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.7
第41卷 第7期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第7期
2020年7月15日

目 次

中国钢铁行业大气环境影响 …… 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆(2981)
华北地区大气细颗粒物($PM_{2.5}$)年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应 …… 杨伟, 姜晓丽(2995)
郑州市民运会期间大气 $PM_{2.5}$ 改善效果评估 …… 王申博, 娄亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹(3004)
成都夏冬季 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子污染特征 …… 冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强(3012)
川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析 …… 雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈(3021)
四川省典型行业挥发性有机物源成分谱 …… 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波(3031)
成都市工业挥发性有机物排源成分谱 …… 周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文虢(3042)
郑州市典型工业企业 VOCs 排放特征及风险评估 …… 齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟(3056)
阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响 …… 牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林(3066)
典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性 …… 景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽(3076)
华北地区典型重工业城市夏季近地面 O_3 污染特征及敏感性 …… 欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音(3085)
稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性 …… 顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运霆(3095)
苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析 …… 卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳(3102)
轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征 …… 谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日超, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜(3112)
非超低与超低排放煤电机组启动过程 NO_x 排放特征对比分析 …… 李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博(3121)
邢台市区道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别 …… 宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫(3130)
叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响 …… 魏文俊, 王兵, 牛香(3136)
关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源 …… 赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成(3148)
岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析 …… 田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰(3157)
木沥河流域氮素污染及其污染源解析 …… 齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙(3165)
辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析 …… 齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾(3175)
鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应 …… 王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾珺杰, 李兆喜, 马明真, 温学发(3186)
象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析 …… 王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳(3194)
乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献 …… 张慧, 王世亮, 余杨(3204)
连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征 …… 李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪(3212)
茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险 …… 吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英(3222)
金盆水库沉积物铁锰释放规律 …… 路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡(3231)
城市湖泊沉积物微塑料污染特征 …… 王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠(3240)
西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析 …… 刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华(3249)
海水中的红霉素与营养盐对微藻的复合影响 …… 王娜, 赵卫红, 苗辉(3257)
梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律 …… 温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟(3266)
宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析 …… 徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃(3275)
分层型水库藻类垂向演替的水质与细菌种群调控 …… 闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾竞宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容(3285)
长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响 …… 毕薇薇, 叶胜, 于建全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁(3297)
供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型 …… 刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁(3307)
碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制 …… 崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜(3315)
弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe^0/WMF)对水中Cr(Ⅵ)的去除特性及机制 … 计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉(3326)
一硫代砷在针铁矿上的吸附及影响因素 …… 廖丹雪, 单慧媚, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽(3337)
生物滤池快速启动 ANAMMOX 运行策略及菌群特征 …… 王晓曈, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍(3345)
低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响 …… 张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石烜, 金鹏康(3356)
羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响 …… 邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏鹏, 方芳, 陈猷鹏(3365)
低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性 …… 高春娣, 张娜, 韩徽, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻(3373)
我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化 …… 董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎(3384)
城镇河流 CO_2 及 CH_4 排放与市政排水管网污水输入的关联影响 …… 李磊, 陈浩, 朱弈, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建锋(3392)
控释尿素对黄河故道沙性潮土 N_2O 排放的影响 …… 姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林(3402)
我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放 …… 张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠(3410)
不同母质发育土壤 Cd 环境行为对水分管理模式的响应差异 …… 黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波(3418)
锰基改性生物炭对弱碱性 Cd 污染土壤团聚体结构以及 Cd 含量特征的影响 …… 孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵(3426)
钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响 …… 曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋(3434)
叶面喷施 2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响 …… 杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波(3441)
《环境科学》征订启事(3011) 《环境科学》征稿简则(3084) 信息(3174, 3185, 3391)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第41卷第7期 2020年7月
Vol.41, No.7 Jul., 2020

岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析

田永著[1], 韩志伟[1,2*], 赵然[1], 李耕[1], 曾祥颖[1], 黄家琰[1]

(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)

摘要: 为解析岩溶流域不同水体中硝酸盐的来源和转化过程,运用 δ^{15}N-NO_3^-、δ^{18}O-NO_3^- 和 δ^{18}O-H_2O 多同位素示踪技术和水化学分析方法,对地表水和地下水的硝酸盐时空分布特征、来源及转化过程进行分析,并利用 SIAR 模型,计算不同端元对水体硝酸盐的贡献比例. 结果表明,研究区水体溶解性无机氮以NO_3^--N和NH_4^+-N两种形态为主,地下水样品中的NO_3^--N浓度在平水期和枯水期的超标率分别为 7.89% 和 16.67%. 时间上,枯水期水体硝酸盐平均浓度高于平水期. 空间上,旱地集中区(凯伦河至松柏山水库坝前区域)地下水硝酸盐浓度明显高于水田集中区(干河区域),旱地和建设用地集中区(凯伦河区域)地表水硝酸盐浓度普遍较高. 水体硝酸盐转化过程以硝化作用为主,土壤有机氮、粪便污水和化肥为水体硝酸盐的主要来源,对地表水硝酸盐的贡献比例分别为 36.7%、34.7% 和 28.6%,对地下水硝酸盐的贡献比例分别为 39.9%、34.9% 和 25.2%.

