基于同位素和水化学的山区饮用水安全风险识别

范丽丽，王宗志，沙海飞，杜慧华，白莹，丁启
（南京水利科学研究院，江苏　南京　210024）

摘　要：以安徽岳西潜水流域为研究区，采集地表、地下、温泉水样，测定水源水质并分析引发健康问题的主要超标因子硝酸盐，利用同位素（N、H、O）和水化学方法解析研究区硝酸盐来源与转化过程，并采用稳定同位素混合模型（SIAR）定量分析各来源的贡献率。结果表明：化肥对硝酸盐贡献最大（占总量的 68.7%），其次是大气降水（15.1%），畜禽粪便和污水的贡献率稍低（9.6%），土壤有机氮的贡献率最低（6.6%）。结合水化学与同位素示踪手段，精确溯源流域硝酸盐污染主要来源于化肥。

关键词：同位素；硝酸盐；水化学；稳定同位素混合模型；山区饮用水
中图分类号：X52　　**文献标志码**：B　　**文章编号**：1006-2009（2024）06-0058-05

Risk Identification of Drinking Water Safety in Mountainous Areas by Isotopes and Hydrochemistry

FAN Lili, WANG Zongzhi, SHA Haifei, DU Huihua, BAI ying, DING qi
(*Nanjing Hydraulic Research Institute*, *Nanjing*, *Jiangsu* 210024, *China*)

Abstract: Taking Yuexi Diving basin in Anhui as the study area, the water quality of surface water, groundwater and hot spring were determined. Nitrate, the main over-standard factor causing health problems was detected. The sources and transformation process of nitrate in the study area were analyzed by isotope (N,H,O) and hydrochemistry method, and the contribution rate of each source was quantitatively analyzed by stable isotope mixing model(SIAR). The results showed that fertilizer contributed the most to nitrate(accounting for 68.7% of the total), followed by atmospheric rainfall(15.1%), livestock manure and sewage contributed slightly low (9.6%), and organic nitrogen in soil contributed the least (6.6%). By means of hydrochemistry and isotope tracer, the main source of nitrate pollution in watershed was accurately traced.

Key words: Isotopes; Nitrate; Hydrochemistry; SIAR model; Drinking water in mountainous area

近年来，在改善农村饮用水水质问题上我国投入了大量财力，由于山区自然环境等影响，农村饮用水安全仍然存在诸多问题[1]。通常采用污染因子筛查或健康风险评价识别饮用水安全风险[2-4]，虽筛查出污染因子，但污染来源及其转化规律不明确。WHO 调查的结果表明，在发展中国家，由于饮用了不安全的水而导致的疾病占 8%左右[5]。《生活饮用水卫生标准》（GB 5749—2022）（以下简称《标准》）中硝态氮（NO_3^--N）的限值为 10 mg/L，饮用水中硝酸盐超标易导致婴幼儿高铁血红蛋白症和成年人胃癌等疾病。研究表明，多地癌症高发与饮用水中硝酸盐的污染存在密切关联[6-7]，故开展饮用水源区的水质安全评价，精确追溯污染物来源，形成有针对性的预警与保护措施，是保障城乡居民饮用水水质安全的重要途径。

近年来，同位素示踪技术[8-30]迅猛发展，利用氮氧稳定同位素技术确定流域水体硝酸盐来源已被广泛应用，多侧重于水质污染因子，而既关注水质问题，又查明污染来源及转化过程的研究则相对

收稿日期：2023-11-17；**修订日期**：2024-11-02
基金项目：国家自然科学青年基金资助项目（52109027）；国家重点研发计划基金资助项目（2023YFC3206604）
作者简介：范丽丽（1981—），女，江苏兴化人，正高级工程师，博士研究生，主要研究方向为水化学及同位素示踪。

较少。今选取典型山区饮用水为研究对象,在潜水小流域范围内筛选出水质污染因子,结合水化学与同位素示踪手段分析研究区水体硝酸盐的来源,采用 SIAR 模型量化各种来源的贡献比例,从源头解决污染超标问题,以期为山区饮用水安全风险有效防控提供支撑。

