

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析 ..... 包良满,刘江峰,雷前涛,李晓林,张桂林,李燕 ( 1 )

中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平 ..... 林海涛,李琦路,张干,李军 ( 10 )

广州城区秋冬季大气颗粒物中WSOC吸光性研究 ..... 黄欢,毕新慧,彭龙,王新明,盛国英,傅家谟 ( 16 )

南京地区大气PM<sub>2.5</sub>潜在污染源硫碳同位素组成特征 ..... 石磊,郭照冰,姜文娟,芮茂凌,曾钢 ( 22 )

青奥会前后南京PM<sub>2.5</sub>重金属污染水平与健康风险评估 ..... 张恒,周自强,赵海燕,熊正琴 ( 28 )

南昌市秋季大气PM<sub>2.5</sub>中金属元素富集特征及来源分析 ..... 林晓辉,赵阳,樊孝俊,胡恭任,于瑞莲 ( 35 )

南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究 ..... 马佳,于兴娜,安俊琳,朱彬,于超,朱俊,夏航 ( 41 )

边界层低空急流导致北京PM<sub>2.5</sub>迅速下降及其形成机制的个例分析 ..... 廖晓农,孙兆彬,何娜,赵普生,马志强 ( 51 )

电厂燃煤烟尘PM<sub>2.5</sub>中化学组分特征 ..... 王毓秀,彭林,王燕,张腾,刘海利,牟玲 ( 60 )

2014年APEC期间北京市空气质量改善分析 ..... 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,孙峰,李令军,李金香,周一鸣,杨妍妍,姜磊 ( 66 )

APEC会议期间北京机动车排放控制效果评估 ..... 樊守彬,田灵娣,张东旭,郭津津 ( 74 )

晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析 ..... 王燕,彭林,李丽娟,王毓秀,张腾,刘海利,牟玲 ( 82 )

北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究 ..... 薛亦峰,周震,钟连红,闫静,曲松,黄玉虎,田贺忠,潘涛 ( 88 )

长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征 ..... 尤翔宇,刘湛,张青梅,漆燕,向仁军,苏艳蓉 ( 94 )

长春城市水体夏秋季温室气体排放特征 ..... 温志丹,宋开山,赵莹,邵田田,李思佳 ( 102 )

查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和CDOM吸收特性 ..... 李思佳,宋开山,赵莹,穆光熠,邵田田,马建行 ( 112 )

不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究:以广西大溶江、灵渠流域为例 ..... 孙平安,于爽,莫付珍,何师意,陆菊芳,原雅琼 ( 123 )

大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价 ..... 黄允优,曾焯,刘守江,马永红,胥晓 ( 132 )

西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征 ..... 杨帆,蒋秩锋,王翠翠,黄晓楠,吴芝菱,陈琳 ( 141 )

合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析 ..... 樊慧慧,李如忠,裴婷婷,张瑞钢 ( 148 )

辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征 ..... 王维契,周俊丽,裴淑玮,刘征涛 ( 156 )

水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价 ..... 黄廷林,刘飞,史建超 ( 166 )

低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响 ..... 游蕊,梁丽,覃蔡清,邓晗,王定勇 ( 173 )

北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态 ..... 王馨慧,单保庆,唐文忠,张超,王闯 ( 180 )

紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨 ..... 王文东,张轲,许洪斌,刘国旗 ( 187 )

二氧化钛光催化氧化阿散酸 ..... 许文泽,杨春风,李静,李建斐,刘会芳,胡承志 ( 193 )

紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能 ..... 段伦超,王凤贺,赵斌,陈亚君 ( 198 )

氢氧化镧-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用 ..... 林建伟,王虹,詹艳慧,陈冬梅 ( 208 )

纳米TiO<sub>2</sub>吸附HgCl<sub>2</sub>水溶液中Hg(II) ..... 周雄,张金洋,王定勇,覃蔡清,徐凤,罗程钟,杨熹 ( 220 )

好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建 ..... 周林军,刘济宁,石利利,冯洁,徐炎华 ( 228 )

3种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性 ..... 古文,周林军,刘济宁,陈国松,石利利,徐炎华 ( 240 )

Fe(II)活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水 ..... 朱松梅,周振,顾凌云,蒋海涛,任佳懿,王罗春 ( 247 )

长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源 ..... 李静雅,吴迪,许芸松,李向东,王喜龙,曾超华,付晓芳,刘文新 ( 253 )

直链烷基苯指示城市化过程初步研究 ..... 徐特,曾辉,倪宏刚 ( 262 )

龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征 ..... 刘硕,吴泉源,曹学江,王集宁,张龙龙,蔡东全,周历媛,刘娜 ( 270 )

水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响 ..... 吴杨周,陈健,胡正华,谢燕,陈书涛,张雪松,申双和,陈曦 ( 280 )

中水浇灌对土壤重金属污染的影响 ..... 周益奇,刘云霞,傅慧敏 ( 288 )

生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响 ..... 安艳,姬强,赵世翔,王旭东 ( 293 )

3种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响 ..... 彭禧柱,杨胜香,李凤梅,曹建兵,彭清静 ( 301 )

丛枝菌根真菌对铈污染土壤上玉米生长和铈吸收的影响 ..... 王芳,郭伟,马朋坤,潘亮,张君 ( 309 )

珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染分布特征 ..... 李彬,吴山,梁金明,邓杰帆,王珂,梁文立,曾彩明,彭四清,张天彬,杨国义 ( 317 )

三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响 ..... 韦丽丽,周琼,谢从新,王军,李君 ( 325 )

起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较 ..... 靳振江,曾鸿鹄,李强,程亚平,汤华峰,李敏,黄炳富 ( 335 )

序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析 ..... 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 ( 342 )

铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果 ..... 杨婷婷,朱能武,芦昱,吴平霄 ( 350 )

运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究 ..... 邓欢,蔡旅程,姜允斌,钟文辉 ( 359 )

通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响 ..... 齐鲁,魏源送,张俊亚,赵晨阳,才兴,张媛丽,邵春岩,李洪枚 ( 366 )

高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究 ..... 陈文和,邓明佳,罗辉,丁文杰,李琳,林坚,刘俊新 ( 377 )

应用FCM-qPCR方法定量检测水中常见病原体 ..... 王明星,柏耀辉,梁金松,霍咏,杨婷婷,袁林江 ( 384 )

乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响 ..... 娄雪宁,周丽萍,宋丹,杨荣,龙峰 ( 391 )

废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响 ..... 楼子墨,王卓行,周晓馨,傅瑞琪,刘榆,徐新华 ( 397 )

《环境科学》征订启事(9) 《环境科学》征稿简则(15) 信息(50, 165, 186, 287)

