

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征	秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)
基于 LUR 模型的中国 PM _{2.5} 时空变化分析	刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制	黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)
成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征	邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成	李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)
炼焦工序颗粒物排放特征	王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)
小流域大气氮干湿沉降特征	王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征	李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响	斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N ₂ O 间接排放特征	田琳琳, 王正, 朱波 (5391)
不同氮污染特征河流 N ₂ O 浓度、释放通量与排放系数	王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例	彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ ¹⁸ O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例	吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析	刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响	廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价	张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律	郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)
大兴安岭南麓湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响	周心劝, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化	王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析	江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响	王木兰, 姜玥璐 (5514)
广东省水库拟柱胞藻 (<i>Cylindropermopsis raciborskii</i>) 的分布特征及影响因素分析	雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸	尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫 (5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果	兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能	顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性	刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应	王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制	王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程	刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响	高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)
主流厌氧氨氧化工艺的优化及其微生物的群落变迁	付昆明, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹 (5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性	陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润 (5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能	路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险	吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险	李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)
某大型神渣场土壤 As 污染特征及生态风险评价	刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系	辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)
岩溶区典型灌丛植物根系丛枝菌根真菌群落结构解析	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响	李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响	柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响	马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系	乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解	刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)
CO ₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征	唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价	许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力	刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年) 总目录	(5740)
《环境科学》征订启事 (5343) 《环境科学》征稿简则 (5439) 信息 (5595, 5619, 5638)	

多种同位素手段的硝酸盐污染源解析:以会仙湿地为例

彭聪, 潘晓东*, 焦友军, 任坤, 曾洁

(中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 近年来, 湿地在人类掠夺性开发下生态环境正不断恶化。其中, 硝酸盐污染就是湿地生态环境面临的一类主要问题。本文以会仙岩溶湿地为研究对象, 为查明导致湿地水体硝酸盐升高的主要因素, 利用 $^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ 、 $^{18}\text{O}(\text{NO}_3^-)$ 同位素手段确定区内硝酸盐污染的主要来源, 并借助 SIAR 模型确定各类污染源的贡献率。在此基础上, 通过 $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 同位素定性描述地下水的径流条件, 以此探究硝酸根浓度的空间分布与水循环的关系。结果表明, 影响研究区水体中硝酸根浓度的主要因素有 3 个方面, 动物粪便及生活污水、化肥中 NO_3^- 和土壤氮, 其对硝酸盐污染的贡献率均值分别为 39.1%、32.2% 和 28.5%。 $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 同位素结果显示, 轻 $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 表明其地下水径流条件好, 其对应的 NO_3^- 浓度值一般较低, 而重 $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 对应的 NO_3^- 浓度值一般较高。由此可知, 地下水径流条件的好坏也一定程度地影响了 NO_3^- 浓度的分布。

关键词: 会仙湿地; 硝酸盐污染; 氮氧同位素; $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$; 地下水径流条件

中图分类号: X144; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5410-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201803212

Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland

PENG Cong, PAN Xiao-dong*, JIAO You-jun, REN Kun, ZENG Jie

(Key Laboratory of Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: In recent years, the ecological environment of wetlands has deteriorated under the predatory exploitation of human beings. Nitrate pollution is a major problem faced by wetland ecosystems. In this paper, Huixian karst wetland was selected as a study area to identify the main factors leading to the increase of nitrate in wetland water. The main sources of nitrate pollution in the area were determined by means of $^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ and $^{18}\text{O}(\text{NO}_3^-)$ isotopes. The contribution rate of all types of pollution sources was determined with the SIAR model. To explore the relationship between the spatial distribution of the nitrate concentration and the groundwater runoff conditions, the $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ isotopes were used to qualitatively characterize the runoff conditions of the groundwater. The results show that there are three main factors affecting the nitrate concentration in the study area: animal manure and domestic sewage, NO_3^- in chemical fertilizer, and soil nitrogen. The average contribution rates to nitrate pollution are 39.1%, 32.2%, and 28.5% respectively. The $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ isotope data clarify that a light $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ reflects better groundwater runoff conditions. The concentration of NO_3^- is generally lower, while the NO_3^- concentration corresponding to heavy $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ is generally higher. The condition of the groundwater runoff to a certain extent also affects the distribution of the NO_3^- concentration.

Key words: Huixian wetland; nitrate pollution; nitrogen and oxygen isotopes; $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$; groundwater runoff condition

湿地作为对人类贡献最大的全球三大生态系统之一, 却遭受着日趋强烈的人为破坏, 特别是城市及其周边的湿地, 不合理的开发活动始终没有得到控制, 开发目的也从满足人类生存需求转化为满足社会经济发展的需求, 致使湿地成为伴随城市化过程消失最快的成分之一^[1]。在湿地生态功能不断退化的同时, 来自人为活动过程中污染物的大量输入导致湿地生态系统已难以承受, 从而导致湿地水环境质量普遍下降^[2,3]。其中, 湿地水体富营养化在我国乃至世界湿地中均是一个普遍性问题^[4-11]。然而, 不同地区因人类活动的方式不同, 导致湿地水体污染的原因也存在差异^[9,10]。因此, 探究污染源可为地下水硝酸盐污染治理措施的制定提供直接

有效的依据。

目前, 关于地下水硝酸盐污染的源识别研究方法有多种, 使用最为广泛的是利用氮氧同位素进行溯源研究^[12,13]。该项技术也从开始的定性化研究逐渐发展为基于模型下的定量化研究^[14-19]。但是, 对于硝酸盐来说, 其迁移能力强, 特别是在岩溶地区, 污染源与污染水体可能相距甚远^[20], 因无相关指示证据而导致某些点的污染原因难以确定, 最终

收稿日期: 2018-03-30; 修订日期: 2018-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702278, 41702279); 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务项目(2017028); 中国地质调查局地质调查项目(DD20160285)