关键词:多环境同位素; 硝酸盐; 源解析; 地下水; 松柏山水库; SIAR 模型

中图分类号: X143 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)07-3157-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201911146

Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin

TIAN Yong-zhu[1], HAN Zhi-wei[1,2*], ZHAO Ran[1], LI Geng[1], ZENG Xiang-ying[1], HUANG Jia-yan[1]

(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)

Abstract: To identify the sources and transformation processes of nitrate in surface water and groundwater in a karst basin, water samples were collected in the Songbai Mountain Reservoir basin during the normal and dry seasons. The spatio-temporal distribution, sources, and transformation processes of nitrate in the waters were analyed using a hydrochemical and stable isotopic (δ^{15}N-NO_3^-, δ^{18}O-NO_3^-, and δ^{18}O-H_2O) multi-tracing approach. The contribution rates of different nitrate sources in surface and groundwater were estimated based on the SIAR model. The results showed that NO_3^--N and NH_4^+-N were the main species of dissolved inorganic nitrogen in the waters. The over standard rate of NO_3^--N in groundwater was 7.89% in the normal season and 16.67% in the dry season. Temporally, the nitrate concentrations of waters in the dry season were higher than those in the normal season. Spatially, the nitrate concentrations of groundwater around dryland areas (from the Kailun River to the Songbai Mountain Reservoir) were higher than those of paddy fields (Ganhe River), and the nitrate concentrations of surface water in dryland and construction sites (Kailun River) were generally high. Nitrification was the dominant process in the waters. The nitrate in the waters mainly came from soil organic nitrogen, manure/sewage, and chemical fertilizers; their contribution rates to nitrate were 36.7%, 34.7%, and 28.6% for surface water and 39.9%, 34.9%, and 25.2% for groundwater, respectively. Nitrate pollution in the waters was mainly affected by agricultural activities and the discharge of sewage; appropriate control measures such as water and fertilizer regulation for farmland and treatment of rural sewage should be strengthened.

Key words: multi-environmental isotopes; nitrate; source apportionment; groundwater; Songbai Mountain Reservoir; SIAR model

水体硝酸盐(NO_3^-)污染已成为全球面临的主要水环境问题之一[1,2]. 水体硝酸盐污染不仅会威胁饮用水安全还会导致一系列的环境问题. 在还原条件下,水体硝酸盐可能被还原为亚硝酸盐,长期饮用富含亚硝酸盐的水体会引发高铁血红蛋白症、食管癌和胃癌等多种疾病[3]. 硝酸盐的来源种类复杂,如大气沉降、化肥、生活污水和人畜粪便等[4,5]. 当水体受到硝酸盐污染时,其多解性和难去除性,导致治理工作十分困难.

目前对岩溶地区硝酸盐的研究相对较少,西南岩溶地区具有特殊的地质结构,水岩作用形成的溶洞、岩溶裂隙及管道等,使硝酸盐极易进入地下水,造成地下水硝酸盐污染,甚至威胁居民的健康[6~9]. 由于岩溶地质环境的复杂性,不同来源的硝酸盐在岩溶水体中的转化过程尚不明确,使该地区硝酸盐污染不能得到有效治理. 因此,为了有效防控岩溶地区水体硝酸盐污染,对其来源的识别及转化过程的解析显得尤为必要.

基于水化学特征和土地利用类型的化学质量平衡法和多元统计法可宏观识别水体硝酸盐污染来源,因该方法的多解性,使其对硝酸盐的污染源的判断不够直接和准确[10]. 硝酸盐氮同位素可直接识别水体中硝酸盐污染来源[11],但不同来源的硝酸盐氮

收稿日期: 2019-11-15; **修订日期**: 2020-01-01

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); 贵州省国内一流学科建设项目(GNYL[2017]007); 贵州省人才基地项目(RCJD2018-21)

作者简介: 田永著(1993~),女,硕士研究生,主要研究方向为流域水环境,E-mail:1377484874@qq.com

* 通信作者,E-mail:zwhan@gzu.edu.cn

同位素值范围存在重叠,仅用 $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$ 不能准确地识别其来源. $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$ 的测定方法的开发与应用[12],弥补了这一不足,硝酸盐氮氧同位素的联合使用可准确地识别硝酸盐的来源[13,14]. 同时,利用 $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$ 和 $\delta^{18}O\text{-}H_2O$ 可有效揭示水体中硝酸盐的转化过程[15~18].

随着研究的深入,硝酸盐污染源识别从定性研究上升到定量研究的层面[19,20]. 目前,IsoSoure 模型和 SIAR 模型被广泛用于不同硝酸盐来源的定量识别. 当有多个污染源时,IsoSoure 模型则无解,在实际情况中,硝酸盐污染源众多,因此该模型的应用严重受限[13,21]. 稳定同位素混合模型 SIAR 可用于 3 个以上硝酸盐污染源的定量识别[22].

本研究选取典型岩溶流域(松柏山水库流域)为研究区,利用 $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$、$\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$ 和 $\delta^{18}O\text{-}H_2O$ 多同位素联合示踪技术,分析流域内水体硝酸盐时空分布特征、解析来源及判定转化过程,并运用 SIAR 模型计算各来源的贡献比例,以期为岩溶地区硝酸盐污染预防和治理提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

松柏山水库流域位于贵州省贵阳市的西南部(26°17′~26°24′N、106°28′~106°34′E),地势西南高东北低,高程1 158~1 551 m(图 1). 该流域的面积为13 914.36 hm^2,属于北亚热带气候,多年平均气温 14.90℃,平均相对湿度 82%,平均无霜 288 d,多年平均降雨量1 099.00 mm,降雨集中于 4~9 月[23]. 2~3 月为研究区内春耕的施肥旺季,1 月为施肥淡季.

流域内的土地利用类型包括耕地、建设用地和林地,其中耕地包括旱地和水田,建设用地主要为农村居民住房. 凯伦河两岸和松柏山水库中上游的土地利用类型主要为旱地,凯伦河西部区域建设用地所占比例较大,而在干河两岸有大量水田分布[24].

