

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.6
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源	林秋菊, 徐娇, 李梅, 王伟, 史国良, 冯银厂 (2505)
南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析	杨笑影, 曹芳, 林煜棋, 章炎麟 (2519)
西安市PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化特征	黄含含, 王羽琴, 李升苹, 陈庆彩 (2528)
新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响	刘会斌, 迪丽努尔·塔力甫, 王新明, 张潇潇, 王威, 阿布力克木·阿不力孜, 买里克扎提·买合木提, 刘伟 (2536)
长秋季生物物质燃烧对PM _{2.5} 中WSOC吸光性的影响	孟德友, 曹芳, 翟晓瑶, 张世春, 章炎麟 (2547)
2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源	王倩 (2555)
南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	曹梦瑶, 林煜棋, 章炎麟 (2565)
郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析	任义君, 马双良, 王思维, 于世杰, 李一丹, 张瑞芹, 尹沙沙 (2577)
上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献	韩婷婷, 李颖若, 邱雨露, 何迪, 王焱, 马志强 (2586)
北京市餐饮业大气污染物排放特征	孙成一, 白画画, 陈雪, 翟翼飞, 高启天, 何万清, 聂磊, 石爱军, 李国傲 (2596)
北京市农业机械排放因子与排放清单	王凯, 樊守彬, 亓浩云 (2602)
北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化	李贝贝, 黄玉虎, 毕晓辉, 刘李阳, 秦建平 (2609)
基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析	张颖蕾, 崔希民 (2617)
环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟	张毅, 马艳飞, 宋帅, 吕永龙, 张盛, 吴强 (2625)
岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析	周石磊, 孙悦, 苑世超, 彭瑞哲, 刘世崇, 岳奇丞, 张航, 王周强, 李再兴, 罗晓 (2635)
“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析	李悦昭, 陈海洋, 孙文超 (2646)
伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价	姜时欣, 翟付杰, 张超, 王蒙蒙, 单保庆 (2653)
典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析	赵然, 韩志伟, 申春华, 张水, 涂汉, 郭永丽 (2664)
沉积物参与氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响	陈洁, 许海, 詹旭, 许笛, 朱广伟, 朱梦圆, 李鹏飞, 康丽娟 (2671)
丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素	李胜男, 陈豪宇, 彭华, 李芸君, 朱坚, 简燕, 纪雄辉 (2679)
胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用	王振方, 韩子玉, 王梦雪, 马逸驰, 王婷, 王丽卿, 张玮 (2688)
不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较	桑雨璇, 杨珈乐, 熊怡, 尹文博, 汪华, 王和云 (2698)
过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用	张帅, 李大鹏, 丁玉琴, 徐楚天, 许鑫澎, 孙培荣, 赵哲豪, 黄勇 (2706)
基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例	王亚楠, 祝伟, 祁新华, 范水生 (2714)
不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (2727)
高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5	李立, 吴丽颖, 董正玉, 王霖, 张倩, 洪俊明 (2736)
Fe-cyclam/H ₂ O ₂ 体系催化降解罗丹明B机制	余雨清, 陈翔宇, 蔡荣华, 黄歆珏, 陈曼 (2746)
微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO ₂ -NTs为光阳极	卢忆, 周海珊, 彭瑞建, 叶杰旭, 陈建孟, 宋爽, 张士汉 (2754)
缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性	陈凡雨, 徐仲, 尤宏, 柳锋, 李之鹏, 陈其伟, 韩红卫 (2762)
HRT对改良式A ² /O-BAF反硝化除磷脱氮的影响	赵凯亮, 刘安迪, 南彦斌, 梁利民, 王云霞, 陈永志 (2771)
重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化	孙琪, 赵白航, 范飒, 周邦磊, 李玉璋 (2779)
异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素的去除及重金属和盐度的影响	王萌萌, 曹刚, 张迪, 冯乃亮, 潘涌璋 (2787)
火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替	薛嘉俊, 张绍青, 张立秋, 李淑更, 姚海楠, 耿忠轩, 李鸿, 刘晓玲 (2796)
游离羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响	沈琛, 张树军, 彭永臻 (2805)
死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰	苏宇傲, 刘宏波, 毛秋燕, 张慧旻, 张衍, 刘和 (2812)
中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价	陈文轩, 李茜, 王珍, 孙兆军 (2822)
土壤环境质量预警体系构建与应用	李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿 (2834)
不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系	毛霞丽, 邱志腾, 张爽, 沈倩, 章明奎 (2842)
长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征	宁玉菲, 魏亮, 魏晓梦, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 吴金水 (2852)
生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响	黄洋, 郭晓, 胡学玉 (2861)
基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价	肖冰, 薛培英, 韦亮, 刘成程, 高培培, 樊利敏, 杜佳燕, 刘文菊 (2869)
重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素	胡青青, 沈强, 陈飞, 尹炳, 邹宏光, 庄红娟, 张世文 (2878)
新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果	陈兆进, 李英军, 邵洋, 林立安, 徐鸽, 陈彦, 田伟, 姚伦广, 韩辉 (2889)
三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征	李丽娟, 李昌晓, 陈春桦, 杨治华, 陈雪梅 (2898)
滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布	张宇, 左剑恶, 王丝可, Alisa Salimova, 李爱军, 李玲玲 (2908)
模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响	王愉琬, 马安周, 种国双, 谢飞, 周汉昌, 刘国华, 庄国强 (2918)
水肥气耦合对温室番茄土壤N ₂ O排放及番茄产量的影响	商子惠, 蔡焕杰, 陈慧, 孙亚楠, 李亮, 朱艳, 王晓云 (2924)
矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用	尚誉, 杨丰隆, 宁夏, 董铁茹, 桑楠 (2936)
海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价	汪慧娟, 旷泽行, 周贤, 覃晓青, 黄洪辉 (2942)
春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析	贺玉晓, 李珂, 任玉芬, 王思琪, 方文颖 (2951)
热解温度和时间对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估	蔡朝卉, 楚沉静, 郑浩, 罗先香, 李锋民 (2963)
长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)	蒋自然, 金环环, 王成金, 叶士琳, 黄艳豪 (2972)
《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697, 2713, 2811)	

