

# 基于 IsoSource 的桂林寨底地下河硝酸盐来源定量研究

卢丽, 李文莉, 裴建国\*, 王喆

中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部/广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004

**摘要:** 近些年, 随着化肥和农药的广泛使用, 地下水中硝酸盐污染日益严峻。本文选择桂林寨底地下河系统为研究区, 对研究区进行地下水取样调查以及水化学和氮、氧同位素分析, 利用 IsoSource 软件对其硝酸盐来源进行定量计算, 为岩溶区地下水硝酸盐来源定量研究提供了一个新方法。结果表明, 寨底地下河硝酸盐主要以  $\text{NO}_3^-$  为主,  $\text{NO}_3^-$  浓度变化在 2.67~17.99 mg/L, 平均值为 6.3 mg/L, 研究区内硝酸盐来源共有三种, 分别为化肥、动物粪便与污水和土壤有机氮, 其中化肥的变化范围为 23%~78%, 动物粪便与污水为 6%~58%, 土壤有机氮为 6%~38%。沿地下水流动方向, 化肥和动物粪便与污水的比例均发生了明显变化, 与离居民区的距离密切相关, 距离远时化肥比例较大, 动物粪便与污水比例较小, 距离近时则相反。

**关键词:** 氮氧同位素; 地下河; 硝酸盐来源; IsoSource; 定量计算

中图分类号: P597.2; X523 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2014.02.18

## A Quantitative Study of the Sources of Nitrate of Zhaidi Underground River in Guilin Based on IsoSource

LU Li, LI Wen-li, PEI Jian-guo\*, WANG Zhe

*Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences,  
Karst Dynamics Laboratory of Ministry of Land and Resources & Guangxi, Guilin, Guangxi 541004*

**Abstract:** In recent years, with the extensive use of chemical fertilizers and pesticides, nitrate contamination in groundwater has become more and more serious with each passing day. Choosing the Zhaidi underground River of Guilin as a study area, the authors analyzed the nitrogen and oxygen isotopes and investigated hydrochemistry for groundwater. This study can provide a new method for quantitative study of groundwater sources of nitrate in the karst area. IsoSource software was used to calculate the sources of nitrate quantitatively. The results show that the nitrate is dominated by  $\text{NO}_3^-$ , the  $\text{NO}_3^-$  concentrations are in the range of 2.67~17.99 mg/L, 6.3 mg/L on average. The sources of nitrate in the study area are animal waste and sewage, fertilizer, and soil organic nitrogen, with fertilizer, animal waste and sewage, and soil organic matter possessing 23%~78%, 6%~58%, and 6%~38% respectively. In the direction of groundwater flow, the proportions of fertilizer and animal waste and sewage vary significantly, closely related to the distance from the residential area. The longer the distance, the larger the proportion of the fertilizer, and the smaller the proportion of the animal waste and sewage.

**Key words:** nitrogen and oxygen isotopes; underground river; sources of nitrate; IsoSource; quantitative calculation

本文由国家自然科学基金(编号: 400772164)、中国地质调查局地质调查项目(编号: 1212011121164)、国家环境保护公益性行业科研专项项目(编号: 2013A035)和中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(编号: 2012014; 201309)联合资助。

收稿日期: 2013-10-06; 改回日期: 2014-01-28。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 卢丽, 女, 1985年生。硕士, 助理研究员。主要从事岩溶地下水污染调查与评价研究。通讯地址: 541004, 桂林市七星路50号。E-mail: luli@karst.ac.cn。

\*通讯作者: 裴建国, 男, 1957年生。博士, 研究员。主要从事岩溶水文地质、岩溶环境地质研究。通讯地址: 541004, 桂林市七星路50号。E-mail: peijg@karst.ac.cn。

近年来,随着化肥和农药的广泛使用,地下水中硝酸盐污染日益严峻,其研究也备受国内外研究者的关注(王东升,1997;周爱国等,2001;任福弘等,2001;李思亮等,2005;张翠云等,2007;周迅等,2014)。在西南岩溶地区,由于其特殊的地表、地下二元结构体系,硝酸盐污染物可以通过落水洞、天窗等直接进入地下河系统,严重威胁当地群众用水安全。因此准确掌握硝酸盐污染来源是治理地下河硝酸盐污染、保护地下河水质安全的前提。目前国内外学者多采取同位素技术来识别地下水中的硝酸盐来源,早期是利用 N 同位素技术(Wilson et al., 1990; McMahon et al., 1996; 邢萌等, 2008), 但存在众多缺陷,如不同污染源的  $\delta^{15}\text{N}$  值存在重叠、反硝化作用引起的同位素分馏等。因此目前多采用  $\delta^{15}\text{N}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  相结合的方法来确定其污染来源(李思亮等, 2006; 周迅等, 2007; 刘君等, 2009; 贾小妨等, 2009; 王松等, 2010; 裴建国, 2012)。虽然国内外应用同位素技术对硝酸盐来源进行了大量的研究工作,但多数处于定性研究阶段,即利用不同硝酸盐来源的  $\delta^{15}\text{N}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  经典分布图进行定性评价。少数国外学者进行了定量研究(Deutsch et al., 2006),但仅限于非岩溶区,岩溶地区尚未涉及。因此,本文利用 IsoSource 软件对桂林寨底地下河硝酸盐来源进行定量计算,为岩溶区地下水硝酸盐来源定量研究提供一个新方法,同时也为西南地下河水质保护提供科学依据。