作者简介: 彭聪(1991~), 男, 研究实习员, 主要研究方向为岩溶地下水环境, E-mail: pengcong@karst.ac.cn

* 通信作者, E-mail: 524592965@qq.com

难免会造成分析结果的偏颇。

事实上,地下水污染物浓度的分布不仅受到污染源的影响,水文地质条件对其浓度分布的影响也至关重要,特别是在岩溶地区,岩溶裂隙及管道发育,且类型复杂,地下水的运移过程及途经直接影响了硝酸盐的浓度变化^[21-24]。目前,水文地质条件对污染物的迁移研究主要集中在模拟等方面,且也主要是针对孔隙含水层,对于岩溶含水层的研究还相对较少^[25]。通过常规组分可以认识硝酸盐的污染程度及污染现状,甚至可以初步分析可能的污染来源。但是,由于缺少深入地研究,确实很难确定其是否受到某类污染源的影响,不同类型污染源对硝酸盐污染的贡献更是难以实现。通过对氮氧同位素的分析,并借助 SIAR 模型是当前进行硝酸盐污染溯源最为有效的方法^[26]。然而,岩溶区因其复杂的水文地质条件,现有的方法也难以快速有效地运用到该类型地区。已有关于硝酸盐污染溯源研究也较少将地下水径流条件进行考虑,而大多数是将硝酸盐浓度结合污染源分布进行污染现状和污染原因研究^[27],所得出的结果难免会出现分析结果与实际情况不符之处,而此不符之处出现的主要原因就是未考虑水文地质条件的影响。因此,在已有研究的基础上,将地下水径流条件考虑进来,可以弥补原有研究的不足之处,使最终分析结果与实际情况更加吻合。

在岩溶区,受水岩作用时间长短的影响,地下水中 Sr/Ca 的比值会存在差异性,由此可有效反映出岩溶水的径流条件^[28,29]。同时,黄奇波等^[30]基于该原理运用¹³C_{DIC} 同位素手段来反映岩溶水的径流条件,并以此反推地下水的径流途径。基于此,受污染的地下水在岩溶含水层或孔隙含水层径流时,根据其在不同径流区的浓度分布,并结合各采样点的¹³C_{DIC} 特征值,便可得出基于浓度变化的水文地质条件的影响。

因此,本文的主要目的是在定量化污染源对地下水硝酸盐污染贡献率的基础上,将¹³C_{DIC} 反映的地下水径流条件进行综合考虑,更加精细刻画岩溶区地下水硝酸盐污染来源与归趋,以期对湿地地下水环境保护及生态环境修护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于桂林市临桂县会仙镇、四塘乡一带,东经 110°09'50"~110°14'30",北纬 25°05'20"

~25°06'45"。海拔 150~170 m,属中亚热带季风气候区,年均气温 19.5℃,多年平均降雨量为 1 835.8 mm,多年平均蒸发量为 1 569.7 mm,雨季为 3~8 月,降雨量占全年的 80%,其中 4~8 月是暴雨多发时期,降雨量占全年的 50%。

区内主要地层岩性包括东岗岭组第一、二段(D₂d¹/D₂d²)白云岩,融县组(D₃r)灰岩,石炭系岩关组(C₁y)及少量的大塘组(C₁d)灰岩。湿地地下水大致可分为 3 个含水岩组:第四系弱富水性单层结构松散岩类孔隙含水岩组;强富水性连续性纯碳酸盐岩中~厚层含水岩组;以及弱富水性夹层型不纯碳酸盐岩含水岩组,见图 1。区内地下水主要接受降水入渗直接补给、湿地水体的入渗补给以及外源水的侧向补给。松散含水层主要为降水和地表水的让入渗补给,丰水期还接受下伏岩层的垂向补给;岩溶含水层主要为降水入渗和外源水侧向补给。



图 1 研究区水文地质示意

Fig. 1 Hydrogeological map of the study area

湿地地下水受地形及构造控制,松散层地下水与岩溶地下水的流向大致相同,总体流向为由南、北两个方向呈扇形向湿地西部、中部以及东部径流。在凤凰山、狮子岩一带受逆断层及地形影响,地下水分别向西部、东部径流。在凤凰山-文全山-冯家一带,由于北东向地层岩性变化,部分地下水径流也会受到阻滞。狮子岩一带伏流的大部分水量来自于黄插塘南部的沼泽水体,另该区大气降水入

渗后一部分沿裂隙径流至伏流管道中。

采用 2014 年 7 月的遥感数据解译出的土地利用类型可知(图 2), 研究区中部的山体恰好形成了良丰和流域和相思江流域的天然分水岭。居民区除北部临桂市区较为集中外, 其余分布则较为零散。区内分布面积最广的要数耕地, 几乎分布于研究区的各个地方。据调查可知, 湿地中耕地作物种植种类繁多, 且大都存在轮作的情况。湿地的水系发达, 其中包括西部的太平河、清水河等最终汇入相思江, 东部的各支流汇入良丰河。据调查发现, 原有的大部分天然湖泊及荒地被改建为养鱼场等, 严重破坏了湿地原有的水文循环条件。

