

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

**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

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对PM<sub>2.5</sub>影响 ..... 段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)

京津冀内陆平原地区PM<sub>2.5</sub>浓度时空变化定量模拟 ..... 郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)

成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响 ..... 刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)

华山地区PM<sub>2.5</sub>中无机离子垂直分布特征 ..... 曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)

烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)成分图谱 ..... 谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)

长三角地区中小燃煤锅炉PM<sub>2.5</sub>成分谱特征 ..... 徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)

民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子 ..... 严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑容, 杨国威, 吴方琪 (1502)

冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素 ..... 张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)

青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度 ..... 李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)

辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配 ..... 张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)

典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露 ..... 李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)

苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平 ..... 王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)

上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响 ..... 杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)

城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性:以宁波市北仑区芦江为例 ..... 曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)

艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨 ..... 曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)

三峡澎溪河水华期间水体CH<sub>4</sub>浓度及其通量变化特征初探 ..... 秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)

漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源 ..... 苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)

柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价 ..... 张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)

黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析 ..... 刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)

白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 ..... 高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)

典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟 ..... 高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)

河道水旁路处理中试工艺中PPCPs的去除效果及机制 ..... 李力, 朱楦, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑勇 (1637)

茶普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价 ..... 樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵顺利, 王聿琳, 彭明国 (1645)

真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质 ..... 孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)

热活化过硫酸盐降解三氯生 ..... 蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆隽鹤 (1661)

水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律 ..... 徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)

海水优化ANAMMOX包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能 ..... 单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)

外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能 ..... 于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)

硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究 ..... 盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)

分段进水对改良A<sup>2</sup>/O-BAF双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响 ..... 南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)

不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化 ..... 梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)

智能化曝气控制A/O工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制 ..... 徐旻昉, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)

温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响 ..... 李玥, 胡奇, 高大文 (1731)

污泥臭原位减量工艺中抗生素的去除 ..... 汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)

零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响 ..... 杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1748)

环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响 ..... 陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)

后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性 ..... 张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)

复合菌株YH01+YH02强化SBR好氧反硝化脱氮及菌群结构分析 ..... 陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)

氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化 ..... 贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)

1株铜绿假单胞菌对苊的降解特性及代谢途径 ..... 李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)

铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子 ..... 李磊, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)

垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响 ..... 黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)

黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响 ..... 陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)

河岸带表层土壤的铁氨氧化(Feammox)脱氮机制的探究 ..... 丁帮环, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)

藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化 ..... 展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)

深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征 ..... 沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)

香港周边海域野生鱼体内DDTs和PCBs的含量分布和食用风险评估 ..... 苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)

偏远高山湿地土壤中PAHs污染特征:以神农架大九湖为例 ..... 胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)

西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征 ..... 孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)

广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估 ..... 宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)

长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响 ..... 张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)

三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响 ..... 辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)

稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系 ..... 王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)

钙基膨润土辅助对堆肥及土壤Cu、Zn形态转化和白菜吸收的影响 ..... 赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)

外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响 ..... 贺玉龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)

模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响 ..... 王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)

紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素 ..... 田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)

季节非对称升温对喀斯特土壤CO<sub>2</sub>释放的影响 ..... 唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)

《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)

# 漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源

苗迎<sup>1</sup>, 章程<sup>1\*</sup>, 肖琼<sup>1</sup>, 赵海娟<sup>1,2</sup>, 李成习<sup>3</sup>

(1. 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, 桂林 541004; 2. 西南大学地理科学学院, 岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715; 3. 中国冶金地质总局山东正元地质勘查院, 济南 250101)

**摘要:** 2016 年 9 月 28 日至 12 月 28 日期间对漓江段 13 个断面地表水进行取样, 取样频率为半月 1 次, 分析硝酸盐在旱季期间漓江段的时空变化特征, 并利用<sup>15</sup>N 和<sup>18</sup>O 同位素技术分析漓江段硝酸盐的来源. 结果表明: ①漓江水体中硝酸盐浓度范围为 0.46 ~ 18.48 mg·L<sup>-1</sup>, 平均值为 6.18 mg·L<sup>-1</sup>, 对比中国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)中规定的硝酸盐浓度(10 mg·L<sup>-1</sup>), 旱季漓江水体中硝酸盐污染程度处于较低水平. ②9 ~ 12 月期间漓江各断面处硝酸盐浓度呈现缓慢递增趋势, 主要受旱季降雨量、径流量及人类活动强度而变化; 硝酸盐浓度自漓江上游至下游表现出“增-减-增”的变化趋势, 主要是污染物逐级汇入且汇水量不断增加的结果. ③旱季漓江水体中硝酸盐的主要来源为土壤有机氮、人畜粪便和污水排放的混合源, 主要来源于居民生活污水、人畜粪便等. ④为了更好地保护漓江水水质, 建议加大城市排污管网的建设、修建小型污水处理设施、提高污水处理率及污水排放标准, 加强旅游环境管理和环境保护宣传, 提高游客环境保护意识.

**关键词:** 漓江; <sup>15</sup>N 同位素; <sup>18</sup>O 同位素; 硝酸盐; 动态变化; 来源

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1589-09 DOI: 10.13227/j.hjx.201708140

## Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River

MIAO Ying<sup>1</sup>, ZHANG Cheng<sup>1\*</sup>, XIAO Qiong<sup>1</sup>, ZHAO Hai-juan<sup>1,2</sup>, LI Cheng-xi<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. Geological Exploration Institute of Shandong Zhengyuan, China Metallurgical Geology Bureau, Ji'nan 250101, China)

**Abstract:** Dynamic variations and sources of nitrate during dry season in the Lijiang River were analyzed using the nitrate concentrations and <sup>15</sup>N and <sup>18</sup>O isotope techniques, from the samples obtained from 13 sections in the Lijiang River from September 28, 2016 to December 28, 2016. Results show that the nitrate concentrations range from 0.46 to 18.48 mg·L<sup>-1</sup>, with an average of 6.18 mg·L<sup>-1</sup>, and that the nitrate levels are low during the dry season. Nitrate concentrations in the Lijiang River increase slowly from September to December, mainly being influenced by rainfall, runoff, and human activity. Nitrate concentrations in the Lijiang River from upstream to downstream show a trend of “increase-decrease-increase.” Nitrate in the Lijiang River during the dry season mainly originates from organic nitrogen in soil, human and animal feces, sewage (largely living sewage), human and animal waste, and tourism. In order to better protect the water quality of the Lijiang River, the urban sewage pipe network must be expanded, in addition to building small sewage treatment facilities and strengthening tourism management and environmental awareness.

