

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 细菌群落特征·····	王步英,郎继东,张丽娜,方剑火,曹晨,郝吉明,朱昕,田埂,蒋靖坤 (2727)
北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析·····	熊秋林,赵文吉,郭道宇,陈凡涛,束同同,郑晓霞,赵文慧 (2735)
北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征·····	程婧晨,崔彤,何万清,聂磊,王军玲,潘涛 (2743)
基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征·····	樊守彬,田灵娣,张东旭,曲松 (2750)
夏季珠江三角洲地区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响·····	杨毅红,瞿群,刘随心,李雄,钟佩仪,陶俊 (2758)
隧道工人的 PM ₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价·····	向华丽,杨俊,仇珍珍,雷万雄,曾婷婷,兰志财 (2768)
基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征·····	张英杰,孔少飞,汤莉莉,赵天良,韩永翔,于红霞 (2775)
柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源·····	朱建佳,陈辉,巩国丽 (2784)
长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义·····	李栋,姚鹏,赵彬,王金鹏,潘慧慧 (2791)
“引江济太”过程中长江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究·····	潘晓雪,马迎群,秦延文,邹华 (2800)
重庆市典型城镇区地表径流污染特征·····	王龙涛,段丙政,赵建伟,华玉妹,朱端卫 (2809)
调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响·····	张婷婷,姚鹏,王金鹏,潘慧慧,高立蒙,赵彬,李栋 (2817)
青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究·····	严芳萍,康世昌,陈鹏飞,柏建坤,李洋,胡召富,李潮流 (2827)
岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素·····	李建鸿,蒲俊兵,袁道先,刘文,肖琼,于爽,张陶,莫雪,孙平安,潘谋成 (2833)
室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响·····	赵瑞一,吕现福,段逸凡 (2843)
新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价·····	冯精兰,余浩,刘书卉,刘梦琳,孙剑辉 (2849)
青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究·····	梁作兵,孙玉川,王尊波,江泽利,廖昱,谢正兰,张媚 (2857)
三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征·····	白薇扬,张成,赵锋,唐振亚,王定勇 (2863)
燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响·····	梁鹏,王远娜,尤琼智,高雪飞,何杉杉 (2870)
运用硫同位素、氮氧同位素示踪厘清湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源·····	李瑞,肖琼,刘文,郭芳,潘谋成,于爽 (2877)
藻华聚集的生态效应:对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响·····	刘国锋,何俊,杨轶中,韩士群 (2887)
DOM 对被动采样技术的影响与应用·····	于尚云,周岩梅 (2895)
蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析·····	王旭东,周森,孟晓荣,王磊,黄丹曦,夏四清 (2900)
水环境中碳纳米管对沙丁胺醇降解的影响·····	汪祺,韩佳芮,魏博凡,周磊,张亚,杨曦 (2906)
β-In ₂ S ₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素·····	艾翠玲,周丹丹,张嵘嵘,邵享文,雷英杰 (2911)
排水管道沉淀物氮释放特性的研究·····	陈红,卓琼芳,许振成,王劲松,魏清伟 (2918)
生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析·····	付昆明,王会芳,左早荣,仇付国 (2926)
ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究·····	吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (2934)
两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究·····	高景峰,李婷,张树军,樊晓燕,潘凯玲,马谦,袁亚林 (2939)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究·····	巫恺澄,吴鹏,徐乐中,李月寒,沈耀良 (2947)
珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价·····	窦磊,杨国义 (2954)
广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价·····	吴洋,杨军,周小勇,雷梅,高定,乔鹏伟,杜国栋 (2964)
开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险·····	段海静,蔡晓强,阮心玲,全致琦,马建华 (2972)
我国西南地区氮饱和马尾松林土壤和植物 ¹⁵ N 自然丰度对长期氮施加的响应·····	刘文静,康荣华,张婷,朱婧,段雷 (2981)
黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征·····	李婷,邓强,袁志友,焦峰 (2988)
开顶式气室原位研究水稻根系对大气汞浓度升高的响应·····	陈剑,王章玮,张晓山,秦普丰,陆海军 (2997)
接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响·····	郑文君,王明元 (3004)
水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响·····	赵志瑞,崔丙健,侯彦林,刘上千,王岩 (3011)
固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中芘解吸的影响·····	全冬丽,双生晴,李晓军,邓万荣,赵然然,贾春云,巩宗强 (3018)
零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究·····	陈忠林,李金春子,王斌远,樊磊涛,沈吉敏 (3026)
Fe ³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究·····	杨蓉,李鸿博,周永莉,陈静,王琳玲,陆晓华 (3032)
原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农用安全性·····	焦海华,潘建刚,徐圣君,白志辉,王栋,黄占斌 (3038)
镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力·····	张杏丽,邹威,周启星 (3045)
不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响·····	刘秋辛,阎秀兰,廖晓勇,林龙勇,杨静 (3056)
磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化·····	汤帆,胡红青,苏小娟,付庆灵,朱俊 (3062)
洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性·····	邵婷,姚春霞,沈源源,张玉洁,苏楠楠,周守标 (3068)
3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价·····	杨扬,李雅洁,崔益斌,李梅 (3074)
石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应·····	孟瑶,付玉彬,梁生康,陈伟,柳昭慧 (3080)
Cu-Mn-Ce/ 分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究·····	虎雪姣,卜龙利,梁欣欣,孟海龙 (3086)
热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响·····	胡玉瑛,吴静,王士峰,曹知平,王凯军,左剑恶 (3094)
磷石膏对麦田 CO ₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析·····	李季,吴洪生,高志球,尚小厦,郑培慧,印进,Kakpa Didier,任迁琪,Ogou Katchele Faustin,陈素云,徐亚,姚童言,李炜,钱景珊,马世杰 (3099)
全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析·····	郝薛文,李力,王杰,曹燕,刘建国 (3106)
《环境科学》征订启事 (2757) 《环境科学》征稿简则 (2767) 信息 (2734,2783,3073,3079)	

运用硫同位素、氮氧同位素示踪里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源

李瑞^{1,2}, 肖琼^{2*}, 刘文^{1,2,4}, 郭芳², 潘谋成², 于爽^{2,3}

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004; 3. 中国地质大学环境学院, 武汉 430074; 4. 山东省地矿工程勘察院, 济南 250014)

摘要: 为揭示里湖地下水水质的时空变化规律, 结合硫同位素及氮氧同位素分析水质变化原因, 为开发和保护岩溶水资源提供科学依据. 于 2010 年 1 月至 12 月, 2014 年 5 月、10 月对里湖地下河进行监测, 分析其常规水化学组成及 $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ 、 $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ 、 $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ 特征. 结果表明: ① 地下河水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型, 受到大气降水、人类活动等影响, 各离子表现出明显的时空变化规律; ② 自污水处理厂运营以来, 地下河中硫酸盐浓度略有降低, 但仍然偏高, 与 2010 年相比, 硝酸盐污染加剧. 受人类活动影响上游拉易洞、南丹河, 中游凉风洞、甘田坝等地硫酸盐、硝酸盐浓度较高, 下游小龙洞处浓度较低; ③ 地下河 $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ 值在 -4.12‰ ~ -0.93‰ 之间, 通过与潜在硫源的 $\delta^{34}\text{S}$ 对比, 推断由工业和居民生活燃煤产生的大量硫氧化物引起雨水酸化, 以酸雨的形式向当地地下水输入大量 SO_4^{2-} ; ④ $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ 值在 0.26‰ ~ 11.58‰ 之间, 平均为 7.61‰ , $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ 在 -2.33‰ ~ 21.76‰ 之间, 平均为 9.38‰ , 结合硝酸盐氮氧同位素组成分析, 认为土壤氮、人畜粪便和污水是研究区硝酸盐的主要贡献者, 也是地下水中硝酸盐污染加剧的主要原因.