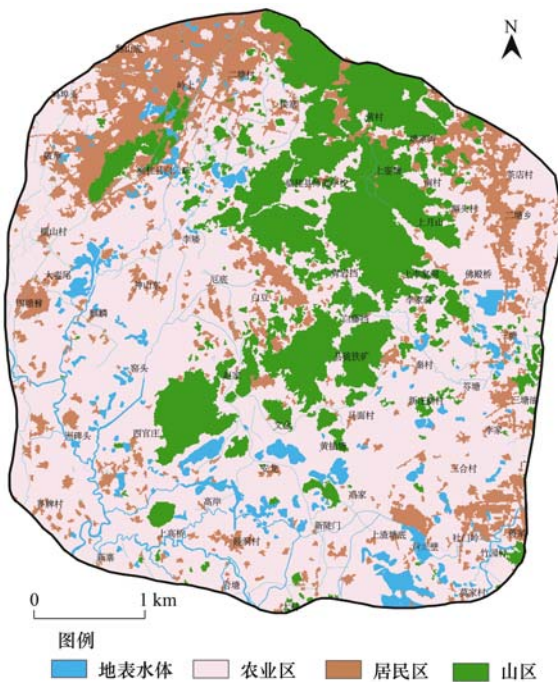


图 2 研究区土地利用类型

Fig. 2 Land use type map of the study area

1.2 样品采集

本研究于 2017 年 10 月共采集了 56 组水样, 其中, 49 个地下水样, 7 个地表水样, 采样点分布见图 3。地下水采集主要以民井和溶潭水为主, 其中民井以第四系孔隙水及表层岩溶水居多, 而溶潭水一般连通于地下管道, 采样点类型基本包含了研究区地下水类型。样品采集时, 水化学常规离子用 500mL 聚乙烯塑料瓶采集, 硝酸盐中 $^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ 、 $^{18}\text{O}(\text{NO}_3^-)$ 和 $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 用 50mL 的聚乙烯塑料瓶采集。水样采集前用 0.45 μm 滤膜过滤, 所有水样 4 $^{\circ}\text{C}$ 条件下冷藏待测。利用美国的 In-suit 仪器现场测试 pH、DO、Eh 及电导率, 用硬度计和碱度计现场测试 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 。阳离子 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 用原子吸收

光谱法(AAS)测试, 阴离子 SO_4^{2-} 、 Cl^- 用高效液相色谱(HPLC)测定。 $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 利用稳定同位素质谱仪(IRMS)测定, 测定方法为酸解法。 $^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ 和 $^{18}\text{O}(\text{NO}_3^-)$ 样采用德国的 Delta V-Precon 测定, 测试方法为细菌反硝化法。其中, 阴阳离子和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 样的测定工作在国土资源部岩溶地质资源环境监督检测中心测试, $^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ 和 $^{18}\text{O}(\text{NO}_3^-)$ 同位素送往中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所进行测试。

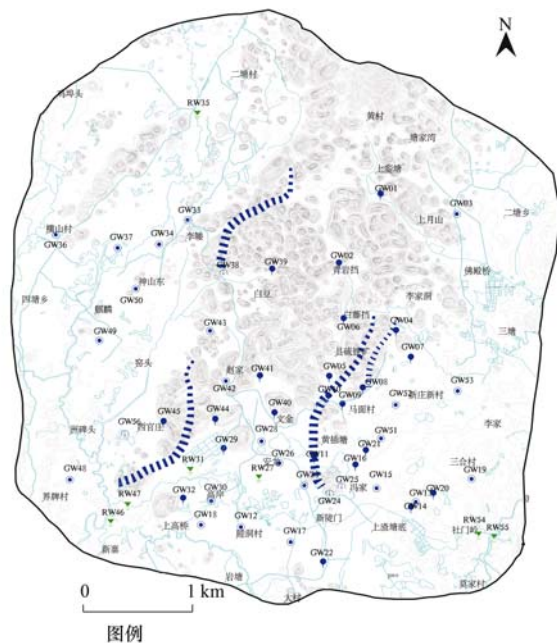


图 3 采样点分布示意

Fig. 3 Distribution of the samples in the study area

2 结果与分析

采样数据的分析测试结果如表 1 所示, 常规指标中, 各类水体的离子浓度均在地下水三类水标准之下, 整体表现较好。三氮中, 硝酸盐未出现超标现象, 而铵根及亚硝酸根则出现了超标现象, 但仅为零星分布。从图 4 可知, 研究区水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水为主, 但 4 种类型水化学仍存在差异, 表现为井水和地表水较为分散, 而溶潭水和地下河水则相对较为集中。综合分析可以初步得出井水和地表水受人为影响较大, 而溶潭水和地下河所受影响则相对较弱。从图 5 可看出, 井水中硝酸根浓度变化最大, 为 2.36 ~ 74.74 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 27.89 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其浓度最高值出现在灌塘的 GW51 井水中; 亚硝酸根浓度变化最为明显的是在地下河水中, 为 nd ~ 1.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 0.48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓

度最高点位于冯家 GW25 的地下河入口处. 铵根的浓度在溶潭水、地下河和地表水的变化均较为显著, 分别为 0~12.9、0~1.9、0~5.3 mg·L⁻¹, 均值分别为 0.8、0.5、1.2 mg·L⁻¹, 其中最高值出现在 GW06 的溶潭水. 虽然硝酸盐离子浓度均未超过地下水三类水标准, 但是从硝酸盐的浓度分布来看, 存在从补给区到排泄区逐渐增高的趋势. 此外, 存在 4 组溶潭水和 2 组地表水铵根离子浓度超地下水三类水标准,

表明地下水最近受到污染. 同时, 在硝酸盐高值点水中, 其常规组分的 Na⁺、Cl⁻ 等指标的浓度值也相对较高. 综合分析可得出, 在人为活动的影响下, 硝酸根势必会随时间而积累, 最终导致径流及排泄区地下水遭受硝酸根的污染而无法饮用. 因此, 查明湿地内水体中硝酸盐的污染来源及迁移规律可直接为当地居民饮用水安全提供保障, 同时也可今后湿地地下水环境保护提供科学依据.