**Key words:** Lijiang River; <sup>15</sup>N isotope; <sup>18</sup>O isotope; nitrate; dynamic variation; source

河流是陆地水文循环的重要途径, 是水资源的重要来源. 随着社会进步和经济发展, 人类活动越来越活跃使得河流水质变得越来越不容乐观, 因此河流污染治理及保护已成为我国河流面临的重要问题. 许多学者对地表河流水质影响的研究结果表明, 硝酸盐浓度的不断增加是水质恶化的主要表现之一<sup>[1~4]</sup>. 水体中硝酸盐浓度过高不仅会促进水体富营养化<sup>[5]</sup>, 而且还严重威胁饮用水质量. 饮用水中硝酸盐浓度过高会直接影响人类身体健康, 如被还原为亚硝态氮后可能引起婴儿患高铁血红蛋白症, 容易引发肝癌、胃癌及高血压等疾病<sup>[6]</sup>. 水体中硝酸盐污染来源复杂, 不同的 $\delta^{15}\text{N}$ 特征值能够识别水

体中硝酸盐的不同来源<sup>[7~9]</sup>, 早期主要利用氮同位素技术识别氮源, 但由于不同污染源硝酸盐的初始 $\delta^{15}\text{N}$ 值存在重叠现象, 且 $\delta^{15}\text{N}$ 特征值会受混合作用、微生物作用以及反硝化作用等地球生物化学作用的

收稿日期: 2017-08-17; 修订日期: 2017-10-16

基金项目: 中国地质科学院基本科研业务费项目(YYWF201639); 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2015007, 2014022); 中南半岛 5 国水文与环境地质合作编图(DD20160111); 广西自然科学基金项目(2016GXNSFAA380064); 重庆市自然科学基金项目(CSTC2016JCYJYS0003)

作者简介: 苗迎(1987~), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为岩溶地下水污染、岩溶水文地质, E-mail: miaoying.1988@karst.ac.cn

\* 通信作者, E-mail: chzhang@karst.ac.cn

影响引起同位素分馏，这时单独利用 $\delta^{15}\text{N}$ 特征值不容易识别出真正的污染源，所以可同时采用 $\delta^{18}\text{O}$ 作为判断水体中硝酸盐污染源的辅助手段<sup>[10~12]</sup>。

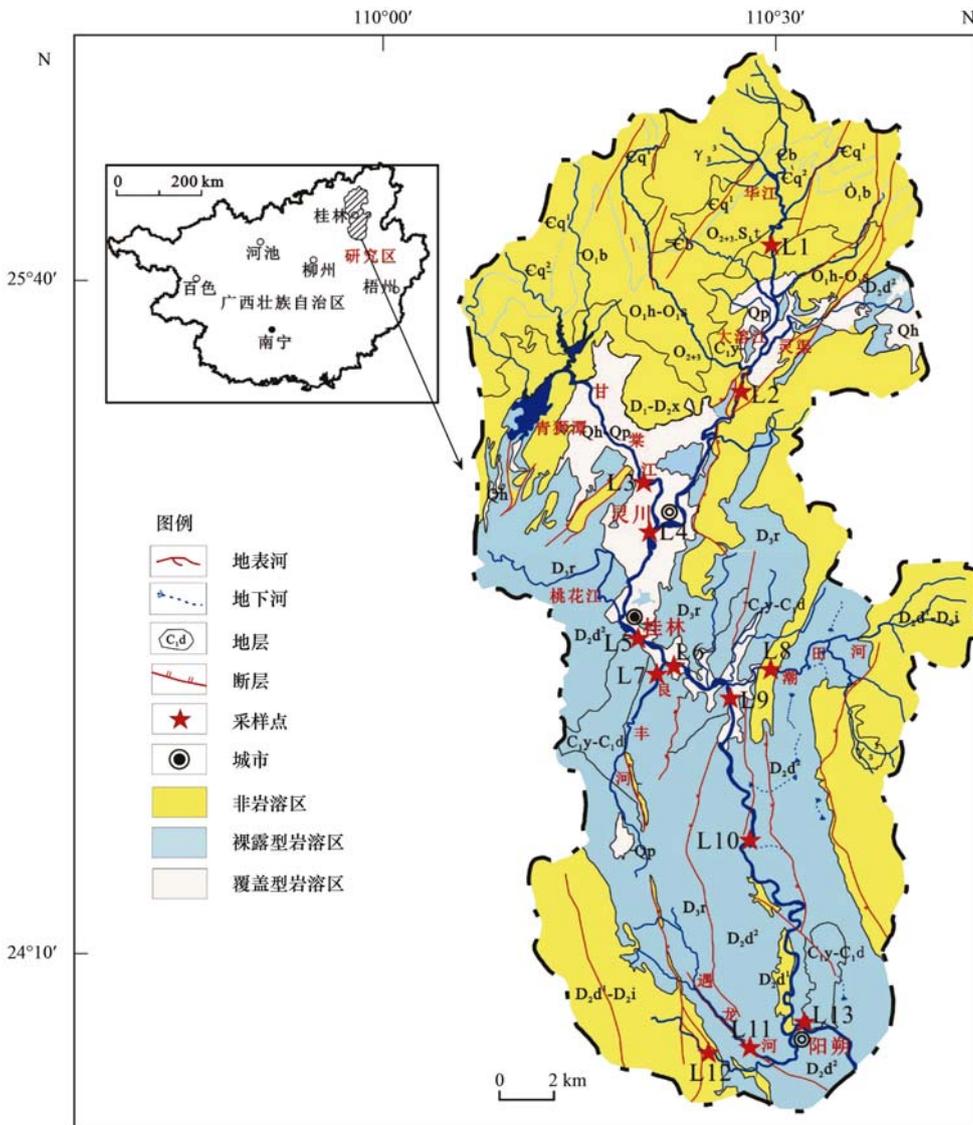
桂林是世界著名的旅游城市，而漓江则是世界最美的山水画廊。随着旅游业不断发展，一方面农业、游客食住行和居民生活污染物持续大量地输入河流，另一方面游船的增设增加了河水的扰动，这些均使得河流生态系统的结构和平衡受到了破坏，河流的自净能力和生态功能减弱，进一步加剧了河流的污染<sup>[13~16]</sup>。从3万年前宝积山上的先民把桂林带入人类文明以来，桂林人始终逐水而居，依靠着漓江的水源生活和发展。据桂林水利部门统计桂林市区每年利用的2.5亿 $\text{m}^3$ 地表水总量中有81.6%以漓江为直接饮用水水源，流域内周边县镇

用水情况与市区基本相同<sup>[17]</sup>。因此，分析漓江水体中硝酸盐的来源，揭示硝酸盐来源的时空变化特征，定制有效的控制硝酸盐的输入途径，净化漓江水水质，对桂林市的饮用水供水安全和旅游业可持续发展具有重要的社会意义。

