

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第4期

Vol.33 No.4

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

碳同位素比技术定量估算城市大气 CO ₂ 的来源	刘卫, 位楠楠, 王广华, 姚剑, 曾友石, 范雪波, 耿彦红, 李燕 (1041)
广州大气降水中稳定同位素对 2008 年初华南地区冰雪灾害期间水汽来源的反映	廖聪云, 钟巍, 马巧红, 薛积彬, 尹焕玲, 龙昆 (1050)
北京雾霾天气期间气溶胶光学特性	于兴娜, 李新妹, 登增然, 德庆央宗, 袁帅 (1057)
白马泉风景区夏季大气 PM _{2.5} 中二次有机物的初步研究	代东决, 李黎, 刘子芳, 赵敏, 冯加良, 赖玮, 曾燕梅, 周宇, 刘露云, 邓仕槐 (1063)
机动车尾气排放 VOCs 源成分谱及其大气反应活性	乔月珍, 王红丽, 黄成, 陈长虹, 苏雷燕, 周敏, 徐骅, 张钢锋, 陈宜然, 李莉, 陈明华, 黄海英 (1071)
法国梧桐叶片氮含量及氮同位素对城市大气湿沉降氮的响应研究	王燕丽, 肖化云, 肖红伟 (1080)
胶州湾及邻近海域表层海水中一氧化氮浓度分布及其影响因素探讨	薛超, 刘春颖, 杨桂朋, 祝陈坚, 张洪海 (1086)
基于不确定性分析的太湖水体多环芳烃的生态风险评价	郭广慧, 吴丰昌, 何宏平, 冯承莲, 张瑞卿, 李会仙 (1091)
流域水质时空分布特征及其影响因素初析	黄金良, 黄亚玲, 李青生, 周增荣, 冯媛, 张祯宇 (1098)
潮白河周丛生物群落元素组成与水质变化的生态计量学关系研究	崔经国, 单保庆, 王帅 (1108)
春季盘溪水质日变化规律及水质评价	张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强 (1114)
西南喀斯特流域风化作用季节性变化研究	肖琼, 沈立成, 杨雷, 伍坤宇, 陈展图 (1122)
三峡水库开县消落区水域冬季蓄水期间藻类群落结构与水质评价	郭劲松, 谢丹, 李哲, 陈园, 孙志禹, 陈永柏, 龙曼 (1129)
淀山湖水华高发期浮游植物群落变化特征研究	徐春燕, 杨洁, 马明睿, 胡雪芹, 由文辉 (1136)
三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验	王建超, 朱波, 汪涛, 易礼军 (1144)
沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征	李振伟, 于兴修, 刘前进, 井光花 (1152)
合肥城区地表灰尘氮磷形态分布及生物有效性	李如忠, 周爱佳, 童芳, 李峰, 钱家忠 (1159)
鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析	张华俊, 陈修康, 韩博平, 罗勇, 杨浩文, 曾艳, 陈敬安 (1167)
三门峡库区河流湿地沉积物重金属赋存形态和风险评价	敖亮, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (1176)
黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价	刘志杰, 李培英, 张晓龙, 李萍, 朱龙海 (1182)
竺山湾重金属污染底泥环保疏浚深度的推算	姜霞, 王雯雯, 王书航, 金相灿 (1189)
雷州近海、流沙湾和深圳湾沉积物 PAHs 污染特征分析	赵利容, 孙省利, 柯盛 (1198)
中国与印度典型城市道路街尘中多环芳烃与黑碳的对比研究	潘苏红, 张千, 孙亚莉, 解启来 (1204)
三江平原典型灌区井灌地下水中铁的随水迁移特征	邹元春, 于晓菲, 霍莉莉, 吕宪国, 姜明 (1209)
海水淡化水在既有管网输配的铁释放控制研究	田一梅, 刘扬, 赵鹏, 单金林, 杨所印, 刘伟 (1216)