表 1 不同类型水离子浓度特征值¹⁾/mg·L⁻¹

指标	井水			溶潭水			地下河			地表水		
	Min	Max	Aver	Min	Max	Aver	Min	Max	Aver	Min	Max	Aver
K ⁺	0.1	86.9	17.3	0.1	27.3	2.7	0.3	7.1	2.8	1.4	17.1	8.2
Na ⁺	1.0	23.5	8.3	0.3	13.1	2.2	0.7	3.1	1.7	1.6	35.8	10.2
Ca ²⁺	44.9	134.1	89.5	34.8	126.1	87.9	52.6	104.3	78.1	37.8	93.2	57.0
Mg ²⁺	2.7	31.9	10.6	0.9	15.7	6.8	2.0	4.5	3.5	3.8	9.0	6.0
Cl ⁻	3.4	49.6	16.7	1.4	27.4	5.9	2.2	7.5	4.6	4.1	44.6	15.1
SO ₄ ²⁻	6.3	64.2	29.6	4.1	75.6	17.5	8.4	19.1	12.0	8.4	22.6	15.8
HCO ₃ ⁻	159	354.4	273.8	142.1	317.5	259.9	164.9	277.2	226.7	133.3	277.2	183.7
NO ₃ ⁻	2.4	74.7	27.9	1.5	37.8	14.5	0.1	17.5	8.9	1.4	27.6	13.1
NO ₂ ⁻	nd	0.01	0.002	nd	0.024	0.03	nd	1.9	0.5	nd	0.01	0.04
NH ₄ ⁺	0.02	0.1	0.03	nd	13.0	0.8	nd	1.9	0.5	nd	5.3	1.2

1) Min:最小值; Max:最大值; Aver:均值; nd:未检出

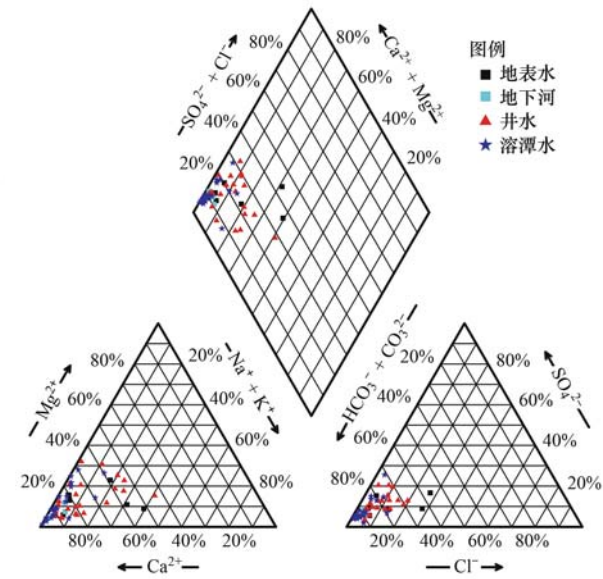


图 4 不同类型水 Piper 三线图

Fig. 4 Piper diagram for different water types

3 讨论

3.1 硝酸盐污染特征

从图 5 可以看出, 硝酸盐浓度的均值表现为井水 > 地表水 > 溶潭水 > 地下河, 且井水硝酸盐浓度分布也较为离散. 相反, 亚硝酸根和铵根离子浓度则表现为地下河和地表水出现高浓度值, 而在井水和溶潭水则基本未检出.

根据硝酸根浓度, 将其分为 5 个等级: <10、10~30、30~50、50~70 和 >70 mg·L⁻¹, 从硝酸根的浓度分布可知(图 6), 硝酸根浓度高值基本分布在两个流域的排泄区, 且从北部的补给区到南部的排泄区硝酸根浓度也有逐渐增大之势. 当然, 也包括分布在补给和径流区的零星水点其硝酸根浓度较大. 在北部的补给区, 虽然主要以山区为主, 但是在山间的小盆地及小平原上, 仍分布有大面积的橘子林及菜地. 而在径流及排泄区, 地势较为平坦, 为主要的居民聚集地, 在各村落附近则主要为耕地, 这也主要为硝酸盐高浓度值的分布区. 此外, 该区域硝酸盐浓度普遍偏高的原因还与水文地质条件有关, 该区域地势平坦, 地下水水力梯度小, 径流缓慢, 虽地处岩溶区, 且有地下河及管道发育, 但是水动力条件差导致地下水交替缓慢, 污染物聚集于此.

在大的环境地质背景条件下, 水井的水可近似为孔隙水, 其在径流排泄区循环缓慢, 此外, 受用水量的影响也会对井水中硝酸盐的浓度值产生影响. 溶潭水则可近似为岩溶水, 经调查, 各溶潭水采样点深者可达十几 m, 浅者也有 3~4 m, 且在枯水期仍能保证一定的水量. 因此, 可推断各溶潭水其下部均有地下裂隙管道相连. 但由于采样时为枯