### 1 研究区概况

#### 1.1 水文地质

漓江流域发源于兴安县猫儿山，属于珠江水系西江一级支流桂江的上游段。漓江上游主流称六峒河，自兴安县东纳黄柏江，西受川江，合流称溶江，由溶江镇汇灵渠水，自北向南依次流经灵川县、桂林市城区、阳朔县、平乐县，最终汇入西江，全长229 km，流域面积约6 050  $\text{km}^2$ <sup>[18]</sup>。如图1所示，漓



此图修改自文献[22]

图1 研究区水文地质略图及采样点位置

Fig. 1 Map of the sampling sites and hydrogeology of the study area

江上游段地层主要为下部古生界 ( $Pz_1$ ) 浅变质碎屑岩系和下泥盆统至中泥盆统下组 ( $D_1 \sim D_{2x}$ ) 红色碎屑岩系, 组成了北部碎屑岩常态中低山; 中下游段地层主要为中泥盆统东岗岭阶 ( $D_{2d}$ )、上泥盆统融县组 ( $D_{3r}$ )、下石炭统岩关阶 ( $C_{1y}$ )、大塘阶 ( $C_{1d}$ ) 碳酸盐岩, 形成了中南部以峰丛洼(谷)地、峰林平原为主的典型岩溶地貌, 整体地形表现为北高南低<sup>[19]</sup>(图 1)。

研究区地处低纬, 属亚热带季风气候。年平均气温为 19.3℃, 年平均无霜期 309 d, 年平均降雨量 1 949.5 mm, 年平均相对湿度为 73%~79%, 年平均日照时数为 1 670 h, 全年风向以偏北风为主<sup>[20]</sup>。漓江为雨源型河流, 河道径流主要接收流域降雨补给, 年内各月径流分配与流域降水量年内分配相似。漓江汛期为每年的 3~8 月, 5~6 月水位达到最高, 其降雨量占全年降雨量的 70% 左右, 枯水期为 9 月~翌年 2 月, 降雨稀少<sup>[21]</sup>。

## 1.2 社会经济状况

漓江源头至近灵川县城段土地利用类型主要为灌丛林地, 人口稀少, 人类活动简单, 居住和耕地主要分布在河流两岸地势相对平缓的区域; 灵川县城至桂林市区段是人口居住密集, 也是人类活动最活跃的区域, 灵川县主要为工农业生产和交通运输, 桂林市区主要为商业、旅游业和交通; 桂林市区至阳朔段有大量的游轮和竹筏来往频繁, 河流两岸农家乐、餐馆、旅店密集分布。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

自 2016 年 9 月 28 日到 2016 年 12 月 28 日, 对漓江段 13 个断面(见图 1)地表水进行取样分析, 取样频率为半月 1 次。阴离子 ( $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$ 、 $Cl^-$ ) 采用 50 mL 聚乙烯瓶采集, 为尽量减小误差, 采样前先用待采水样洗涤采样瓶 3~5 次, 采样后尽量保证采样瓶中无气泡, 密封保存; 氮氧同位素 ( $\delta^{15}N-NO_3^-$ 、 $\delta^{18}O-NO_3^-$ ) 采样前先用直径 70 mm、孔径 0.7  $\mu m$  的玻璃纤维膜过滤待采水样, 之后采样过程同阴离子。采样后, 样品应尽量避光、4℃ 低温保存, 并尽快送往实验室。

### 2.2 样品测试

阴离子浓度在广西/国土资源部岩溶动力学重点实验室使用美国戴安公司 ICS-900 离子色谱仪进行分析测试, 阴离子分析误差 < 5%<sup>[23]</sup>。氮氧同位素冷冻运输送至国家海洋局第三海洋研究所测试中

心进行测试分析, 测定水体中硝酸盐氮氧同位素的分析方法为改进的化学转化法, 分析仪器为美国 Thermo Fisher Scientific 公司的同位素质谱仪(型号: Mat253),  $\delta^{15}N$  和  $\delta^{18}O$  的测试精度分别为 0.25‰ 和 0.6‰, 具体测试方法如下。

**水样 pH 值预分析:** 为了使硝酸盐还原和叠氮化反应在适宜的 pH 条件下进行, 需要对水样 pH 值进行预先分析测定, 并利用 10% 盐酸和 2 mol·L<sup>-1</sup> 的咪唑溶液进行 pH 值调节, 使其处于 6~8 的 pH 条件范围内, 满足铵镉还原法对硝酸盐还原的最佳条件。

**亚硝酸盐/硝酸盐比值预分析:** 通常水样中硝酸盐浓度量级是亚硝酸盐浓度量级的 2 倍以上, 可以忽略亚硝酸在叠氮化反应步骤转化生成的氧化亚氮 ( $N_2O$ ) 的信号值。由文献[14]可知, 本次样品中亚硝酸盐浓度可以忽略不计。

**硝酸盐还原:** 取 40 mL 水样于 60 mL 顶空瓶中, 加入 0.8 mL 20 g·L<sup>-1</sup>  $CdCl_2$  溶液、0.8 mL 250 g·L<sup>-1</sup>  $NH_4Cl$  溶液、3×10 cm 4N(或者 3N) 洁净锌片(Zn), 在摇床上以 220 r·min<sup>-1</sup> 转速振荡 10 min。取出锌片, 密闭顶空瓶, 完成硝酸盐还原步骤。

**叠氮化反应:** 向经硝酸盐还原后的顶空瓶中加入 2 mL 2 mol·L<sup>-1</sup> 的  $NaN_3$  和 20%  $CH_3COOH$  的 1:1 混合液, 剧烈振荡使反应充分。之后同样以 220 r·min<sup>-1</sup> 转速振荡 30 min, 最后加入 1.2 mL 6 mol·L<sup>-1</sup> 的  $NaOH$  溶液作为终止剂, 结束叠氮化反应。

**上机测试:** 反应后的水样用同位素质谱仪进行测试。

## 3 结果与讨论

### 3.1 硝酸盐动态变化

2016 年 9 月 28 日到 2016 年 12 月 28 日  $NO_3^-$  浓度变化如表 1 所示。漓江水体中  $NO_3^-$  浓度在 0.46~18.48 mg·L<sup>-1</sup> 之间, 平均值为 6.18 mg·L<sup>-1</sup>, 根据中国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006) 中硝酸盐浓度规定限值为 10 mg·L<sup>-1</sup> 来判断, 旱季漓江支流断面 L7 中  $NO_3^-$  浓度超标, 漓江支流断面 L3、漓江干流断面 L5、L6、L9 和 L10 仅个别时间段超标。总体上来看, 漓江各断面  $NO_3^-$  污染程度仍处于较低水平, 但应加强对污染源的控制, 保护漓江水质。