典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析

赵然¹, 韩志伟^{1,2*}, 申春华¹, 张水¹, 涂汉¹, 郭永丽³

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳 550025; 3. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 地下河是岩溶地区地下水赋存运动的主要场所和重要水源, 近年来, 硝酸盐污染严重. 为解析典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐的来源, 利用 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 、 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ 稳定同位素示踪技术开展研究, 并通过 SIAR 稳定同位素模型, 对不同污染源的贡献率进行了定量识别, 同时阐明了土地利用类型对流域水体硝酸盐分布及来源的影响. 结果表明: ①降雨/化肥中的氨盐、土壤有机氮和粪肥污水是流域内水体硝酸盐的主要来源; ②流域内水体硝酸盐的转化过程主要以硝化作用为主导, 水体硝酸盐氮氧同位素初始值未受分馏影响; ③基于 SIAR 模型, 不同端元对流域内水体硝酸盐的贡献比例呈季节性差异, 化肥、土壤有机氮和粪肥污水对丰水期流域内水体硝酸盐的贡献比例分别为 57.07%、34.06% 和 8.87%; 对流域内枯水期水体硝酸盐的贡献比例分别为 34.14%、33.02% 和 32.84%.

关键词: 多环境同位素; 硝酸盐; 源解析; 岩溶地下河; SIAR 模型

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2664-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201911046

Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin

ZHAO Ran¹, HAN Zhi-wei^{1,2*}, SHEN Chun-hua¹, ZHANG Shui¹, TU Han¹, GUO Yong-li³

(1. College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, Guiyang 550025, China; 3. Key Laboratory of Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: Underground rivers are an important source of groundwater in karst area. Recently, nitrate pollution of underground rivers has become a serious issue. To identify the sources of nitrate in Guancun typical karst underground river basin, stable isotope techniques ($\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$, and $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$) were applied in this study. The contribution rates of different nitrate sources in groundwater were quantitatively identified based on the stable isotope analysis in R (SIAR) model, and the influence of land use type on nitrate distribution and source in watershed water was clarified. The results showed that ① nitrate mainly came from fertilizers, soil organic nitrogen, and manure/sewage based to the isotopic composition of nitrate nitrogen and oxygen isotopes. It was revealed that non-point sources significantly contributed to nitrate in waters of the Guancun underground river basin. ② Nitrification dominated the formation process of nitrate in groundwater, and the initial values of nitrogen and oxygen isotopes were not affected by fractionation. ③ Based on SIAR, the contribution of different sources to nitrate in water in the basin varied seasonally, and the contributions of fertilizer, soil organic nitrogen, and manure/sewage to nitrate were 57.07%, 34.06%, and 8.87% in the wet season and 34.14%, 33.02%, and 32.84% in the dry season, respectively. Overall, the present study quantitatively evaluated the temporal variations of nitrate sources in a typical karst groundwater river basin and provided a theoretical foundation for prevention and control management of non-point source pollution and watershed management in karst areas.

Key words: multi-isotope; nitrate pollution; source analysis; karst underground river; SIAR model

硝酸盐污染作为地下水面临的最普遍的环境问题之一, 是国内外学者关注的焦点和研究的难点^[1-3]. 随着人类活动日益加强, 我国农田及城市生态系统地下水硝酸盐污染日趋严重^[4]. 硝酸盐污染不仅会造成水体富营养化, 长期摄入过量硝酸盐还会严重威胁人体健康, 且硝酸盐在还原条件下形成的亚硝酸盐具有致毒致癌性^[5]. 水体硝酸盐来源广泛、转化过程复杂, 然而当硝酸盐进入水体后, 不能通过煮沸、物理吸附和化学沉淀等方法去除^[6], 这使得硝酸盐污染治理困难且昂贵. 因此, 就保障水环境和人类饮食安全两个方面而言, 确定硝酸盐的来源和转化过程都具有重要现实意义.

岩溶地区碳酸盐岩分布广泛, 岩溶发育形成了

地表、地下双层结构, 并呈现地表干旱、地下河水资源丰富特征, 地表水与地下水之间的水力联系, 为硝酸盐进入地下水提供了“便利通道”^[7]. 岩溶地下河是岩溶地下水赋存运动的主要场所, 不仅是当地的重要水源, 更控制着当地洪涝灾害的发生^[8]. 岩溶地下河流域内“三水”转换作用更加强烈, 又由于

收稿日期: 2019-11-06; 修订日期: 2019-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501018, 41763019); 贵州大学引进人才科研项目(贵大人基合字[2014]51号); 自然资源部/广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室开放课题项目(KDL201401); 贵州省国内一流学科建设项目(GNYL[2017]007)

作者简介: 赵然(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水环境学, E-mail: 554895620@qq.com

* 通信作者, E-mail: zwzhan@gzu.edu.cn

岩溶地区含水层的异质性,不同来源的硝酸盐在岩溶水循环流域中的转化过程难以明晰,此方面的研究是岩溶地下河流域硝酸盐污染防控工作的基础。

多种方法被用于研究水体硝酸盐来源及转化过程。前人多基于污染源分布和土地利用类型,结合水化学特征,判断水体中硝酸盐的污染源,此方法操作简便,却只能宏观地识别污染源^[1]。近年来农业面源污染问题日益突出,水化学方法无法满足污染源识别工作的更高要求,利用硝酸盐氮同位素示踪技术对水体硝酸盐进行来源解析是水化学方法的有效补充^[9],可直接识别硝酸盐来源,但无法揭示硝酸盐的转化过程^[10]。氮氧双同位素示踪技术弥补了以上两种方法的不足,因此许多学者应用该技术对岩溶地区硝酸盐污染问题进行研究^[1,2,11,12]。其精确的“指纹识别”不仅可以示踪硝酸盐来源,还可以联合多种稳定同位素用于解析硝酸盐的转化过程^[13,14],此外,结合源解析模型能对水体中硝酸盐不同来源的贡献率进行定量识别^[12,15~17]。因此,氮氧双同位素示踪方法是目前研究岩溶地区硝酸盐来源及转化过程的有效手段。