# 不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究:以广西大溶江、灵渠流域为例

孙平安<sup>1</sup>, 于爽<sup>1</sup>, 莫付珍<sup>2</sup>, 何师意<sup>1</sup>, 陆菊芳<sup>2</sup>, 原雅琼<sup>3</sup>

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004; 2. 广西水文水资源桂林分局, 桂林 541001; 3. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715)

**摘要:** 2013 年 5 月至 2014 年 4 月, 对漓江上游两个具不同地质背景的地表河流域进行一个完整水文年的观测和采样, 探讨河流水化学的季节性变化特征和主要影响因素。结果表明, 无论是碳酸盐岩占一半的灵渠流域, 还是仅占 9% 的大溶江流域, 其水化学类型均为 Ca-HCO<sub>3</sub> 型, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 是主要的阴阳离子。河水的主要离子浓度整体表现为冬高夏低的特征, 主要受流量变化的影响。Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 主要源自流域内碳酸对碳酸盐岩的风化溶解, 同时存在硫酸风化碳酸盐岩和硅酸盐岩风化的贡献。此外, 相较于灵渠, 大溶江流域上游具较强侵蚀性外源水对下游碳酸盐岩的侵蚀, 增加了碳酸盐岩风化对河流水化学的贡献。而 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 主要受大气降水和人类活动的影响, 相较而言, 灵渠流域受人类活动影响更为显著。

**关键词:** 水化学特征; 岩石风化; 影响因素; 大溶江; 灵渠

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0123-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.01.017

## Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background: A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China

SUN Ping-an<sup>1</sup>, YU Shi<sup>1</sup>, MO Fu-zhen<sup>2</sup>, HE Shi-yi<sup>1</sup>, LU Ju-fang<sup>2</sup>, YUAN Ya-qiong<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. Guilin Branch of Guangxi Hydrologic and Water Resources Bureau, Guilin 541001, China; 3. School of Geography Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** The observation and sampling were carried out in May 2013 to April 2014 in a hydrological year for two river basins with different geological background in upstream of Li river basin. The seasonal variations of river water chemistry and its main influencing factors were discussed in this paper. The results showed that the hydrochemistry types of both Darongjiang basin with 9% of carbonates and Lingqu basin with nearly 50% of carbonates in area belonged to Ca-HCO<sub>3</sub> type. Ca<sup>2+</sup> and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> were the main cations and anions. The main ion concentrations were higher in winter and lower in summer, affected by the change of the flow. Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> were mainly sourced from the weathering of carbonates by carbonic acid. The weathering of carbonates by sulfuric acid and the weathering of silicate rocks also had contribution to the river water chemistry. In addition, comparing to the Lingqu basin, the contribution of the weathering of carbonates was much more than the percent of carbonates area, because the carbonate rocks were eroded by the allogenic water. On the other hand, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> were mainly affected by the atmospheric precipitation and human activities. Comparing to the Darongjiang Basin, the effects of human activities on the changes of K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> were more significant in Lingqu Basin.

**Key words:** hydrochemical characteristics; rock weathering; influencing factors; Darongjiang Basin; Lingqu Basin

河流作为全球水循环的重要组成部分,是连接陆地与海洋两大生态系统的主要通道,也是生物地球化学循环的一个关键环节。河流的化学组成受流域气候、岩性、土壤、植被等自然因素和人类活动的影响。对河流水化学特征的研究可以反映流域内元素的地球化学行为、岩石风化、人类活动等重要信息<sup>[1-3]</sup>。我国的河流水化学研究始于 20 世纪 60 年代乐嘉祥等<sup>[4]</sup>的研究。在这之后,有关河流化学特征的研究得到了迅速发展,如陈静生等<sup>[5-7]</sup>在长江、黄河和珠江流域河流水化学组成特征、水质变

化及离子来源上进行了一系列的研究,高全洲等<sup>[8]</sup>、韩贵琳等<sup>[9]</sup>、刘丛强等<sup>[10]</sup>、张连凯等<sup>[11]</sup>、唐文魁等<sup>[12]</sup>、于爽等<sup>[13]</sup>对我国长江和珠江流域河流水化学特征、流域化学风化等进行了较为详细的研究。前人研究表明,岩石化学风化是河流离子的主要来源<sup>[14-16]</sup>,而影响地表岩石化学风化速率的控制

收稿日期: 2015-05-31; 修订日期: 2015-08-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402238, 41402324); 地质调查项目(12120113005100)

作者简介: 孙平安(1986~), 男, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为地球化学, E-mail: safesun@163.com

因素包括大地构造性质、岩性、地貌、气候、水文特征、植被类型和人类活动等<sup>[17]</sup>。就岩性而言,不同岩性风化速率存在巨大差异,如碳酸盐岩的风化速率要显著高于硅酸盐岩<sup>[18-20]</sup>,灰岩溶蚀速率显著高于白云岩<sup>[21]</sup>,因而流域内岩性的差异会使得河流水化学差异显著。本研究选取气候条件一致、地质背景差异显著的两个小流域——大溶江和灵渠流域,利用水化学、流量等数据,探讨其河流水化学的季节性变化特征和主要影响因素。

## 1 研究区概况

大溶江流域位于广西桂林市兴安县溶江镇北部,发源于华南第一峰猫儿山东,其干流长度为 56 km,平均坡降 51.8‰,多年平均径流量  $1.32 \times 10^9$  m<sup>3</sup>,出口大溶江水位站断面控制面积为 719 km<sup>2</sup>(图 1)。灵渠(灵河)流域位于广西桂林市兴安县溶江镇与兴安县城之间,发源于源江西面山峰,干流长度 48.2 km,平均坡降 5.4‰,多年平均径流量  $3.68 \times 10^8$  m<sup>3</sup>,出口灵渠水文站断面控制面积为 248 km<sup>2</sup>。灵河向西南流于溶江盆地与自北而南的大溶江相会,以下称漓江。大溶江流域和灵渠流域属于亚热带季风气候,气候温和,降水充沛,年平均气温 17.5℃,年均降雨量约 2 000 mm。降雨量受季风活动影响,分布不均,主要集中在 4~7 月,占年降雨量的 57%~75%,是研究区的丰水期。11 月至次年 2 月,降雨量稀少,仅占年降雨量的 11%~18%,属枯水期。