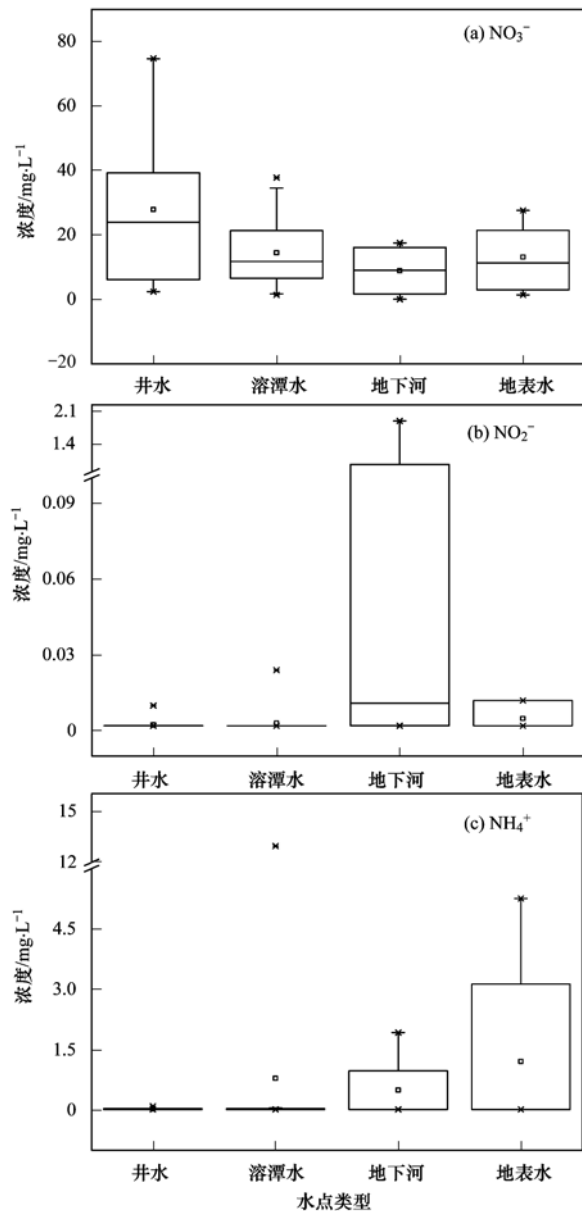


图5 不同类型水中氮浓度箱型图

Fig. 5 Box pattern of nitrogen concentrations for different water types

水期,各溶潭水均被附近村民抽出用于浇地,人为加快了地下水的循环,最终表现为溶潭水中的硝酸盐的浓度并不高,该现象同样出现在地下河水中。在所有采样点中,硝酸盐浓度值高于 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 82% 为井水, 18% 为溶潭水。而在地表水中,除在北部的 RW35 ($27.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和南部的 RW46 ($21.38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 外,其余的硝酸根浓度值均小于 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。其中, RW35 为北部临桂城区的生活及工业用水排往湿地的主要通道,因此表现为受人为影响而硝酸根浓度相对偏高。而 RW46 为相思江水,同时受到北部临桂市区和湿地排泄补水,其浓度也相对较高,但是低于其补给区的 RW35。此外,

位于其支流睦洞河的 RW47 硝酸根浓度值为 $11.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 低于其排泄流域的 RW46。因此,可初步得出会仙湿地核心区中地表水的硝酸根浓度值较低。推测原因主要是地表水富营养化导致水体中植物生长较快,消耗了一部分硝酸根,从而表现为地表水中硝酸根浓度普遍较低。相比之下,亚硝酸根和铵根浓度高值则主要在溶潭水、地下河和地表水中,且该部分水点中硝酸根浓度相对较低,因此,初步可以得出水点为最近受到氮污染。据采样调查发现,枯水期导致果林及作物的需水量增大,对溶潭水的开采导致了其水循环加快,因此表现出低硝酸,但是由于耕地距溶潭较近,大范围浇地后可导致少量的灌溉水随孔隙入渗并顺势排入溶潭中,这就导致了超过 90% 的氨氮超标点集中在溶潭水中。

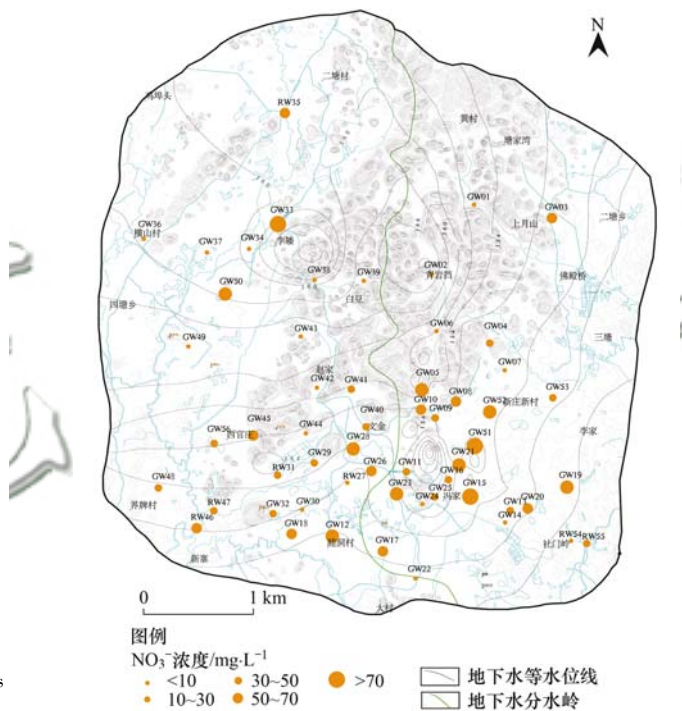


图6 硝酸盐浓度分布

Fig. 6 Distribution diagram of the nitrate concentration

3.2 氮氧同位素特征

基于氮氧同位素的测试数据,对湿地水进行硝酸盐污染溯源。如图 7,氮氧同位素主要集中在化肥、土壤氮及动物粪便和污水区域,其中,化肥区域有 5 组、土壤氮区域有 2 组、动物粪便和污水区域有 10 组,其余的点未落在任何区域,但位置也在这三类污染源区域附近。此外,从不同类型水点的分布区也可看出,溶潭水分布在化肥区域较多,井水分布在动物粪便及生活污水区较多,而地下河及地表水则分别分布在土壤氮和动物粪便与生活污水区

域较多. 综合来看, 研究区地表及地下水中硝酸盐主要受到来自化肥及动物粪便及生活污水的影响.