本研究选取典型岩溶地下河流域(官村地下河流域)为研究区,用 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 、 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ 多稳定同位素联合示踪技术,解析了流域内水体中硝酸盐来源及转化过程,基于 SIAR 模型,定量识别了不同污染源的贡献比例,以为岩溶地区水体硝酸盐污染的源头防控和流域管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

官村地下河流域是典型的岩溶地下河流域($109^{\circ}19'\text{E} \sim 109^{\circ}23'\text{E}$, $24^{\circ}52'\text{N} \sim 24^{\circ}57'\text{N}$),位于广西壮族自治区柳州市融安县大良镇,流域面积 30.5 km^2 ^[6]。研究区地貌主要为峰丛洼地,地势为东北和西北端高,平均海拔 420 m,属于湿热多雨的亚热带季风气候,年平均降雨量 1750 mm,年平均气温 20°C ,降雨集中于每年的 3~8 月^[18]。

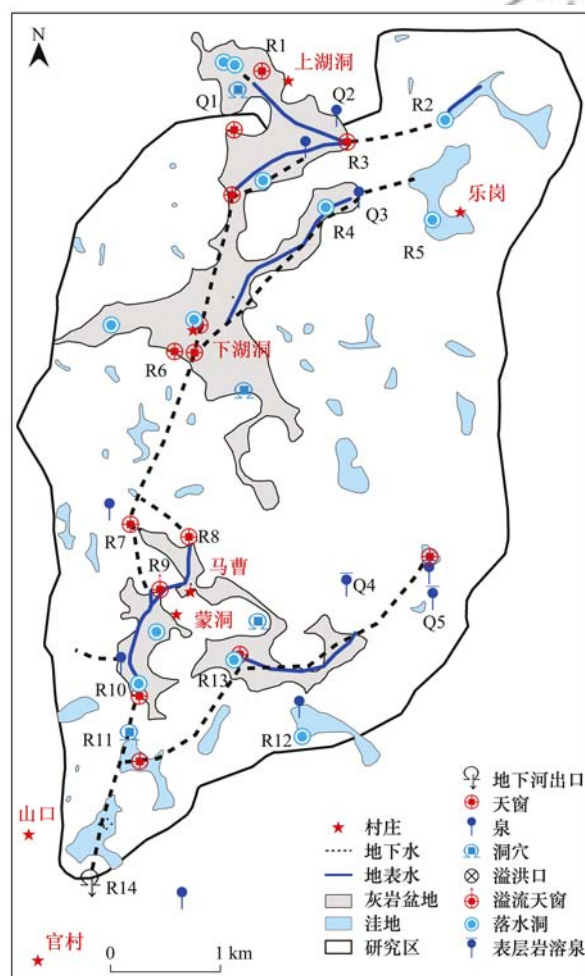
研究区沉积岩和变质岩分布广泛,以寒武系、泥盆系和石炭系分布最广^[6]。官村地下河流域为大气降水单一补给型地下河,水岩作用使流域内岩溶发育,包括溶蚀洼地、溶槽、落水洞和地下河天窗等地表岩溶形态,及岩溶洞穴、管道和地下河等地下岩溶形态^[19]。地下河沿南北方向分布,上湖洞~下湖洞~马槽~山口为主管道,乐岗~下湖洞为支管道。

流域内以农业活动为主导,无工业生产,土地利用类型包括水田、旱地和畜牧用地等,经济作物以水稻和甘蔗为主,耕地、村庄及规模化养殖场主要分布

在地下河主管道上方的洼地中^[20]。据报道,官村地下河水体中硝酸盐受农业活动影响显著,20 世纪 90 年代以来,由于施肥种类、施肥量和畜禽数量的增加以及矿业活动对植被的破坏,流域内氮素流失严重,水体硝酸盐浓度明显升高^[19]。

1.2 样品采集

分别在丰水期(8 月)和枯水期(1 月)采集官村岩溶地下河流域中泉水 5 件、地下河河水 11 件,并用手持 GPS 设备定位,采样点位置详见图 1。现场使用便携式多参数水质测试仪(WTW multi 3430, Germany)测定 pH 和溶解氧(DO)。使用 $0.22 \mu\text{m}$ 的水系微孔滤膜将样品过滤后,装入 15 mL 聚乙烯离心管,并密封冷藏保存,用于测定硝酸盐的氮氧同位素。



R3、R4、R6 和 R8 采集自丰水期, R2、R10 和 R11

采集自枯水期, 其余样品采自两期

图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Locations of the sampling sites

1.3 测试分析

水体硝酸盐浓度采用 ICS-1100 离子色谱仪进行测试分析^[6],硝酸盐的氮氧同位素于中国科学院地球化学研究所(贵阳)通过反硝化细菌法^[21]测定,

将经过 5 ~ 10 d 培养的反硝化细菌 *Pseudomonas aureofaciens* 离心,然后将菌液浓缩 5 倍,再向顶空进样瓶注入 3 mL 菌液,密封后利用高纯氮气吹扫 3 h 以上,注入 50 nmol NO₃⁻ 水样经过夜培养灭活后,使用 Trace Gas Pre-concentrator-Isoprime 测试 N₂O 同位素组成,用样品同位素比值与标准样品同位素比值的千分偏差值来表示 δ:

δ = (R_{sample} - R_{standard}) / R_{standard} × 1 000‰

式中, R_{sample} 为样品中重同位素与轻同位素比值; R_{standard} 为标准样品中重同位素与轻同位素比值.