1.2 样品采集

分别于平水期(2017 年 4 月)和枯水期(2018 年 1 月)在流域内开展了样品采集工作,分别采集了不同水体样品 59 件(地表水 21 件、地下水 38 件)

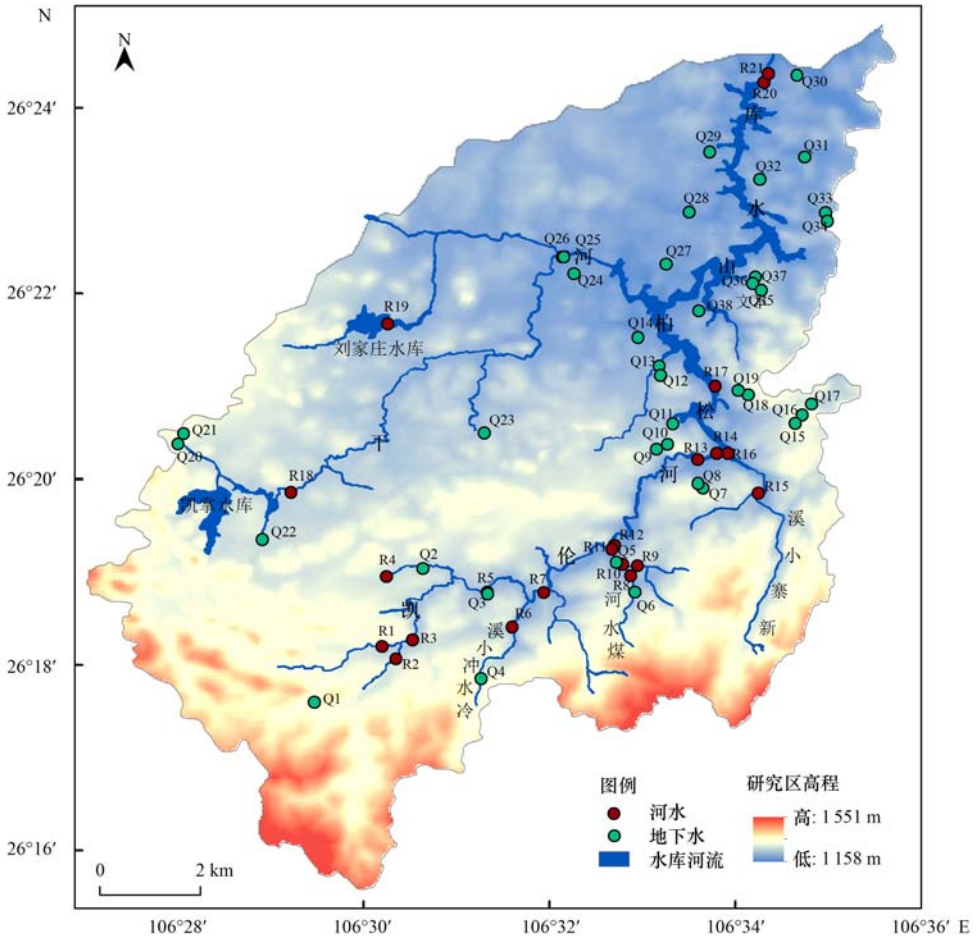


图 1 研究区采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling points in the study area

和 51 件(地表水 21 件、地下水 30 件),采样点分布详见图 1. 用便携式水质参数仪(Multi 3430, WTW, Weilheim,德国)测定水样的溶解氧(DO). 阴离子样品、水的氧同位素样品和硝酸盐的氮、氧同位素样品经 0.22 μm 滤膜过滤后直接密封,所有样品均放入冷藏箱(4℃)保存.

1.3　测试分析

阴离子(NO_3^- 和 Cl^-)样品用离子色谱(ICS-1100)测定,氨氮(NH_4^+-N)采用纳氏试剂分光光度法测试分析,亚硝态氮(NO_2^--N)采用重氮耦合分光光度计法测试分析,水体氧同位素样品使用 Picarro L2130-i 超高精度液态水/水汽同位素分析仪分析,硝酸盐的氮、氧同位素通过反硝化细菌法测定[25]. 其中,阴离子、氨氮和亚硝态氮浓度于贵州大学测定,水体的氧同位素于中山大学测定,硝酸盐的氮、氧同位素于中国科学院地球化学研究所(贵阳)测定.

水体氧同位素与硝酸盐氮、氧同位素用 δ 表示:

$$\delta = \frac{R_{样品} - R_{标准}}{R_{标准}} \times 1\,000‰$$

式中,$R_{样品}$ 表示样品中重同位素与轻同位素比值;$R_{标准}$ 表示标准样品中重同位素与轻同位素比值.

1.4　SIAR 混合模型

本研究使用稳定同位素混合模型 SIAR 计算硝酸盐各来源的贡献比例. SIAR 模型通过定义 k 个来源 n 个混合物的 j 个同位素[22],考虑到同位素分馏作用的影响,模型可以表示为:

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

$$S_{jk} \backsim N(\mu_{jk}, \omega_{jk}^2)$$

$$C_{jk} \backsim N(\lambda_{jk}, \tau_{jk}^2)$$

$$\varepsilon_{jk} \backsim N(0, \sigma_j^2)$$

式中,X_{ij} 是混合物的同位素的 δ 值,其中:i 为 1,2,3,…,N, j 为 1,2,3,…,J; S_{jk} 是第 k 个端元的 j 同位素值(k 为 1,2,3,…,K),μ_{jk} 为均值,ω_{jk} 为标准差; 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,标准差为 σ_j.

2　结果与分析

流域内平水期和枯水期地表水 DO 的变化范围分别为 5.49 ~ 10.55 mg·L^{-1}(平均值为 8.30 mg·L^{-1})和 7.25 ~ 11.14 mg·L^{-1}(平均值为 9.02 mg·L^{-1}),平水期和枯水期地下水 DO 的变化范围分别为 0.36 ~ 14.22 mg·L^{-1}(平均值为 6.93 mg·L^{-1})和 0.75 ~ 11.72 mg·L^{-1}(平均值为 6.58 mg·L^{-1}),流域水体基本处于氧化环境. 枯水期水体“三氮”平均浓度均大于平水期; 在平水期和枯水期,地下水中的NO_3^--N和NH_4^+-N的平均浓度均大于地表水,而 NO_2^--N 的平均浓度则均呈现相反的特征(表 1); 相比 NO_2^--N 和NH_4^+-N,两期地表水和地下水中的NO_3^--N浓度明显较高且变幅大,表明其在研究区内的分布具有明显的空间分异性. 根据我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006),硝酸盐(以 N 计)和亚硝酸盐的浓度限值分别为 10 mg·L^{-1}和 1 mg·L^{-1},研究区地表水和地下水的亚硝酸盐均未超标,地表水NO_3^--N浓度均未超标,表明流域内地表水受硝酸盐污染不明显,部分地下水的NO_3^--N浓