寨底地下河位于桂林市东侧,距市区 31 km,面积约为 32 km<sup>2</sup>。地下河系统处于潮田—海洋向斜的东翼,区内发育多条 NE—SW 走向断层。出露地层依次为下泥盆统莲花山组石英砂岩(D<sub>1</sub>l)、中泥盆统信都组砂岩(D<sub>2</sub>x)、中泥盆统塘家湾组灰岩、白云岩(D<sub>2</sub>t)、中泥盆统东岗岭组泥质灰岩(D<sub>2</sub>d)、上泥盆统巴漆组灰岩夹硅质岩(D<sub>3</sub>b)、上泥盆统桂林组灰岩、白云质灰岩(D<sub>3</sub>g)、上泥盆统东村组灰岩(D<sub>3</sub>d)、上泥盆统额头村组灰岩、白云质灰岩(D<sub>3</sub>e)、上泥盆统融县组粒屑灰岩(D<sub>3</sub>r)、上泥盆统榴江组硅质岩(D<sub>3</sub>l)、上泥盆统五指山组灰岩夹钙质泥岩(D<sub>3</sub>w)、下石炭统尧云岭组灰岩、含泥质灰岩(C<sub>1</sub>y)、下石炭统鹿寨组页岩、板岩夹灰岩(C<sub>1</sub>l)、第四系(Q)。地下河系统东、西部为隔水边界,北部为地下分水岭,南部为地下河集中排泄边界。系统内以峰丛洼地地貌为主,碳酸盐广泛分布,系统内岩溶发育强烈,地下河、落水洞、天窗等分布众多,地下水具有多级排泄和多次循环的特点。大气降雨经大小洼地汇集,通过落水洞、地下河入口等点状入渗补给岩溶含水系统,地下水从北向南流动,在寨底总出口处集中

排泄(图 1)。研究区地下水水化学常量组分以 Ca<sup>+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>为主, Mg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>次之。按舒卡列夫分类,其水化学类型以 HCO<sub>3</sub>-Ca 为主,矿化度小于 300 mg/L,属于低矿化度水。

## 1 样品采集与测试

### 1.1 采样点设置

根据研究区内地下河管道及水点分布情况,选择 G006、G011、G015、G016、G026、G027、G029、G030、G032、G037、G047、G054、G070、G071 为取样点,取样点详细位置见图 1。2012 年 6 月对研究区进行污染源调查,同时对取样点进行氮氧同位素水样、硝酸根、亚硝酸根和氨根水样的采集。

### 1.2 取样方法及预处理

用 600 mL 高密度聚乙烯塑料瓶取水样 1 瓶,密封、冷藏送实验室做 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>测试。用 10 L 高密度聚乙烯塑料桶取氮氧同位素水样,水样均充满瓶口,密封、冷藏运回实验室进行同位素样品预处理,然后送至国家海洋局第三研究所进行测试。而 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>测试则由中国地质科学院岩溶地质研究所完成。

本次研究采用阴离子交换树脂法对样品进行预处理(肖化云等, 2001; 周爱国等, 2003)。用 0.45 μm 聚碳酸酯膜滤纸对同位素水样进行过滤,去掉水中的颗粒物杂质,然后将过滤后的水样通过装有阴离子树脂的交换吸附装置,流速控制在 10 mL/min。用 15 mL 的 3 mol/L 盐酸,分 5 次将树脂吸附的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的洗脱于 50 mL 烧杯中。把盛有洗脱液的烧杯放在冷水浴上,每次向洗脱液中加入 1 g Ag<sub>2</sub>O,总共加入 6 g,用玻璃棒充分搅拌,使混合液的 pH 值在 5.5~6 之间。用 0.45 μm 聚碳酸酯膜除掉 AgCl 沉淀,把滤液收集在 50 mL 的比色管中,然后用去离子水冲洗过滤器使滤液总体积达到 40 mL。为了测定  $\delta^{15}\text{N}$  和  $\delta^{18}\text{O}$ ,将其分成两份分别装在两个 30 mL 的试剂瓶中,对于  $\delta^{15}\text{N}$  的测定,只需对其中一份进行冷冻干燥,得到 AgNO<sub>3</sub> 固体即可。而对于  $\delta^{18}\text{O}$  的测定,需将另一份滤液过阳离子树脂,除掉过多阳离子,同时如果水样中的溶解性有机碳重量含 20%以上或者 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量大于 10 mg/L 时,应采取相应的方法将滤液中溶解性的有机碳和含氧成分除掉(杨琰等, 2005),并用少量 Ag<sub>2</sub>O 进行中和,确保 pH 值为 6。