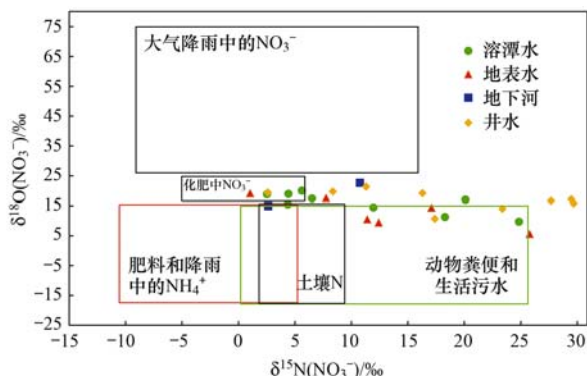


图7 不同 NO_3^- 来源的 $\delta^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ 和 $\delta^{18}\text{O}(\text{NO}_3^-)$ 的典型值

Fig. 7 Ranges of $\delta^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ and $\delta^{18}\text{O}(\text{NO}_3^-)$ of nitrate from different sources

为进一步确定各类污染源对区内水硝酸盐污染程度, 采用 SIAR 模型对各潜在污染源进行量化工作. 首先, 通过分析确定湿地水硝酸盐主要受到的污染来自 3 个方面, 分别为化肥、土壤氮及动物粪便和生活污水. 再经模型处理并最终得出各潜在污染源对硝酸盐污染的贡献情况如图 8. 从中可以看出, 动物粪便及生活污水贡献率的均值最高为 39.1%, 其次为化肥贡献率均值为 32.2%, 而土壤氮则相对较低, 贡献率均值为 28.5%. 前文已述, 会仙湿地主要以蔬菜种植和养殖业为主, 且种植和养殖规模大. 据调查, 会仙湿地水产养殖、猪和家禽的养殖非常普遍, 大量动物粪便未经有效地处置而是露天堆放或是排于附近水池或水沟中, 通过降雨或自然的渗漏于地下, 这也就是湿地水体中硝酸盐受到动物粪便贡献最大的原因. 如点 GW28, 其附近为养猪场及养鱼塘, 据调查虽然该井达 40 余米深且井壁防护完好, 但是该点硝酸盐的浓度值为 $39.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 据现场观察发现, 养鱼塘下部有防渗膜, 影响不大, 而养猪场的粪便均排在附近水沟中, 且无任何保护措施. 该点氮氧同位素特征值恰好落在动物粪便和生活污水区, 因此分析粪便渗滤液通过第四系下渗, 且随下部岩溶裂隙和管道进入到岩溶含水层, 从而影响地下水水质.

种植方面, 蔬菜的轮作导致土壤肥力下降, 化肥使用强度增加, 而过量施肥最终导致湿地水体中硝酸根浓度升高. 如 GW15 监测点, 附近土地利用方式为蔬菜种植地, 井深约 4 m, 为孔隙水, 井壁虽有水泥管衬砌, 但存在缝隙, 水体硝酸根浓度为 $74.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 该点氮氧同位素特征值位于化肥区

域, 附近菜地过量施用化肥未被作物完全吸收, 随灌溉用水下渗到下部孔隙含水层, 并通过井壁缝隙进入井水中, 导致硝酸盐浓度升高.

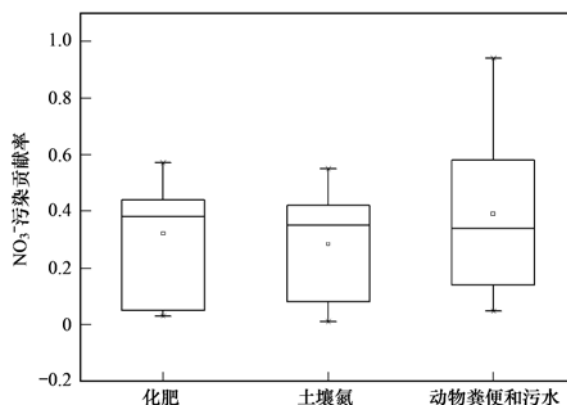


图8 各类型污染源对硝酸盐贡献率

Fig. 8 Contribution rate of various types of pollution sources to nitrate

3.3 $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 同位素特征

通过硝酸盐氮氧同位素及 SIAR 模型可以得出各类污染源对湿地水体硝酸盐污染的贡献大小, 实现了污染源的量化, 也能更加准确地为今后湿地硝酸盐污染提供针对性的治理措施. 然而, 由于硝酸根是一种迁移性较强的指标, 因此对其浓度升高的贡献除了有污染源的存在外, 地下水径流条件也是另一个重要的影响因素. 如溶潭 GW41, 其上游约 100 m 处有养猪场的粪便堆积, 但是该点的硝酸盐浓度并不高, 为 $10.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 而同样位于补给区的 GW33 水井, 其附近虽无明显污染源, 但水井中硝酸根浓度值却高达 $70.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 该差异存在的主要原因是溶潭水虽存在污染源, 但由于在枯水期其下游的溶潭抽水导致了水径流加快, 从而加快了其循环而表现出硝酸根浓度值并不高. 相反, 水井 GW33 为孔隙水, 其所处地势较为平坦, 地下水径流缓慢, 外加井水使用量较少, 最终导致污染物的聚集而呈现出硝酸根浓度较高. 由此看来, 污染源与硝酸根浓度升高的关系是充分条件, 并不是必要条件. 若同时具备了污染源和地下水径流条件差两个条件, 则地下水硝酸盐污染的概率就相对较大, 而两者缺一则会降低其受污染的风险.