分析完毕后,采用 Parnell 等^[22]开发的在 R 统计软件中运行的稳定同位素混合模型 SIAR,估算混合物中各来源贡献比例的概率分布.可表示为:

X_{ij} = ∑_{k=1}^k p_k (S_{jk} + C_{jk}) + ε_{jk}
S_{jk} ~ N(μ_{jk}, ω_{jk}²)
C_{jk} ~ N(λ_{jk}, τ_{jk}²)
ε_{jk} ~ N(0, σ_j²)

式中, X_{ij} 是混合物的同位素的 δ 值,其中: i = 1, 2, 3,

⋯, N, j = 1, 2, 3, ⋯, J; S_{jk} 是第 k 个端元的 j 同位素值 (k = 1, 2, 3, ⋯, K), μ_{jk} 为均值, ω_{jk} 为标准偏差; p_k 为端元 k 的贡献比例,需要根据 SIAR 模型来预测; C_{jk} 是端元 k 在 j 同位素上的分馏因子, λ_{jk} 为分馏因子的均值, τ_{jk} 为标准偏差; ε_{jk} 为剩余误差,代表不同单个混合物间未能确定的变量,其均值为 0, 标准偏差为 σ_j.

2 结果与分析

流域内水体呈弱碱性,水中溶解氧浓度较高.丰水期流域内水体中硝酸盐的 δ¹⁵N-NO₃⁻ 和 δ¹⁸O-NO₃⁻ 的变化范围分别为 1.69‰~14.41‰和 -7.57‰~12.98‰ (n = 16, 平均值分别为 4.30‰和 -1.96‰),枯水期流域内水体中硝酸盐的 δ¹⁵N-NO₃⁻ 和 δ¹⁸O-NO₃⁻ 的变化范围分别为 -2.05‰~23.76‰和 -10.75‰~19.00‰ (n = 15, 平均值分别为 7.05‰和 2.08‰).地下河河水中硝酸盐的 δ¹⁵N-NO₃⁻ 和 δ¹⁸O-NO₃⁻ 平均值均高于泉水,枯水期流域内水体中硝酸盐的 δ¹⁵N-NO₃⁻ 和 δ¹⁸O-NO₃⁻ 平均值均高于丰水期(表 1).

表 1 野外调查参数及氮氧同位素统计值

Table 1 Statistical values of field investigation parameters, δ¹⁵N-NO₃⁻ and δ¹⁸O-NO₃⁻

类型	统计值	pH	DO/mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	δ ¹⁵ N-NO ₃ ⁻ /‰	δ ¹⁸ O-NO ₃ ⁻ /‰
丰水期河水 (n = 11)	最小值	6.90	6.42	2.79	2.04	-5.18
	最大值	7.90	9.75	17.89	14.41	12.98
	平均值	7.23	8.00	8.93	4.75	-1.09
丰水期泉水 (n = 5)	最小值	6.80	6.48	2.74	1.69	-7.58
	最大值	7.60	8.77	6.73	5.05	0.77
	平均值	7.26	7.85	4.85	3.30	-3.87
枯水期河水 (n = 10)	最小值	7.21	5.73	1.76	-2.05	-7.20
	最大值	8.36	9.65	13.16	23.76	19.00
	平均值	7.57	7.23	6.96	8.68	4.10
枯水期泉水 (n = 5)	最小值	7.37	5.95	0.89	-0.07	-10.75
	最大值	8.47	11.61	5.36	7.73	14.54
	平均值	7.86	8.76	2.48	3.82	-1.97

如表 2 所示,丰水期化肥端元对流域大部分水体中硝酸盐的贡献比例高于枯水期,粪肥污水端元的贡献比例低于枯水期.流域内 11 个样品采集点周边土地利用类型为农田或居民区,占总样品采集点数量的 57.89%.由于岩溶地区土层较薄,农田和居民区产生的硝酸盐极易通过降水入渗补给至岩溶地下水系统,从而影响地下水环境^[8],因此大部分农田或居民区周边水体的硝酸盐浓度较高.然而,林地周边水体(Q4、Q5、R8 和 R11)的硝酸盐浓度高于部分农田和居民区周边水体,且化肥和粪肥污水对其硝酸盐的贡献比例均较高,岩溶管道的发育加强了各含水层之间水力联系,为不同来源的硝酸盐迁移

提供了重要途径,化肥和粪肥污水可能通过此途径影响林地周边水体.

3 讨论

3.1 硝酸盐来源解析

总体上看,官村地下河流域丰水期水体中硝酸盐浓度高于枯水期,水体硝酸盐空间分布特征不随季节变化.在主、支管道中,硝酸盐空间变异性特征一致,管道上游水体硝酸盐浓度最低,并随着水流方向先升高后降低(图 2)^[6].有研究表明,包气带土壤中硝酸盐的流失主要受控于降雨时间、降雨强度和土壤饱和度^[10].R6 和 R13 的硝酸盐浓度分别为

表 2 不同土地利用类型影响下水体硝酸盐的贡献比例¹⁾

Table 2 Contribution proportion of nitrate in four water types from different sources

ID	土地利用类型	丰水期				枯水期			
		NO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	贡献比例/%			NO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	贡献比例/%		
			CF	SON	M&S		CF	SON	M&S
Q1	居民区 & 农田	4.45	47.10	37.38	15.52	1.8	34.34	39.68	25.98
Q2	农田 & 林地	5.43	45.03	37.10	17.87	0.89	35.86	36.68	27.46
Q3	林地	2.74	41.11	35.09	23.80	1.34	37.25	35.73	27.02
Q4	林地	4.92	31.36	47.70	20.93	5.36	31.39	31.86	36.75
Q5	林地	6.73	57.58	29.62	12.80	2.99	36.80	33.01	30.19
R1	居民区	5.26	41.21	34.32	24.47	2.08	32.37	32.08	35.56
R2	林地	—	—	—	—	1.76	36.91	37.09	26.00
R3	农田 & 林地	4.3	51.51	33.97	14.51	—	—	—	—
R4	农田	4.21	50.61	32.37	17.02	—	—	—	—
R5	农田 & 林地	2.79	58.78	30.10	11.12	—	—	—	—
R6	农田 & 林地	13.1	45.74	34.38	19.87	12.59	25.70	28.30	46.00
R7	农田 & 林地	10.08	44.45	33.48	22.07	6.71	29.68	31.12	39.20
R8	林地	10.28	28.41	30.11	41.48	—	—	—	—
R9	居民区 & 农田	9.61	43.70	36.49	19.81	6.28	29.65	31.03	39.32
R10	居民区	—	—	—	—	5.94	71.96	20.75	7.29
R11	林地	—	—	—	—	8.56	70.63	22.18	7.20
R12	农田	9.34	31.76	31.19	37.05	5.34	31.26	32.28	36.46
R13	甘蔗林	17.89	48.39	39.50	12.10	13.16	49.90	31.47	18.63
R14	农田 & 林地	11.32	45.45	33.90	20.65	7.17	26.28	29.70	44.02