将硝酸银样品通过高温燃烧方法将其转化为 N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 用于测试  $\delta^{15}\text{N}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的气体,然后通过气体稳定同位素质谱仪(MAT253)完成测试,精确度为 0.1‰。

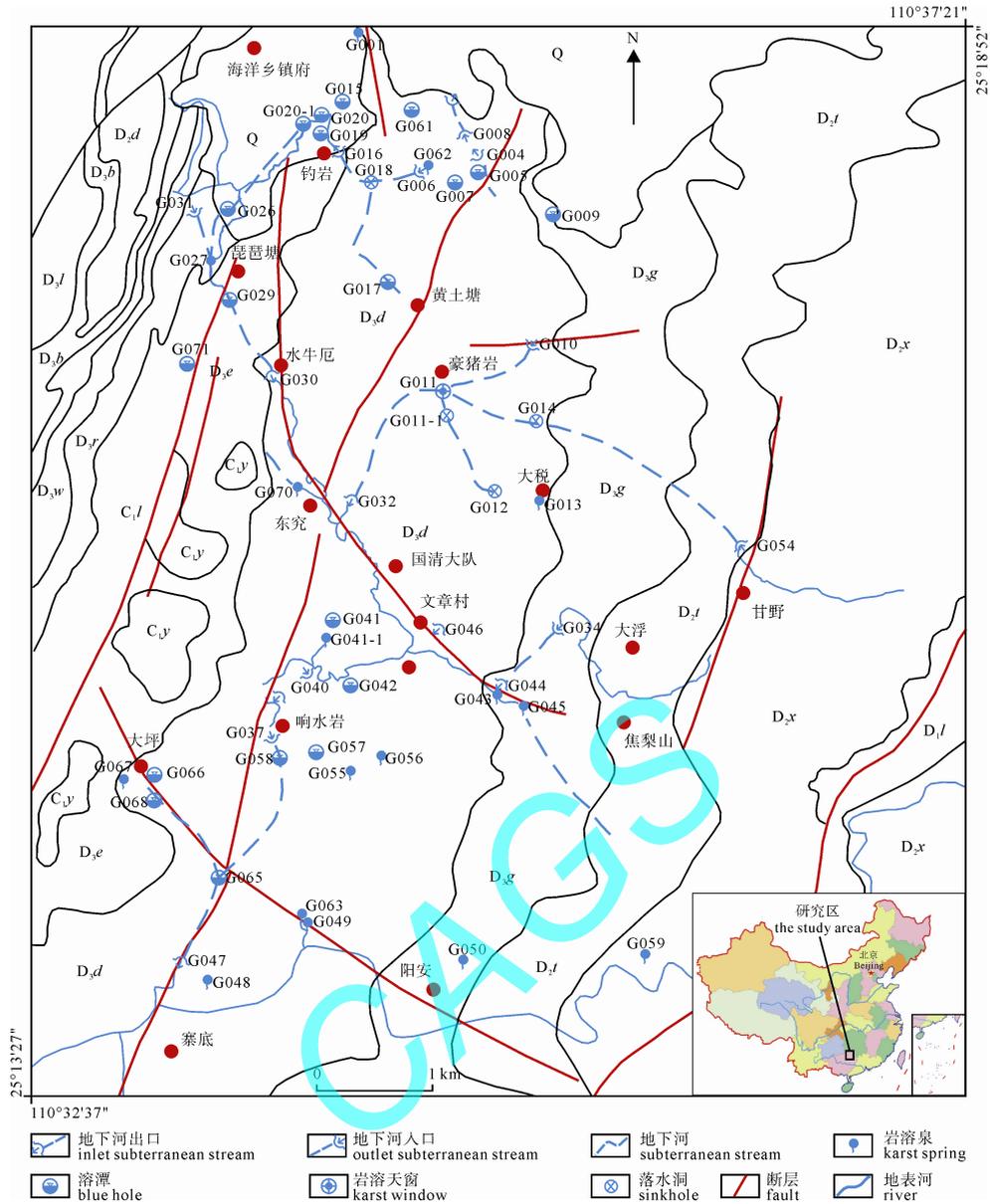


图 1 研究区水文地质简图

Fig. 1 Hydrogeological map of the study area

D<sub>1</sub>l-下泥盆统莲花山组; D<sub>2</sub>x-中泥盆统信都组; D<sub>2</sub>t-中泥盆统塘家湾组; D<sub>2</sub>d-中泥盆统东岗岭组; D<sub>3</sub>b-上泥盆统巴漆组;

D<sub>3</sub>g-上泥盆统桂林组; D<sub>3</sub>d-上泥盆统东村组; D<sub>3</sub>e-上泥盆统额头村组; D<sub>3</sub>r-上泥盆统融县组; D<sub>3</sub>l-上泥盆统榴江组;