流域内出露地层有加里东期中粒斑状花岗岩( $\gamma_3$ );震旦系下统含砾泥质砂岩( $Z_1$ ),上统硅质岩、页岩( $Z_2$ );寒武系清溪组一段砂质泥岩( $\epsilon q^1$ )、二段灰岩( $\epsilon q^2$ ),边溪组砂岩夹页岩( $\epsilon b$ );奥陶系下统白洞组灰岩( $O_{1b}$ )、黄隘组泥岩夹砂岩( $O_{1h}$ )、升平组泥岩夹砂岩( $O_{1s}$ ),中上统砂岩夹页岩( $O_{2+3}$ );志留系下统田林口组砂岩夹页岩( $S_{1t}$ );泥盆系下统砂岩夹页岩( $D_1$ ),中统信都组砂岩夹页岩( $D_{2x}$ )、东岗岭组灰岩( $D_{2d}$ ),上统榴江组灰岩( $D_{3l}$ );石炭系下统岩关组灰岩( $C_{1y}$ )、大塘组灰岩( $C_{1d}$ );第四系砾石层、砂土、亚砂土( $Q_p$ 、 $Q_h$ )(图 1)。大溶江和灵渠流域岩性差别较大,其中大溶江流域以碎屑岩为主,碳酸盐岩主要分布在下游溶江盆地,面积约 62 km<sup>2</sup>,大致为流域面积的 9%;灵河流域碳酸盐岩主要分布在流域北部地区,面积 118 km<sup>2</sup>,大致为流域面积的 48%(图 1)。

此外,两个流域人类活动的差异显著。大溶江

流域主要位于华江瑶族乡,其上游为猫儿山国家级风景区,中游河谷两侧为山脉,仅有少量村庄分布,下游与灵渠交汇前约 8 km 地势变缓,人口增加。而灵渠干流流经兴安县城、严关镇和溶江镇,较易受人类活动影响。

## 2 样品与方法

2013 年 5 月至 2014 年 4 月,对位于桂林市兴安县溶江镇交汇前的灵渠和大溶江断面(图 1)进行了一个水文年定期监测和采样,每月 2~3 次,包括仪器现场测试和样品室内测试等。

使用德国 WTW 公司 Multi340i 便携式水质多参数分析仪,现场测定各采样点河水的 pH 值、水温( $t$ )、电导率(Spc)等参数,其中 pH 值和电导率由温度自动补偿至 25℃ 的值。pH 值、 $t$ 、Spc 精度分别达到 0.01 个 pH 单位、0.1℃ 和  $0.1 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。流量由广西壮族自治区水文资源桂林分局大溶江水文站提供。

现场取 500 mL 水样储存于高密度聚乙烯瓶子,用于阴离子的测定。用于阳离子测定的样品现场用  $0.45 \mu\text{m}$  的醋酸纤维滤膜过滤,装入 50 mL 聚乙烯瓶子,加入约 0.2 mL 1:1 HNO<sub>3</sub> 溶液,调节 pH 值 < 2。所有水样采集后立即放入便携式冰袋保存,并于 12 h 内运至室内 4℃ 冷藏。F<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 阴离子采用离子色谱仪分析(861 Advanced Compact IC Metrohm, Swiss),测试精度为  $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 阳离子采用 ICP-OES 光谱仪分析(IRIS Intrepid II XSP, Thermo Fisher Scientific, USA),测试精度为  $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 用盐酸滴定法测定,每个样品重复滴定 2~3 次,平均误差 < 5%; SiO<sub>2</sub> 用硅钼黄比色法测定(DZ/T0064.62-1993),测试精度均为  $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。水样的测试分析在中国地质科学院岩溶地质与资源环境测试中心完成。

## 3 结果与分析

大溶江断面和灵渠断面水化学组分组成范围如表 1 所示。大溶江断面和灵渠断面水温较为一致,分别为 8.4~29.0℃ 和 8.6~28.7℃。大溶江断面河水的 pH 值为 6.9~7.7,平均值为 7.2;电导率为  $52.8 \sim 155.9 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,平均  $92.9 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。而灵渠断面河水的 pH 值为 6.7~8.2,平均值为 7.5;电导率为  $149.6 \sim 313.0 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,平均  $227.1 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。可见,灵渠断面河水有着较大溶江断面更高的 pH



离子当量浓度为  $1.49 \sim 3.04 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均  $2.31 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 总阴离子当量浓度为  $1.47 \sim 3.35 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均  $2.48 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ . 此外, 大溶江断面和灵渠断面  $\text{SiO}_2$  含量分别为  $0.08 \sim 0.11 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.01 \sim 0.12 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 大溶江断面略有高出.

## 4 讨论

### 4.1 研究区水化学类型

本研究两个断面水化学 Piper 三线图(图 2)显

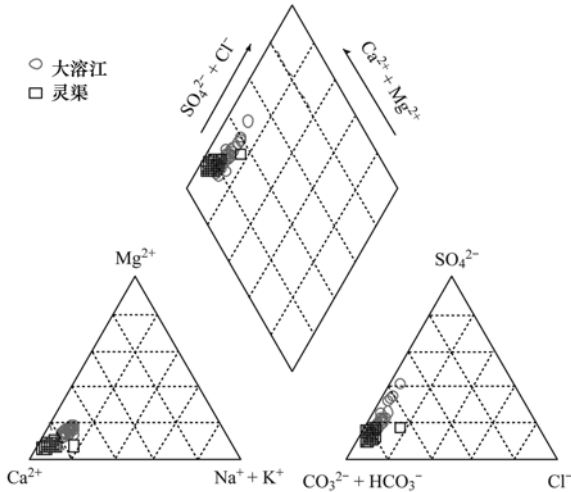


图 2 大溶江和灵河流域水化学 piper 三线图

Fig. 2 Piper chart of river water in Darongjiang and Lingqu Basin

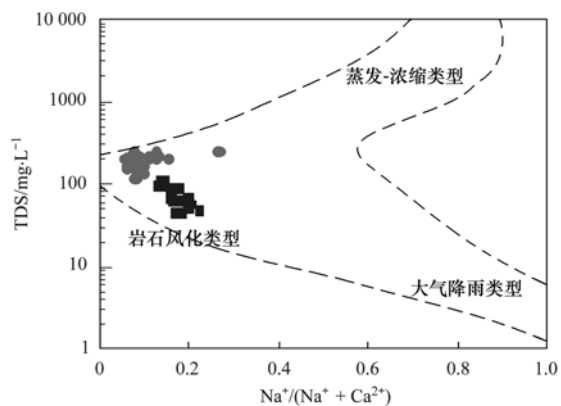
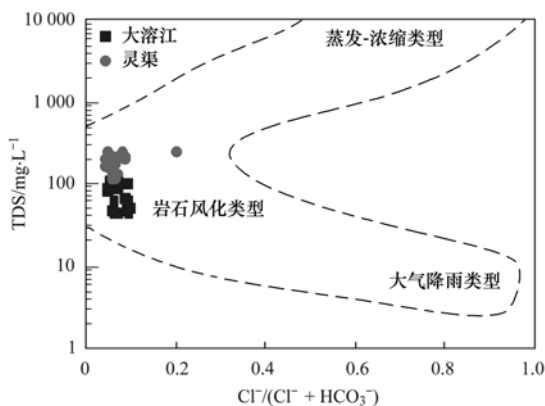