通过对研究区水体中 $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 进行测试分析, 得出井水的 $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 变化范围为 $-5.02\text{‰} \sim -11.78\text{‰}$, 均值为 -9.11‰ , 溶潭水的 $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 变化范围为 $-6.5\text{‰} \sim -12.82\text{‰}$, 均值为 -9.4‰ , 地下河水中 $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的变化范围为 $-8.01\text{‰} \sim -13.52\text{‰}$, 均值为 -10.76‰ . 整体来看, 区内地下河水的径流条件

好于溶潭水,而井水的径流条件相对较差。

为进一步验证¹³C_{DIC}与硝酸根浓度的关系,利用SPSS对区内水体中¹³C_{DIC}、¹⁵N(NO₃⁻)、NH₄⁺、NO₂⁻、NO₃⁻进行相关性分析,如表2。分析结果表明,¹³C_{DIC}与¹⁵N(NO₃⁻)呈负相关关系,而与NO₃⁻呈正相关关系,¹⁵N(NO₃⁻)和NO₂⁻呈负相关关系。从结果中可以看出,¹³C_{DIC}与NO₃⁻呈正相关关系,说明¹³C_{DIC}较轻时,其硝酸根浓度相对较低,即地下水径流条件好时,其水中硝酸根浓度低。从同位素证据来看,¹³C_{DIC}与¹⁵N(NO₃⁻)呈负相关关系,同样表现出

¹³C_{DIC}轻硝酸根浓度低,证实了地下水径流条件会影响水中硝酸根浓度。仍以溶潭GW41为例,其上游虽有污染源分布,但是其水体中¹³C_{DIC}值为-12.02‰,相对较轻,表明其径流条件良好,而硝酸根浓度不高为10.52 mg·L⁻¹,由此可说明该点良好的地下水径流条件稀释了硝酸盐浓度,并最终导致了其下游的水点硝酸盐浓度的升高,如溶潭GW40和GW11附近均无明显的污染源,但是其硝酸根浓度却要高于GW41,分别为10.68 mg·L⁻¹和12.6 mg·L⁻¹。由此可推断,在岩溶区地下水径流条件确实为影响区内硝酸根浓度的另一重要因素。

表2 ¹³C_{DIC}、¹⁵N(NO₃⁻)同位素与三氮的相关性结果¹⁾

Table 2 Correlation between ¹³ C _{DIC} , ¹⁵ N(NO ₃ ⁻) isotopes, and three nitrogen					
	¹³ C _{DIC}	¹⁵ N(NO ₃ ⁻)	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻
¹³ C _{DIC}	1				
¹⁵ N(NO ₃ ⁻)	-0.470 *	1			
NH ₄ ⁺	0.032	-0.073	1		
NO ₂ ⁻	0.177	-0.381 *	0.061	1	
NO ₃ ⁻	0.364 *	-0.356	0.010	0.123	1

1) *表示在置信度(单侧)为0.05时,相关性是显著的

4 结论

(1)会仙湿地水体中硝酸根虽然整体未超地下水三类水标准,但是在空间上呈现出从补给区到排泄区浓度不断增大的趋势。除此之外,在补给区的某些水点的NO₂⁻和NH₄⁺出现超标的现象,表明氮污染还在持续不断地发生。

(2)通过¹⁵N(NO₃⁻)、¹⁸O(NO₃⁻)同位素进行氮污染溯源研究发现,区内主要的污染源为化肥氮、土壤氮、动物粪便和生活污水,通过SIAR模型确定各类污染源对研究区硝酸盐污染的贡献率的均值分别为39.1%、32.2%和28.5%。

(3)对于会仙湿地水体硝酸盐污染除各类污染源有直接贡献外,地下水径流条件对水体中硝酸盐的迁移起了至关重要的作用。由¹³C_{DIC}与三氮的相关分析结果显示,¹³C_{DIC}与NO₃⁻呈正相关关系,表现为轻的¹³C_{DIC},其径流条件好,NO₃⁻浓度值则相对较低。

参考文献:

[1] 徐长君,殷亚杰,秦姝冕,等. 大庆湿地生态系统服务功能及可持续发展[J]. 大庆师范学院学报, 2014, 34(3): 67-71.

[2] 闫长平,马延吉. 人类产业活动对湿地环境的影响研究进展[J]. 湿地科学, 2010, 8(1): 98-104.

Yan C P, Ma Y Y. Research progress on impacts of human industrial activities on wetland environment [J]. Wetland Science, 2010, 8(1): 98-104.

[3] Loeb R, Lamers L P M, Roelofs J G M. Assessing the

eutrophication risks of water retention and water storage in riverine wetlands International [A]. In: Symposium on Wetland Pollution-Dynamics and Control [C]. Ghent, Belgium, 2005. A119.

[4] Mooney H A, Cropper A, Capistrano D, et al. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment (millennium ecosystem assessment series) [M]. Reno: Published by Island Press, 2003.

[5] Wang J Z, Gu B H, Ewe S M L, et al. Stable isotope compositions of aquatic flora as indicators of wetland eutrophication[J]. Ecological Engineering, 2015, 83: 13-18.

[6] 叶雅杰,罗金明,王永洁,等. 扎龙湿地水体的富营养化特征及综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(11): 110-115.

Ye Y J, Luo J M, Wang Y H, et al. Trophic state of Zhalong wetland and the comprehensive assessment [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(11): 110-115.

[7] 邢海燕,张浩,周绪申,等. 基于改进熵权法的湿地水体富营养化评价[J]. 海河水利, 2016, (1): 36-38.

Xing H Y, Zhang H, Zhou X S, et al. Eutrophication evaluation of wetland based on improved entropy weight [J]. Haihe Water Resources, 2016, (1): 36-38.

[8] 梁慧雅,翟德勤,孔晓乐,等. 府河-白洋淀硝酸盐来源判定及迁移转化规律[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(8): 1236-1244.

Liang H Y, Zhai D L, Kong X L, et al. Sources, migration and transformation of nitrate in Fuhe River and Baiyangdian Lake, China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(8): 1236-1244.

[9] 赵楠芳,李荣昉,胡春华. 鄱阳湖地表水硝酸盐时空变异性及其来源研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(8): 93-98.