D<sub>3</sub>w-上泥盆统五指山组; C<sub>1</sub>y-下石炭统尧云岭组; C<sub>1</sub>l-下石炭统鹿寨组; Q-第四系

D<sub>1</sub>l-Lower Carboniferous Lianhuashan Formation; D<sub>2</sub>x-Middle Carboniferous Xindu Formation; D<sub>2</sub>t-Middle Carboniferous Tangjiawan Formation; D<sub>2</sub>d- Middle Carboniferous Donggangling Formation; D<sub>3</sub>b-Upper Carboniferous Baqi Formation; D<sub>3</sub>g-Upper Carboniferous Guilin Formation; D<sub>3</sub>d-Upper Carboniferous Dongcun Formation; D<sub>3</sub>e-Upper Carboniferous Etoucun Formation; D<sub>3</sub>r-Upper Carboniferous Rongxian Formation; D<sub>3</sub>l-Upper Carboniferous Liujiang Formation; D<sub>3</sub>w-Upper Carboniferous Wuzhishan Formation; C<sub>1</sub>y-Lower Carboniferous Yaoyunling Formation; C<sub>1</sub>l-Lower Carboniferous Luzhai Formation; Q-Quaternary

## 2 IsoSource 软件及理论

目前 IsoSource 软件多应用于食物网、植物水分等方面的研究(商栩等, 2009; 朱林等, 2012; 姜启吴等, 2012), 用于地下水硝酸盐来源研究尚属首次。IsoSource 软件以多源线性混合模型(质量守恒模型)为基础, 用于估算各种硝酸盐来源对地下水硝酸盐污染的贡献率。其原理是将地下水与待定硝酸盐来源(假设为三种来源)中的氮、氧同位素数值

输入, 构建质量守恒模型, 如下式所示:

$$\begin{aligned} \overline{\delta}_M &= f_A \overline{\delta}_A + f_B \overline{\delta}_B + f_C \overline{\delta}_C \\ \overline{\lambda}_M &= f_A \overline{\lambda}_A + f_B \overline{\lambda}_B + f_C \overline{\lambda}_C \\ 1 &= f_A + f_B + f_C \end{aligned}$$

式中:  $f_A$ 、 $f_B$ 、 $f_C$  为不同硝酸盐来源所占比例,  $\overline{\delta}_A$ 、 $\overline{\delta}_B$ 、 $\overline{\delta}_C$  为不同来源氮同位素数值,  $\overline{\lambda}_A$ 、 $\overline{\lambda}_B$ 、 $\overline{\lambda}_C$  为不同来源氧同位素数值,  $\overline{\delta}_M$ 、 $\overline{\lambda}_M$  为某点水样中氮、氧同位素数值。

然后设置模型的容差参数和增量参数, 利用迭代方法计算出水样中不同来源所占百分比的概率分布图(Phillips et al., 2002, 2005)。不同来源所有可能的百分比组合(和为 100%)则按下式计算(Phillips et al., 2003):

$$\text{组合数量} = \binom{(100/i) + (s-1)}{s-1} = \frac{[(100/i) + (s-1)]!}{(100/i)!(s-1)!}$$

式中:  $i$  为增量参数,  $s$  为硝酸盐来源数量。

这一模型可以检验每种来源潜在贡献的所有可能组合, 当不同来源的氮、氧同位素加权平均值与待测水样中的氮、氧同位素值相差小于 0.1‰时, 才认为是可能的解。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 结果

测试结果如表 1 所示。从表 1 可以看出, 寨底地下河中  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_2^-$  浓度大都处于检测线之下, 这说明寨底地下河硝酸盐主要以  $\text{NO}_3^-$  为主, 与  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_2^-$  相关性较小。 $\text{NO}_3^-$  浓度变化在 2.67~17.99 mg/L, 平均值为 6.3 mg/L, 高值区域主要集中在研究区的北部, 这与北部地区人员密集, 农业、生活污染较为严重有关, 沿地下水流动方向,  $\text{NO}_3^-$  浓度由北向南呈逐渐降低趋势。其  $\delta^{15}\text{N}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值分别为 4.79‰~15.65‰和 9.25‰~19.36‰,  $\delta^{15}\text{N}$  值在北部和南部地区较小, 而在中部地区  $\delta^{15}\text{N}$  值较大, 对于  $\delta^{18}\text{O}$ , 除 G071 点外,  $\delta^{18}\text{O}$  值变化相对较小。

虽然表 1 中  $\text{NO}_3^-$  尚未达到三类水标准 ( $\geq 20$  mg/L), 但有些水点  $\text{NO}_3^-$  浓度与三类水较为接近, 根据寨底地下河常年水化学数据, 其部分地区已超过三类水标准, 局部达到 85.00 mg/L, 因此需对  $\text{NO}_3^-$  来源进行分析, 防止污染范围扩大。