图 3 大溶江和灵渠流域河水 Gibbs 图

Fig. 3 Gibbs chart of river water in Darongjiang and Lingqu Basin

Gaillardet 等<sup>[1]</sup> 根据单一岩性小流域的水化学特征, 给出了三大岩类端元, 并对全球 60 条大河进行了分析. 本研究将两大流域各 25 个数据投于 Gaillardet 等的图版中(图 4), 可以看出, 两个断面都表现为碳酸盐岩和硅酸盐岩风化混合的特征, 并以碳酸盐岩风化为主. 虽然大溶江流域碳酸盐岩分布面积远小于灵渠流域, 但两个流域碳酸盐岩风化的贡献比例没有显著差距, 这与外源水对碳酸盐岩的强侵蚀有关<sup>[23]</sup>. 大溶江流域中上游基本上为碎屑

岩,  $\text{Ca}^{2+}$  是大溶江和灵渠最主要的阳离子, 分别占阳离子的 75% 和 86%;  $\text{HCO}_3^-$  是大溶江和灵渠最主要的阴离子, 分别占阴离子的 67% 和 77%. 可见研究区的水化学类型为  $\text{Ca-HCO}_3$  型, 这两种离子的浓度与岩溶作用强度有着密切联系, 反映了断面河水化学特征主要碳酸盐岩溶解的影响.

Gibbs 根据河流的主要溶质化学组成设计的一种对数坐标图解<sup>[22]</sup>, 可以直观地比较各类河水的化学组成、形成原因及彼此间的相互关系. 如图 3 所示, 大溶江断面 TDS 分布在  $42.9 \sim 108.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间, 平均  $75.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  值在  $0.05 \sim 0.10$  之间, 平均 0.07;  $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  值在  $0.13 \sim 0.22$  之间, 平均 0.17. 灵渠断面 TDS 分布在  $114.6 \sim 245.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间, 平均  $190.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  值在  $0.04 \sim 0.20$  之间, 平均 0.07;  $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  值在  $0.06 \sim 0.27$  之间, 平均 0.10. 两个断面河水水化学特征基本上属于“岩石风化类型”(图 3), 主要反映了岩石风化作用对河水水化学的影响. 仅灵渠 2014 年 1 月 8 日样品  $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  值和  $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  值较高, 反映了该时段河流除受到岩石风化影响外, 还受到了其他因素的影响(详见下文).

岩(图 1), 其地表水  $\text{SiC}$  不饱和(如六洞河电导率为  $18 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,  $\text{SiC}$  为  $-3.67$ <sup>[24]</sup>), 具较强侵蚀性. 当该外源水进入流域下游岩溶区后, 水岩作用加强, 促进了岩溶作用的发生, 加剧了碳酸盐岩的风化. 经过岩溶区后的大溶江断面电导率分布在  $52.8 \sim 155.9 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  之间, 平均  $92.9 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ;  $\text{SiC}$  分布在  $-0.98 \sim -2.35$  之间, 平均  $-1.62$ , 较其上游显著增加, 也显示了外源水对碳酸盐岩的侵蚀作用.

综上所述, 虽然大溶江和灵渠流域碳酸盐岩分

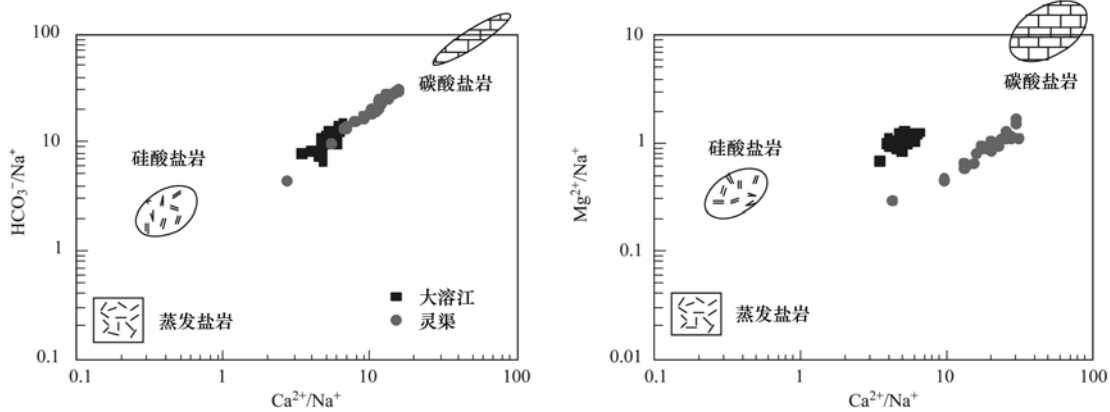


图4 大溶江和灵渠流域河水  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$  与  $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$  与  $\text{HCO}_3^{-}/\text{Na}^{+}$  的关系

Fig. 4 Relationship of  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$  and  $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$  and  $\text{HCO}_3^{-}/\text{Na}^{+}$  for river water in Darongjiang and Lingqu Basin

布面积不占绝对优势,但因碳酸盐岩风化速率显著大于硅酸盐岩<sup>[18~20]</sup>以及外源水的作用<sup>[22]</sup>,河流水化学组成表现为碳酸盐岩风化来源为主,部分受硅酸盐岩影响。

#### 4.2 主要离子变化趋势及影响因素

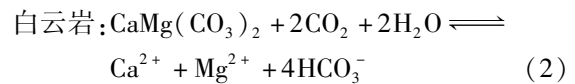
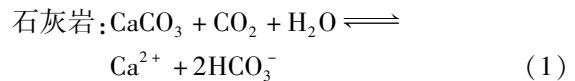
如图5所示,大溶江和灵渠断面河水的主要离子具有明显的季节性变化,除  $\text{K}^{+}$  秋季最高外,各主要离子含量冬季最高,秋季和春季次之,夏季河水离子浓度最低。该特征与流量变化呈相反趋势(图5),大溶江和灵渠流域河水总溶解固体物(TDS)与流量的相关系数  $R$  分别为  $-0.70$  和  $-0.81$ ,呈反相关关系,可见,即使夏季温度升高,岩石风化作用增强,但由于流量增大导致的稀释作用,使得河水中离子浓度下降。而冬季情况正好相反,因而离子含量最高。