关键词: 岩溶地下水; 水化学; 硫同位素; 氮氧同位素; 示踪来源

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2877-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.08.020

Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China

LI Rui^{1,2}, XIAO Qiong^{2*}, LIU Wen^{1,2,4}, GUO Fang², PAN Mou-cheng², YU Shi^{2,3}

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources/ Guangxi, International Research Center on Karst Under the Auspices of UNESCO, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 3. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 4. Shandong Geological Engineering Investigation Institute, Jinan 250014, China)

Abstract: To reveal the temporal and spatial variation pattern of groundwater chemistry in Lihu Lake and explore the causes for the change of water quality through analysis of sulfur isotope and nitrogen-oxygen isotope, so as to provide scientific basis for reasonable exploitation and protection of karst water resources. Several groundwater samples, collected from January to December in 2010 and May, October in 2014 were monitored to analyze the chemical composition of conventional water and the characteristics of $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$, $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, and $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$. The results showed that: ① The hydrochemical type of the underground water was $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ type and effected by the seasonal precipitation and human activity, the temporal and spatial variation of the main cations was obvious. ② The sulfur concentration in the underground river was slightly decreased since the operation of the sewage plant, however, the sulfur concentration was still high. The nitrate pollution aggravated in the year 2014 compared to 2010. Impacted by human activity, the concentration of sulfur and nitrate was higher in the upstream Nandan river, Layi cave and the midstream Liangfeng cave, and Gantianba than in the downstream Xiaolong cave. ③ The $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ value ranged from -4.12‰ to -0.93‰ . It was inferred that the emission of sulfur oxides through burning coal resulted in the rainwater acidification, which input a large amount of SO_4^{2-} into the underground water in the form of acid rain. ④ The $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ value ranged from 0.26‰ to 11.58‰ , with an average value of 7.61‰ , the $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ value ranged from -2.33‰ to 21.76‰ , with an average value of 9.38‰ . In combination of the composition analysis of nitrogen-oxygen isotope of nitrate, it was believed that soil organic nitrogen, manure and sewage were the main sources of nitrate in the groundwater and the main causes for aggravation of nitrate pollution of the underground water.

Key words: karst underground water; hydrochemistry; sulfur isotope; nitrate-oxygen isotope; trace source

收稿日期: 2015-02-01; 修订日期: 2015-04-07

基金项目: 广西自然科学基金项目(2013GXNSFDBA019221, 2013GXNSFDA019024); 国家自然科学基金项目(41302213, 41102161); 中国地质调查局项目(1212010916063); 国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室开放基金项目(14-B-03)

作者简介: 李瑞(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶水文地质学, E-mail: 616569272@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: xiaoqiong-8423@163.com

人类活动向地下河中排放的污染物质往往具有多样性和多源性,运用单一的指标判别地下水中所有污染源往往缺乏针对性和科学性,因此,需要结合多种同位素分别示踪污染物质来源。地下水中硝酸盐污染的来源较多,早期主要利用氮同位素技术识别氮源^[1~6],但由于不同污染源 NO_3^- 的初始 $\delta^{15}\text{N}$ 值存在交迭现象,以及诸如反硝化作用等地球化学作用引起同位素分馏,利用单一的 $\delta^{15}\text{N}$ 值难以区分^[7,8]。为此,将 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 相结合能有效地确定污染来源,识别反硝化作用^[9~16]。而针对地下河中硫酸盐来源问题,根据代表不同来源污染物特征化学指纹的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,在没有硫同位素分馏效应以及已知潜在硫源的 $\delta^{34}\text{S}$ 的情况下,可以通过所测样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 推测其硫源,较好地进行了示踪^[17~21]。基于此,本研究在监测里湖地下河各常规离子时间变化特征的基础上,联系城市发展情况和流域的水文地质条件,利用硫同位素示踪硫酸盐来源,氮氧同位素示踪硝酸盐来源,以期厘清城市污染物质来源,从源头上减少硫酸盐、硝酸盐输入,协调城市经济发展与水质保护提供科学依据。

1 研究区概况

里湖地下河位于广西河池市南丹县中北部,是区内最大的地下河水系,其流域面积为 517.4 km^2 ,其中碳酸盐岩出露面积占总面积的 85% 左右(图 1)。里湖地下河发源于拉易、关西的峰林、峰丛溶盆-溶洼地区,水系呈树枝状展布,径流于峰林溶洼山地,于贵州省荔波县拉娘村西北打狗河西岸陡崖脚出露排泄。流域内出露地层主要为石炭系、二叠系、三叠系,仅在南丹河河谷地带存在第四系堆积物,广泛分布含燧石石灰岩,偶夹煤层及白云岩,灰岩,砂岩,页岩等。研究区为中亚热带季风性湿润气候,年平均气温为 $17 \sim 20^\circ\text{C}$,月平均最高气温为 27°C ,最低气温 7°C 。本区降水充沛,据南丹县 1965~2009 年以来 45 年的降水数据显示,降水主要集中在 5~8 月,达 965.2 mm ,占全年降水量的 65.7%^[22],是地下水的主要补给来源之一^[23]。受降水季节变化的影响,地下河平水期流量 $4593.75 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,枯季流量 $3339.66 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,其中地表水补给流量 $1259.05 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

里湖地下河是南丹县兼有城市供水、农业灌溉,工业用水等多重社会和经济功能的重要水源(图 1)。由于 90 年代以来城市化进程的加快,城市工业废水,生活污水和人畜废水大量排放,里湖地下