#### 3.1.1 硝酸盐时间变化

本次采样期共计 92 d, 其中, 降雨天数 27 d, 总降雨量 74.3 mm。分别计算漓江 13 个断面处硝

表 1 2016 年旱季漓江各断面处样品测试结果<sup>1)</sup>

Table 1 Results of samples in Lijiang River during the dry season of 2016

指标	日期 (月-日)	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	09-28	1.23	2.26	5.55	3.41	4.06	6.06	10.52	7.31	6.66	6.02	7.50	1.93	6.98
	10-15	1.21	2.67	5.67	3.02	4.41	6.68	11.86	7.78	5.88	7.15	6.91	1.18	6.99
	10-30	3.00	3.94	9.20	3.89	6.57	11.36	13.69	4.64	7.85	6.81	6.72	3.65	6.95
	11-17	0.69	0.93	2.63	1.21	1.83	0.90	12.92	6.88	1.12	11.12	0.76	0.46	1.41
	12-5	2.52	4.58	4.12	3.80	10.68	10.01	15.72	3.89	6.58	6.25	7.85	4.69	7.87
	12-17	2.61	3.92	4.96	2.61	6.00	9.15	17.27	6.53	8.20	8.93	6.92	3.17	7.11
	12-28	3.87	4.97	18.06	5.79	9.80	8.00	18.48	6.23	10.88	9.79	7.12	3.29	8.39
δ <sup>15</sup> N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /‰	09-28	2.5	3.1	4.3	3.8	2.7	3.9	3.0	4.0	3.1	6.2	3.7	5.3	5.0
	10-15	3.3	4.2	4.6	4.4	4.8	4.3	—	4.3	4.2	5.2	ND	4.0	5.2
	10-30	1.8	—	-0.2	3.3	-0.3	—	—	2.6	ND	ND	-0.4	2.5	ND
	11-17	4.7	4.7	5.0	4.3	4.7	4.1	3.6	4.8	4.5	4.4	6.1	5.0	4.9
	12-5	ND	4.6	8.9	4.4	4.9	3.8	2.6	3.4	4.5	5.5	4.4	5.5	4.1
	12-17	3.5	3.9	7.8	4.0	6.0	4.5	3.8	4.1	5.4	5.5	2.9	5.8	3.3
	12-28	1.8	2.2	0.0	1.4	1.5	1.8	1.6	3.1	2.9	2.4	3.0	3.5	2.5
δ <sup>18</sup> O-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /‰	09-28	8.4	8.1	8.4	7.5	6.2	6.1	8.9	9.8	4.9	7.8	8.5	7.6	10.0
	10-15	6.6	9.9	7.8	7.7	7.9	8.4	—	9.5	6.6	6.2	ND	5.9	8.0
	10-30	7.1	ND	6.0	7.8	4.1	—	—	9.9	ND	ND	5.8	7.1	ND
	11-17	9.7	9.9	9.6	9.2	9.6	9.6	10.8	9.2	10.2	9.2	11.1	10.0	9.6
	12-5	ND	10.4	12.7	10.4	10.8	8.1	9.6	9.6	8.7	9.6	11.0	10.8	9.4
	12-17	11.9	10.1	11.1	8.5	11.7	9.7	9.8	10.5	9.6	9.1	9.6	10.2	8.3
	12-28	9.1	11.4	8.9	10.2	9.7	9.4	9.2	10.3	10.0	9.7	11.0	9.5	9.2

1) “—”表示样品丢失, “ND”表示样品未检出

酸盐浓度随时间变化曲线的线性回归方程, 可知漓江各干流断面处 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度均随着时间的推移缓慢递增. 如图 2 所示, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度最高值为 11.36 mg·L<sup>-1</sup>, 出现在 10 月 30 日 L6 断面处, 最低值为 0.69 mg·L<sup>-1</sup>, 出现在 11 月 17 日 L1 断面处. 9 月 28 日至 10 月 30 日期间, 降雨量仅 0.3 mm, 导致河流径流量减少, 物质携带能力差. 据统计 2016 年“十一”黄金周期间漓江接待游客量达 6 万人次<sup>[24]</sup>, 为漓江增加了大量的生活污水, 因此 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度增加. 另外, “十一”黄金周之后 10 月 15 日的测量数据表明, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度没有大幅度增加, 这可以说明在黄金周过后的一周时间内, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 得到了有效地降解, 这表示漓江仍具有良好的自净能力和生态功能, 应注意保护; 10 月 30 日至 11 月 17 日期间, 除漓江主干流断面 L10 之外, 其他断面处 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度均呈现锐减的现象, 这主要是 11 月 7 日到 11 月 17 日 11 d 时间内连续 9 d 降雨, 降雨量达到 30 mm, 导致污染物浓度被稀释所造成的; 11 月 17 日至 12 月 28 日降雨总量达到 38 mm, 但是降雨时间不连续导致河流径流量没有增加, 没有达到一定的阈值使 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度稀释, 因此 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度继续缓慢增加. 总体来看大气降水和径流量变化是导致 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 变化的主导因素.

漓江各支流断面处 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度随着时间的推移呈现波动变化, 支流断面 L3 和 L7 呈现较快速递增趋势, L12 呈现缓慢递增趋势, L8 和 L11 却呈现缓慢递减趋势, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度最高值为 18.48 mg·L<sup>-1</sup>, 出现在 12 月 28 日 L7 断面处, 最低值为 0.46 mg·L<sup>-1</sup>, 出现在 11 月 17 日 L12 断面处. 同漓江各干流相同, 随着旱季的到来, 漓江支流径流量也随着降雨量的逐渐减少而减少, 污染物的浓度应随着逐渐增加. 然而, L8 和 L11 呈现相反变化趋势, 这可能和人类活动的活跃程度降低有关, L8 为漓江支流潮田河, L11 为漓江支流遇龙河漂流段, 随着时间的推移, 天气逐渐变凉, 潮田河边的农家乐和野炊活动逐渐减少, 遇龙河上的竹筏漂流以及河边游客量逐渐减少, 均导致污染物排放量减少, 叠加河水径流量减少的现象, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度逐渐减少说明人类活动对这两个断面的影响大于大气降水和径流量的减少.

综上所述, 旱季漓江各断面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度基本随降雨量和河水径流量的减少而增加, 这表明大气降水和河水径流量是控制旱季漓江水体中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度的主要因素, 其他影响因素还有人类活动、河流自净能力、污染物排放量等.