1　试验

1.1　主要仪器与试剂

NexION350X 型电感耦合等离子体质谱仪,PE-7000DV 型 ICP-OES 仪,美国珀金埃尔默公司;AutoAnalyzer 3 型连续流动分析仪,德国 seal 公司;IC-2010 型离子色谱仪,日本 TOSOH 公司;Isoprime 100 型气体稳定同位素比值质谱仪(带痕量气体全自动预浓缩装置),德国 Elementar 公司;Cd 还原柱(有机玻璃管或苯乙烯管, 30 cm × 5 mm × 3 mm)。

500 mg/L 的硝酸盐氮标准溶液,1 000 mg/L 的 26 种元素混合标准储备溶液,1 000 mg/L 的钾、钠、钙、镁混合标准储备溶液,100 mg/L 的水中氯、硝酸根、硫酸根成分分析标准物质,北京北方伟业计量技术研究院;淋洗液为 7.5 mmol/L 的 $NaHCO_3$ 溶液和 1.1 mmol/L 的 Na_2CO_3 溶液;1 mol/L 的咪唑溶液,镀铜镉粒(cat No:13913),Skalar Analytical B. V.;2 mol/L 的 NaN_3 溶液,20% 的醋酸溶液;高纯氦气;高纯氩气;浓硝酸(优级纯)。

1.2　研究区概况与样品采集

岳西县位于大别山腹地,全县平均海拔 600 m,多年平均降水量为 1 427 mm,地跨长江、淮河两大流域,境内河网密集,属于丘陵裂隙-岩溶水亚区与沿江平原孔隙水亚区,以丘陵裂隙-岩溶水为主,研究区内含水岩层为碳酸盐岩裂隙。岳西承担着为周边及下游地区发展提供重要生态屏障和优质水资源的重任,区域内横水水库、班竹河上下游及农户家水井均为重要的饮用水源。

于 2022 年 7 月沿岳西县潜水干流共采集 8 组水样,每组水样采集 3 个平行样。水体取样点布设时遵循以下原则:路线与采样点位遍布流域上、中、下游,体现成果整体代表性;采集居民饮用水水样,适当采集河水样及温泉样,满足地表水、地下水对比分析需求。选择小流域中存在饮用水导致健康问题的地区,特别是工程性缺水的山区。研究区域与采样点分布见图 1。其中,地表水样品 4 组(4、

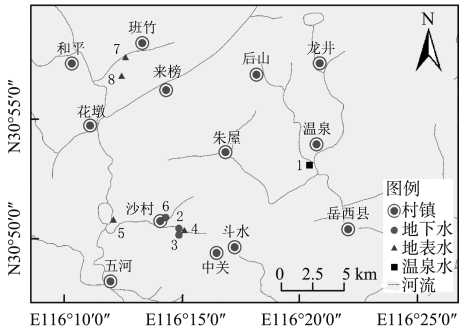

图 1　研究区与采样点位分布

Fig. 1　Location of the study area and sampling sites

5、7、8),地下水样品 3 组(2、3、6),温泉水 1 组(1)。地表水主要沿上下游采集;地下水样品按汇流方向采集。镉等重金属,K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、NO_3^-、Cl^-、F^-、SO_4^{2-},以及氨氮、亚硝酸盐用 500 mL 聚乙烯塑料瓶采集。$\delta^{18}O\text{-}H_2O$、$\delta^{15}N\text{-}NO_3$、$\delta^{18}O\text{-}NO_3$ 样分别用 50 mL 棕色聚乙烯塑料瓶采集,取样瓶用 0.45 μm 滤膜过滤后的水润洗三四次再装样。水样于冰柜中 4 ℃下冷藏,待测。

1.3　测定

水样分析由南京水科院生态水文实验中心测试完成。用滴定法测试碱度;采用离子色谱测定 NO_3^-、Cl^-、SO_4^{2-};用 ICP-OES 测定 K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^2;镉等重金属采用 ICP-MS 测定;氨氮、亚硝酸盐、硝酸盐用连续流动分析仪测定。δ^2H、$\delta^{18}O$ 采用气体稳定同位素比值质谱仪测定,采用 VSMOW 标准,测量精度分别优于 1‰、0.1‰;$\delta^{15}N\text{-}NO_3$ 和 $\delta^{18}O\text{-}NO_3$ 同位素样品由中科院土壤所用两步化学还原法测定,氮同位素采用大气氮(AIR)作为标准,氧同位素采用 VSMOW 标准,测量精度分别优于 0.5‰和 1‰。