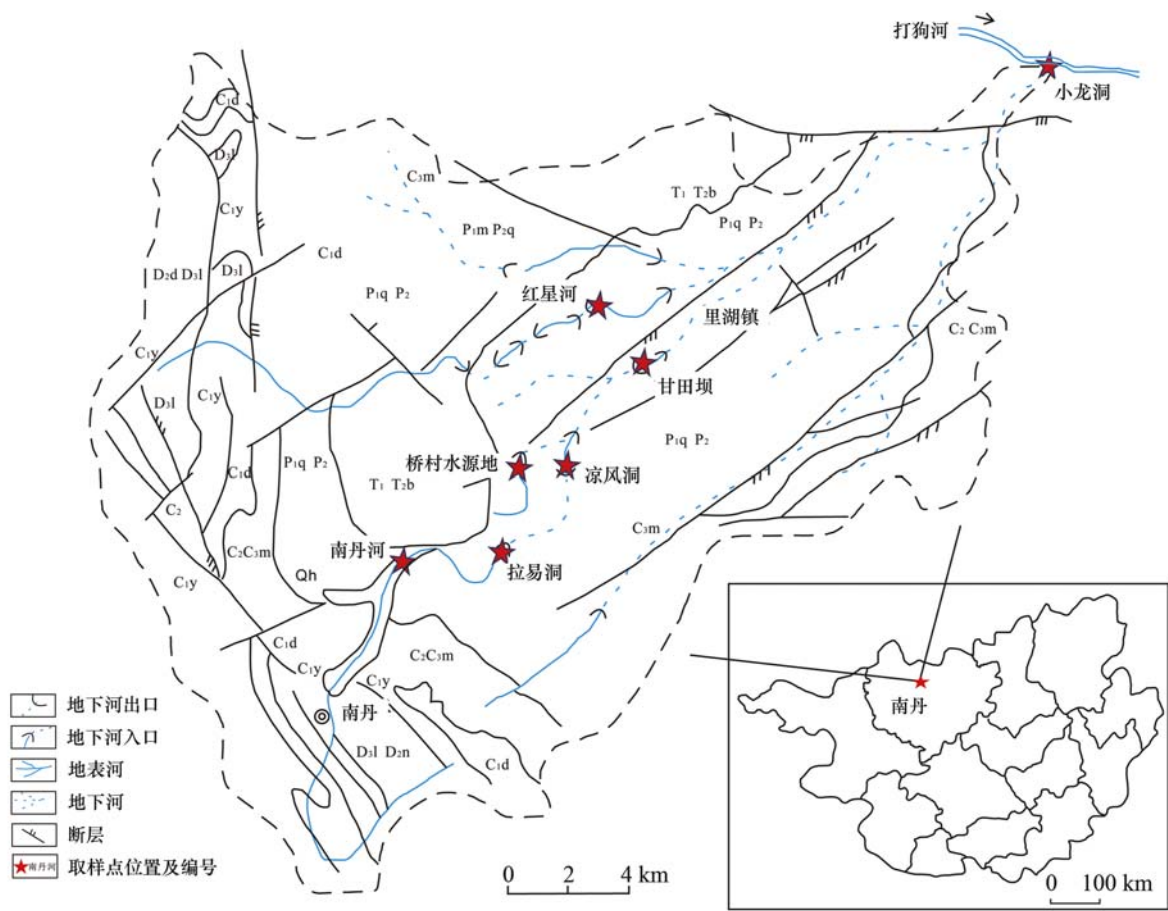
河污染载荷增加,水质变差。已有研究表明氨氮是里湖地下河主要污染指标,亚硝态氮、锰、总铁、化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、生化需氧量(biochemical oxygen demand, BOD)部分浓度超过国家Ⅲ类水标准,砷、铬、硝态氮的部分浓度值超过国家Ⅱ类水质量标准,部分采样点水污染严重,已基本不能利用^[23]。郭芳等^[24]选取水中主要离子和微量元素,分析了里湖地下河的自净能力,为地下河水资源管理和保护提供了依据。上述研究从不同角度对里湖地下河的水质进行了分析,指出人类活动是里湖地下河水质变化的因素,但得出的污染源的结果较为粗略,要从源头上减少污染物质的输入,还需要利用同位素示踪方法直接、明确地追踪出污染来源。

2 材料与方法

在里湖地下河共布设 7 个采样点(图 1),采样工作分 3 个时间段,即 2010 年 1~12 月(马振杰^[23]的采样)、2014 年 5 月 16 日、2014 年 10 月 18 日。其中,在小场采集里湖地下河上游的南丹河水样,该地表水流经南丹县城,途经居民区,菜市场等,生活和生产废水被直接或间接地排放到南丹河,对南丹河的水质产生直接影响。拉易洞为其上游地表河转化为地下河的结点,是里湖地下河的主要入口之一。凉风洞、甘田坝、红星河等是里湖地下水的出露点,其间明暗流交替。桥村是南丹县的备用水源地,根据柳州水文队调查,认为该股水与拉易洞水为上下层关系,最终将汇入里湖地下河。小龙洞是里湖地下河汇入打狗河的出口。

现场用 WTW 3430 多参数水质测定仪(德国 WTW 公司)测定水温、溶解氧(dissolved oxygen, DO)、pH 值,电导率,精度分别为 0.1°C 、 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.01 个 pH 单位、 $1 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; HCO_3^- 和 Ca^{2+} 采用德国 Merck 公司便携式试剂盒,精度分别为 $0.1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

每次采样前,用水样清洗采样瓶 3~4 次,现场用直径 50 mm、 $0.45 \mu\text{m}$ 的醋酸纤维滤膜过滤水样后,存储于 100 mL 聚乙烯采样瓶中,带回实验室用离子色谱分析仪测定其 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- ,此测试工作在广西/国土资源部岩溶动力学重点实验室完成;取过滤水样,装于事先用水样清洗过的 50 mL 聚乙烯样瓶中,并立即加 1:1 优级纯硝酸溶液 5~8 滴,调节 $\text{pH} < 2$,用美国 Perkin Elmer 公司产的 Optima 2100DV 全谱直读型 ICP-OES 测定水样中的 K^+ 、



根据文献[25]修改

图1 研究区水文地质图及采样点位置

Fig. 1 Hydrogeological map of the studied area and the locations of sampling sites

Na^+ 、 Mg^{2+} ，阳离子测试在西南大学地理科学学院地球化学同位素实验室完成。

水中 SO_4^{2-} 的 $\delta^{34}\text{S}$ 在 2014 年 5 月 16 日采集，现场用 $0.45\ \mu\text{m}$ 醋酸纤维滤膜过滤 1.5 L 水样装入事先清洗 3 遍的采样瓶。带回实验室后，加 HCl 酸化，使 $\text{pH} \leq 2$ ，视水样中 SO_4^{2-} 浓度加入过量的饱和 BaCl_2 溶液，使 SO_4^{2-} 完全生成 BaSO_4 ，静置过夜。用去离子水反复冲洗沉淀保证完全去除 Cl^- ，并用 $0.45\ \mu\text{m}$ 醋酸纤维滤膜过滤生成的 BaSO_4 沉淀，置于 850°C 烘干 2 h。 $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ 采用元素分析仪 (Carlo Erba 1108) 结合同位素质谱仪 (IRMS, Delta C Finningan Mat) 测定，测定结果相对于国际标准 V-CDT，测试精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$ ，测试工作在中国地质大学 (武汉) 环境学院教学实验中心完成。

用事先清洗 3 遍的 50 mL 聚乙烯瓶取水样，密封，冷藏送实验室进行水中 $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ 同位素分析，样品用反硝化细菌法结合痕量气体分析

仪 (TraceGas) / 同位素质谱仪进行测试。利用天然存在无 N_2O 还原性酶活性的反硝化细菌将 NO_3^- 转化为 N_2O 气体，再采用痕量气体分析仪 TraceGas 在线提取和纯化 N_2O 气体，利用含高氯酸镁及碱石棉的水阱除去水分和 CO_2 ，再用液氮捕集浓缩 N_2O 气体，然后加热释放，经 Porapak Q 色谱柱分离后由 He 气带入同位素质谱仪进行测定，测试工作在中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所稳定同位素实验室完成。

3 结果与分析

3.1 水化学类型

表 1 为里湖地下河部分测试数据，图 2 为研究区 7 个采样点的水化学 Piper 三线图，在阳离子三角图上，里湖地下河阳离子以 Ca^{2+} 为主，平均占阳离子组成的 74%，阴离子三角图上以 HCO_3^- 为主要离子，平均占阴离子组成的 71%，其次为 SO_4^{2-} ，平均占阴离子组成的 24%，水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型。从

阳离子浓度均值来看, $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+}$; 从阴离子浓度均值来看, $\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^{-} > \text{Cl}^{-}$.