表 1　研究区水化学指标/mg·L^{-1}

Table 1　Hydrochemical index in the study area/mg·L^{-1}

时期	类型	DO	Cl^-	NO_3^-	NO_2^-	NO_3^--N	NO_2^--N	NH_4^+-N
平水期地表水(n=21)	平均值	8.30	2.30	7.27	0.03	1.64	1.01×10^{-2}	1.14
	最大值	10.55	3.94	12.18	0.14	2.75	4.37×10^{-2}	3.41
	最小值	5.49	0.98	2.17	0.01	0.49	2.12×10^{-3}	0.27
	标准差	1.20	0.81	2.50	0.03	0.56	8.93×10^{-3}	0.82
平水期地下水(n=38)	平均值	6.93	5.88	22.36	0.01	5.05	3.60×10^{-3}	1.15
	最大值	14.22	20.41	60.37	0.05	13.67	1.47×10^{-2}	2.66
	最小值	0.36	0.61	0.51	0.00	0.11	0	0.32
	标准差	2.67	5.34	15.15	0.01	3.42	4.24×10^{-3}	0.75
枯水期地表水(n=21)	平均值	9.08	2.96	9.03	0.04	2.04	1.18×10^{-2}	1.45
	最大值	11.14	13.72	14.75	0.14	3.33	4.37×10^{-2}	10.60
	最小值	7.25	0.85	2.15	0.00	0.49	7.86×10^{-4}	0.06
	标准差	1.26	2.58	3.73	0.03	0.84	9.60×10^{-3}	2.31
枯水期地下水(n=30)	平均值	6.58	6.37	26.11	0.02	5.89	6.51×10^{-3}	2.47
	最大值	11.72	19.86	61.26	0.07	13.83	1.99×10^{-2}	47.38
	最小值	0.75	0.53	0.92	0.00	0.21	5.28×10^{-4}	0.18
	标准差	2.52	5.32	17.77	0.02	4.01	5.43×10^{-3}	8.55

度大于 10 mg·L^{-1},其中平水期超标率为 7.89%,枯水期超标率为 16.67%.

大部分水体"三氮"主要以NO_3^--N为主,其余以NH_4^+-N为主,研究区大部分水体处于氧化环境中,亚硝酸盐极易被硝化细菌转化为硝酸盐,因此NO_2^--N 浓度最低(图 2). 通过 Pearson 显著性检验,两个采样期$\rho(NO_3^-\text{-N})$与$\rho(Cl^-)$呈显著正相关关系(表 2),表明研究区水体硝酸盐和氯离子有相同的来源,可能来自于人为活动的影响.

流域内地表水$\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$和$\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$的平均值分别为 8.80‰和 4.05‰($n=3$,范围分别为 8.51‰~8.98‰和 3.56‰~4.74‰),地下水$\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$和$\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$的平均值分别为 8.81‰和 2.36‰,($n=12$,变化范围分别为 3.94‰~13.78‰和 0.64‰~5.13‰).

表 2 研究区水化学指标的 Pearson 相关系数[1)]

Table 2 Pearson's correlation coefficients of water chemistry index in the study area

时期	类型	Pearson	DO	Cl^-	NO_3^--N	NO_2^--N	NH_4^+-N
平水期($n=59$)	DO	相关性	1				
		显著性					
	Cl^-	相关性	0.018	1			
		显著性	0.89				
	NO_3^--N	相关性	0.152	0.799**	1		
		显著性	0.251	0			
	NO_2^--N	相关性	0.154	0.065	−0.127	1	
		显著性	0.245	0.627	0.337		
	NH_4^+-N	相关性	−0.021	−0.104	0.028	0.101	1
		显著性	0.876	0.433	0.832	0.445	
枯水期($n=51$)	DO	相关性	1				
		显著性					
	Cl^-	相关性	0.07	1			
		显著性	0.624				
	NO_3^--N	相关性	0.042	0.636**	1		
		显著性	0.771	0			
	NO_2^--N	相关性	0.274	0.517**	0.061	1	
		显著性	0.052	0	0.672		
	NH_4^+-N	相关性	−0.062	0.028	0.06	0.037	1
		显著性	0.664	0.845	0.676	0.794	

1) ** 表示在 0.01 水平上显著相关

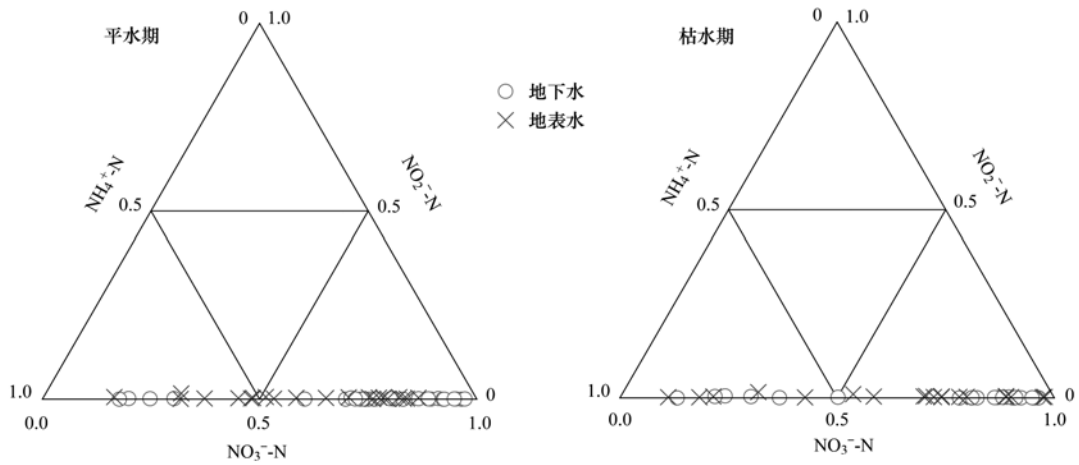


图 2 不同时期地表水与地下水的不同种类氮的相对浓度三线图

Fig. 2 Ternary diagram showing relative concentrations of different nitrogen species in surface and groundwater