### 3.1.2 硝酸盐空间分布特征

如图 3 所示, 将漓江段划分为上游(L1 ~ L4)、

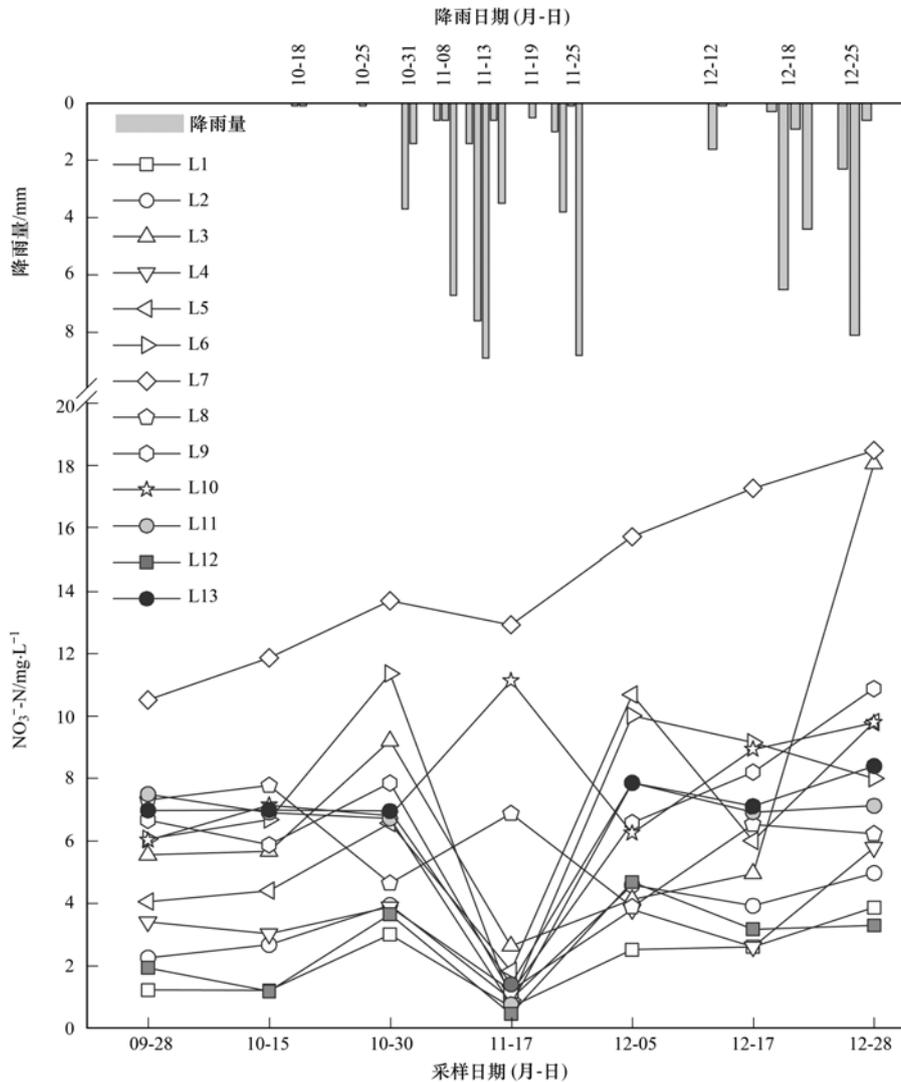


图2 2016年漓江断面旱季 $\text{NO}_3^-$ 浓度及降雨量分布

Fig. 2 Distribution of  $\text{NO}_3^-$  and precipitation in the mainstream of the Lijiang River during the dry season of 2016

中游(L5~L9)和下游(L10~L13),旱季期间漓江上游 $\text{NO}_3^-$ 平均浓度为 $4.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,中游 $\text{NO}_3^-$ 平均浓度为 $8.18\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,下游 $\text{NO}_3^-$ 平均浓度为 $5.85\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,浓度分布整体上为上游<下游<中游.漓江上游干流断面L1、L2、L4的土地利用类型主要为林地、灌木丛以及少量耕地,随着人类活动程度逐渐增多, $\text{NO}_3^-$ 浓度逐渐增加,漓江支流(甘棠江)断面L3穿过灵川县城,由于灵川县城区内人类活动频繁,其 $\text{NO}_3^-$ 浓度相比上游干流断面高出2~6倍,而断面L4的 $\text{NO}_3^-$ 浓度低于支流断面L3但高于干流断面L2,这表明人类活动减弱以及河水稀释自净作用、河流交汇所引起的河水扰动是导致 $\text{NO}_3^-$ 浓度降低的主导因素;漓江中游干流断面L5、L6、L9和支流断面L7、L8位于桂林市区,由图3可知,支流断面L7、L8处 $\text{NO}_3^-$ 浓度均高于干流断

面,尤其是旱季期间支流断面L7处 $\text{NO}_3^-$ 浓度高于中国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)中规定的硝酸盐浓度限值( $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),主要是由于两条支流流经桂林市郊区,生活污水没有汇入城市排水管网,并且农家乐活动盛行,人类活动十分频繁,导致水体中 $\text{NO}_3^-$ 浓度普遍较高;漓江下游干流断面L10和L13处 $\text{NO}_3^-$ 浓度与中游干流断面L5、L6和L9基本一致,这是因为桂林市区至阳朔段漓江两岸的主要人类活动为以游客为主的江上游览和江边食宿活动,类似线状污染,使得该段漓江水体中 $\text{NO}_3^-$ 浓度变化不大;漓江下游支流断面L11和L12在L13断面之前汇入漓江,由图3可知,断面L11处 $\text{NO}_3^-$ 浓度远远高于L12,主要原因为遇龙河(L11)是最精华的旅游观光地,遇龙河上的竹筏漂流以及两岸的秀丽山峰都令游客趋之若鹜,而金宝