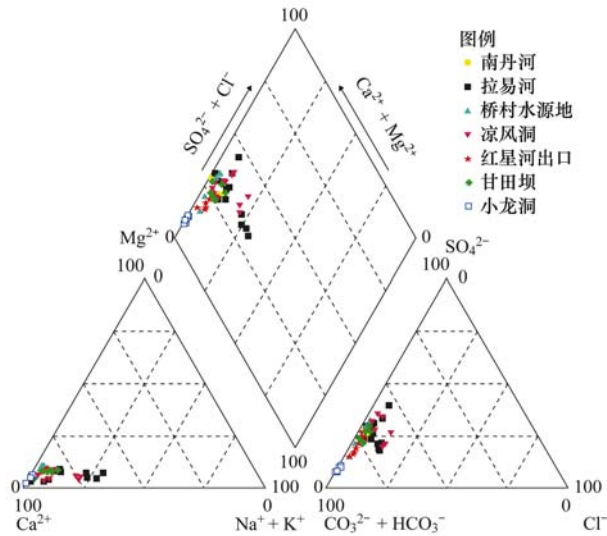


图 2 里湖水化学 Piper 三线图

Fig. 2 Piper chart of Lihu Lake underground water

3.2 里湖水化学时间变化特征

里湖地下河电导率变化在 $231 \sim 803 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, pH 在 $7.10 \sim 8.87$ 之间, 水温变化在 $13.5 \sim 24.7^{\circ}\text{C}$ 之间, 受气温影响, 夏季大于冬季. 分别选取代表里湖地下河上、中、下游的拉易洞、凉风洞、小龙洞来分析里湖地下河水化学时间变化(图 3). 上游拉易洞和中游凉风洞各离子浓度时间变化上基本相同, 即 K^{+} 、 Na^{+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在 5 月急剧降低, 之后一直呈降低趋势, 8 月后浓度又逐渐上升, 主要是受到雨季降水稀释及至 2010 年 4 月 30 日起位于拉易洞上游约 200 m 处的污水处理厂开始运营, 集中处理由城镇排放出的生活和生产污水, 使地下河中各离子浓度在 2010 年 4 月后开始出现显著降低; 基于同样的原因, HCO_3^{-} 、 Cl^{-} 、 NO_3^{-} 、 SO_4^{2-} 也出现类似的时间变化规律, 但 NO_3^{-} 、 SO_4^{2-} 等阴离子相对于其他离子波动较大. 从下游地下河出口小龙洞处 2010 年 7 ~ 12 月的数据来看, 除 HCO_3^{-} 离子外, 各

表 1 里湖地下河部分测试数据¹⁾

Table 1 Part of the testing data of Lihu Lake underground water

取样时间	采样点	电导/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	pH	水温/ $^{\circ}\text{C}$	溶解氧(DO)	$\text{Cl}^{-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{SO}_4^{2-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^{-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
2010-05	拉易洞	347	7.73	20.4	—	8.62	73.84	4.16
	凉风洞	392	7.64	20.1	—	9.48	68.49	1.15
	拉易洞	419	7.11	21	—	7.31	61.3	8.37
	桥村	396	7.19	19.5	—	4.47	42.1	12.36
2010-10	凉风洞	387	7.54	20.5	—	4.61	58.9	18.51
	红星河出口	350	7.93	20.1	—	2.79	56.6	8.68
	干田坝	380	8.08	20.6	—	4.23	54.5	16.96
	小龙洞	322	7.48	20.4	—	0.74	16.2	5
	南丹河	365	7.69	18.7	7.74	2.56	45.35	15.34
2014-05-16	拉易河	367	7.55	19.5	7.12	8.62	47.11	14.52
	桥村水源地	311	7.24	18.8	6.88	2.3	21.59	7.19
	凉风洞	349	7.63	20.8	7.9	3.66	45	12.04
	红星河出口	295	7.86	19.5	8.64	2.27	38.15	7.19
	甘田坝	352	7.99	20.1	8.76	3.49	44.35	11.58
	小龙洞	364	7.63	20.9	8.62	1.45	16.58	3.97
	南丹河	359	8.87	24.6	13.55	5.63	48.1	4.04
2014-10-18	拉易河	412	7.72	22.4	9.67	10.44	46.5	9.1
	桥村水源地	419	7.1	19.5	5.16	4.51	40.26	11.47
	凉风洞	373	7.51	20.9	7.48	6.65	40.38	14.88
	红星河出口	368	7.6	20.1	5.15	3.42	27.92	8.09
	甘田坝	373	7.99	20.5	8.38	6.11	40.93	13.98
	小龙洞	337	7.47	21.7	8.6	0.97	14.24	4.27

1) “—”表示数据缺省; 部分数据引自文献[23]

离子浓度均较上游和中游的拉易洞和凉风洞低, 且基本保持在较低水平, 随时间变化小.

3.3 里湖地下河硫同位素、氮氧同位素组成

测得里湖地下河 2014 年 5 月水体中 $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ 值在 $-4.12\text{‰} \sim -0.93\text{‰}$ 之间波动, 平均为 -2.46‰ (表 2); $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^{-}$ 值在 $4.79\text{‰} \sim 10.22\text{‰}$

之间, 平均为 7.71‰ , $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^{-}$ 值在 $5.62\text{‰} \sim 21.76\text{‰}$ 之间, 平均为 12.53‰ . 同年 10 月的硝酸盐中的氮氧同位素组成与 5 月相比, $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^{-}$ 值变化幅度更大, 在 $0.26\text{‰} \sim 11.58\text{‰}$ 之间, 平均为 7.50‰ , $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^{-}$ 值与 5 月相比普遍偏低, 在 $-2.33\text{‰} \sim 12.56\text{‰}$ 之间, 平均为 6.22‰ .

表 2 2014 年里湖地下河硫同位素、氮氧同位素特征

Table 2 Values of $\delta^{34}\text{S}$ in sulfur and the values of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in nitrate in Lihu Lake underground water in the year 2014					
取样时间	样点名称	$\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-/\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$
2014-05-16	南丹河	-0.93	4.79	9.13	0.52
	拉易河	-3.02	6.92	6.03	1.15
	桥村水源地	-1.12	8.98	21.76	0.41
	凉风洞	-4.08	7.17	5.62	1.28
	红星河出口	-4.12	7.73	12.97	0.60
	甘田坝	-1.37	8.21	11.22	0.73
	小龙洞	-2.61	10.22	21	0.49
2014-10-18	南丹河	— ¹⁾	7.83	12.56	0.62
	拉易河	—	0.26	-2.33	-0.11
	桥村水源地	—	11.58	3.66	3.16
	凉风洞	—	9.76	4.87	2.00
	红星河出口	—	8.7	6.96	1.25
	甘田坝	—	9.26	5.52	1.68
	小龙洞	—	5.1	12.32	0.41

1) “—”表示数据缺失

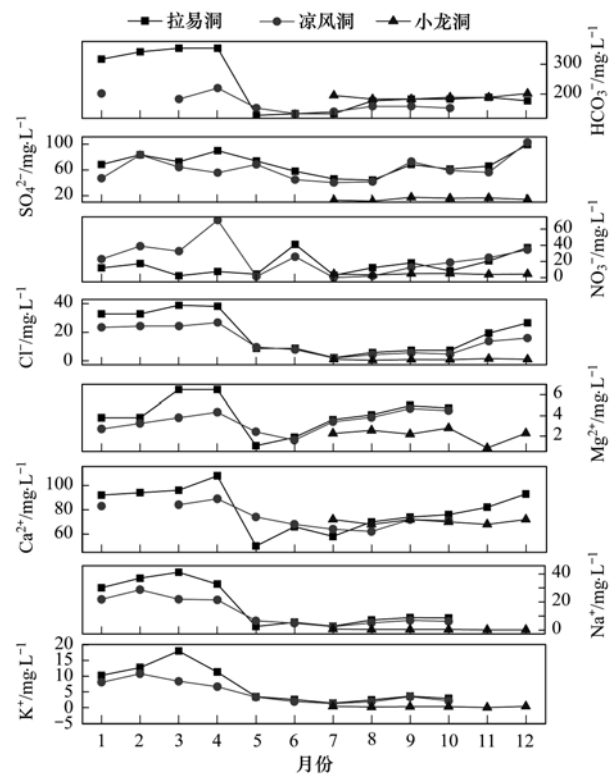


图 3 里湖地下河 2010 年各月水化学指标时间变化
Fig. 3 Temporal variation of the hydrochemistry in Lihu Lake underground water in each month of the year 2010