3 讨论

3.1 硝酸盐的时空分布

为明晰硝酸盐的来源,对不同水体硝酸盐进行空间分析(图 3). 流域内有 5 个规模化养殖场,其周边地表水和地下水中硝酸盐浓度均未受到明显影响. 整体上,枯水期水体硝酸盐浓度高于平水期. 研究区为喀斯特山区,坡耕地广泛分布,在雨水的淋溶冲刷作用下,极易使硝酸盐向地表水和地下水迁移,而水田为相对还原条件且持水性能较好,硝酸盐很

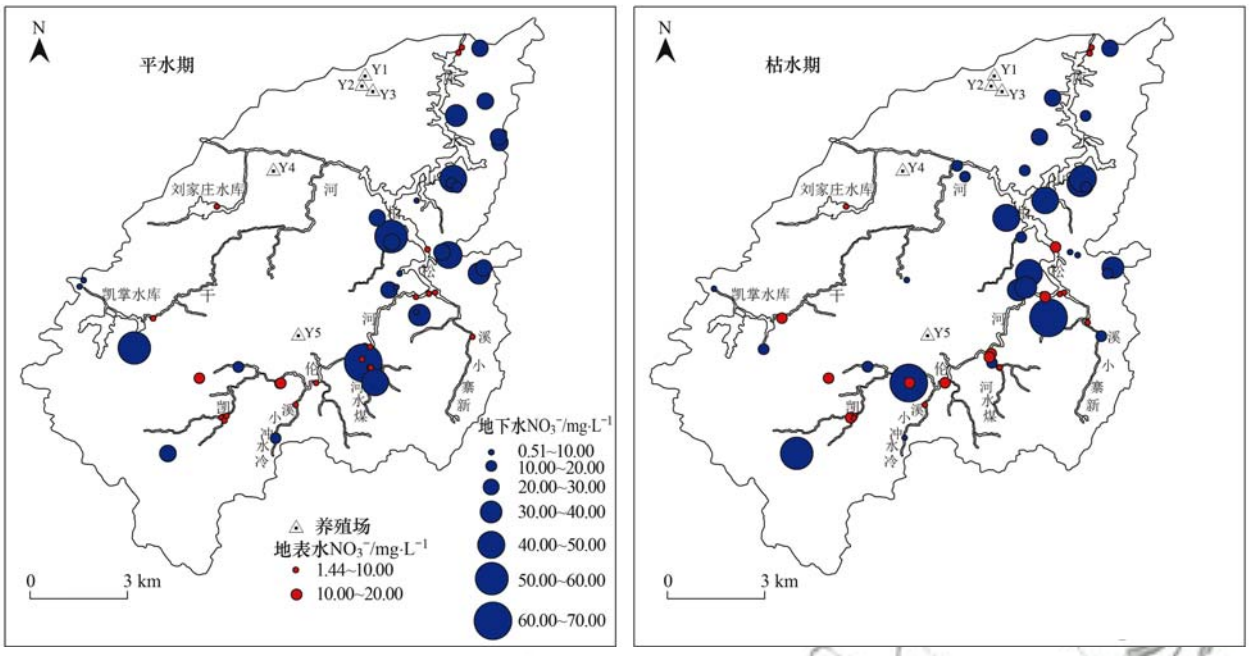


图 3　研究区水体硝酸盐浓度分布

Fig. 3　Distribution of nitrate concentration in water

难通过入渗迁移至地下水系统. 因此,在平水期和枯水期,旱地集中区(凯伦河至松柏山水库坝前区域)地下水硝酸盐浓度明显高于水田集中区(干河区域),在旱地和建设用地集中区(凯伦河区域)地表水硝酸盐浓度普遍较高.

3.2　硝酸盐来源及转化过程

3.2.1　硝酸盐来源解析

Cl^-广泛存在于自然环境中,其来源有生活污水、人和动物的排泄物、工业废水等人为污染源,$c(NO_3^-)/c(Cl^-)$的方法常应用于 NO_3^- 来源的判断[15,26,27]. 高 Cl^-浓度,低 $c(NO_3^-)/c(Cl^-)$,水体的 NO_3^- 来源于粪便和生活污水; 低 Cl^- 浓度,高 $c(NO_3^-)/c(Cl^-)$,NO_3^- 受农业活动的影响; 低 Cl^- 浓度,低 $c(NO_3^-)/c(Cl^-)$,水体 NO_3^- 则来源于土壤 N[28]. 由图 4 所示,研究区水体硝酸盐来源相对单一,主要受农业来源影响.

水体硝酸盐氮氧同位素值域大部分位于土壤有机氮和粪肥污水的范围内,少部分位于化肥和降雨中的 NH_4^+ 范围内,受粪便及生活污水排放的影响,分布在该端元值域内样品的硝酸盐浓度均较高(图 5). 流域内硝酸盐的主要来源为土壤有机氮、粪便污水和化肥.