##### 4.2.1 岩石风化的影响

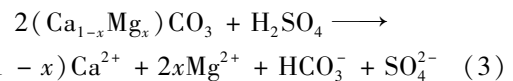
如图5所示,作为研究区最主要阴阳离子的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^{-}$ ,以及  $\text{Mg}^{2+}$  有着一致的变化趋势,并与流量的变化趋势呈显著的负相关关系(各离子与流量的相关系数  $R^2$  大于  $0.6$ )。河水的化学组成一般来源于大气输入、水/岩相互作用及人类活动的影响<sup>[1~3]</sup>。 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^{-}$  主要受控于流域岩性。相较于流量两个数量级的年度变化,岩石风化速率的季节性变化不显著,因而流量对离子浓度变化起主导作用<sup>[25]</sup>,即流量增大,离子浓度因稀释作用而降低。

研究区未见膏岩地层,碳酸盐岩风化和碎屑岩中碳酸盐岩矿物的溶蚀是  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^{-}$  的主要来源<sup>[26]</sup>。大溶江和灵渠河水  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  值分别为  $0.20$  和  $0.09$ (表1),即河水中  $\text{Ca}^{2+}$  要远大于  $\text{Mg}^{2+}$ ,这与研究区碳酸盐岩以灰岩为主,并且石灰岩有着较白云岩更快的溶蚀速率<sup>[21]</sup>相一致。碳酸

盐岩矿物的碳酸溶解反应式如下:



主要产物为  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^{-}$ ,且  $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{HCO}_3^{-}]$  的当量比值为  $1$ 。如图6(a)所示,  $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{HCO}_3^{-}]$  的当量比值大于  $1$ ,即有额外的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  来源。而在河水样品的离子比中加上  $\text{SO}_4^{2-}$  后,其比值  $([\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{HCO}_3^{-} + \text{SO}_4^{2-}])$  近似为  $1$ [图6(b)],表明河水中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  有一部分来自于硫酸对碳酸盐岩的风化,其反应式如下:



该反应  $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{HCO}_3^{-}]$  的当量比值为  $2$ ,  $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{HCO}_3^{-} + \text{SO}_4^{2-}]$  的当量比值为  $1$ 。

近年来,除碳酸风化岩石或矿物外,硫酸参与流域岩石矿物化学风化对河水化学组成的贡献以得到广泛认识,并已有较多报道<sup>[9, 10, 13, 27~29]</sup>。大溶江断面河水  $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{HCO}_3^{-}]$  值在  $1.03 \sim 1.70$  之间,平均  $1.20$ ,可见硫酸溶蚀碳酸盐岩作用对河水  $\text{HCO}_3^{-}$  的贡献可达  $20\%$ 。灵渠断面河水  $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{HCO}_3^{-}]$  值在  $1.01 \sim 1.41$  之间,平均  $1.15$ ,即有  $15\%$  的河水  $\text{HCO}_3^{-}$  来自硫酸溶蚀碳酸盐岩作用的贡献。

此外,大溶江和灵渠断面  $\text{Si}$  平均含量分别为  $0.10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.07 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (表1),其对河水  $\text{HCO}_3^{-}$  的贡献较小,若按可溶性硅浓度的一半计算,

