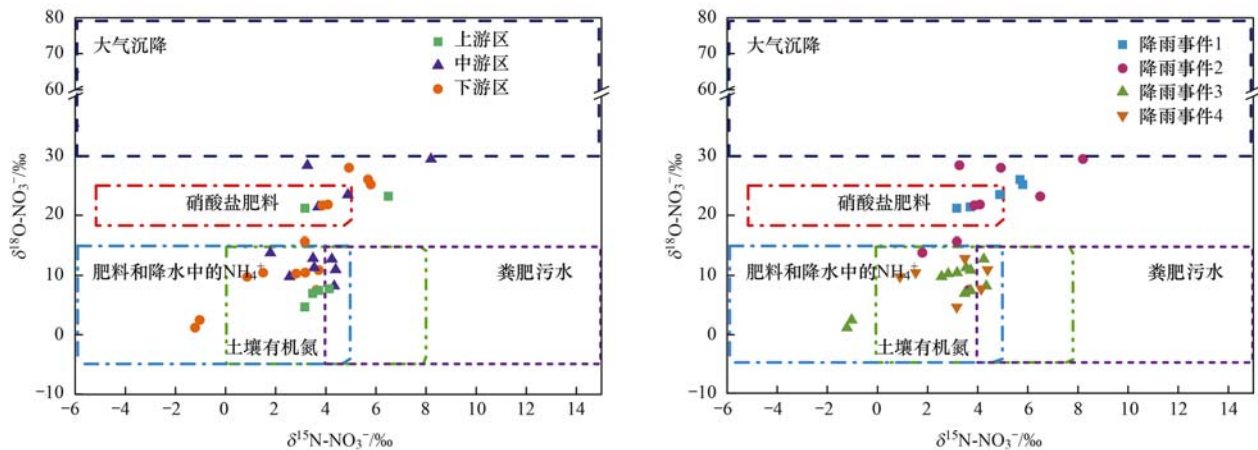


图5 通扬运河不同区段及不同降雨事件下水体硝酸盐氮和氧同位素关系

Fig. 5 Nitrogen and oxygen isotopic relationships under different sections of Tongyang Canal and different rainfall events

3 结论

(1) 通扬运河各河段污染物浓度具有很强的空间变异性。 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 具有相似的空间分布特征, 表现为: 中游区 > 下游区 > 上游区, 中游区较高的城市化水平带来的人类活动加剧了氮污染的输入。

(2) 降雨增加了各河段污染物浓度的不确定性, 降雨带来的冲刷和稀释效应总体上增加了水体中的 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 、 $\rho(\text{Cl}^-)$ 和 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 。

(3) 在无雨和低降雨的条件下, 通扬运河水体 NO_3^- 主要来源于大气沉降 (贡献率为 27%~47%) 和土壤有机氮 (贡献率为 21%~29%); 在降雨事件影响下, 化肥 (贡献率为 16%~34%) 成为了最主要的污染源。降雨造成的污染源变化具有空间差异性, 下游区 (农业区) 化肥和土壤有机氮贡献率的增加较中上游区更加明显。

(4) 下游区存在较强的反硝化作用, 且低降雨条件下更容易发生硝化和反硝化。

参考文献:

- [1] Romanelli A, Soto D X, Matiatos I, *et al.* A biological and nitrate isotopic assessment framework to understand eutrophication in aquatic ecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **715**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136909.
- [2] Zhang M, Zhi Y Y, Shi J C, *et al.* Apportionment and uncertainty analysis of nitrate sources based on the dual isotope approach and a Bayesian isotope mixing model at the watershed scale[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **639**: 1175-1187.
- [3] 孙厚云, 卫晓锋, 贾凤超, 等. 基于多环境介质氮素和同位素的滦平盆地地下水硝酸盐来源示踪[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4936-4947.
Sun H Y, Wei X F, Jia F C, *et al.* Source of groundwater nitrate in Luanping Basin based on multi-environment media nitrogen cycle and isotopes[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4936-4947.
- [4] 李艳利, 孙伟, 杨梓睿. 太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5039-5046.
- [5] Li Y L, Sun W, Yang Z R. Identification of nitrate sources and transformation processes in midstream areas: a case in the Taizi River Basin[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5039-5046.
- [6] Guo X J, Tang Y C, Xu Y C, *et al.* Using stable nitrogen and oxygen isotopes to identify nitrate sources in the Lancang River, upper Mekong[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **274**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111197.
- [7] Jin Z F, Cen J R, Hu Y M, *et al.* Quantifying nitrate sources in a large reservoir for drinking water by using stable isotopes and a Bayesian isotope mixing model[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(20): 20364-20376.
- [8] 王诗绘, 马玉坤, 沈珍瑶. 氮氧稳定同位素技术用于水体中硝酸盐污染源解析方面的研究进展[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2021, **57**(1): 36-42.
- [9] Wang S H, Ma Y K, Shen Z Y. Identification of nitrate source in receiving water with dual NO_3^- isotopes ($\delta(^{15}\text{N})$ and $\delta(^{18}\text{O})$) [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2021, **57**(1): 36-42.
- [10] Burns D A, Boyer E W, Elliott E M, *et al.* Sources and transformations of nitrate from streams draining varying land uses: evidence from dual isotope analysis[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, **38**(3): 1149-1159.
- [11] 张鑫, 张妍, 毕直磊, 等. 中国地表水硝酸盐分布及其来源分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1594-1606.
- [12] Zhang X, Zhang Y, Bi Z L, *et al.* Distribution and source analysis of nitrate in surface waters of China[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1594-1606.
- [13] 徐志伟, 张心昱, 于贵瑞, 等. 中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 3230-3238.
- [14] Xu Z W, Zhang X Y, Yu G R, *et al.* Review of dual stable isotope technique for nitrate source identification in surface-and groundwater in China[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 3230-3238.
- [15] Mizota C, Hosono T, Matsunaga M, *et al.* Dual (oxygen and nitrogen) isotopic characterization of the museum archived nitrates from the United States of America, South Africa and Australia[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **625**: 627-632.
- [16] Li C, Li S L, Yue F J, *et al.* Identification of sources and