3.2.2　硝酸盐转化过程

水体中硝酸盐的氮氧同位素组成不仅受其来源的影响,硝化、反硝化、固氮和矿化等生物活动过程也会引起其产生变化. 其中矿化作用、同化作用和固氮作用不会对水体硝酸盐氮氧同位素产生较大的分馏效应[29],因此,本研究主要识别硝化作用和反硝

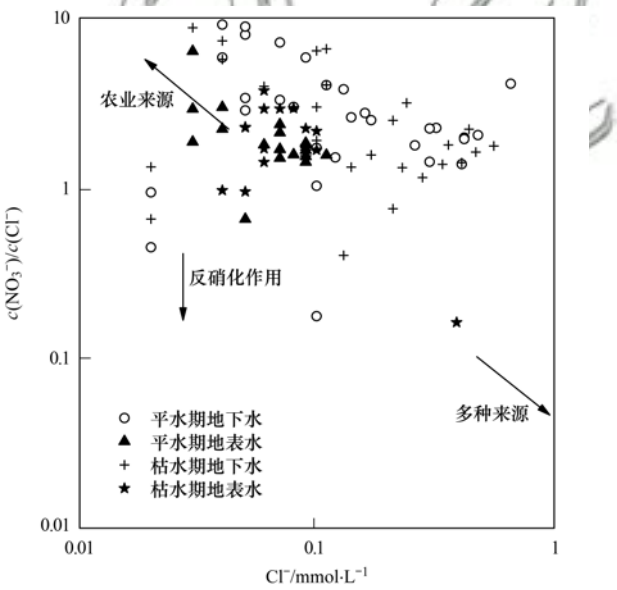


图 4　采样点 $c(NO_3^-)/c(Cl^-)$ 的浓度比和 Cl^-浓度关系

Fig. 4　Relationship between Cl^- concentration and $c(NO_3^-)/c(Cl^-)$ at the sampling sites

化作用对硝酸盐转化过程的影响.

Gillham 等[30]的研究表明,水体中反硝化作用的 DO 浓度上限为 2.0 mg·L^{-1}; 而 Desimone 等[31]的研究发现 DO 浓度为 2 ~ 6 mg·L^{-1}的条件下,水体中的硝酸盐仍可能发生反硝化作用. 流域内地表水样品除平水期的 R21 的 DO 值为 5.49 mg·L^{-1},其余样品的 DO 值为均大于 6 mg·L^{-1},说明研究区地表水发生反硝化作用的可能性很小; 地下水样品除 Q2 和 Q4 的 DO 值较小,其余样品均大于 2 mg·L^{-1},表明研究区地下水环境总体上不利于发生反硝化反

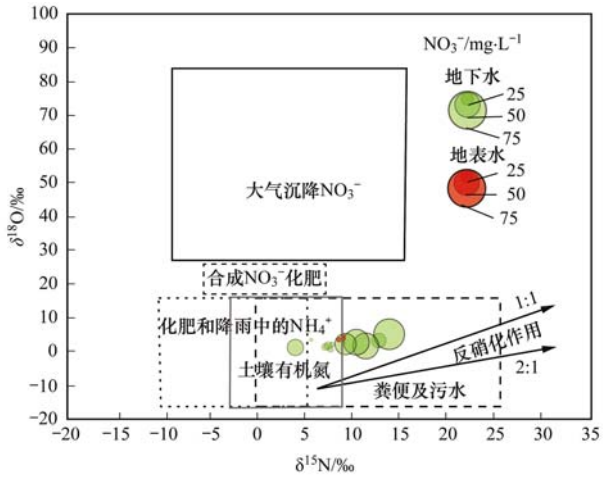


图 5 研究区硝酸盐氮氧同位素特征值

Fig. 5 Characteristic values of nitrate nitrogen and oxygen isotopes in the study area

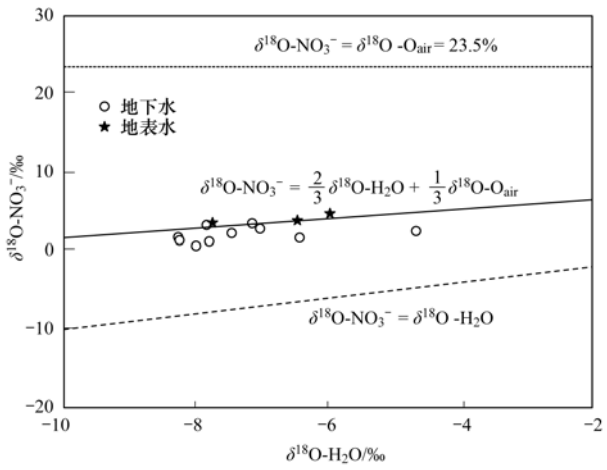


图 6 $\delta^{18}O\text{-}H_2O$ 与 $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$ 关系

Fig. 6 Relationship between $\delta^{18}O\text{-}H_2O$ and $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$

应. 在反硝化过程中,水体的 NO_3^- 转化为 N_2 和 N_2O,导致水体中 NO_3^- 浓度降低并伴随着硝酸盐的氮氧同位素富集,且 $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$ 和 $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$ 富集比率接近 2∶1[32,33]. 在本研究中,$\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$ 与 $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$ 的比值并不在 1∶1 ~ 2∶1 之间(图 5),表明流域水体硝酸盐的转化过程中未发生反硝化作用.

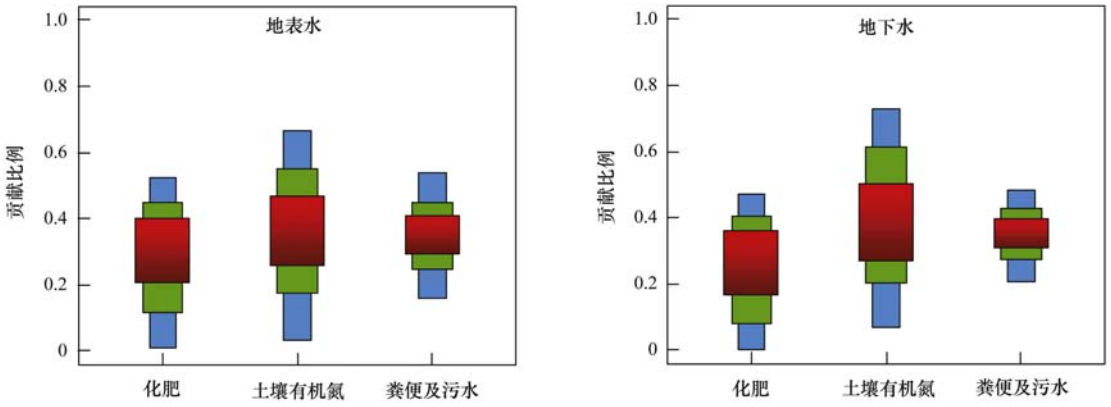
有研究表明,硝化作用产生的 NO_3^-,一个氧原子来自水中溶解的氧气,其同位素组成与大气中的氧气相似,另外两个氧原子来自水[34],即:

$$\delta^{18}O\text{-}NO_3^- = 2/3\ \delta^{18}O\text{-}H_2O + 1/3\delta^{18}O\text{-}O_{air}$$