#### 3.2 讨论

不同来源的  $\text{NO}_3^-$  具有不同的氮、氧同位素比值特征( $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ ), 目前多数学者利用此规律来识别  $\text{NO}_3^-$  污染来源, 进行定性分析。大量研究报告和文献表明, 不同  $\text{NO}_3^-$  来源中的  $\delta^{15}\text{N}$  值和  $\delta^{18}\text{O}$  值有如下规律: 土壤有机氮产生的硝酸盐中  $\delta^{15}\text{N}$  值为 4‰~9‰(邓林等, 2007), 无机化肥产生的硝酸盐中  $\delta^{15}\text{N}$  值为 -4‰~4‰(朱琳等, 2003), 粪便或含粪便的污水源为 9‰~20‰(袁机娟等, 2010), 合成肥料的  $\delta^{15}\text{N}$  值为 -2‰~4‰。不同硝酸盐来源中的氧同位素组成也存在较大的差异, 来源于大气沉降硝酸盐的  $\delta^{18}\text{O}$  值范围为 20‰~70‰(庞凤梅等, 2011), 化肥中的硝酸盐的  $\delta^{18}\text{O}$  值一般在  $22\text{‰} \pm 3\text{‰}$ , 而微生物硝化作用形成的  $\text{NO}_3^-$  的  $\delta^{18}\text{O}$  值为 -10‰~10‰。常见的不同硝酸盐来源的 N、O 同位素典型特征值如图 2 所示。

氮是一种易分馏的元素, 因此在水土环境中, 存在众多影响氮同位素组成的因素, 而反硝化作用则是重要的影响因素之一。反硝化作用是  $\text{NO}_3^-$  水污染中常见的化学反应, 其使得地下水中的  $\text{NO}_3^-$  浓度减少,  $\delta^{15}\text{N}$  值增加, 改变了硝酸盐来源同位素的初始组成, 因此, 识别反硝化作用是研究硝酸盐污染源的重要前提。

水样中的  $\delta^{15}\text{N}$  和  $\text{NO}_3^-$  浓度关系如图 3 所示, 从图 3 中可以看出, 随着  $\delta^{15}\text{N}$  值逐渐增加,  $\text{NO}_3^-$  浓度值并没有随之降低或者升高, 相关性较差, 同时从图 2 中也可以看出,  $\delta^{15}\text{N}/\delta^{18}\text{O}$  比值不等于 2:1。因此, 从这两方面可以得出, 研究区内没有或者很少发生反硝化作用, 氮、氧同位素测试结果可用, 无需校正。

从图 2 中可以看出, 在 14 个水样测试数据点

表 1 寨底地下河水样测试结果  
Table 1 Analytical results of water samples from the Zhaidi underground river

采样点	取样点位置	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\text{NH}_4^+/\text{mg/L}$	$\text{NO}_3^-/\text{mg/L}$	$\text{NO}_2^-/\text{mg/L}$
G006	邓塘	8.24	19.36	<0.02	3.56	0.003
G011	豪猪岩	10.02	18.72	0.04	6.70	<0.002
G015	钓岩	5.28	16.79	0.03	16.99	0.660
G016	钓岩	4.79	16.29	<0.02	8.62	0.004
G026	塘子厄	11.75	16.14	0.03	12.67	<0.002
G027	琵琶塘	10.21	15.02	<0.02	14.65	0.640
G029	琵琶塘	15.65	19.30	<0.02	14.55	0.004
G030	水牛厄	13.85	15.23	0.03	12.91	0.003
G032	东究	10.56	18.76	0.03	6.07	<0.002
G037	响水岩	14.52	16.50	<0.02	7.95	<0.002
G047	寨底	8.98	18.20	<0.02	8.25	<0.002
G054	甘野	4.97	19.25	<0.02	2.67	0.005
G070	东究	4.58	18.01	<0.02	5.62	0.018
G071	江尾村东	8.44	9.25	<0.02	17.99	0.008

中,有6个点落在化肥区域内,剩下8个数据点没有落到任何区域内,但这些点离化肥、动物粪便与污水和土壤有机氮三个区域最近,结合污染源调查情况,其很可能是三种来源组合构成。综上所述,将研究区的硝酸盐污染源分为三种:化肥、动物粪便与污水和土壤有机氮。利用 IsoSource 软件,计算出研究区内取样点硝酸盐来源的定量结果(表2)。

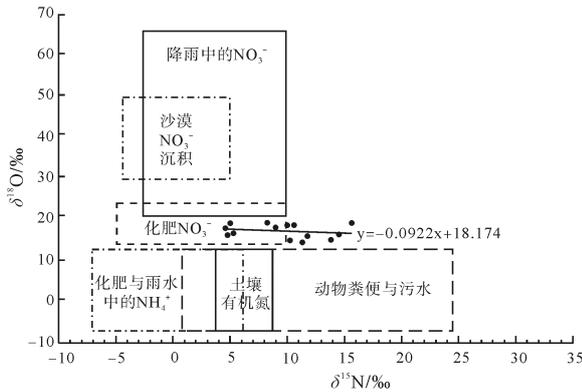


图2 不同  $\text{NO}_3^-$  来源的  $\delta^{15}\text{N}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的典型值  
Fig. 2 Ranges of  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values of nitrate from different sources