采用 Piper 三线图分析水化学类型,利用氢氧同位素确定水的来源,氮氧同位素追踪硝酸盐来源,SIAR 定量污染源贡献率。

1.4　同位素来源解析

虽然氮氧同位素联合示踪可以有效识别水环境中 NO_3^- 的来源,但对多来源 NO_3^- 输入端无法量化。为了估算不同的潜在污染源对硝酸盐氮污染的贡献比例,采用 SIAR 模型[10]建模分析,基于 R 软件进行不同来源贡献率的计算,见式(1)—(4)。

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

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

$$C_{jk} \sim N(\lambda_{jk}, \tau_{jk}^2) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma_j^2) \quad (4)$$

式中：X_{ij} 为第 i 个样品中第 j 种同位素的比值，其中 $i=1$、2、3…N，$j=1$、2、3…J；p_k 为模型计算得到的第 k 个来源的贡献率；S_{jk} 为第 k 个来源的第 j 种同位素特征值，其中 $k=1$、2、3…K；μ_{jk} 为平均值；ω_{jk}^2 为正态分布的方差；C_{jk} 为第 k 个来源的第 j 种同位素的分馏系数；λ_{jk} 为平均值；τ_{jk}^2 为正态分布的方差；ε_{ij} 为第 i 个样品中第 j 种同位素比值的残余误差，用于表征不同单个混合物之间不能确定的变量；0 为平均值；σ_j^2 为正态分布的方差。

2　结果与分析

2.1　水质筛查结果

选择有代表性的易引起健康疾病风险的水质指标砷、氟化物、硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮等进行检测，结果见表 1。由表 1 可知，重金属、氟化物等均在《标准》限值内，研究区饮用水源中威胁生命健康的主要污染物为硝酸盐（0.09 mg/L ~ 16.4 mg/L），3 号样品中 NO_3^- 测定结果超过了《标准》中规定的硝酸盐（以 N 计）10 mg/L 限值，可能对流域内居民的身体健康产生风险。

2.2　水化学特征及影响因子

利用 Piper 三线图分析研究区水文地球化学机制，见图 2。由图 2 可见，大部分阳离子分布在 Ca^{2+} 区，大部分阴离子样品集中在 HCO_3^- 区。地表水水化学类型为 HCO_3-Ca·Na、HCO_3·NO_3-Ca·Mg、HCO_3-Ca·Mg；地下水化学类型为 HCO_3-NO_3·Ca、HCO_3·NO_3-Ca·Mg、HCO_3-Ca·Na·Mg；温泉水（地热水）为 HCO_3·SO_4-Na。

2.3　水体氢氧同位素特征

各水样测定结果见表 2。地表水、地下水、温泉水的 $\delta^{18}O$-H_2O 平均值分别为 −7.97‰、−7.22‰、−7.33‰；δD-H_2O 平均值分别为 −55.5‰、−51.4‰、−52.1‰；各监测点水体氢氧同位素均接近全球大气降水线，表明水体主要来源于大气降水；温泉水、地下水、河水 $\delta^{18}O$-H_2O 值与 δD-H_2O 值均在区域降水线下方，表明水体在循环过程中受到了蒸发分馏作用的影响。

2.4　硝酸盐来源解析

前人总结了最常见几种硝酸盐来源的范围[31-32]，大气沉降硝酸盐 $\delta^{15}N$ 范围为 −13‰ ~ 13‰，土壤有机氮形成硝酸盐 $\delta^{15}N$ 范围为 −3‰ ~ 9‰，来自合成化肥的 $\delta^{15}N$ 范围为 −4‰ ~ 4‰，来自污水或者粪便产生硝酸盐的 $\delta^{15}N$ 范围为 7‰ ~ 25‰；铵态氮肥、土壤铵态氮、动物粪便等的 $\delta^{18}O$ 值为 −15‰ ~ 15‰；人工合成的化肥硝酸盐 $\delta^{18}O$ 为 18‰ ~ 20‰。地表水、地下水、温泉水的 $\delta^{15}N$-NO_3 平均值分别为 4.92‰、2.05‰、−4.79‰，$\delta^{18}O$-NO_3 平均值分别为 0.25‰、−0.81‰、−2.6‰。研究区水体 $\delta^{15}N$-NO_3 与 $\delta^{18}O$-NO_3 主要分布在无机化肥端元区，这表明水体硝酸盐主要来源于农业生产施肥活动，同时采样点 4 落在牲畜粪便端元区，说明也受牲畜粪便的影响。