本研究所有样品的 $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$ 值均在理论值附近(图 6),表明硝化作用主导着硝酸盐的氧同位素组成.

3.3 SIAR 模型定量识别硝酸盐的来源

硝酸盐主要来源于土壤有机氮、粪便污水和化肥,水体硝酸盐的转化过程以硝化作用为主. 由上文分析,反硝化作用可以忽略,因此 SIAR 模型计算硝酸盐来源的贡献率时假设分馏因子 C_{jk} 为 0. SIAR 模型运算结果显示(图 7),研究区不同端元对地表水硝酸盐贡献大小顺序为:土壤有机氮(36.7%) > 粪便及污水(34.7%) > 化肥(28.6%);对地下水贡献大小顺序为:土壤有机氮(39.9%) > 粪便及污水(34.9%) > 化肥(25.2%). 模型的运算结果与样品采集地点周边土地利用类型现状及水化学分析较一致. 因此,研究区水体硝酸盐污染主要受农业活动和粪便污水的排放的影响,应加强流域内农田的水肥调控及农村粪便污水的集中处理.



箱线图的蓝、绿、红分别表明 25%, 50%, 75% 的比例

图 7 SIAR 模型计算各污染源的贡献率

Fig. 7 SIAR model calculations of the contribution rate of each pollution source

4 结论

(1)水体中溶解性无机氮以 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 为主,流域内地表水的 NO_3^--N 均达到国家饮用水标准,地下水在平枯两期存在不同程度的超标现象. 流域内水体硝酸盐浓度受土地利用影响明显,旱地集中区地表水和地下水的硝酸盐浓度明显偏高.

(2)水体硝酸盐主要受控于农业活动,土壤有

机氮、粪便及污水是流域内水体硝酸盐的主要来源，硝化作用对水体硝酸盐的转化过程起主导作用.

(3)SIAR 模型结果显示：土壤有机氮、粪便污水和化肥对地表水硝酸盐的贡献比例分别为 36.7%、34.7% 和 28.6%,对地下水硝酸盐的贡献比例分别为 39.9%、34.9% 和 25.2%.

参考文献：

[1] Sullivan T P, Gao Y, Reimann T. Nitrate transport in a karst aquifer: numerical model development and source evaluation[J]. Journal of Hydrology, 2019, **573**: 432-448.

[2] Goudarzi S, Jozi S A, Monavari S M, *et al*. Assessment of groundwater vulnerability to nitrate pollution caused by agricultural practices [J]. Water Quality Research Journal, 2017, **52**(1): 64-77.

[3] Zhai Y Z, Zhao X B, Teng Y G, *et al*. Groundwater nitrate pollution and human health risk assessment by using HHRA model in an agricultural area, NE China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, **137**: 130-142.

[4] 汪银龙, 冯民权, 董向前. 汾河下游雨季硝酸盐污染源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 4033-4041.
Wang Y L, Feng M Q, Dong X Q. Analysis of nitrate pollution sources in the rainy season of the lower Fenhe river [J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 4033-4041.

[5] 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.

[6] 盛婷, 杨平恒, 谢国文, 等. 基于 $\delta^{15}N$ 和 $\delta^{18}O$ 的农业区地下河硝酸盐污染来源[J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4547-4555.
Sheng T, Yang P H, Xie G W, *et al*. Nitrate-Nitrogen pollution sources of an underground river in karst agricultural area using ^{15}N and ^{18}O isotope technique [J]. Environmental Science, 2018, **39**(10): 4547-4555.

[7] 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 X, 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.

[8] Puig R, Soler A, Widory D, *et al*. Characterizing sources and natural attenuation of nitrate contamination in the Baix Ter aquifer system (NE Spain) using a multi-isotope approach[J]. Science of the Total Environment, 2017, **580**: 518-532.

[9] Musgrove M, Opsahl S P, Mahler B J, *et al*. Source, variability, and transformation of nitrate in a regional karst aquifer: Edwards aquifer, central Texas[J]. Science of the Total Environment, 2016, **568**: 457-469.

[10] 傅雪梅, 孙源媛, 苏婧, 等. 基于水化学和氮氧双同位素的地下水硝酸盐源解析[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(9): 3951-3958.
Fu X M, Sun Y Y, Su J, *et al*. Source of nitrate in groundwater based on hydrochemical and dual stable isotopes [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(9): 3951-3958.

[11] 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 等. 岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应：以重庆龙凤槽谷地下河系统为例[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1715-1725.
Duan S H, Jiang Y J, Zhang Y Z, *et al*. Sources of nitrate in groundwater and its environmental effects in karst trough valleys: a case study of an underground river system in the Longfeng Trough Valley, Chongqing[J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1715-1725.

[12] Amberger A, Schmidt H L. Natürliche isotopengehalte von nitrat als indikatoren für dessen herkunft [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1987, **51**(10): 2699-2705.

[13] Li R F, Ruan X H, Bai Y, *et al*. Effect of wheat-maize straw return on the fate of nitrate in groundwater in the Huaihe River Basin, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, **592**: 78-85.