1) NO₃⁻ 质量浓度数据引用自文献[6], “—”表示无相应数据; CF 表示化肥, SON 表示土壤有机氮, M&S 表示粪肥及污水

主管道和支管道水体硝酸盐的最高值点. 根据现场调查情况, R6 点位于水田集中区, R13 位于甘蔗田内, 可见, 农业面源污染可能是研究区内水体硝酸盐浓度上升的主要原因.

流域内水体中硝酸盐氮氧同位素分布在化肥/降雨中的氨盐、土壤有机氮和粪肥/污水范围内(图 3). 其中, 硝酸盐浓度高的样点大多出现在丰水期, 并集中于土壤有机氮、化肥/降雨中的

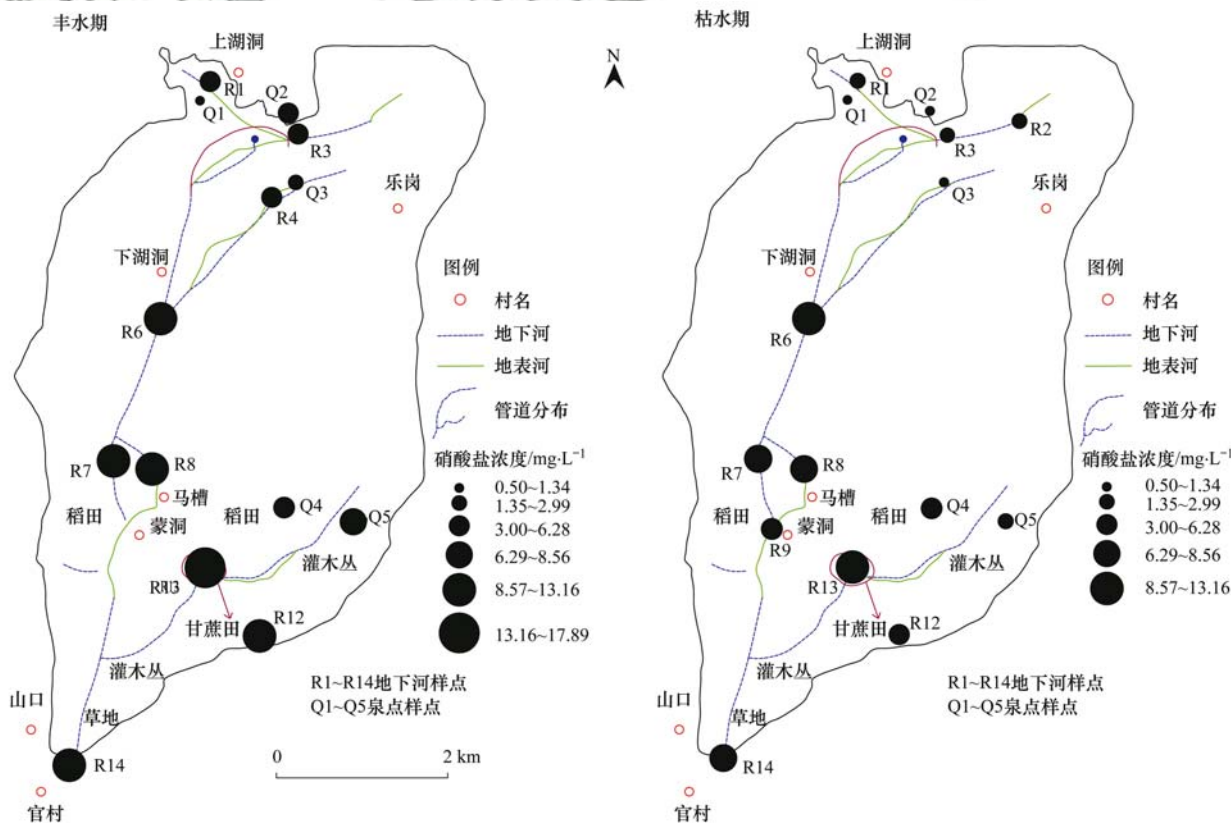


图 2 官村地下河流域硝酸盐浓度时空分布^[6]

Fig. 2 Temporal and spatial distribution of nitrate concentration in Guanaco underground river basin

氨盐和粪便污水范围重叠部分. 与丰水期相比, 枯水期水体的硝酸盐浓度较低, 硝酸盐氮氧同位素数据点则散落在土壤有机氮、化肥/降雨中的

氨盐和粪便污水范围内, 流域内水体硝酸盐氮氧同位素组成受 3 种来源共同影响, 粪肥污水影响显著.