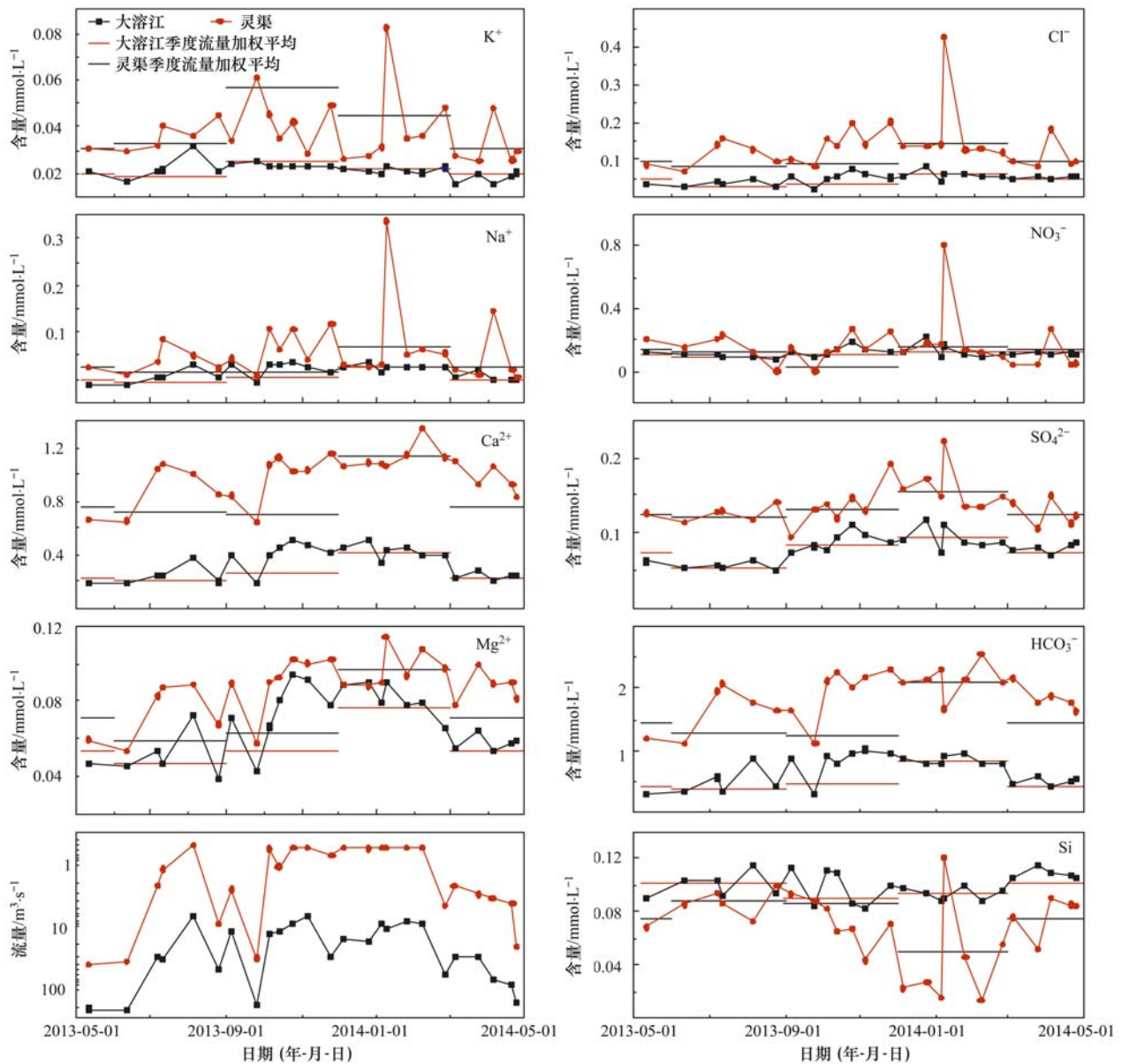


图 5 大溶江和灵渠流域主要离子变化趋势

Fig. 5 Change trends of main ions in Darongjiang and Lingqu Basin

其贡献率分别仅为 7% 和 2%。

综上所述,大溶江和灵渠河水最主要的阴阳离子  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+}$  主要来自岩石风化的贡献,主要是碳酸对碳酸盐岩的溶蚀,硫酸对碳酸盐岩的溶蚀,硅酸盐风化也有着一定的贡献。在扣除硫酸溶蚀的基础上,利用水化学-径流法估算出大溶江和灵渠断面无机碳汇通量(以  $\text{CO}_2$  计,下同)分别为  $1.72 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$  和  $7.26 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ,单位面积年碳汇通量分别为  $23.8 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  和  $29.3 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。该数值明显小于典型岩溶水系统 [ $68.82 \sim 100.07 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ]<sup>[30]</sup>,而与珠江 [ $16.3 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ]<sup>[31]</sup>、西江 [ $20.3 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ]<sup>[32]</sup>、柳江 [ $19.7 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ]<sup>[33]</sup>、乌江

白泥河 [ $14.6 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ]<sup>[34]</sup> 等碳酸盐岩、碎屑岩混合流域相当。

#### 4.2.2 大气降水和人类活动的影响

如图 5 所示, $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  有着相似的年度变化趋势。 $\text{Cl}^-$  是保守元素,基本上没有分馏,所以学者一般认为其主要来自海洋粒子,但也会受到人类活动的影响<sup>[35, 36]</sup>。如图 7(a) 所示, $\text{Na}^+$  与  $\text{Cl}^-$  呈明显的正相关性,表明  $\text{Na}^+$  与  $\text{Cl}^-$  有相似的来源。其中灵渠河水  $\text{Cl}^-/\text{Na}^+$  值为 1.20,接近于海水的比值 ( $\text{Cl}^-/\text{Na}^+ = 1.17$ )<sup>[37]</sup>,主要受大气降水的影响。而大溶江河水  $\text{Cl}^-/\text{Na}^+$  值分布在 0.47 ~ 1.14 之间,平均仅为 0.75,远小于大气降水和人类



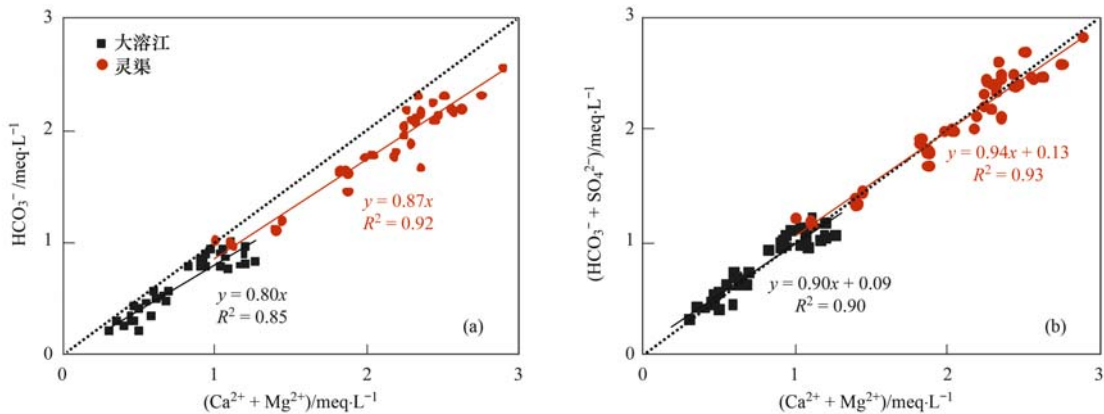


图6 大溶江和灵渠流域河水  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  与  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  与  $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$  关系

Fig. 6 Relationship of  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$  for river water in Darongjiang and Lingqu Basin

活动来源的比值,可见除大气降水和人类活动外,还有较多其他来源的  $\text{Na}^+$ . 大溶江流域广泛分布硅酸盐岩,其风化过程中产生  $\text{Na}^+$ ,而不产生  $\text{Cl}^-$ ,因而,流域内硅酸盐岩风化是该部分  $\text{Na}^+$  的主要来源.

相较于  $\text{Na}^+$ ,两个断面  $\text{K}^+$  的变化特征差异更为显著,灵渠断面  $\text{K}^+$  离子含量明显高于大溶江,平均含量大致为其两倍(表1). 大溶江断面  $\text{K}^+$  与  $\text{Cl}^-$  的相关性极差 ( $R^2$  为 0.001),而灵渠断面  $\text{K}^+$  与  $\text{Cl}^-$

却有着较好的相关性 ( $R^2$  为 0.53). 可见,两个流域  $\text{K}^+$  的来源存在显著差异,这与两个流域的背景相一致. 灵渠流域流经兴安县城、严关至溶江镇,受人类活动影响较大(如生活污水,农业活动等),使得该流域河水  $\text{K}^+$  含量在硅酸盐风化和人类活动的共同作用下显著增加. 相对而言,大溶江流域人类活动相对较少,并分布有大范围硅酸盐岩,其  $\text{K}^+$  主要来自于硅酸盐岩的风化.

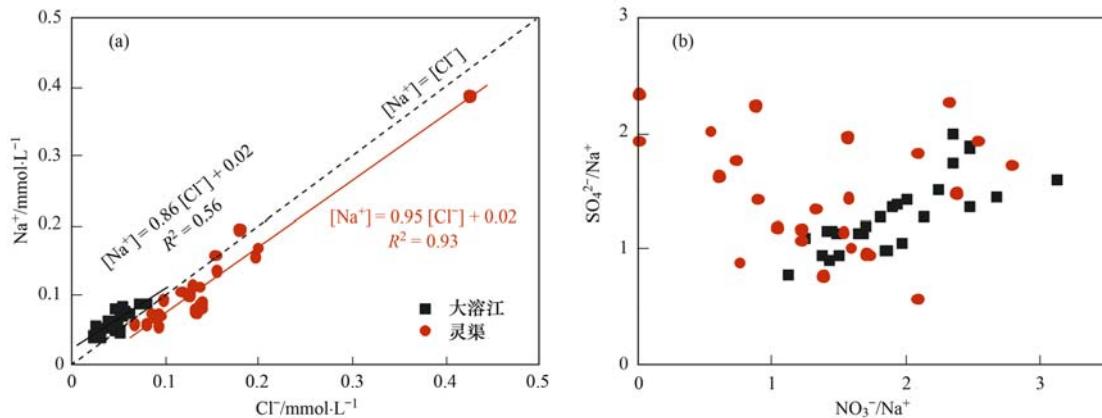


图7 大溶江和灵渠流域河水  $\text{Cl}^-$  与  $\text{Na}^+$  和  $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$  相关关系