4 里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源研究

4.1 里湖地下河硫酸盐和硝酸盐时空变化特征

里湖地下河中 SO_4^{2-} 较高,2010 年 5 月平均浓度为 $71.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,10 月平均浓度为 $48.27\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,2014 年 5 月平均为 $47.11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,10 月平均为 $48.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,远远高于世界河水 SO_4^{2-} 的平

均值 $11.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [26]。图 4 对比了里湖地下河 2010 年 5 月、10 月与 2014 年 5 月、10 月的 SO_4^{2-} 浓度时空变化,其中 2010 年大于 2014 年,表明从 2010 年污水处理厂开始运营后,虽其浓度仍偏高,但比 2010 年有所降低。 NO_3^- 浓度在 $1.15\sim71.21\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,其时间变化表现出不同于 SO_4^{2-} 的特征。从图 4 可以看出 2014 年 5、10 月的 NO_3^- 浓度都分别大于 2010 年 5、10 月,这说明硝酸盐的污染在加剧,指示了工、农业活动的加剧和城市污水的排放增加了地下河的氮负荷。从空间分布上看,上游南丹河,拉易洞、中游凉风洞、甘田坝等硫酸盐、硝酸盐浓度较高,下游小龙洞处则较低。结合实地考察,在城关镇小场采集的南丹河水样流经南丹县

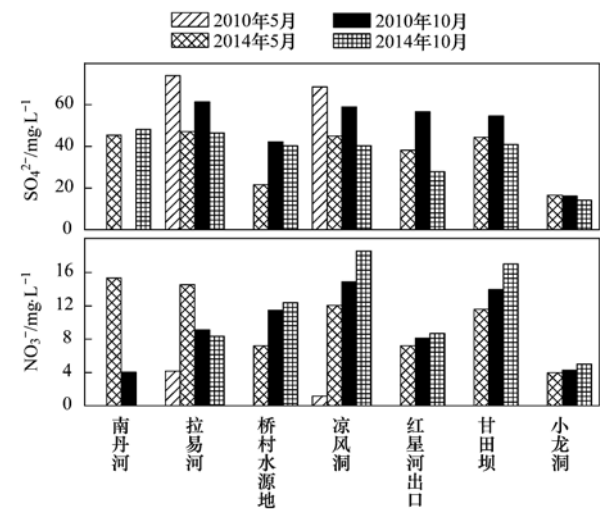


图 4 里湖地下河硫酸盐、硝酸盐时空分布变化
Fig. 4 Spatial and temporal variation of sulfur and nitrate in Lihu Lake underground water

城,途经居民区,菜市场,沿途生活、生产废水直接或间接地排放到南丹河,污染物质在向下运移的途中不断积累;拉易洞为地表河转为地下河的入口,汇集了来自上游的大量地表污水,加上周围分布有采石场、水泥厂、砖厂等,堆积在地表的岩石风化物 and 工业废水被输送到河水中;凉风洞周围正在进行旅游开发,地下河污染负荷随人类活动的加剧而增大;甘田坝周围为大片农田,农业活动也是地下水污染来源之一. 据此粗略地认为地下水中硫酸盐、硝酸盐主要是来源于人类活动,但具体的污染来源需要结合硫同位素、氮氧同位素进行示踪.

4.2 $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ 特征及其 SO_4^{2-} 来源

地下水中硫酸盐主要有以下几种来源:大气降水、蒸发岩的溶解、硫化物的氧化及土壤带中有机硫的矿化,海岸地区还受到海水入侵的影响或传输的海盐通过降水补给而导致地下水中硫酸盐浓度增大^[27]. 此外,随着工农业的发展和城市化进程的加快,人类活动(如开采矿床、施用化肥等)的输入也成为硫酸盐的主要来源之一^[28~31]. 稳定同位素的组成($\delta^{34}\text{S}$)代表各污染源的特征化学指纹,不同来源的 $\delta^{34}\text{S}$ 存在较大差异,这使利用硫稳定同位素示踪污染来源成为可能^[32],而被广泛运用于自然生态系统中各种硫源的示踪和地球化学循环的研究^[33].

里湖地下河中 $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ 值在 $-4.12\text{‰} \sim -0.93\text{‰}$ 之间,平均值为 -2.47‰ (表2),其相对较窄的分布范围反映了当地硫源较为单一. 里湖地下河流经地区出露的二叠纪、三叠纪地层中偶夹薄层石膏,地下水在流经石膏层时,水岩作用的结果是水体会较高的 SO_4^{2-} 浓度和高的 $\delta^{34}\text{S}$ 值. 临近地区贵州的海相蒸发岩(石膏)的 $\delta^{34}\text{S}$ 值的变化区间为 $23.7\text{‰} \sim 29.56\text{‰}$ ^[34],四川盆地三叠系硬石膏 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $14.7\text{‰} \sim 35.4\text{‰}$ ^[35]. Querol 等^[36] 研究西班牙地区地下水、地表水及矿物中 SO_4^{2-} 的硫同位素组成时,发现三叠纪和中新世石膏的 $\delta^{34}\text{S}$ 值多数分布在 $12\text{‰} \sim 14\text{‰}$ 之间. 通常地层中石膏的 $\delta^{34}\text{S}$ 值均偏正,与研究区地下水中 $\delta^{34}\text{S}$ 值 $-4.12\text{‰} \sim -0.93\text{‰}$ 之间差异较大,可以得出里湖地下河中没有或较少存在石膏溶解的情况.

据 Moncaster 等^[37] 报道,英国化肥的 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 $5.4\text{‰} \sim 8.5\text{‰}$ 之间; Mizota 等^[38] 报道了日本的化肥硫酸铵(俗称肥田粉)和普通过磷酸钙 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 10.2‰ ,在澳大利亚和新西兰的更高,在 $15.7\text{‰} \sim 20.7\text{‰}$ 之间;在四川盆地西南部的峨眉山,人造化肥为 $7.1\text{‰} \sim 8.9\text{‰}$ ^[22]. 由凉风洞以下的里湖中下

游地区虽分布有大片农田,但农业化肥的 $\delta^{34}\text{S}$ 值皆分布在正值范围内,与里湖地下水的 $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ 值主要是在负值范围不一致,由此认为农业活动中施用的化肥不是里湖地下河 SO_4^{2-} 的主要来源.

里湖地下河的补给来源主要是大气降水,所属的河池市是广西地区酸雨较严重的城市之一,约 82% 的大气降水的 pH 值 < 5.6 ^[39],酸雨可向地下河中输入大量 SO_4^{2-} . 据广西地区的柳州气象局地面站、桂林市环境保护监测站、合山电厂化学分场等的监测数据,湘桂走廊地区大气降水的 $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ 值的变化范围为 $-4.8\text{‰} \sim -0.1\text{‰}$,集中分布在负值范围内^[40],涵盖了里湖地下水的硫同位素组成范围($-4.12\text{‰} \sim -0.93\text{‰}$),据此推断地下水中 SO_4^{2-} 大部分来自于大气降水. 又将里湖地下河的 $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ 值与 $1/\text{SO}_4^{2-}$ 做图(图5),水体 $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ 值主要落在大气降水的 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围内,部分落在大气降水和煤重合的值域内,但里湖流经地层主要为石炭系下统岩关阶、石炭系上统马平群、二叠系下统栖霞阶、二叠系上统、三叠系下统,三叠系中统百逢组,并没有煤系地层的存在,出现这种情况可能是由于煤炭是里湖地区工业生产和居民生活的主要能源,洪业汤等^[41] 研究中国大气降水的南北分异时发现,中国在长江以南地区,由拉萨,经贵阳往深圳地区,大气降水的 $\delta^{34}\text{S}$ 值均为负值,这与中国煤炭 $\delta^{34}\text{S}$ 值的南北分异相似,认为煤炭燃烧过程中的同位素分馏效应造成了这种分异.