表 1　研究区水质监测结果　　mg/L

Table 1　Test results of water quality in the study area　　mg/L

指标	样品编号 1	2	3	4	5	6	7	8
硝酸盐	0.09	3.01	16.4	1.62	0.77	0.24	2.68	1.57
氟化物	2.66	0.17	0.10	0.14	0.19	0.20	0.17	0.16
亚硝酸盐	0.004	0.004	0.005	0.005	0.007	0.002	0.004	0.008
氨氮	0.06	0.06	0.05	0.07	0.07	0.05	0.08	0.07
铬	0.001 3	0.000 6	0.005 0	0.000 8	0.000 6	0.000 8	0.000 5	0.000 8
锰	0.021 0	0.001 6	0.005 4	0.001 5	0.008 7	0.002 5	0.084 0	0.002 5
钴	0.000 2	—	0.000 2	—	—	—	0.000 8	—
镍	0.001 1	0.000 3	0.004 6	0.000 2	0.000 5	0.000 3	0.002 6	0.000 3
铜	0.004 8	0.002 1	0.001 5	0.000 7	0.000 7	0.001 1	0.000 7	0.001 1
砷	0.001 3	0.000 6	0.000 6	—	0.000 2	0.000 3	—	0.000 3
硒	0.000 2	—	—	—	—	—	—	—
钼	0.000 5	0.000 4	0.001 2	0.000 3	0.000 3	0.000 2	0.000 5	0.000 2
镉	—	—	—	—	—	—	—	—
锑	0.000 4	0.000 4	0.000 8	0.000 2	0.000 2	0.000 2	0.000 4	0.000 2
钨	—	—	—	—	—	—	—	—
铅	0.001 5	0.000 2	0.000 3	—	0.000 2	—	—	—

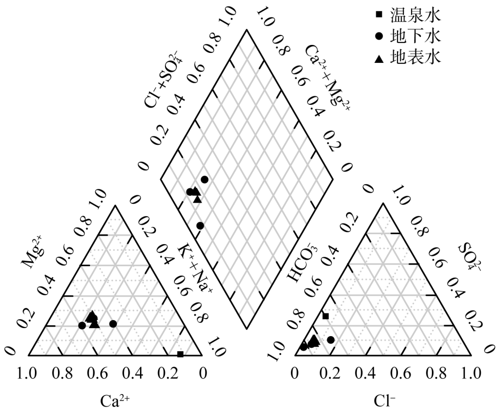

图 2　研究区水化学类型

Fig. 2　Hydrochemical type in the study area

2.5　硝酸盐迁移转化过程的识别

硝酸盐中的 $\delta^{15}N\text{-}NO_3$、$\delta^{18}O\text{-}NO_3$ 值在自然界迁移转化过程中，微生物反硝化作用会导致水体中硝酸盐氮同位素值随着硝酸盐浓度的增高呈指数增加，对硝酸盐氮氧同位素技术精准溯源具有较大的影响。因此，识别是否存在反硝化作用是用同位素方法识别硝酸盐来源的一个重要前提。Soto 等[33]的研究认为，由硝化作用生成的 NO_3^- 的 3 个氧原子中，2/3 的氧来源于周围水体，1/3 的氧来自溶解于水体的氧气。研究区水体的 $\delta^{18}O\text{-}H_2O$ 值在 −7.97‰ ~ −6.96‰ 之间，大气中 $\delta^{18}O\text{-}O_2$ 理论值为 23.5‰，结合公式计算得到的 $\delta^{18}O\text{-}NO_3$ 理论值为 2.52‰ ~ 3.19‰，采样点的 $\delta^{18}O\text{-}NO_3$ 值仅略小于理论值，全部 $\delta^{18}O\text{-}NO_3$ 值落在硝化作用产生的典型 $\delta^{18}O\text{-}NO_3$ 范围（−10‰ ~ 10‰）内，这表明地表水、地下水、温泉水中硝化作用对 NO_3^- 来源起主导作用。

2.6　SIAR 模型计算各污染源对 NO_3^- 的贡献率

将不同硝酸盐来源的同位素特征范围和分馏系数引入（SIAR）模型，定性分析结果表明研究区水体中并不存在明显的反硝化作用，故对研究区硝酸盐氮氧同位素反硝化分馏系数 C_{jk} 取值为 0，计算研究区各污染源对硝酸盐氮的贡献率（见表 3）。由表 3 可知，对整体流域而言，化肥对硝酸盐贡献百分比最大，占总量的 68.7%；其次是大气降水，百分比为 15.1%；畜禽粪便和污水的贡献百分比稍低，为 9.6%；土壤有机氮的贡献百分比最低，为 6.6%。除温泉点外，岳西潜水流域硝酸盐污染的主要来源为化肥。