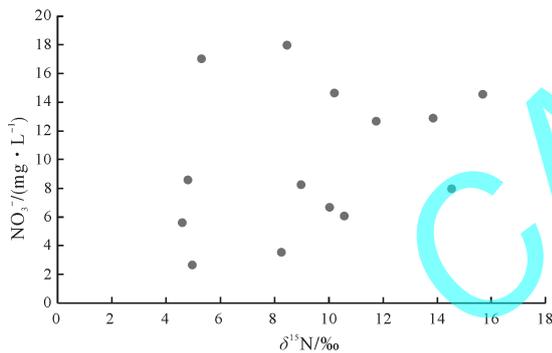


图3  $\delta^{15}\text{N}$  和  $\text{NO}_3^-$  含量的关系  
Fig. 3 Relationship between  $\delta^{15}\text{N}$  value and  $\text{NO}_3^-$  concentration

从表2中可以看出,以化肥来源为主的区域分布较为分散,在研究区的北部(钧岩)、中部(东究)和南部(寨底)均有分布,变化范围为23%~78%,平均值为49.43%,而以动物粪便与污水来源为主的区域,则集中分布在塘子厄(G026)至水牛厄(G030)段,变化范围为6%~58%,平均值为34.36%,土壤有机氮则在研究区内的比例相对较低,变化范围为6%~38%,平均值为15.38%。

上述分布规律与研究区的实际情况密切相关。研究区北部(钧岩)为峰丛谷地地区,地势平坦,有大面积农田分布,化肥用量较大,离居民区相对较远,因此化肥比例较高,最大值为66%;而塘子厄(G026)至水牛厄(G030)段,居民区较多,人口较为密集,有多个养鸭、养鸡场,人畜粪便和生活污水随意排放,导致此段的主要来源为动物粪便与污水,最大值为58%。

研究区内主要有四段地下河,分别为G006—G015、G026—G030、G054—G032、G037—G047。沿地下水流动方向,4段地下河硝酸盐来源比例的变化规律如下:①地下河  $\text{NO}_3^-$  来源多以化肥和动物粪便与污水为主,而土壤有机氮比例则相对较低;②沿地下水流动方向,化肥和动物粪便与污水两种来源的比例均发生了明显变化,且与离居民区的距离密切相关,距离远时化肥比例较大,动物粪便与污水比例较小,距离近时则相反。

#### 4 结论

1)寨底地下河硝酸盐来源为化肥、动物粪便与污水和土壤有机氮三种,其中化肥的变化范围为23%~78%,动物粪便与污水的变化范围为6%~58%,土壤有机氮的变化范围为6%~38%。以化肥来源为

表2 研究区硝酸盐污染源定量计算结果

Table 2 Quantitative results of the sources of nitrate contamination in the study area

样品号	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	化肥/%	动物粪便与污水/%	土壤有机氮/%
G006	8.24	19.36	52	39	9
G011	10.02	18.72	41	45	14
G015	5.28	16.79	56	6	38
G016	4.79	16.29	66	8	26
G026	11.75	16.14	43	51	6
G027	10.21	15.02	33	35	32
G029	15.65	19.30	41	51	8
G030	13.85	15.23	32	58	10
G032	10.56	18.76	55	33	12
G037	14.52	16.50	36	52	12
G047	8.98	18.20	61	32	7
G054	4.97	19.25	78	11	11
G070	4.58	18.01	75	10	15
G071	11.38	14.45	23	50	27
平均值	9.63	17.29	49.43	34.36	15.38

主的区域在研究区内均有分布, 以动物粪便与污水来源为主的区域集中在塘子厄(G026)至水牛厄(G030)段, 而土壤有机氮来源在研究区内含量普遍偏低。

2)研究区内4段地下河 $\text{NO}_3^-$ 来源多以化肥和动物粪便与污水为主, 沿地下水流动方向, 两种来源的比例均发生了明显变化, 且与离居民区的距离密切相关, 距离远时化肥比例较大, 动物粪便与污水比例较小, 距离近时则相反。

## 参考文献:

邓林, 曹玉清, 王文科. 2007. 地下水 $\text{NO}_3^-$ 氮与氧同位素研究进展[J]. 地球科学进展, 22(7): 716-724.

贾小妨, 李玉中, 徐春英, 李巧珍. 2009. 氮、氧同位素与地下水中硝酸盐溯源研究进展[J]. 中国农学通报, 25(14): 233-239.

姜启昊, 欧志吉, 左平. 2012. 盐沼植被对江苏盐城湿地生态系统有机质贡献的初步研究[J]. 海洋通报, 31(5): 547-551.

李思亮, 刘丛强, 肖化云, 陶发祥, 郎赞超, 韩贵琳. 2005.  $\delta^{15}\text{N}$ 在贵阳地下水氮污染来源和转化过程中的辨识应用[J]. 地球化学, 34(3): 257-262.

李思亮, 刘丛强. 2006. 贵阳地下水硝酸盐氧同位素特征及应用[J]. 地球科学, 25(2): 108-111.

刘君, 陈宗宇. 2009. 利用稳定同位素追踪石家庄市地下水中的硝酸盐来源[J]. 环境科学, 30(6): 1602-1607.

庞凤梅, 吴文良, 孟凡乔, 郭岩彬. 2011. 利用氮、氧稳定同位素识别地下水硝酸盐污染源研究进展[J]. 农业资源与环境学报, (4): 64-69.