Fig. 7 Relationship of  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$  and  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$  for river water in Darongjiang and Lingqu Basin

河水溶质中  $\text{SO}_4^{2-}$  主要来源于石膏等蒸发岩的溶解,硫化物的氧化、大气降雨(酸雨)以及人类活动,主要是工业活动<sup>[10, 13]</sup>. 研究区未见蒸发岩和硫化物矿床,因而  $\text{SO}_4^{2-}$  主要源自大气沉降和工业活动. 而  $\text{NO}_3^-$  主要源于人类活动中施用氮肥和排放的氮氧化物,氮肥中  $\text{NH}_4^+$  通过硝化反应转化为硝酸根,化石燃料的燃烧过程中排放的氮氧化物在大气中反应生成硝酸,这些酸性物质最后通过降雨或河流的冲刷作用最终溶解于河流中<sup>[38-40]</sup>. 大溶江和灵渠断面  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  有着相似的变化趋势(图

5),并与  $\text{Cl}^-$  有着较好的相关性 ( $R^2$  为 0.58 ~ 0.88),有着相似的来源,即与降雨关系密切. 大溶江断面  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  当量比值分布在 1.02 ~ 1.76 之间,平均 1.36; 灵渠断面  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  当量比值分布在 0.54 ~ 7.40 之间,平均 1.70,明显低于桂林地区降雨当量比值 ( $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^- = 2.90$ <sup>[31]</sup>). 因而,除降雨外,农业活动提供了额外的  $\text{NO}_3^-$  来源.

如图 7 (b) 所示,大溶江断面  $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$  有着较好的正相关关系,而灵渠断面分布较散. 因而,灵渠流域人类活动对河流水化学的影

响存在显著的年际差异. 相较于大溶江断面, 灵渠断面河水  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$  浓度波动较大, 例如, 2014 年 1 月 8 日在流量未见明显变化的情况下, 灵渠断面河水  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$  浓度较 1 月 5 日显著增大, 而  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $HCO_3^-$  浓度和大溶江断面各离子浓度未见显著变化(图 5). 介于两个相邻流域的巨大差异, 该变化不是降雨造成的, 而与灵渠流域内分布的城镇和农村人类活动(包括工业活动和农业活动)的影响有关, 即人类活动使灵渠断面河水  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$  浓度增加.

## 5 结论

(1) 大溶江和灵渠流域水化学类型为 Ca- $HCO_3$  型,  $Ca^{2+}$  是大溶江和灵渠最主要的阳离子, 分别占阳离子的 75% 和 86%;  $HCO_3^-$  是大溶江和灵渠最主要的阴离子, 分别占阴离子的 67% 和 77%.

(2) 河水的主要离子浓度表现出明显的季节变化特征, 总体表现为冬季最高, 秋季和春季次之, 夏季最低, 主要受控于流量变化, 即流量增大导致的稀释作用是夏季河水离子浓度降低的主要原因.

(3)  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  和  $HCO_3^-$  离子的来源主要受控于流域碳酸盐岩的风化溶解, 大溶江流域碳酸盐岩分布面积仅为 9%, 大致为灵渠流域的 1/5, 但其离子浓度大致为灵渠流域的 1/3, 其原因为流域上游具较强侵蚀性外源水加快了下游碳酸盐岩的溶蚀. 大溶江和灵渠流域除碳酸溶蚀碳酸盐岩外, 硫酸也参与了碳酸盐岩的化学风化, 其对  $HCO_3^-$  离子的贡献分别为 20% 和 15%. 大溶江和灵渠流域虽然分布有大面积硅酸盐岩, 但因其风化速率较低, 其对河水化学的贡献较小.

(4)  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$  主要受大气降水和人类活动的影响. 相较而言, 灵渠流域因人口密集, 受人类活动的影响更为显著.

### 参考文献:

- [ 1 ] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, *et al.* Global silicate weathering and  $CO_2$  consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. *Chemical Geology*, 1999, **159**(1-4): 3-30.
- [ 2 ] Hindshaw R S, Tipper E T, Reynolds B C, *et al.* Hydrological control of stream water chemistry in a glacial catchment (Damma Glacier, Switzerland) [J]. *Chemical Geology*, 2011, **285**(1-4): 215-230.
- [ 3 ] Li S Y, Lu X X, He M, *et al.* Major element chemistry in the upper Yangtze River: A case study of the Longchuanjiang River [J]. *Geomorphology*, 2011, **129**(1-2): 29-42.
- [ 4 ] 乐嘉祥, 王德春. 中国河流水化学特征 [J]. *地理学报*, 1963, **29**(1): 1-13.
- [ 5 ] 陈静生, 何大伟. 珠江水系河水主要离子化学特征及成因 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1999, **35**(6): 786-793.
- [ 6 ] 陈静生, 王飞越, 何大伟. 黄河水质地球化学 [J]. *地学前缘*, 2006, **13**(1): 58-73.
- [ 7 ] 陈静生, 王飞越, 夏星辉. 长江水质地球化学 [J]. *地学前缘*, 2006, **13**(1): 74-85.
- [ 8 ] 高全洲, 沈承德, 孙彦敏, 等. 珠江流域的化学侵蚀 [J]. *地球化学*, 2001, **30**(3): 223-230.
- [ 9 ] 韩贵琳, 刘丛强. 贵州喀斯特地区河流的研究——碳酸盐岩溶解控制的水文地球化学特征 [J]. *地球科学进展*, 2005, **20**(4): 394-406.
- [ 10 ] 刘丛强, 蒋颖魁, 陶发祥, 等. 西南喀斯特流域碳酸盐岩的硫酸侵蚀与碳循环 [J]. *地球化学*, 2008, **37**(4): 404-414.
- [ 11 ] 张连凯, 覃小群, 杨慧, 等. 珠江流域河流碳输出通量及变化特征 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3025-3034.
- [ 12 ] 唐文魁, 陶贞, 高全洲, 等. 桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2099-2107.
- [ 13 ] 于爽, 孙平安, 杜文越, 等. 人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 72-79.
- [ 14 ] 李晶莹, 张经. 黄河流域化学风化作用与大气  $CO_2$  的消耗 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, **23**(2): 43-49.
- [ 15 ] 王亚平, 王岚, 许春雪, 等. 长江水系水文地球化学特征及主要离子的化学成因 [J]. *地质通报*, 2010, **29**(2-3): 446-456.
- [ 16 ] 张春来, 曹建华, 刘晓华, 等. 河水化学离子成因及影响因素的因子分析探讨 [J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2013, **31**(2): 123-132.
- [ 17 ] Hagedorn B, Cartwright I. Climatic and lithologic controls on the temporal and spatial variability of  $CO_2$  consumption via chemical weathering: An example from the Australian Victorian Alps [J]. *Chemical Geology*, 2009, **260**(3-4): 234-253.
- [ 18 ] Meybeck M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads [J]. *American Journal of Science*, 1987, **287**(5): 401-428.
- [ 19 ] Suchet P A, Probst J L. A global model for present-day atmospheric/soil  $CO_2$  consumption by chemical erosion of continental rocks (GEM- $CO_2$ ) [J]. *Tellus*, 1995, **47**(1-2): 273-280.
- [ 20 ] Liu Z H, Dreybrodt W. Dissolution kinetics of calcium carbonate minerals in  $H_2O$ - $CO_2$  solutions in turbulent flow: The role of the diffusion boundary layer and the slow reaction  $H_2O + CO_2 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^-$  [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, **61**(14): 2879-2889.
- [ 21 ] 刘再华, Dreybrodt W, 李华举. 灰岩和白云岩溶解速率控制机理的比较 [J]. *地球科学*, 2006, **31**(3): 411-416.
- [ 22 ] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.