表 2　3 种水样各项目的测定均值

Table 2　Mean values of each index of the three water samples

项目	地表水	地下水	温泉水
$\rho_{NO_3^-}$/(mg·L^{-1})	0.77	0.24	0.09
$\rho_{NO_2^-}$/(mg·L^{-1})	0.004	0.002	0.004
$\rho_{NH_4^+}$/(mg·L^{-1})	0.007	0.005	0.06
$\delta^{18}O\text{-}NO_3$/‰	−0.8	−2.47	−2.6
$\delta^{15}N\text{-}NO_3$/‰	2.55	−1.72	−4.79
$\delta^{18}O\text{-}H_2O$/‰	−7.97	−7.22	−7.33
$\delta D\text{-}H_2O$/‰	−55.5	−51.4	−52.1

表 3　硝酸盐氮各污染源贡献率　%

Table 3　Contribution rate of each source of nitrate pollution　%

样品编号	降水	土壤	粪肥	化肥
1	42.8	4.1	46.9	6.2
2	9.5	4.8	3.2	82.5
3	13.5	8.6	5.2	72.7
4	22.8	4.9	3.1	69.2
5	9.1	6.8	4.3	79.8
6	1.9	2.2	1.5	94.4
7	11.6	14.8	8.5	65.1
8	9.6	6.8	4.3	79.3
平均	15.1	6.6	9.6	68.7

3　结语

综上所述，硝酸盐含量分布规律为地下水 > 地表水 > 温泉水，且 2、3 号水样均采自农家井水，相隔几百米，硝酸盐浓度却相差 5 倍多。经现场调研，2、3 号水样所在沙河村刘屋组，地表水供水水源主要由横水水库出流和另一条河流入流共同组成。横水水库是一个小型水库，其集水区域种植有茶叶、水稻等农作物，农业种植时会施用大量的化肥，另一条河流集水区除农作物外，还建设有两个养猪场。研究区含水岩层为碳酸盐岩裂隙，部分学者认为丘陵裂隙溶岩中存在的裂隙、孔洞等为降水–地下水转换过程提供了优势通道，使降水能够以优势流方式快速下渗补给地下水，岩溶地下水与地表联系紧密，极易受地表污染物的污染，推测 3 号点位的水井可能位于裂隙、孔洞内，化肥、粪便等污染物随降水经快速通道直接下渗，导致其硝酸盐浓度远高于附近井水及地表水的硝酸盐浓度。

研究区个别点位硝酸盐超标，表明当前岳西县典型地区农村饮用水水源水质具有风险，其主要风险源为 NO_3^-。流域水体氮的迁移转化过程以硝化反应为主，基本不存在反硝化作用。SIAR 模型结

果显示造成地下水水质风险的 NO_3^- 主要来源于流域集水面积中的化肥，占 68.7%，其次是大气降水占 15.1%，畜禽粪便和污水占 9.6%，土壤有机氮占 6.6%。对化肥农药污染为主的山区饮用水，建议强化推广使用测土配方施肥，倡导施用缓释肥、有机肥，减少化肥、农药、除草剂的使用量。

［参考文献］

[1] 由栋阳. 农村饮用水安全问题及对策[J]. 乡村科技,2017(11):71-72.

[2] 司家济,高良敏,解志林,等. 焦岗湖水环境重金属分布及健康风险评价[J]. 环境监测管理与技术,2019,31(3):41-44.

[3] 拉巴次仁,布多,谭欣,等. 西藏尼洋河水环境重金属元素水平与风险评估[J]. 环境监测管理与技术,2017,29(4):33-36.

[4] 刘晓明. 峡山水库饮用水水源地安全风险分级管控探讨[J]. 山东水利,2023(8):53-55.

[5] 高娟,李贵宝,刘晓茹,等. 国内外生活饮用水水质标准的现状与比对[J]. 水利技术监督,2005(3):61-64.

[6] 孟春霞,郑西来,马振宇,等. 青岛市农村供水中硝酸盐氮污染状况及健康风险评价[J]. 水利水电技术,2014,45(9):24-26.