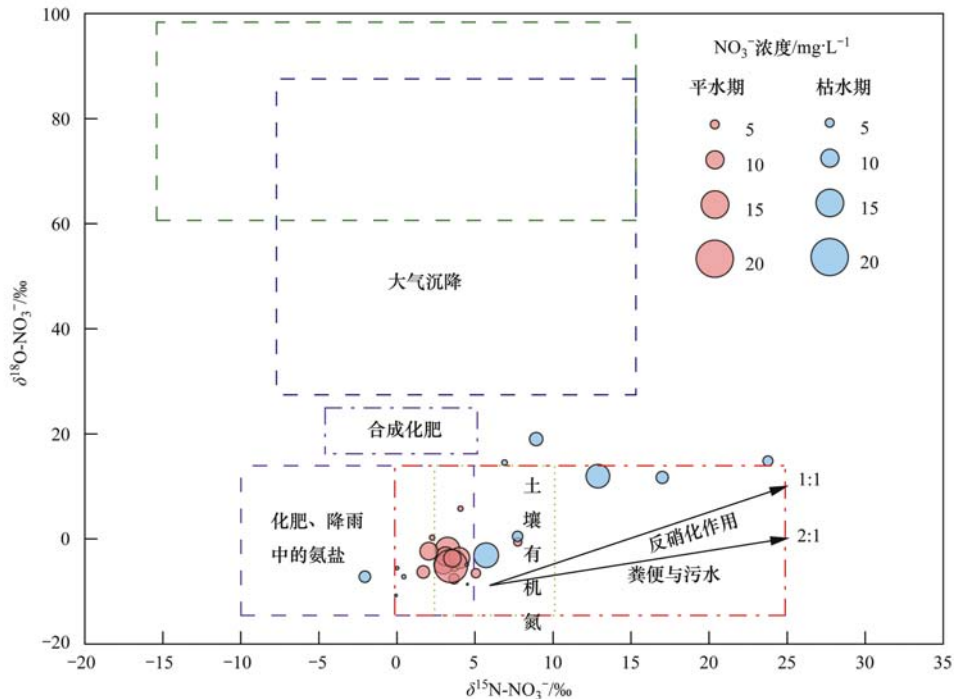


图 3 典型硝酸盐来源氮、氧同位素范围及研究区水体硝酸盐氮、氧同位素分布

Fig. 3 General NO_3^- source fingerprints in a diagram of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ and distribution of NO_3^- in waters of the study area

3.2 硝酸盐转化过程

硝酸盐的同位素组成不仅取决于不同的硝酸盐来源, 也受所经历的生物地球化学过程影响, 如氨挥发、反硝化作用和硝化作用等, 一般认为反硝化作用引起的同位素分馏效应最显著^[23]. 反硝化作用将 NO_3^- 还原为气态产物, 释放到大气中, 从而使剩余 NO_3^- 中的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 富集较重, 由于脱氮速率、温度和底物浓度等因素, 底物硝酸盐的同位素初始值改变. Gillham 等^[24] 经统计分析认为, 水环境中反硝化作用的 DO 浓度上限为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 也有学者认为在 DO 浓度为 $2 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下仍有极其微弱的反硝化作用存在^[25]. 总之, 当 DO 浓度低于 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时水体中可能会发生反硝化作用而造成底物同位素初始值的改变. 根据现场测定结果分析, 流域内水体溶解氧浓度不满足反硝化作用的发生条件. 当水体中发生反硝化作用且 N、O 原子来自同一个 NO_3^- 分子, 剩余反应物中的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 会以 2:1 的比例富集^[26]. 在本研究中, $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 与 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 的比例并不在 1:1 ~ 2:1 区间内 (图 3), 证明反硝化作用未对研究区水体硝酸盐的氮、氧同位素造成分馏.

同时, 水体中硝酸盐的同位素组成受氨挥发过程的影响, 而该过程明显受 pH 控制^[27], pH 在临界

值 9.3 左右时, 水溶液中的 NH_4^+ 转化为 NH_3 , 当 pH 低于 9.3 时, 氨氮仍以离子态存在, 研究区水体中 pH 均低于 9.3, 因此不考虑水体中硝酸盐的同位素组成受氨挥发的影响.

理论上, 硝化作用形成的 NO_3^- 中, 有 2/3 的氧原子来自于水, 有 1/3 的氧原子来自于溶解氧, 后者的同位素组成与大气中的 O_2 相似, 即 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^- = 1/3 \delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O} + 2/3 \delta^{18}\text{O}_{\text{air}}$. 官村地下河流域属于亚热带季风气候, 较高的温度会经过多种途径促使硝化细菌作用下硝酸盐的 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 值范围广^[28], 还可能由于硝化途径不止一条, 不同的中间产物具有不同的同位素组分, 因而导致 $\delta^{18}\text{O}$ 值域范围较大. Kendall 等^[29] 认为硝化作用并不完全按照 2:1 的比例利用水中氧原子和空气中氧原子, 因此部分样品硝酸盐 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 值高于理论值 (图 4). 同时, Kendall 等^[23] 提出硝化作用形成的硝酸盐, 其 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 值应该在 $-10\text{‰} \sim 10\text{‰}$ 之间, 流域内水体硝酸盐的 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 大多分布在该范围内, 证明流域内水体硝酸盐的形成过程以硝化作用为主导.

3.3 硝酸盐来源定量识别

基于典型硝酸盐来源的氮氧同位素值^[17], 利用 SIAR 模型对研究区水体中硝酸盐来源贡献比进行估算. 根据上文, 流域内水体硝酸盐基本不受大气沉

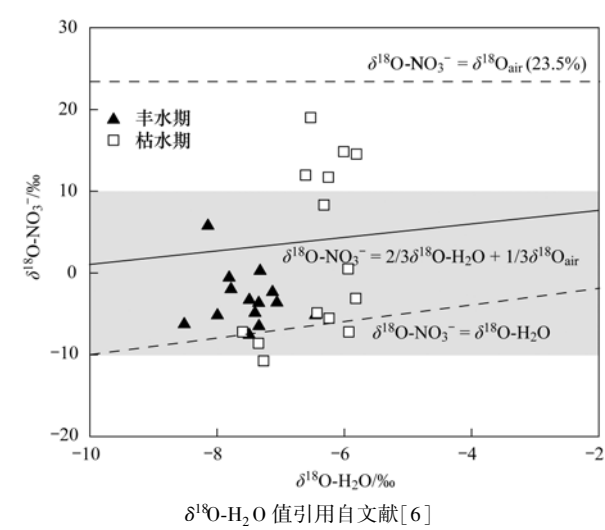


图4 $\delta^{18}\text{O}\text{-H}_2\text{O}$ 与 $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ 关系

Fig. 4 Relationship between $\delta^{18}\text{O}\text{-H}_2\text{O}$ and $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$

降的影响(图3),该端元的贡献可忽略.由于反硝化作用和挥发作用未对流域内水体硝酸盐氮氧同位素

初始值造成改变,计算过程中假设 $C_{jk} = 0$. 结果显示,丰水期流域内水体中硝酸盐主要来源于土壤有机氮和化肥,不同端元对丰水期水体中硝酸盐的贡献率大小顺序为:化肥>土壤有机氮>粪肥及污水,贡献比例分别为 57.07%、34.06% 和 8.87%. 丰水期之前的 4~5 月为研究区内农耕施肥高峰期,进入丰水期后,雨水的冲刷使土壤中过量的硝酸盐进入地下河,水体中硝酸盐含量明显升高,因此土壤有机氮和化肥对该时期水体硝酸盐的贡献大.