- [23] 黄芬, 唐伟, 汪进良, 等. 外源水对岩溶碳汇的影响——以桂林毛村地下河为例[J]. 中国岩溶, 2011, **30**(4): 417-421.
- [24] 张红波, 何师意, 于爽, 等. 桂江流域河流水化学特征及影响因素[J]. 中国岩溶, 2012, **31**(4): 395-401.
- [25] 康志强, 袁道先, 常勇, 等. 岩溶碳汇的主控因子——水循环[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, **41**(5): 1542-1547.
- [26] 刘再华. 岩石风化碳汇研究的最新进展和展望[J]. 科学通报, 2012, **57**(2-3): 95-102.
- [27] Galy A, France-Lanord, C. Weathering processes in the Ganges-Brahmaputra basin and the riverine alkalinity budget [J]. *Chemical Geology*, 1999, **159**(1-4): 31-60.
- [28] Gaillardet J, Millot R, Dupré B. Chemical denudation rates of the western Canadian orogenic belt: the stikine terrane [J]. *Chemical Geology*, 2003, **201**(3-4): 257-279.
- [29] Li S L, Calmels D, Han G L, *et al.* Sulfuric acid as an agent of carbonate weathering constrained by  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ : Examples from Southwest China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, **270**(3-4): 189-199.
- [30] 裴建国, 章程, 张强, 等. 典型岩溶水系统碳汇通量估算[J]. 岩矿测试, 2012, **31**(5): 884-888.
- [31] Cao J H, Yang H, Kang Z Q. Preliminary regional estimation of carbon sink flux by carbonate rock corrosion: A case study of the Pearl River Basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(35): 3766-3773.
- [32] Yu S, Du W Y, Sun P A, *et al.* Study on the hydrochemistry character and carbon sink in the middle and upper reaches of the Xijiang River basin, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **74**(2): 997-1005.
- [33] 原雅琼, 何师意, 于爽, 等. 柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2437-2445.
- [34] 焦树林, 梁虹, 丁蓉. 乌江源区白泥河流域化学风化过程及其碳汇效应研究[J]. 科技导报, 2012, **30**(28-29): 89-93.
- [35] 姚小红, 黄美元, 高会旺, 等. 沿海地区海盐和大气污染物反应的致酸作用[J]. 环境科学, 1998, **19**(3): 22-27.
- [36] 张红波, 于爽, 何师意, 等. 桂林岩溶区大气降水的化学特征分析[J]. 中国岩溶, 2012, **31**(3): 289-295.
- [37] Berner E K, Berner R A. *The Global Water Cycle: Geochemistry and Environment* [M]. New York: Prentice-Hall, 1987. 394.
- [38] 汪智军, 杨平恒, 旷颖仑, 等. 基于 $^{15}\text{N}$ 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.
- [39] 蒲俊兵, 袁道先, 扈志勇, 等. 高分辨率监测岩溶地下水 $\text{NO}_3^-$ 的动态变化及对外界环境的响应[J]. 环境科学, 2011, **32**(3): 680-686.
- [40] 徐尚全, 杨平恒, 殷建军, 等. 重庆雪玉洞岩溶地下河地球化学敏感性研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 77-83.

## CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe .....	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> ( 1 )
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure .....	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> ( 10 )
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou .....	..... HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> ( 16 )
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Nanjing Region .....	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> ( 22 )
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games .....	..... ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> ( 28 )
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> in Autumn in Nanchang City .....	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> ( 35 )
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring .....	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> ( 41 )
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM <sub>2.5</sub> Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism .....	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> ( 51 )
Characteristics of Chemical Components in PM <sub>2.5</sub> from the Coal Dust of Power Plants .....	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> ( 60 )
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014 .....	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> ( 66 )
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing .....	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> ( 74 )
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng .....	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> ( 82 )
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing .....	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> ( 88 )
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region .....	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> ( 94 )
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China .....	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> ( 102 )
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn .....	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> ( 112 )
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China .....	..... SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> ( 123 )
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River .....	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> ( 132 )
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff .....	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> ( 141 )
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban .....	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> ( 148 )
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River .....	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shu-wei, <i>et al.</i> ( 156 )
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir .....	..... HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao ( 166 )
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir .....	..... YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> ( 173 )
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing .....	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> ( 180 )
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism .....	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> ( 187 )
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO <sub>2</sub> .....	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> ( 193 )
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV .....	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> ( 198 )
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution .....	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> ( 208 )
Experimental Research of Hg( II ) Removal from Aqueous Solutions of HgCl <sub>2</sub> with Nano-TiO <sub>2</sub> .....	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> ( 220 )
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters .....	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> ( 228 )
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System .....	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> ( 240 )
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate .....	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> ( 247 )
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta .....	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> ( 253 )
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization .....	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang ( 262 )
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City .....	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> ( 270 )
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration .....	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> ( 280 )
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil .....	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min ( 288 )
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil .....	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> ( 293 )
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings .....	..... PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> ( 301 )
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils .....	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> ( 309 )
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China .....	..... LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> ( 317 )
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors .....	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> ( 325 )
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland .....	..... JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> ( 335 )
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill .....	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> ( 342 )
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction .....	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> ( 350 )
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy .....	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> ( 359 )
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying .....	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> ( 366 )
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter .....	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> ( 377 )
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens .....	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> ( 384 )
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants .....	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> ( 391 )
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact .....	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> ( 397 )

# 《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)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 15, 2016

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