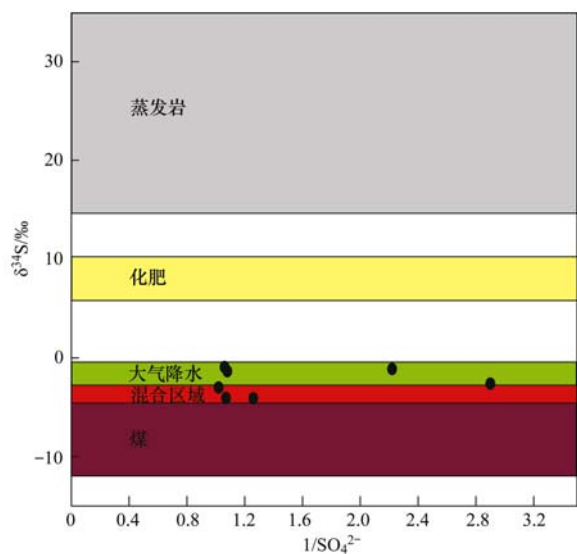


图5 里湖地下水 $\delta^{34}\text{S}$ 与 $1/\text{SO}_4^{2-}$ 的变化关系

Fig. 5 Variation relationship of $\delta^{34}\text{S}$ and $1/\text{SO}_4^{2-}$ in the Lihu Lake underground water

4.3 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 特征及其 NO_3^- 来源

4.3.1 反硝化作用的识别

地下水中的硝酸盐来源很多,而且一经污染则难以治理,因此查明硝酸盐来源,对从根源上减少硝酸盐的输入具有重要意义^[42]。岩溶地区的土壤、岩石和包气带的渗透性较好,由源进入地下水过程中氮同位素分馏作用通常较小^[43~45],应用 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$,并结合 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 能够有效地进行地下水污染溯源。但发生反硝化作用导致氮同位素分馏,致使不同氮源的硝酸盐同位素组成值域发生重合的可能仍然存在,因此,有必要辨识反硝化过程,排除同位素分馏导致的氮源识别干扰^[46]。在识别反硝化作用之前还应先判定该区的地下水环境是否适宜反硝化作用的发生。由于反硝化作用发生在厌氧环境下,因此水中溶解氧的多少可以作为判别指标之一,研究发现在 DO 浓度 $< 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下,反硝化速率最理想^[47]。而 Gillham 等^[48] 经野外调查研究认为,地下水环境中反硝化作用的 DO 上限为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Desimone 等^[47] 对地下水 NO_3^- -N 污染晕监测分析时发现,在 DO 浓度为 $2 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下仍有反硝化作用的存在,但速率很小^[49]。反硝化作用是受 NO_3^- 污染地下水的一种重要的自净过程,可以降低水中 NO_3^- 的污染水平,一般反硝化过程中, NO_3^- 浓度降低伴随着 $\delta^{15}\text{N}/\delta^{18}\text{O}$ 成比例增加,增加比率接近 2:1^[50],应用这种线性关系,可以识别地下水是否发生反硝化作用。

据 2014 年 5 月和 10 月现场测定的 DO 数据(表 1),仅 10 月在桥村水源地测得的 DO 值为 $5.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,小于 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其余样点的 DO 值在 $6.88 \sim 13.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均为 $7.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,指示当地地下水环境并不适宜反硝化作用的进行。从研究区的水文地质条件来看,南丹河到甘田坝的里湖中上游段,地下水埋藏较浅,小于 30 m,而且地下河管道为很大的洞穴,明暗流交替,空气充足,属于好氧环境,硝化作用占主导地位,再次印证了以上推断。地下河大多数样点 $\delta^{15}\text{N}$ 在 $4.79\text{‰} \sim 11.58\text{‰}$ 这一较小的变化范围,相反, $\delta^{18}\text{O}$ 却有较广的分布范围,在 $-2.33\text{‰} \sim 21.76\text{‰}$ 间。通过计算 $\delta^{15}\text{N}/\delta^{18}\text{O}$ 得到的比值多数在 $-0.11 \sim 1.68$ 之间,比值小于 2,仅采于 2014 年 10 月的桥村水源地与凉风洞比值较大,分别为 3.16 和 2.00(表 2)。从图 6 也可以看出, $\delta^{15}\text{N}$ 与 NO_3^- 的浓度间并不存在显著的相关关系,并未出现 NO_3^- 浓度降低伴随着 $\delta^{15}\text{N}$ 增加这一反硝化作用的线性关系。综上分析,判断反硝化作用并不是影

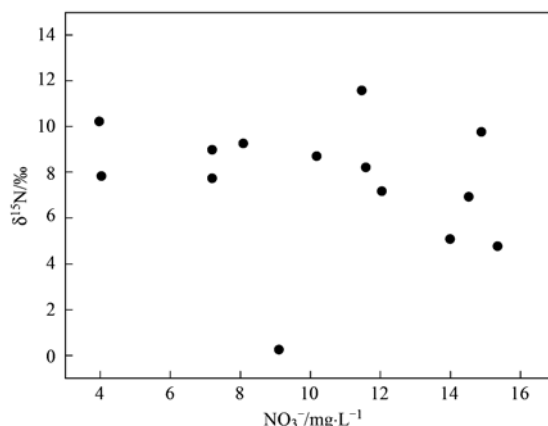


图 6 里湖地下水 NO_3^- 浓度与 $\delta^{15}\text{N}$ 的关系

Fig. 6 Relationship between the NO_3^- concentration and the $\delta^{15}\text{N}$ values

响同位素变化的因素。

4.3.2 地下水硝酸盐来源

氯在自然界中是相对稳定的元素,其可能来源包括农用钾肥,动物粪便,生活污水等,因此氯可以作为指示污染源的元素^[51]。 $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 可以用来识别 NO_3^- 浓度变化过程中的稀释效应和生物作用^[52,53]。2014 年 5 月,里湖地下河中 Cl^- 的平均浓度为 $2.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,10 月平均为 $5.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,受雨水稀释作用明显,从图 7 可以看出,大多数采样点的 NO_3^- 与 Cl^- 呈一定的正相关趋势,指示它们具有相似的来源,5 月的样品中 NO_3^- 与 Cl^- 之间呈正相关 ($R^2 = 0.4610$),这揭示样品 NO_3^- 受到大气降水和其他来源的混合作用。

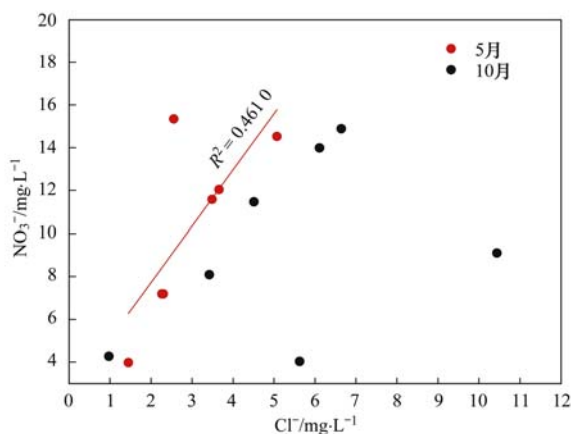


图 7 地下水 Cl^- 和 NO_3^- 的关系

Fig. 7 Relationship between Cl^- and NO_3^- concentrations in Lihu Lake underground water