[7] 袁甜甜,高鹏. 饮用水硝酸盐与癌症死亡率相关性的仿真分析[J]. 计算机仿真,2019,36(6):242-245.

[8] 顾慰祖. 同位素水文学[M]. 北京:科学出版社,2011.

[9] WANG P,LIU J Z,QI S H,et al. Tracing sources of nitrate using water chemistry,land use and nitrogen isotopes in the Ganjiang River,China[J]. Isotopes in Environmental and Health Studies,2017,53(5):539-551.

[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.

[11] ZHANG M,ZHI Y,SHI J,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.

[12] 殷超,杨海全,陈敬安,等. 基于水化学和氮氧同位素的贵州草海丰水期水体硝酸盐来源辨析[J]. 湖泊科学,2020,32(4):989-998.

[13] 齐冉,徐菲菲,杨帆,等. 木沥河流域氮素污染及其污染源解析[J]. 环境科学,2020,41(7):3165-3174.

[14] 徐璐,蒋勇军,段世辉,等. 基于双同位素($\delta^{15}N$-NO_3^--$\delta^{18}O$-NO_3^-)和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪[J]. 环境科学,2020,41(8):3637-3645.

[15] CHEN X,JIANG C L,ZHENG L G,et al. Identification of nitrate sources and transformations in basin using dual isotopes and hydrochemistry combined with a Bayesian mixing model: application in a typical mining city[J]. Environmental Pollution,2020,267:115651.

[16] 凌郡鸿,张依章,曹英杰,等. 基于氮氧同位素的南四湖硝酸盐来源解析[J]. 中国环境科学,2023,43(6):3100-3106.

[17] 魏守才,刘京涛,夏江宝,等. 基于氮氧同位素示踪的滨州市水体硝酸盐污染来源解析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2021,57(1):29-35.

[18] 赵然,韩志伟,田永著,等. 岩溶流域地表水和地下水硝酸盐来源定量识别[J]. 中国环境科学,2020,40(4):1706-1714.

[19] 吴亚丽,亢晓琪,牛远,等. 基于氮氧同位素的深水湖泊硝酸盐来源辨析[J]. 中国农村水利水电,2022(4):106-113.

[20] 李智滔,肖红伟,伍作亭,等. 基于水化学及氮氧同位素技术的硝酸盐来源解析——以鄱阳湖湿地为例[J]. 中国环境科学,2022,42(9): 4315-4322.

[21] 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):1594-1601.

[22] 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来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.

[23] 裴东艳,谢磊,徐斌,等. 基于氮氧同位素技术的黄河上游清水河硝酸盐来源解析[J]. 中国环境科学,2022,42(9):4115-4121.

[24] CUI R Y, FU B, MAO K M, et al. Identification of the sources and fate of NO_3^--N in shallow groundwater around a plateau lake in southwest China using NO_3^- isotopes ($\delta^{15}N$ and $\delta^{18}O$) and a Bayesian model[J]. Journal of Environment Management,2020,270:110897.

[25] YIN C,YANG H Q,WANG J F,et al. Combined use of stable nitrogen and oxygen isotopes to constrain the nitrate sources in a karst lake[J]. Agriculture,Ecosystems and Environment,2020,303:107089.

[26] 盛婷. 基于氮氧同位素和 IsoSource 模型的农业区地下河硝酸盐来源研究[D]. 重庆:西南大学,2019.

[27] 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.

[28] 杨延梅,张田,郑明霞,等. 基于水化学及当地稳定同位素的地下水硝酸盐污染空间分布特征及污染源解析[J]. 环境科学研究,2021,34(9):2164-2172.

[29] 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.

[30] 国秋艳,张秋英,舒旺,等. 典型城市河流硝态氮污染来源的氮氧同位素解析[J]. 环境工程技术学报,2023,13(5):1820-1828.

[31] ZHANG Y, LI F D, ZHANG Q Y, et al. Tracing nitrate pollution sources and transformation in surface and ground-waters using environmental isotopes[J]. Science of the Total Environment,2014,490: 213-222.

[32] 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.

[33] SOTO D X,KOEHLER G,WASSENAAR L I,et al. Spatio-temporal variation of nitrate sources to Lake Winnipeg using N and O isotope($\delta^{15}N$,$\delta^{18}O$) analyses[J]. Science of the Total Environment,2019,647: 486-493.