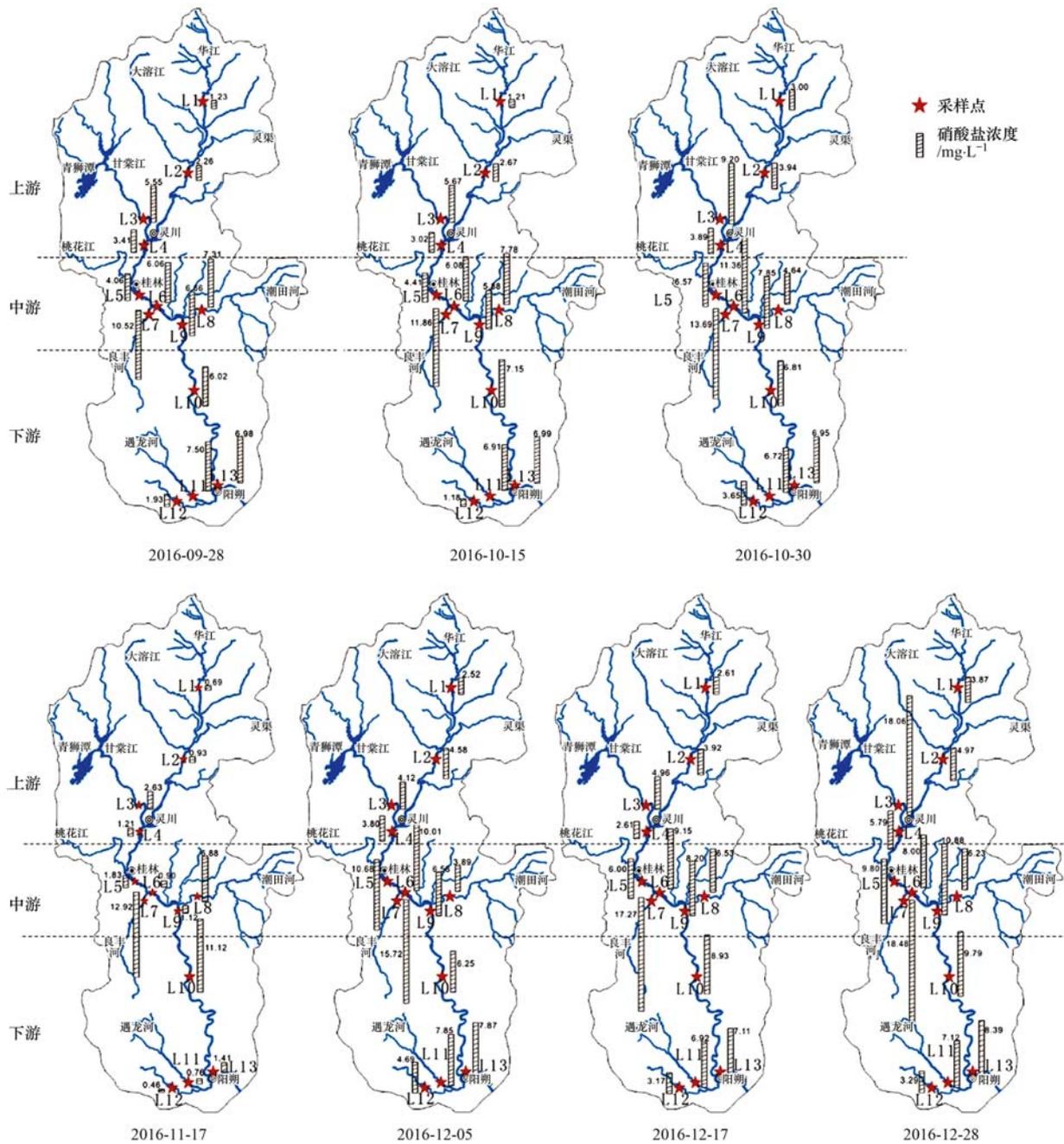


图3 旱季 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 在漓江断面分布

Fig. 3 Distribution of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in the Lijiang River during the dry season

河(L12)则以居民生活和农田为主.

综上所述,旱季期间漓江 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度呈现先增加(上游-中游)再减少(中游-下游)的趋势,主要受土地利用类型和人类活动频繁程度的影响,由于污染物的逐段汇入并且汇入量的不断增加,加重了漓江的自净能力和生态功能.

### 3.2 硝酸盐来源解析

氮迁移过程中会发生氮同位素分馏作用,包括氨气的挥发作用、硝化作用、反硝化作用、离子交

换作用和扩散作用等,而矿化作用、同化作用和固氮作用产生的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的 δ<sup>15</sup>N 值与初始反应物的 δ<sup>15</sup>N 值一致,具有较小的同位素分馏<sup>[25,26]</sup>. 氮同位素分馏引起自然界含氮物质 δ<sup>15</sup>N 值的显著差异<sup>[27]</sup>,也对有效识别 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 来源造成了一定困难. 由文献[14]可知漓江水体中没有大量 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 积累,即不存在氨气挥发的可能性;土壤微生物的硝化作用会导致 δ<sup>18</sup>O 的值处于 -10‰ ~ -7‰ 之间<sup>[28]</sup>,可知漓江水体中不存在硝化作用;由 δ<sup>15</sup>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (‰) 和 δ<sup>18</sup>O-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

(‰)之间的线性关系图(图4)可知,  $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的比值为0.42,并不在1.3~2.0<sup>[29]</sup>的范围内,因此漓江水体中不存在反硝化作用,这一点从漓江水体溶解氧的浓度在1.56~19.30  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间也可以确定;固氮作用所引起的同位素分馏比较微弱,仅为-3‰~1‰,一般可忽略不计<sup>[28]</sup>.国内外众多研

究者<sup>[7,30~34]</sup>对不同硝酸盐污染源中 $\delta^{15}\text{N}$ 特征值变化范围研究结果主要为:大气沉降-13‰~13‰,土壤有机氮0‰~8‰,粪肥5‰~25‰,人造肥-6‰~6‰,污水4‰~19‰.  $\delta^{18}\text{O}$ 特征值变化范围研究结果主要为:大气沉降25‰~75‰,人造肥18‰~24‰,土壤有机氮、粪肥、污水-5‰~15‰.

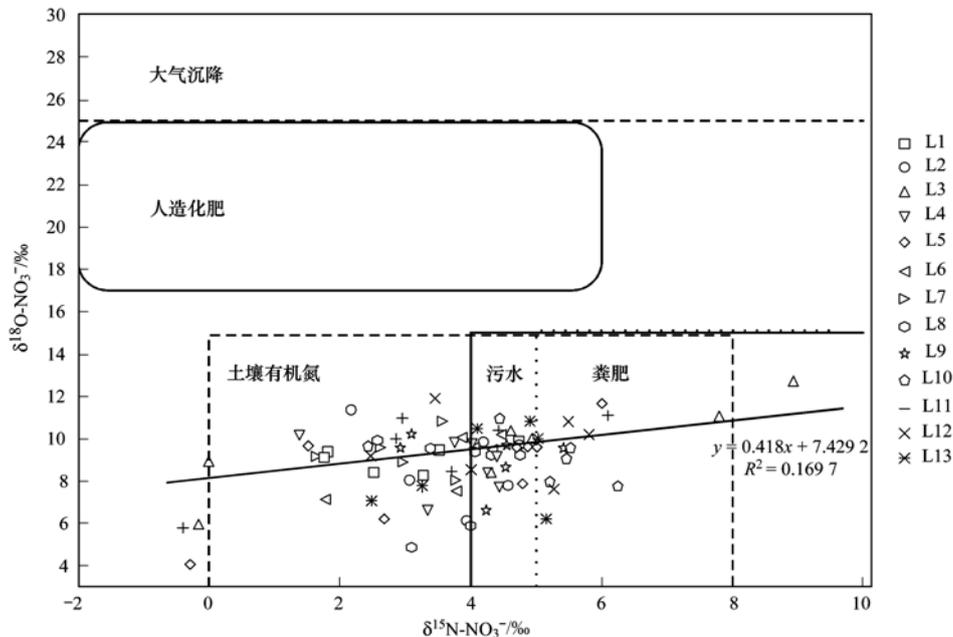


图4 旱季漓江各断面处地表水 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 关系

Fig. 4 Relationship diagram of  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  in  $\text{NO}_3^-$  in the water of the Lijiang River during the dry season

本研究自2016年9月28日至12月28日每半月采集一次水样监测分析 $^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 的同位素值,共计7次.将所测得的数据投影于 $\text{NO}_3^-$ 氮氧同位素关系图上(图4),由图4可知, $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化范围为-0.4‰~8.9‰, $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围为4.1‰~12.7‰,二者均反映出旱季漓江水体中硝酸盐的主要来源为土壤有机氮、人畜粪便和污水排放的混合源,根据水体流经各断面的土地利用类型、人类活动等方面来大致区分硝酸盐的来源.