地下水 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 值在 $0.26\text{‰} \sim 11.58\text{‰}$ 之间,平均为 7.61‰ , $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 值在 $-2.33\text{‰} \sim 21.76\text{‰}$ 之间,平均为 9.38‰ 。图 8 为较常用的不同来源的

硝酸盐的 N、O 同位素的典型特征值,将里湖各采样点的 N、O 同位素在图 8 中表示,主要是落在土壤氮、人畜粪便和污水的交叉区间,说明人类生活排放的污水、饲养家畜排出的粪便以及有机氮浓度较高的土壤是当地硝酸盐主要来源。一般来说,土壤 N 的浓度较为稳定,人畜粪便和生产生活污水排放是引起里湖流域硝酸盐浓度在空间上波动变化的主要原因。需要特别注意的是,在 2014 年 5 月采集的桥村水源地和小龙洞这两个点的 N、O 同位素主要落在大气沉降 NO_3^- 这一范围内,桥村水源地为当地的备用水源,居民注重对饮水水质的保护,小龙洞周围为大片的未开垦的山地,植被覆盖良好,远离人类活动,且这两个采样点的 NO_3^- 浓度显著低于其他采样点(图 4),这都说明在化肥,人畜粪便和污水等输入较少,森林覆盖条件较好的地区,雨季大气降水的混入也是当地地下水重要的氮源^[54~56],且对样品 N 同位素影响较大;在旱季的 10 月份,大气降水较少,土壤氮、人畜粪便和污水便成为了主要的污染来源。

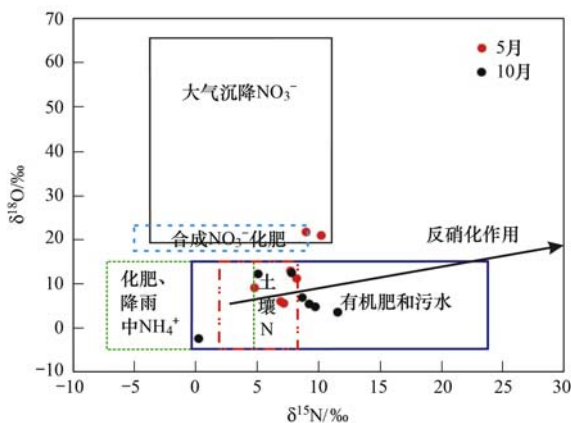


图 8 不同来源硝酸盐的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 典型值^[57]

Fig. 8 Typical ranges of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of nitrate of different sources

5 结论

(1)里湖地下河水中主要阴离子为 HCO_3^- , 主要阳离子为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} , 基本水化学类型为 HCO_3^- -Ca 型。水体中离子的主要来源为碳酸盐岩的风化, 其次各离子变化还受到人类活动的影响, 除 HCO_3^- 外, 其他离子浓度在里湖地下河上游、中游偏高, 下游偏低。受中亚热带季风气候的影响, 地下水中各离子浓度呈现出雨季降低, 旱季增大的特点。

(2)自 2010 年污水处理厂开始运营后, 地下河中硫酸盐浓度有所降低, 但仍然偏高, 硝酸盐浓度略有增加, 指示当地硝酸盐污染在加剧。从空间变化

上看, 上游南丹河, 拉易洞、中游凉风洞、甘田坝等人类活动强度较大, 地下河硫酸盐、硝酸盐浓度较高, 下游小龙洞处植被良好且远离人类活动干扰, 其硫酸盐、硝酸盐浓度较低。

(3)里湖地下河 $\delta^{34}\text{S}$ - SO_4^{2-} 值分布在 $-4.12\text{‰} \sim -0.93\text{‰}$ 这一相对较窄的范围, 反映了当地硫源较为单一, 并且该值域与大气降水的 $\delta^{34}\text{S}$ 值一致, 因此认为大气降水输入是当地 SO_4^{2-} 的主要来源。

(4)将 2014 年与 2010 年相对比, 里湖地下河中硝酸盐浓度呈增加趋势, 表明硝酸盐污染在加剧。根据地下水 DO 值, 并结合 NO_3^- 与 $\delta^{15}\text{N}$ 、 NO_3^- 与 Cl^- 、 $\delta^{15}\text{N}$ - NO_3^- 与 $\delta^{18}\text{O}$ - NO_3^- 的关系排除了反硝化作用对氮氧同位素的影响。地下水硝酸盐的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在 $0.26\text{‰} \sim 11.58\text{‰}$ 之间, $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-2.33\text{‰} \sim 21.76\text{‰}$ 之间, 指示土壤氮、人畜粪便和污水是研究区硝酸盐的主要贡献者, 为有针对地开展硝酸盐污染防治提供了依据。

参考文献:

- [1] 张翠云, 张胜, 马琳娜, 等. 污灌区地下水硝酸盐污染来源的氮同位素示踪[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2012, **37**(2): 350-356.
- [2] 刑萌, 刘卫国, 胡婧. 滦河、滹河河水硝酸盐氮污染来源的氮同位素示踪[J]. 环境科学, 2010, **31**(10): 2305-2310.
- [3] 汪智军, 杨平恒, 旷颖伦, 等. 基于 ^{15}N 同位素示踪技术的地下河硝态氮来源时空变化特征分析[J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3548-3554.
- [4] Choi W J, Han G H, Lee S M, et al. Impact of land-use types on nitrate concentration and $\delta^{15}\text{N}$ in unconfined groundwater in rural areas of Korea [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, **120**(2-4): 259-268.
- [5] Wilson G B, Andrews J N, Bath A H. Dissolved gas evidence for denitrification in the Lincolnshire Limestone groundwaters, eastern England[J]. Journal of Hydrology, 1990, **113**(1-4): 51-60.
- [6] Vogel J C, Talma A S, Heaton T H E. Gaseous nitrogen as evidence for denitrification in groundwater [J]. Journal of Hydrology, 1981, **50**: 191-200.
- [7] 贾小妨, 李玉中, 徐春英, 等. 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, 2009, **25**(14): 233-239.
- [8] Kohl D H, Shearer G B, Commoner B. Fertilizer nitrogen: contribution to nitrate in surface water in a corn belt watershed [J]. Science, 1971, **174**(4016): 1331-1334.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Liu T, Wang F, Michalski G, *et al.* Using ^{15}N , ^{17}O , and ^{18}O to determine nitrate sources in the Yellow River, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47** (23): 13412-13421.
- [12] 任玉芬, 张心昱, 王效科, 等. 北京城市地表河流硝酸盐氮来源的氮氧同位素示踪研究[J]. *环境工程学报*, 2013, **7** (5): 1636-1640.
- [13] Jia G D, Chen F J. Monthly variations in nitrogen isotopes of ammonium and nitrate in wet deposition at Guangzhou, south China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44** (19): 2309-2315.
- [14] Savard M M, Somers G H, Smirnoff A, *et al.* Nitrate isotopes unveil distinct seasonal N-sources and the critical role of crop residues in groundwater contamination [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, **381** (1-2): 134-141.
- [15] 刘君, 陈宗宇. 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*, 2009, **30** (6): 1602-1607.
- [16] Heaton T H E. Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere: a review[J]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 1986, **59**: 87-102.
- [17] 赵敏, 曾成, 杨睿, 等. 贵州普定灯盏岩岩溶泉的硫同位素季节变化特征[J]. *地球科学与环境学报*, 2012, **34** (3): 83-88.
- [18] Li X D, Liu C Q, Liu X L, *et al.* Identification of dissolved sulfate sources and the role of sulfuric acid in carbonate weathering using dual-isotopic data from the Jialing River, Southwest China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, **42** (3): 370-380.
- [19] 肖红伟, 肖化云, 龙爱民, 等. 贵阳大气降水硫同位素地球化学特征[J]. *地球化学*, 2011, **40** (6): 559-565.
- [20] Li X D, Masuda H, Ono M, *et al.* Contribution of atmospheric pollutants into groundwater in the northern Sichuan Basin, China [J]. *Geochemical Journal*, 2006, **40** (1): 103-119.
- [21] 储雪蕾. 北京地区地表水的硫同位素组成与环境地球化学[J]. *第四纪研究*, 2000, **20** (1): 87-96.
- [22] 黄丽秋, 黎玉梅, 周慧僚. 南丹县45年气温、降水变化特征分析[J]. *农家之友(理论版)*, 2010, (12): 36-38.
- [23] 马振杰. 城市生活废弃物对岩溶地下河的污染研究——以南丹县里湖地下河为例[D]. 重庆: 西南大学, 2011. 33-43.
- [24] 郭芳, 王文科, 姜光辉, 等. 岩溶地下河污染物运移特征及自净能力——以广西里湖地下河为例[J]. *水科学进展*, 2014, **25** (3): 414-419.
- [25] 张连凯, 杨慧. 岩溶地下河中砷迁移过程及其影响因素分析——以广西南丹县里湖地下河为例[J]. *中国岩溶*, 2013, **32** (4): 377-383.
- [26] 沈照理, 朱宛华, 钟佐桑. *水文地球化学基础*[M]. 北京: 地质出版社, 1993. 68-69.
- [27] 刘丛强. *生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环*[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 311-314.
- [28] Han G L, Liu C Q. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: a study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China[J]. *Chemical Geology*, 2004, **204** (1-2): 1-21.
- [29] Montoroi J P, Grünberger O, Nasri S. Groundwater geochemistry of a small reservoir catchment in Central Tunisia[J]. *Applied Geochemistry*, 2002, **17** (8): 1047-1060.
- [30] Macpherson G L. Hydrogeology of thin limestones: the Konza Prairie long-term ecological research site, Northeastern Kansas [J]. *Journal of Hydrology*, 1996, **186** (1-4): 191-228.
- [31] Hanshaw B B, Back W. Major geochemical processes in the evolution of carbonate-aquifer systems [J]. *Journal of Hydrology*, 1979, **43** (1-4): 287-312.
- [32] 郭照冰, 董琼元, 陈天, 等. 硫稳定同位素对环境污染物的示踪[J]. *南京工程信息大学学报(自然科学版)*, 2010, **2** (5): 426-430.
- [33] 宋柳霆, 刘丛强, 王中良, 等. 贵州红枫湖硫酸盐来源及循环过程的硫同位素地球化学研究[J]. *地球化学*, 2008, **37** (6): 556-564.
- [34] 韩志钧, 金占省. *贵州省水文地质志*[M]. 北京: 地震出版社, 1996. 1-508.
- [35] 林耀庭, 曹善行, 熊淑君, 等. 四川盆地海相三叠系硬石膏和盐卤水的硫同位素组成及意义[J]. *化工矿产地质*, 1997, **19** (3): 171-176.
- [36] Querol X, Alastuey A, Chaves A, *et al.* Sources of natural and anthropogenic sulphur around the Teruel power station, NE Spain. Inferences from sulphur isotope geochemistry [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34** (2): 333-345.
- [37] Moncaster S J, Bottrell S H, Tellam J H, *et al.* Migration and attenuation of agrochemical pollutants: insights from isotopic analysis of groundwater sulphate [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2000, **43** (2): 147-163.
- [38] Mizota C, Sasaki A. Sulfur isotope composition of soils and fertilizers: differences between Northern and Southern Hemispheres[J]. *Geoderma*, 1996, **71** (1-2): 77-93.
- [39] Chen A Z, Wei H H, Tan F. Analysis of the temporal-spatial distribution and seasonal variation of the acid rain in Guangxi province [J]. *Meteorological and Environmental Research*, 2010, **1** (1): 62-65.
- [40] 张洪斌, 胡鸾琴, 卢承祖, 等. 华南地区酸沉降的硫同位素组成及其环境意义[J]. *中国环境科学*, 2002, **22** (2): 165-169.
- [41] 洪业汤, 张鸿斌, 朱咏焯, 等. 中国大气降水的硫同位素组成特征[J]. *自然科学进展: 国家重点实验室通讯*, 1994, **4** (6): 741-745.
- [42] 邓林, 曹玉清, 王文科. 地下水 NO_3^- 氮与氧同位素研究进展[J]. *地球科学进展*, 2007, **22** (7): 716-724.
- [43] Buzek F, Kadlecova R, Knezek M. Model reconstruction of nitrate pollution of riverbank filtration using ^{15}N and ^{18}O data, Karany, Czech Republic[J]. *Applied Geochemistry*, 2006, **21** (4): 656-674.
- [44] Kellman L M, Hillaire-Marcel C. Evaluation of nitrogen isotopes as indicators of nitrate contamination sources in an agricultural

- watershed[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, **95**(1): 87-102.
- [45] Wassenaar L I. Evaluation of the origin and fate of nitrate in the Abbotsford aquifer using the isotopes of ^{15}N and ^{18}O in NO_3^- [J]. *Applied Geochemistry*, 1995, **10**(4): 391-405.
- [46] 周迅, 姜月华. 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*, 2007, **28**(4): 389-395.
- [47] 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.
- [48] Gillham R W, Cherry J A. Field evidence of denitrification in shallow ground water flow systems [J]. *Water Pollution Research. Canada*, 1978, **13**(1): 53-71.
- [49] 吴耀国. 地下水环境中反硝化作用[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2002, **3**(3): 27-31.
- [50] Amberger A, Schmidt H L. Natürliche Isotopengehalte von Nitrat als Indikatoren für dessen Herkunft [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, **51**(10): 2699-2705.
- [51] Mengis M, Schiff S L, Harris M, *et al.* Multiple geochemical and isotopic approaches for assessing ground water NO_3^- elimination in a riparian zone[J]. *Ground Water*, 1999, **37**(3): 448-459.
- [52] Widory D, Petelet-Giraud E, Négrel P, *et al.* Tracking the sources of nitrate in groundwater using coupled nitrogen and boron isotopes: a synthesis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(2): 539-548.
- [53] Koba K, Tokuchi N, Wada E, *et al.* Intermittent denitrification: the application of a ^{15}N natural abundance method to a forested ecosystem[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, **61**(23): 5043-5050.
- [54] Schiff S L, Devito K J, Elgood R J, *et al.* Two adjacent forested catchments: Dramatically different NO_3^- export [J]. *Water Resources Research*, 2002, **38**(12): 28-1-28-13.
- [55] Kendall C, Aravena R. Nitrate isotopes in groundwater systems [A]. In: Cook P, Hercze A L (eds). *Environmental Tracers in SubSurface Hydrology* [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. 261-297.
- [56] Durka W, Schulze E D, Gebauer G, *et al.* Effects of forest decline on uptake and leaching of deposited nitrate determined from ^{15}N and ^{18}O measurements[J]. *Nature*, 1994, **372**(6508): 765-767.
- [57] Kendall C. Tracing nitrogen sources and cycling in catchments [A]. In: Kendall C, McDonnell J J (eds). *Isotope Tracers in Catchment Hydrology* [M]. Amsterdam: Elsevier Science B V, 1998. 519-576.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	Li Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster: The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-rui, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行