[14] Bu H M, Song X F, Zhang Y, *et al*. Sources and fate of nitrate in the Haicheng River basin in Northeast China using stable isotopes of nitrate[J]. Ecological Engineering, 2017, **98**: 105-113.

[15] 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.
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.

[16] Yue F J, Liu C Q, Li S L, *et al*. Analysis of $\delta^{15}N$ and $\delta^{18}O$ to identify nitrate sources and transformations in Songhua River, Northeast China[J]. Journal of Hydrology, 2014, **519**: 329-339.

[17] Kim H, Kaown D, Mayer B, *et al*. Identifying the sources of nitrate contamination of groundwater in an agricultural area (Haean basin, Korea) using isotope and microbial community analyses[J]. Science of the Total Environment, 2015, **533**: 566-575.

[18] Yue F J, Li S L, Liu C Q, *et al*. Sources and transport of nitrate constrained by the isotopic technique in a karst catchment: an example from Southwest China [J]. Hydrological Processes, 2015, **29**(8): 1883-1893.

[19] Ji X L, Xie R T, Hao Y, *et al*. Quantitative identification of nitrate pollution sources and uncertainty analysis based on dual isotope approach in an agricultural watershed[J]. Environmental Pollution, 2017, **229**: 586-594.

[20] Lu L, Cheng H G, Pu X, *et al*. Nitrate behaviors and source apportionment in an aquatic system from a watershed with intensive agricultural activities [J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2015, **17**(1): 131-144.

[21] 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.

[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] 董雪妍. 基于 GIS 与 ANN 方法的花溪河流域岩溶地下水脆弱性评价[D]. 贵阳：贵州大学, 2017. 11-12.

[24] 代克志. 基于3S技术的花溪河流域景观格局变化及影响研究[D]. 贵阳：贵州师范大学, 2016. 23-29.
Dai K Z. Study on the landscape pattern change and its influence

of the Huaxi river basin based on 3S technology[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2016. 23-29.

[25] 岳甫均, 李思亮, 刘丛强, 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.

[26] Wang W J, Song X F, Ma Y. Identification of nitrate source using isotopic and geochemical data in the lower reaches of the Yellow River irrigation district (China)[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**(11): 936.

[27] 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.

[28] Chen Z X, Yu L, Liu W G, *et al*. Nitrogen and oxygen isotopic compositions of water-soluble nitrate in Taihu Lake water system, China: implication for nitrate sources and biogeochemical process [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **71**(1): 217-223.

[29] 张金, 马金珠, 陈春武, 等. 硝酸盐氮氧同位素在不同生态系统中的研究进展[J]. 干旱区地理, 2015, **38**(2): 312-319.
Zhang J, Ma J Z, Chen C W, *et al*. An overview on application of dual isotope compositions of nitrate in different ecosystems[J]. Arid Land Geography, 2015, **38**(2): 312-319.

[30] Gillham R W, Cherry J A. Field evidence of denitrification in shallow groundwater flow systems[J]. Water Quality Research Journal, 1978, **13**(1): 53-72.

[31] 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.

[32] Zhao Y Y, Zheng B H, Jia H F, *et al*. Determination sources of nitrates into the Three Gorges Reservoir using nitrogen and oxygen isotopes[J]. Science of the Total Environment, 2019, **687**: 128-136.

[33] 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.

[34] 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.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 41 No. 7

Jul. 15, 2020

CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China ····· TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, *et al.* (2981)

Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change ····· YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)

Evaluation of the Reduction in $PM_{2.5}$ Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou ····· WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, *et al.* (3004)

Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter ····· FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, *et al.* (3012)

Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province ····· LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, *et al.* (3021)

Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan ····· XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, *et al.* (3031)

Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu ····· ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, *et al.* (3042)

Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou ····· QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, *et al.* (3056)

Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan ····· NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, *et al.* (3066)

Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode ····· JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, *et al.* (3076)

Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer ····· OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, *et al.* (3085)

Source Apportionment of Atmospheric Ammonia: Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language ····· GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, *et al.* (3095)

Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou ····· LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, *et al.* (3102)

Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode ····· XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, *et al.* (3112)

Comparative Analysis of NO_x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process ····· LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, *et al.* (3121)

Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City ····· SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, *et al.* (3130)

Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter ····· WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)

Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain ····· ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, *et al.* (3148)

Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin ····· TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, *et al.* (3157)

Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin ····· QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, *et al.* (3165)

Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohe Estuary and the Related Influencing Factors ····· QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, *et al.* (3175)

Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake ····· WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, *et al.* (3186)

Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed ····· WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, *et al.* (3194)

Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China ····· ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)

Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang ····· LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, *et al.* (3212)

Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin ····· WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, *et al.* (3222)

Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir ····· LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, *et al.* (3231)

Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes ····· WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, *et al.* (3240)

Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet ····· LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, *et al.* (3249)

Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater ····· WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)

Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River ····· WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, *et al.* (3266)

Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo ····· XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, *et al.* (3275)

Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir ····· YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, *et al.* (3285)

Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems ····· BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, *et al.* (3297)

Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water ····· LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, *et al.* (3307)

Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar ····· CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, *et al.* (3315)

Enhanced Chromate (Ⅵ) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe^0/WMF) ····· JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, *et al.* (3326)

Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite ····· LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, *et al.* (3337)

Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter ····· WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, *et al.* (3345)

Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater ····· ZHANG Xin-rui, CHI Yu-lei, WANG Qian, *et al.* (3356)

Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge ····· XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, *et al.* (3365)

Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature ····· GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, *et al.* (3373)

Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China ····· DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, *et al.* (3384)

Relationship Between CO_2 and CH_4 Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network ····· LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, *et al.* (3392)

Effects of Controlled-Release Urea Application on N_2O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil ····· JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, *et al.* (3402)

Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China ····· ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, *et al.* (3410)

Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils ····· HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, *et al.* (3418)

Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil ····· SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, *et al.* (3426)

Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai ····· CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, *et al.* (3434)

Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings ····· YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, *et al.* (3441)