漓江上游干流断面L1处,土地利用类型主要为林地、灌木丛,人类活动仅为少量交通运输,因此L1处硝酸盐的主要来源应为土壤有机氮;L1断面至L2断面、L2断面至L4断面以及自青狮潭水库至漓江支流断面L3,土地利用类型均以林地、灌木丛为主,部分为耕地,其中部分河道流经村庄,排污小且漓江水体自净能力高,因此硝酸盐来源应以土壤有机氮为主,可能有未经漓江水体自净完全的人畜粪便和生活污水;L4断面流经桂林市区至L5断面,人口居住密集,人类活动频繁,虽然市政管网建设完善,但仍有偷排现象,因此硝酸盐来源

主要应为生活污水;L5断面至L6断面、L6断面至L9断面以及漓江支流相思江(L7)、潮田河(L8),土地利用类型均以耕地为主,部分为林地和灌木丛,村庄密集分布在河道两岸,并且生活污水没有进入市政管网,因此硝酸盐来源主要应为人畜粪便和生活污水;L9断面至L10断面、L10断面至L13断面,土地利用类型均以林地、灌木丛为主,部分为耕地,村庄零星分布在河道两岸,另外该段河道是漓江游览的黄金水道,每天有大量的邮轮和竹筏来往于江面,因此旅游旺季硝酸盐来源主要应为人畜粪便和生活污水,淡季为土壤有机氮;漓江支流遇龙河(L11)、金宝河(L12)土地利用类型均以林地、灌木丛为主,部分为耕地,村庄零星分布在河道两岸,硝酸盐来源应以土壤有机氮为主.

#### 4 结论

(1)旱季漓江水体中 $\text{NO}_3^-$ 浓度在0.46~18.48  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均值为6.18  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .总体上来看,漓江水体中 $\text{NO}_3^-$ 浓度符合中国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006),仍具有良好的自净能力和

生态功能.

(2) 旱季漓江水体  $\text{NO}_3^-$  浓度动态变化明显. 中游市区段  $\text{NO}_3^-$  浓度最高, 下游阳朔段次之, 上游最低,  $\text{NO}_3^-$  浓度受到降雨稀释、径流携带和人类活动的影响较大.

(3) 旱季漓江水体中硝酸盐的主要来源为土壤有机氮、人畜粪便和污水排放的混合源, 主要受人类活动的影响, 尤其旅游活动对河流水体硝酸盐污染有重要影响.

(4) 本研究表明旱季漓江水体中  $\text{NO}_3^-$  污染程度仍处于较低水平, 但是仍要加强对污染源的控制, 保护漓江水质. 建议加大城市排污管网的建设, 减少生活污水向漓江的直接排放, 尤其是在农村及郊区等人口密集区修建小型污水处理设施; 加强旅游环境管理和环境保护宣传, 减少游客在食住行等活动中对漓江的污染.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 王倩, 吴亚东, 丁庆玲, 等. 西太湖入湖河流水系污染时空分异特征及解析[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(7): 2699-2707.  
Wang Q, Wu Y D, Ding Q L, *et al.* Temporospatial variations and influential factors of water quality in the flowing river systems of western Taihu Lake Basin[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(7): 2699-2707.
- [ 2 ] 李文赞, 李叙勇, 王慧亮, 等. 濠阳河主要水环境污染物质空间分布特性研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(11): 2814-2819.  
Li W Z, Li X Y, Wang H L, *et al.* Spatial distribution of the main contaminations in aquatic environment in Fuyang River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(11): 2814-2819.
- [ 3 ] 张亚丽, 张依章, 张远, 等. 太子河流域地表水和地下水硝酸盐污染特征及来源分析[J]. 中国生态农业学报, 2014, **22**(8): 980-986.  
Zhang Y L, Zhang Y Z, Zhang Y, *et al.* Characteristics and potential sources of nitrate pollution in surface water and groundwater systems in Taizihe River Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, **22**(8): 980-986.
- [ 4 ] 黄强盛, 李清光, 卢玮琦, 等. 滇池流域地下水、河水硝酸盐污染及来源[J]. 地球与环境, 2014, **42**(5): 589-596.  
Huang Q S, Li Q G, Lu W Q, *et al.* Characteristics and potential sources of nitrate pollution in groundwater and river water in the Dianchi Lake Basin[J]. Earth and Environment, 2014, **42**(5): 589-596.
- [ 5 ] Camargo J A, Alonso ú. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: a global assessment[J]. Environment International, 2006, **32**(6): 831-849.
- [ 6 ] Macilwain C. US report raises fears over nitrate levels in water [J]. Nature, 1995, **377**(6544): 4.
- [ 7 ] 邢萌, 刘卫国, 胡婧. 沪河、滂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.  
Xing M, Liu W G, Hu J. Using nitrate isotope to trace the nitrogen pollution in Chanhe and Laohe River[J]. Environmental Science, 2010, **31**(10): 2305-2310.
- [ 8 ] Weng T N, Liu C W, Kao Y H, *et al.* Isotopic evidence of nitrogen sources and nitrogen transformation in arsenic-contaminated groundwater[J]. Science of the Total Environment, 2017, **578**: 167-185.
- [ 9 ] Cao W Z, Huang Z, Zhai W D, *et al.* Isotopic evidence on multiple sources of nitrogen in the northern Jiulong River, Southeast China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, **163**: 37-43.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] Savard M M, Somers G H, Smirnov 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.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 杜文越, 何若雪, 何师意, 等. 桂江上游水化学特征变化及离子来源分析——以桂林断面为例[J]. 中国岩溶, 2017, **36**(2): 207-214.  
Du W Y, He R X, He S Y, *et al.* Variation of hydrochemical characteristics and the ion source in the upstream of Guijiang River: a case study in Guilin section [J]. Carsologica Sinica, 2017, **36**(2): 207-214.
- [ 14 ] 申豪勇, 姜光辉, 郭芳, 等. 漓江桂林市区段三氮分布特征及影响因素分析[J]. 中国岩溶, 2015, **34**(4): 369-374.  
Shen H Y, Jiang G H, Guo F, *et al.* Distribution characteristics and influence factors of the ammonia, nitrite and nitrate in the Lijiang River, Guilin City [J]. Carsologica Sinica, 2015, **34**(4): 369-374.
- [ 15 ] 林鹏, 陈余道, 夏源. 漓江流域不同土地利用类型下水体污染类型与成因[J]. 桂林理工大学学报, 2016, **36**(3): 539-544.  
Lin P, Chen Y D, Xia Y. Types and causes of water pollution under different land use types in Lijiang River Basin [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2016, **36**(3): 539-544.
- [ 16 ] 代俊峰, 杨艺, 方荣杰, 等. 漓江流域上游水质分析和污染物定量分割[J]. 中国农村水利水电, 2017, (4): 67-71.  
Dai J F, Yang Y, Fang R J, *et al.* Water quality analysis and segmentation of the pollution loads in different spatial scales of the upstream of Lijiang River [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017, (4): 67-71.
- [ 17 ] 韦杰. 桂林漓江景区生态环境保护探讨[J]. 绿色科技, 2016, (22): 36-38, 41.
- [ 18 ] 蔡德所, 马祖陆. 漓江流域的主要生态环境问题研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2008, **26**(1): 110-112.  
Cai D S, Ma Z L. Main ecological problems in Lijiang River Watershed [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2008, **26**(1): 110-112.