在枯水期,不同端元粪便污水、土壤有机氮和化肥对水体中硝酸盐的贡献率大小顺序为:化肥土壤>有机氮>粪便及污水,贡献比例分别为 34.14%、33.02% 和 32.84% (图5). 土壤在雨季经过反复冲刷后,进入水体中的硝酸盐明显降低,使枯水期水体中的硝酸盐浓度明显低于丰水期^[19],而流域内粪便及污水的输出总量基本稳定,因此粪便及污水对枯水期水体中硝酸盐的贡献比例较丰水期明显升高.

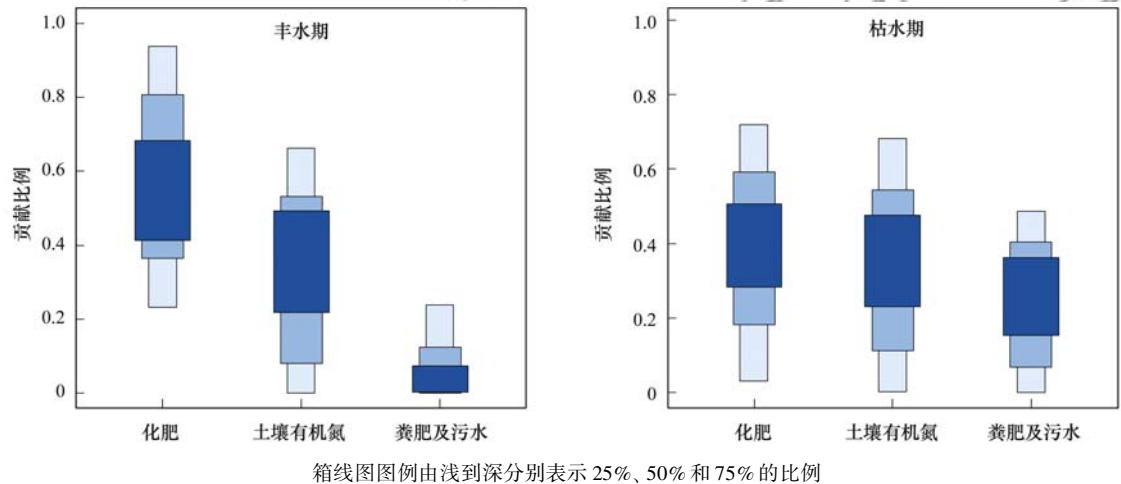


图5 用 SIAR 计算的丰、枯水期官村地下河流域硝酸盐来源贡献占比

Fig. 5 SIAR estimations of the proportion of contribution of four potential sources on the Guancun underground river in wet and dry seasons

4 结论

(1)官村地下河流域中水体呈弱碱性,溶解氧充足,流域内水体中硝酸盐氮氧同位素组成表明硝酸盐主要来源于化肥、土壤有机氮和粪肥污水.流域内水体硝酸盐的转化过程主要受硝化作用主导,氨挥发、反硝化作用等生物地球化学过程并未对硝酸盐氮氧同位素值产生分馏影响.

(2)通过 SIAR 模型定量计算结合土地利用类型分析,3 种来源对流域内水体硝酸盐的贡献比例呈明显的季节性变化,其中化肥端元和粪肥污水端元贡献比例的季节性变化最为明显.受集中施肥和雨水冲刷的影响,丰水期化肥端元对大部分农田或居民区周边水体中硝酸盐的贡献比例明显高于枯水期;而粪便污水端元对丰水期水体中硝酸盐的贡献

比例明显低于枯水期.

参考文献:

[1] 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.
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.

[2] Gutiérrez M, Biagioni R N, Alarcón-Herrera M T, et al. An overview of nitrate sources and operating processes in arid and semiarid aquifer systems[J]. Science of the Total Environment, 2018, 624: 1513-1522.

[3] Xu S G, Kang P P, Sun Y. A stable isotope approach and its application for identifying nitrate source and transformation process in water[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(2): 1133-1148.

[4] 张千千, 缪丽萍, 孙继朝, 等. 稳定同位素识别水体硝酸盐污染来源的研究进展[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24