新生态铁的混凝作用探索	杨雪, 张景成, 关小红 (1221)
饮用水中甲羟孕酮的臭氧氧化降解研究	岳婵媛, 缪恒峰, 任洪艳, 阮文权 (1227)
核壳式磁性碳纳米吸附剂的制备及其对水环境中金霉素的吸附研究	王懿萱, 张娣, 牛红云, 孟昭福, 蔡亚岐 (1234)
络合-超滤耦合工艺去除水中镍离子的研究	秦妹, 邵嘉慧, 何义亮, 李雯玺 (1241)
赤铁矿光助类 Fenton 降解有毒有机污染物	张钰, 顾彦, 杨慧, 何燕, 李瑞萍, 黄应平, 张爱清 (1247)
掺氮 Ta ₂ O ₅ 诱发可见光-类 Fenton 体系降解阿特拉津研究	赵璐, 邓一荣, 杜瑛珣, 傅翔 (1252)
O ₃ /H ₂ O ₂ 降解水中扑灭通效能研究	李绍峰, 孙楚 (1260)
Pr-N 共掺杂 TiO ₂ 光电催化降解孔雀石绿动力学	沙爽, 周少奇, 张小娜, 周晓 (1267)
铜陵相思谷尾矿用于处理酸性矿山排水的实验研究	张楠, 陈天虎, 周跃飞, 黎少杰, 金杰, 王延明 (1272)
聚合铝铁对 A ² /O 系统 EPS 及生物絮凝性能的影响	温沁雪, 刘爱翠, 陈志强, 施汉昌, 吕炳南 (1278)
温度对污水脱氮系统污染物去除效果及氧化亚氮释放的影响	张婷婷, 张建, 杨芳, 谢慧君, 胡振, 李一冉 (1283)
温度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定性的影响	李祥, 黄勇, 郑宇慧, 袁怡, 李大鹏, 潘杨, 张春蕾 (1288)
好氧颗粒污泥处理制糖工业废水厌氧出水的除磷特性研究	王硕, 于水利, 时文歆, 暴瑞玲, 衣雪松, 李建政 (1293)
除磷颗粒污泥系统中不同粒径颗粒的理化特性分析	李志华, 张玉蓉, 杨帆, 李胜, 姬晓琴 (1299)
利用氧化亚氮还原酶基因 (nosZ) 评价人工湿地系统中的反硝化菌	王晓君, 陈少华, 张兆基, 肖俊超 (1306)
紫外诱变法提高好氧反硝化菌降解性能的研究	于佳佳, 陈浚, 杨宣, 陈建孟 (1313)
1 株异养硝化菌胞外聚合物的研究	陈哲, 张斌, 湛志强, 邱志刚, 郭迎庆, 李君文, 王景峰 (1318)
氨氮对稀有鮕鲫胚胎及卵黄囊期仔鱼的毒性效应研究	王志坚, 鲁增辉, 石萍 (1323)
多年蔬菜连作对土壤氨氧化微生物群落组成的影响	孟德龙, 杨扬, 伍延正, 吴敏娜, 秦红灵, 朱亦君, 魏文学 (1331)
生物质炭施用对土壤中氯虫苯甲酰胺吸附及消解行为的影响	王廷廷, 余向阳, 沈燕, 张超兰, 刘贤进 (1339)
水稻光合同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴ C连续标记法	聂三安, 周萍, 葛体达, 童成立, 肖和艾, 吴金水, 张杨珠 (1346)
油田污染土壤残油组成与特征参数分析	王坚, 张旭, 李广贺 (1352)
挥发性氯代烃在湿润土壤中的平衡吸附研究	孟凡勇, 刘锐, 小林刚, 万梅, 余素林, 陈吕军 (1361)
田间土壤外源铜镍在小麦中的累积及其毒害研究	黄锦孙, 韦东普, 郭雪雁, 马义兵 (1369)
中国磷消费结构的变化特征及其对环境磷负荷的影响	马敦超, 胡山鹰, 陈定江, 李有润 (1376)
基于 3MRA 模型的填埋场安全填埋废物污染物阈值评估方法与应用研究	袁英, 席北斗, 何小松, 魏自民, 李鸣晓, 姜永海, 苏婧, 安达 (1383)
填埋垃圾初始含水率对渗滤液产量的影响及修正渗滤液产量计算公式	兰吉武, 詹良通, 李育超, 陈云敏 (1389)
生物反应器填埋场中邻苯二甲酸二丁酯的迁移转化	方程冉, 龙於洋, 沈东升 (1397)
岩溶区峰丛洼地植被指数的克里格分析	杨奇勇, 蒋忠诚, 马祖陆, 曹建华, 罗为群, 李文军, 段晓芳 (1404)
《环境科学》征订启事 (1062) 《环境科学》征稿简则 (1107) 信息 (1135, 1215, 1396)	