- [19] 茹锦文, 周世英, 李淑莹, 等. 漓江流域整治的综合研究 [M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 1988. 5-10.  
Ru J W, Zhou S Y, Li S Y, *et al.* The comprehensive study of Lijiang River Watershed management [M]. Guilin: Guangxi Normal University Press, 1988. 5-10.
- [20] 搜狗百科. 桂林 [EB/OL]. <http://baike.sogou.com/v135872.htm?fromTitle=%E6%A1%82%E6%9E%97>.
- [21] 韩耀全, 周解, 吴祥庆. 漓江的自然地理与水质调查[J]. 广西水产科技, 2007, (2): 8-16.
- [22] 赵海娟, 肖琼, 吴夏, 等. 漓江地表水体有机碳来源[J]. 环境科学, 2017, 38(8): 3200-3208.  
Zhao H J, Xiao Q, Wu X, *et al.* Sources of organic carbon in the surface water of Lijiang River [J]. Environmental Science, 2017, 38(8): 3200-3208.
- [23] HJ 84-2016, 水质 无机阴离子 ( $F^-$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_2^-$ 、 $Br^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $PO_4^{3-}$ 、 $SO_3^{2-}$ 、 $SO_4^{2-}$ ) 的测定 离子色谱法[S].
- [24] 广西旅游网. 2016 年国庆假期旅游信息综述(第 1-7 号文) [EB/OL]. <http://www.gxta.gov.cn/home/list?signname=hjzjlytj>.
- [25] 王丽丽. 基于同位素分析法的氮识别技术及迁移规律研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2012. 3.  
Wang L L. The identify and the migration of nitrogen on isotopic analysis method [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2012. 3.
- [26] Kendall C, McDonnell J J. Isotope tracers in catchment hydrology[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 1998. 519-576.
- [27] 王东升. 氮同位素比 ( $^{15}N/^{14}N$ ) 在地下水氮污染研究中的应用基础[J]. 地球学报, 1997, 18(2): 220-223.  
Wang D S. Basis for the use of nitrogen isotopes to identify nitrogen contamination of groundwater [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1997, 18(2): 220-223.
- [28] Tu J. Spatial variations in the relationships between land use and water quality across an urbanization gradient in the watersheds of northern Georgia, USA[J]. Environmental Management, 2013, 51(1): 1-17.
- [29] Böettcher J, Strelbel O, Voerkelius S, *et al.* Using isotope fractionation of nitrate-nitrogen and nitrate-oxygen for evaluation of microbial denitrification in a sandy aquifer[J]. Journal of Hydrology, 1990, 114(3-4): 413-424.
- [30] 陈自祥, 柳后起, 刘广, 等. 淡水水体中氮污染源的识别——利用硝酸根中氮和氧同位素组成[J]. 环境化学, 2012, 31(12): 1855-1864.  
Chen Z X, Liu H Q, Liu G, *et al.* Tracing nitrogen sources and cycle in freshwater system using nitrogen and oxygen isotopic values in nitrate[J]. Environmental Chemistry, 2012, 31(12): 1855-1864.
- [31] 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.  
Ren Y F, Zhang X Y, Wang X K, *et al.* Application of nitrogen and oxygen isotopes in study of nitrate sources in Beijing urban rivers[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(5): 1636-1640.
- [32] Xue D M, Botte J, De Baets B, *et al.* Present limitations and future prospects of stable isotope methods for nitrate source identification in surface-and groundwater[J]. Water Research, 2009, 43(5): 1159-1170.
- [33] Fenech C, Rock L, Nolan K, *et al.* The potential for a suite of isotope and chemical markers to differentiate sources of nitrate contamination: a review[J]. Water Research, 2012, 46(7): 2023-2041.
- [34] 徐志伟, 张心昱, 于贵瑞, 等. 中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展[J]. 环境科学, 2014, 35(8): 3230-3238.  
Xu Z W, Zhang X Y, Yu G R, *et al.* Review of dual stable isotope technique for nitrate source identification in surface-and groundwater in China [J]. Environmental Science, 2014, 35(8): 3230-3238.

## CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM <sub>2.5</sub> .....	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM <sub>2.5</sub> Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu .....	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM <sub>2.5</sub> at Mt. Huashan, Inland China .....	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM <sub>2.5</sub> ) Produced by Burning Fireworks .....	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region .....	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion .....	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring .....	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao .....	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay .....	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas .....	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City .....	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai .....	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River; A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo .....	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region .....	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinigeer·Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH <sub>4</sub> Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River .....	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River .....	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments .....	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River .....	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake .....	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta .....	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process .....	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen; Removal, Transformation and Risk Assessment .....	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine .....	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation .....	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water .....	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater .....	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition .....	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads .....	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A <sup>2</sup> /O-BAF System .....	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control .....	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process .....	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater .....	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process .....	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process .....	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge .....	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process .....	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02 .....	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances .....	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain .....	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings .....	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin .....	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region .....	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feamnox in the Surface Soils of a Riparian Zone .....	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding .....	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China .....	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment .....	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajuhu Lake, Shengongjia .....	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China .....	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi .....	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It .....	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment .....	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains .....	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage .....	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern .....	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland .....	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission .....	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO <sub>2</sub> Release in Karst Region .....	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)