- transformations of nitrate in the Xijiang River using nitrate isotopes and Bayesian model [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **646**: 801-810.
- [13] Hu M M, Wang Y C, Du P C, *et al.* Tracing the sources of nitrate in the rivers and lakes of the southern areas of the Tibetan Plateau using dual nitrate isotopes [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **658**: 132-140.
- [14] 崔玉环, 王杰, 郝洸, 等. 长江中下游平原升金湖流域硝酸盐来源解析及其不确定性[J]. *湖泊科学*, 2021, **33**(2): 474-482.
- Cui Y H, Wang J, Hao S, *et al.* The contribution rates of nitrate sources and their uncertainties in Shengjin Lake Basin, middle and lower reaches of the Yangtze River Plain [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(2): 474-482.
- [15] 王静, 叶寅, 王允青, 等. 利用氮氧同位素示踪技术解析巢湖支流店埠河硝酸盐污染源[J]. *水利学报*, 2017, **48**(10): 1195-1205.
- Wang J, Ye Y, Wang Y Q, *et al.* Using $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values to identify sources of nitrate in the Dianbu River in the Chaohu Lake Basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, **48**(10): 1195-1205.
- [16] Soto D X, Koehler G, Wassenaar L I, *et al.* Spatio-temporal variation of nitrate sources to Lake Winnipeg using N and O isotope ($\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$) analyses [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **647**: 486-493.
- [17] 吴小伟, 刘平, 王永东. 南水北调东线工程江都段水环境现状及纳污削减方案探讨[J]. *治淮*, 2016, (12): 87-89.
- [18] Xu C Y, Li Y Z, Li Q Z, *et al.* Measurement of ^{15}N and ^{18}O isotope abundance of nitrate using denitrifier method on Tracegas-Isotope Ratio Mass Spectrometry [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, **726-731**: 1346-1349.
- [19] Parnell A C, Inger R, Bearhop S, *et al.* Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation [J]. *PLoS One*, 2010, **5**(3), doi: 10.1371/journal.pone.0009672.
- [20] Jin Z F, Zheng Q, Zhu C Y, *et al.* Contribution of nitrate sources in surface water in multiple land use areas by combining isotopes and a Bayesian isotope mixing model [J]. *Applied Geochemistry*, 2018, **93**: 10-19.
- [21] Yu L, Zheng T Y, Zheng X L, *et al.* Nitrate source apportionment in groundwater using Bayesian isotope mixing model based on nitrogen isotope fractionation [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **718**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137242.
- [22] Zhang Y, Shi P, Li F D, *et al.* Quantification of nitrate sources and fates in rivers in an irrigated agricultural area using environmental isotopes and a Bayesian isotope mixing model [J]. *Chemosphere*, 2018, **208**: 493-501.
- [23] 贾珺杰, 高扬, 陈维梁, 等. 黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析: 以羊圈沟为例 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 147-155.
- Jia J J, Gao Y, Chen W L, *et al.* Characteristics of nitrogen transport and its source trace in Loess Plateau's dam watershed in alternating wet and dry seasons: a case study of Yangjuangou Watershed [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 147-155.
- [24] 李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 等. 太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1076-1084.
- Li Y L, Yang Z R, Yin X J, *et al.* Identification of nitrate sources and the fate of nitrate in downstream areas: a case study in the Taizi River Basin [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1076-1084.
- [25] Hu M P, Liu Y M, Zhang Y F, *et al.* Coupling stable isotopes and water chemistry to assess the role of hydrological and biogeochemical processes on riverine nitrogen sources [J]. *Water Research*, 2019, **150**: 418-430.
- [26] Kang P P, Xu S G. The impact of mariculture on nutrient dynamics and identification of the nitrate sources in coastal waters [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(2): 1300-1311.
- [27] Hernández-del Amo E, Menció A, Gich F, *et al.* Isotope and microbiome data provide complementary information to identify natural nitrate attenuation processes in groundwater [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **613-614**: 579-591.
- [28] Nakagawa K, Amano H, Berndtsson R, *et al.* Use of sterols to monitor surface water quality change and nitrate pollution source [J]. *Ecological Indicators*, 2019, **107**, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105534.
- [29] Qian Z Y, Ma J, Sun C L, *et al.* Using stable isotope labeling to study the nitrogen metabolism in *Anabaena flos-aquae* growth and anatoxin biosynthesis [J]. *Water Research*, 2017, **127**: 223-229.
- [30] Yi Q T, Chen Q W, Hu L M, *et al.* Tracking nitrogen sources, transformation, and transport at a basin scale with complex plain river networks [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(10): 5396-5403.

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China: Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sierozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)