裴建国. 2012. 寨底地下河系统水质演化趋势及碳汇通量分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京).

任福弘, 孙继朝, 张胜, 贾秀梅, 张翠云, 叶思源. 2001. 包气带土体生物地球化学特征与氮转化研究——以河北平原正定试验场剖面为例[J]. 地球学报, 22(4): 324-329.

商栩, 管卫兵, 张国森, 张经. 2009. 互花米草入侵对河口盐沼湿地食物网的影响[J]. 海洋学报, 31(1): 132-142.

王东升. 1997. 氮同位素比( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ )在地下水氮污染研究中的应用基础[J]. 地球学报, 18(2): 220-223.

王松, 裴建国, 梁建宏. 2010. 利用氮氧同位素研究桂林寨底地下河硝酸盐来源[J]. 地质灾害与环境保护, 21(4): 54-56.

肖化云, 刘丛强. 2001. 水样氮同位素分析预处理方法的研究现状与进展[J]. 岩矿测试, 20(2): 125-130.

邢萌, 刘卫国. 2008. 西安泾河、灞河硝酸盐氮同位素特征及污染源示踪探讨[J]. 地球学报, 29(6): 783-789.

杨琰, 蔡鹤生, 刘存富, 周爱国. 2005. 地下水中 $\text{NO}_3^-$ 的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素测试新技术-密封石英管燃烧法[J]. 水文地质工程地质, (2): 20-24.

袁利娟, 庞忠和. 2010. 地下水硝酸盐污染的同位素研究进展[J]. 水文地质工程地质, 37(2): 108-115.

张翠云, 马琳娜, 张胜, 李政红, 殷密英, 臧逸中. 2007. Visual Modflow 在石家庄市地下水硝酸盐污染模拟中的应用[J]. 地球学报, 28(6): 561-566.

周爱国, 蔡鹤生, 刘存富. 2001. 硝酸盐中 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的测试新

技术及其在地下水氮污染防治研究中的进展[J]. 地质科技情报, 20(4): 94-98.

周爱国, 陈银琢, 蔡鹤生, 刘存富, 杨琰. 2003. 水环境硝酸盐氮污染研究新方法—— $^{15}\text{N}$ 和 $^{18}\text{O}$ 相关法[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 28(2): 219-224.

周迅, 姜月华. 2007. 氮、氧同位素在地下水硝酸盐污染研究中的应用[J]. 地球学报, 28(4): 389-395.

周迅, 朱春芳. 2014. 福建省晋江市浅层地下水硝酸盐含量特征及其水化学指示意义[J]. 地球学报, 35(2): 177-182.

朱林, 许兴, 赵小红, 唐建宁. 2012. 基于 $^{18}\text{O}$ 稳定同位素对银川平原北部4种灌木夏季水分利用特征研究[J]. 西北林学院学报, 27(4): 24-30.

朱琳, 苏小四. 2003. 地下水硝酸盐中氮、氧同位素研究现状及展望[J]. 世界地质, 22(4): 396-403.

## References:

DENG Lin, CAO Yu-qing, WANG Wen-ke. 2007. An Overview of the Shady on Nitrogen and Oxygen Isotopes of Nitrate in Groundwater[J]. Advances in Earth Science, 22(7):716-724(in Chinese with English abstract).

DEUTSCH B, MELANIE M, IRIS L, MAREN V. 2006. Quantification of diffuse nitrate inputs into a small river system using stable isotopes of oxygen and nitrogen in nitrate[J]. Organic Geochemistry, 37(10): 1333-1342.

JIA Xiao-fang, Li Yu-zhong, Xu Chun-ying, Li Qiao-zhen. 2009. Research Advances in N, O Isotope and Sources of Nitrate in Groundwater[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 25(14): 233-239(in Chinese with English abstract).

JINAG Qi-wu, OU Zhi-ji, ZUO Ping. 2012. Primary study on the organic matter contribution of salt marsh vegetation to coastal wetland ecosystem in Yancheng Jiangsu[J]. Marine Science Bulletin, 31(5): 547-551(in Chinese with English abstract).

LI Si-liang, LIU Cong-qiang, XIAO Hua-yun, TAO Fa-xiang, LANG Yun-chao, HAN Gui-lin. 2005. Using  $\delta^{15}\text{N}$  to assess groundwater nitrogen pollution in Guiyang[J]. Geochimica, 34(3): 257-262(in Chinese with English abstract).

LI Si-liang, LIU Cong-qiang. 2006. The Character and Application of  $\delta^{18}\text{O}$ - $\text{NO}_3^-$  in the Groundwater of Guiyang[J]. Carsologica Sinica, 25(2): 108-111(in Chinese with English abstract).

LIU Jun, CHEN Zong-yu. 2009. Using stable isotope to trace the sources of nitrate in groundwater in Shijiazhuang[J]. Environmental Science, 30(6): 1602-1607(in Chinese with English abstract).

MCCAHON P B, BOEHLKE J K. 1996. Denitrification and mixing in a stream-aquifersystem: effects on nitrate loading to surface water[J]. Journal of Hydrol, 186: 105-128.