Zhao N F, Li R F, Hu C H. Spatial and temporal variability and

- sources of nitrate in surface water in Poyang Lake [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(8): 93-98.
- [10] 毛德华, 夏军. 洞庭湖湿地生态环境问题及形成机制分析[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(4): 444-451.
- Mao D H, Xia J. Ecological and environmental problems and their causing mechanisms in Dongting lake wetland [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, **24**(4): 444-451.
- [11] Huiskes A H L, Rozema J. The Impact of anthropogenic activities on the coastal wetlands of the north sea [A]. In: Salomons W, Bayne B L, Duursma E K, *et al* (Eds.). *Pollution of the North Sea* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1993. 455-473.
- [12] 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.
- Zhou X, Jiang Y H. Application of nitrogen and oxygen isotopes to the study of groundwater nitrate contamination [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2007, **28**(4): 389-395.
- [13] 沈杨. 浑河傍河区地下水水化学特征及氮污染来源同位素识别[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- Shen Y. Analyses of Hydrochemical characteristics of the groundwater and nitrogen pollution sources of the liguan riparian area by the means of the isotope [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.
- [14] Johannsen A, Dähnke K, Emeis K. Isotopic composition of nitrate in five German rivers discharging into the North Sea [J]. *Organic Geochemistry*, 2008, **39**(12): 1678-1689.
- [15] Parnell A C, Phillips D L, Bearhop S, *et al*. Bayesian stable isotope mixing models [J]. *Environmetrics*, 2013, **24**(6): 387-399.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 卢丽, 李文莉, 裴建国, 等. 基于 IsoSource 的桂林寨底地下河硝酸盐来源定量研究[J]. 地球学报, 2014, **35**(2): 248-254.
- Lu L, Li W L, Pei J G, *et al*. A quantitative study of the sources of nitrate of Zhaidi underground river in Guilin based on IsoSource [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2014, **35**(2): 248-254.
- [19] Liu M Z, Alfa-Sika M S L, Tchakala I, *et al*. Tracking sources of groundwater nitrate contamination using nitrogen and oxygen stable isotopes at Beijing area, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **72**(3): 707-715.
- [20] 杨平恒, 袁道先, 任幼蓉, 等. 川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中 NO_3^- 的存储和运移[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3124-3131.
- Yang P H, Yuan D X, Ren Y R, *et al*. Nitrate storage and transport within a typical karst aquifer system in the paralleled ridge-valley of east Sichuan [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3124-3131.
- [21] Jiang Y J, Wu Y X, Yuan D X. Human impacts on karst groundwater contamination deduced by coupled nitrogen with strontium isotopes in the Nandong Underground River System in Yunan, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(20): 7676-7683.
- [22] 张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 等. 重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1379-1388.
- Zhang Y Z, He Q F, Jiang Y J, *et al*. Characteristics and transport patterns of ammonia, nitrites, nitrates and inorganic nitrogen flux at epikarst springs and a subterranean stream in Nanshan, Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1379-1388.
- [23] 蓝家程, 杨平恒, 任坤, 等. 重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1297-1303.
- Lan J C, Yang P H, Ren K, *et al*. Investigation of nitrogen, phosphorus and microbial contamination in Laolongdong underground river system of Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(4): 1297-1303.
- [24] 李瑞, 肖琼, 刘文, 等. 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[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2877-2886.
- Li R, Xiao Q, Liu W, *et al*. Using $\delta^{34}\text{S-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ to trace the sources of sulfur and nitrate in Lihu Lake underground water, Guangxi, China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2877-2886.
- [25] 侯玉松, 马振民, 雒芸芸, 等. 焦作地区水文地质条件对浅层地下水污染的控制作用研究[J]. 中国农村水利水电, 2013, (4): 40-44.
- Hou Y S, Ma Z M, Luo Y Y, *et al*. Research on the control of hydrogeological conditions under shallow groundwater pollution in Jiaozuo area [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2013, (4): 40-44.
- [26] 吴文欢, 何小娟, 吴海露, 等. 运用氮、氧双同位素技术研究永安江硝酸盐来源[J]. 生态与农村环境学报, 2016, **32**(5): 802-807.
- Wu W H, He X J, Wu H L, *et al*. Identification of sources of nitrate in the Yongan river with isotopic technology [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, **32**(5): 802-807.
- [27] Ryu H D, Kim M S, Chung E G, *et al*. Assessment and identification of nitrogen pollution sources in the Cheongmi River with intensive livestock farming areas, Korea [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(14): 13499-13510.
- [28] 俞锦标, 杨立铮, 章海生, 等. 中国喀斯特发育规律典型研究: 贵州普定南部地区喀斯特水资源评价及其开发利用 [M]. 北京: 科学出版社, 1990. 266-227.
- [29] 黄奇波, 康志强, 覃小群, 等. 习水县岩溶水系统 $\rho(\text{Sr}^{2+})$ 、 $\rho(\text{Sr})/\rho(\text{Ca})$ 、 $\rho(\text{Sr})/\rho(\text{Mg})$ 分布特征及其应用[J]. 地质科技情报, 2011, **30**(4): 98-103.
- Huang Q B, Kang Z Q, Qin X Q, *et al*. Distribution characteristics of Sr^{2+} , Sr/Mg , Sr/Ca and its applications in karst water system of Xishui County [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, **30**(4): 98-103.
- [30] 黄奇波, 覃小群, 唐萍萍, 等. 桂林地区不同类型岩溶地下水中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及意义[J]. 地球化学, 2013, **42**(1): 64-72.
- Huang Q B, Qin X Q, Tang P P, *et al*. The characteristic and significance of carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) and oxygen isotope ($\delta^{18}\text{O}$) value in different type of karst water in Guilin [J]. *Geochimica*, 2013, **42**(1): 64-72.

CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM _{2.5} in China Based on the LUR Model	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physicochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta	 HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer	 SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N ₂ O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and $\delta^{18}O$ in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City	 WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir	 ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding	 YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City	 WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i>	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region	 LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO ₂ -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field	 BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region	 QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO ₂ Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios	 TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)