- (5): 742-749.
- Zhang Q Q, Miao L P, Sun J C, *et al.* Research advances in identifying nitrate pollution sources of water environment by using stable isotopes[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(5): 742-749.
- [5] 巫光宏, 初志战, 何平, 等. 亚硝酸盐急性中毒小鼠肝损伤机理探讨[J]. *食品科学*, 2009, **30**(7): 229-232.
- Wu G H, Chu Z Z, He P, *et al.* Study on mechanism of acute poisoning and hepatic injury induced by sodium nitrite in mice[J]. *Food Science*, 2009, **30**(7): 229-232.
- [6] 申春华, 韩志伟, 郭永丽, 等. 典型岩溶地下河系统不同水体中硝酸盐时空分布规律及其影响因素分析[J]. *中国生态农业学报*, 2019, **27**(8): 1255-1264.
- Shen C H, Han Z W, Guo Y L, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics and factors influencing nitrate level in waters of a typical karst underground river system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, **27**(8): 1255-1264.
- [7] 闫雅妮, 马腾, 张俊文, 等. 地下水与地表水相互作用下硝态氮的迁移转化实验[J]. *地球科学*, 2017, **42**(5): 783-792.
- Yan Y N, Ma T, Zhang J W, *et al.* Experiment on migration and transformation of nitrate under interaction of groundwater and surface water[J]. *Earth Science*, 2017, **42**(5): 783-792.
- [8] 袁道先. 对南方岩溶石山地区地下水资源及生态环境地质调查的一些意见[J]. *中国岩溶*, 2000, **19**(2): 103-108.
- Yuan D X. Aspects on the new round land and resources survey in karst rock desertification areas of South China[J]. *Carsologica Sinica*, 2000, **19**(2): 103-108.
- [9] 张妍, 张鑫, 毕直磊, 等. 渭河流域关中段地表水硝酸盐氮污染现状及其源解析[J]. *安全与环境学报*, 2018, **18**(6): 2395-2400.
- Zhang Y, Zhang X, Bi Z L, *et al.* Nitrate nitrogen pollution and source trace in the surface water of Guanzhong area, Shaanxi, in the Weihe River Basin[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, **18**(6): 2395-2400.
- [10] Yue F J, Liu C Q, Li S L, *et al.* Analysis of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ to identify nitrate sources and transformations in Songhua River, northeast China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, **519**: 329-339.
- [11] 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.
- [12] 金赞芳, 张文辽, 郑奇, 等. 氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2039-2047.
- Jin Z F, Zhang W L, Zheng Q, *et al.* Contribution of nitrogen sources in water sources by combining nitrogen and oxygen isotopes and SIAR[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2039-2047.
- [13] 彭聪, 潘晓东, 焦友军, 等. 多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5410-5417.
- Peng C, Pan X D, Jiao Y J, *et al.* Identification of nitrate pollution sources through various isotopic methods: A case study of the Huixian Wetland[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5410-5417.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 张妍, 张秋英, 李发东, 等. 基于稳定同位素和贝叶斯模型的引黄灌区地下水硝酸盐污染源解析[J]. *中国生态农业学报*, 2019, **27**(3): 484-493.
- Zhang Y, Zhang Q Y, Li F D, *et al.* Source identification of nitrate contamination of groundwater in Yellow River Irrigation Districts using stable isotopes and Bayesian model[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, **27**(3): 484-493.
- [17] 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.
- [18] 孟志龙, 杨永刚, 秦作栋, 等. 汾河下游流域水体硝酸盐污染过程同位素示踪[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(3): 1066-1072.
- Meng Z L, Yang Y G, Qin Z D, *et al.* Isotopic tracing for nitrate pollution process of water body in the lower reaches of Fenhe River[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(3): 1066-1072.
- [19] 郭芳. 官村地下河流域氮流失及其影响因素研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
- [20] 郭芳, 姜光辉, 康志强. 亚热带典型岩溶水系统的碳汇效应对比研究[J]. *中国岩溶*, 2011, **30**(4): 403-409.
- Guo F, Jiang G H, Kang Z Q. Study on carbon sink effect in typical sub-tropical karst water system[J]. *Carsologica Sinica*, 2011, **30**(4): 403-409.
- [21] 岳甫均, 李思亮, 刘从强, 等. 利用反硝化细菌法测试水体硝酸盐氮氧同位素[J]. *生态学杂志*, 2012, **31**(8): 2152-2157.
- Yue F J, Li S L, Liu C Q, *et al.* Measurement of waters nitrate dual isotopes based on denitrifier method[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(8): 2152-2157.
- [22] 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): e9672.
- [23] Kendall C, Elliott E M, Wankel S D. Tracing anthropogenic inputs of nitrogen to ecosystems[A]. In: Michener R, Lajtha K (Eds.). *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science* (2nd ed.) [M]. Malden, MA: Blackwell Pub, 2007: 375-449.
- [24] Gillham R W, Cherry J A. Field evidence of denitrification in shallow groundwater flow systems[J]. *Water Quality Research Journal of Canada*, 1978, **13**(1): 53-71.
- [25] DeSimone L A, Howes B L. Nitrogen transport and transformations in a shallow aquifer receiving wastewater discharge: a mass balance approach[J]. *Water Resources Research*, 1998, **34**(2): 271-285.
- [26] Böttcher J, Strebel O, Voerkelius S, *et al.* Using isotope fractionation of nitrate-nitrogen and nitrate-oxygen for evaluation of microbial denitrification in a sandy aquifer[J]. *Journal of Hydrology*, 1990, **114**(3-4): 413-424.
- [27] Korom S F. Natural denitrification in the saturated zone: a review[J]. *Water Resources Research*, 1992, **28**(6): 1657-1668.
- [28] Fadhullah W, Yaccob N S, Syakir M I, *et al.* Nitrate sources and processes in the surface water of a tropical reservoir by stable isotopes and mixing model[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **700**: 134517, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134517.
- [29] Kendall C, Aravena R. Nitrate isotopes in groundwater systems[A]. In: Cook P G, Herczeg A L (Eds.). *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology* [M]. Boston: Springer US, 2000. 261-297.

CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i> (2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China	YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xi'an	HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i> (2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area	LIU Hui-bin, Dilinuer-Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i> (2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun	MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019	WANG Qian (2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn	CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin (2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou	REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i> (2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i> (2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing	SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i> (2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation	WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun (2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing	LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061	ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min (2617)
Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model	ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i> (2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i> (2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System	LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao (2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area	JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Chang, <i>et al.</i> (2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin	ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu	CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting	LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i> (2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp.	WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i> (2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels	SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i> (2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment	ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i> (2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed	WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i> (2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i> (2727)
Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate	LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H ₂ O ₂ System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B	YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i> (2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO ₂ -NTs as a Photoanode	LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i> (2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR	CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i> (2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A ² /O-BAF	ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i> (2771)
Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics	SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i> (2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity	WANG Meng-meng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter	XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i> (2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria	SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen (2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge	SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i> (2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China	CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials	MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i> (2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management	NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i> (2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops	HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu (2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale	XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i> (2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors	HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xixiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i> (2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake	ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i> (2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield	WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i> (2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N ₂ O Emission and Yield in Greenhouse Tomato	SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i> (2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i> (2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province	WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i> (2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring	HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk	CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i> (2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016)	JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i> (2972)