PANG Feng-mei, WU Wen-liang, MENG Fan-qiao, GUO Yan-bin. 2011. Identification of Nitrate Source in Groundwater Using Dual Isotope( $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ ) methods[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, (4): 64-69(in Chinese with English abstract).

PEI Jian-guo. 2012. The analysis of water quality trends and carbon sinks flux in Zhaidi underground river systems[D]. Bei-

- jing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).
- PHILLIPS D L, GREGG J W. 2003. Source partitioning using stable isotopes: Coping with too many sources[J]. *Oecologia*, 136: 261-269.
- PHILLIPS D L, KOCH P L. 2002. Incorporating concentration dependence in stable isotope mixing models[J]. *Oecologia*, 130: 114-125.
- PHILLIPS D L, NEWSOME S D, GREGG J W. 2005. Combining sources in stable isotope mixing models: alternative methods[J]. *Oecologia*, 144: 520-527.
- REN Fu-hong, SUN Ji-chao, ZHANG Sheng, JIA Xiu-mei, ZHANG Cui-yun, YE Si-yuan. 2001. A Study of Biogeochemistry and Nitrogen Transform in the Unsaturated Soil Zone[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 22(4): 324-329(in Chinese with English abstract).
- SHANG Xu, GUAN Wei-bing, ZHANG Guo-sen, ZHANG Jing. 2009. The impact of invasion of *Spartina alterniflora* on the food webs of estuarine salt marshes[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 31(1): 132-142(in Chinese with English abstract).
- WANG Dong-sheng. 1997. Basis for the use of nitrogen isotopes to identify nitrogen contamination of groundwater[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(2): 220-223(in Chinese with English abstract).
- WANG Song, PEI Jian-guo, LIANG Jian-guo. 2010. Using nitrogen and oxygen isotope techniques to identify the sources of nitrate in subterranean stream of Zhaidi, Guilin[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 21(4): 54-56(in Chinese with English abstract).
- WILSON G B, ANDREW J N, BATH A H. 1990. Dissolved gas evidence for denitrification in the Lincolnshire limestone groundwater, eastern England[J]. *Journal of Hydrology*, 113: 51-60.
- XIAO Hua-yun, LIU Cong-qiang. 2001. Present Situation and Development of Water Sample Preparation Methods for  $^{15}\text{N}$  Analysis[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 20(2): 125-130(in Chinese with English abstract).
- XING Meng, LIU Wei-guo. 2008. Nitrogen Isotopic Characteristics of Nitrate and Contamination Source Tracing of the Chanhe River and the Bahe River in Xi'an[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 29(6): 783-789(in Chinese with English abstract).
- YANG Yan, CAI He-sheng, LIU Cun-fu, ZHOU Ai-guo. 2005. A new analytical technique for detecting isotopes  $^{15}\text{N}$  and  $^{18}\text{O}$  in  $\text{NO}_3^-$  of groundwater: Sealed combustion quartz tube method[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, (2): 20-24(in Chinese with English abstract).
- YUAN Li-juan, PANG Zhong-he. 2010. Research on Isotopes in Groundwater Nitrate Pollution: A review[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 37(2): 108-113(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Cui-yun, MA Lin-na, ZHANG Sheng, LI Zheng-hong, YIN Mi-ying, ZANG Yi-zhong. 2007. The Application of VisualModflow to the Simulation of Groundwater Nitrate Contamination in Shijiazhuang[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 28(6): 561-566(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Ai-guo, CAI He-sheng, LIU Cun-fu. 2001. A new analytical technique of isotope  $^{15}\text{N}$  and  $^{18}\text{O}$  in  $\text{NO}_3^-$  and the development in N contaminative study of groundwater[J]. *Geological Science and Technology Information*, 20(4): 94-98(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Ai-guo, CHEN Yin-zhuo, CAI He-sheng, LIU Cun-fu, YANG Yan. 2003. New Way in  $\text{NO}_3^-$ -N Contamination Study of Water Environment: Correlative Method of  $^{15}\text{N}$  &  $^{18}\text{O}$ [J]. *Earth Science(Journal of China University of Geosciences)*, 28(2): 219-224(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Xun, JIANG Yue-hua. 2007. Application of Nitrogen and Oxygen Isotopes to the Study of Groundwater Nitrate Contamination[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 28(4): 389-395(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Xun, ZHU Chun-fang. 2014. The Nitrate Content Characteristics of Shallow Groundwater in Jinjiang City, Fujian Province, and Their Hydrochemical Indication Significance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 35(2): 177-182(in Chinese with English abstract).
- ZHU Lin, SU Xiao-si. 2003. Research Status of Nitrogen and Oxygen Isotopes of Nitrate in Groundwater[J]. *Global Geology*, 22(4): 396-403(in Chinese with English abstract).
- ZHU Lin, XU Xing, ZHAO Xiao-hong, TANG Jian-ning. 2012. Characteristics of water use of four bushes growing in northern areas of Yinchuan Plain in summer based on the  $^{18}\text{O}$  stable isotope analysis[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 27(4): 24-30(in Chinese with English abstract).