西南喀斯特流域风化作用季节性变化研究

肖琼¹, 沈立成¹, 杨雷¹, 伍坤宇¹, 陈展图²

(1. 西南大学地理科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 北碚 400715; 2. 南宁市社会科学院, 南宁 530022)

摘要: 以西南地区典型喀斯特流域, 长江上游一级支流嘉陵江温塘峡段为例, 连续2 a 按月取样, 并通过水化学分析、同位素分析等方法, 研究得出嘉陵江温塘峡段水化学类型受地层控制, 为 HCO_3^- -Ca 型. 在稀释作用的影响下, 除 HNO_3^- 的浓度因受人类活动的影响雨季偏大外, 其余大部分离子浓度雨季较早季偏小. 所有样品的 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ (浓度比) 在 0.5 ~ 1 之间, $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ (浓度比) 大部分处于 0.5 ~ 1 之间, 由此表明嘉陵江风化作用主要以碳酸的风化和硫酸风化碳酸岩盐为主, 硫酸岩盐的风化为辅. 根据同位素分析结果表明嘉陵江水中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$ 值为 $-8.74\text{‰} \sim -7.36\text{‰}$, $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}}$ 值旱季为 14.43‰ , 雨季为 12.21‰ , 表明硫酸对碳酸盐岩的风化作用和硫酸盐岩自身的风化作用在雨季均表现更强, 其中, 硫酸岩盐自身的风化作用在雨季强度更大, 而旱季碳酸对碳酸盐岩的风化作用比较强.

关键词: 风化作用; 水化学指标; $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$; $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}}$; 嘉陵江

中图分类号: X523; X832 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)04-1122-07

Weathering Seasonal Variations in Karst Valley in Southwest China

XIAO Qiong¹, SHEN Li-cheng¹, YANG Lei¹, WU Kun-yu¹, CHEN Zhan-tu²

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Nanning Academy of Social Sciences, Nanning 530022, China)

Abstract: Jialing River is a 1st grade tributary of upstream Yangzi River. In two years, Samples were collected monthly in Wentang Gorge section of Jialing River and analyzed multi-parameters including hydrochemistry and isotopes. Thus, a general result was concluded that the hydrochemical characteristic of Jialing River in Wentang gorge is controlled by weathering of stratum and the hydrochemical type is HCO_3^- -Ca. Most ions were influenced by dilution, which had higher concentrations in dry season than that in rainy season, but nitrate. Nitrate, which was controlled by human activities, has higher concentrations in rainy season. However, some other analyst revealed weathering impacts. The contrast ratio of $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ and HCO_3^- were between 0.5-1, the same as $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ and $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$, Which implied that the weathering impacts in this basin was mainly carbonated and sulfate weathering of carbonated, and sulphate rocks weathering was not so significant. The values of $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$ in Jialing River were $-8.74\text{‰} \sim -7.36\text{‰}$, and $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}}$ was 14.43‰ in dry season and 12.21‰ in rainy season. The data of isotopes inferred that, in rainy season sulfate weathering of carbonated and sulphate rocks weathering both had more impacts and sulphate rocks weathering played a more important role than sulfate weathering of carbonated, but, in dry season, carbonated weathering of carbonated was more meaningful.

Key words: weathering; hydrochemical index; $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$; $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}}$; Jialing River

河流的水化学特征和地球化学特征反映了地表风化、剥蚀作用的强弱, 陆地风化作用的产物亦是河流的主要物质来源, 所以研究风化作用对河流水文地球化学特征的影响在研究地表风化作用中日益受到重视. 文献[1]指出了我国河流的离子组成主要受碳酸盐岩石和蒸发盐岩石溶解作用的影响, 而较少地受硅酸盐和铝硅酸盐岩石风化作用. 紧接着, 国内许多学者对长江、黄河、乌江、红河等^[2~4]流域内河流的地球化学特征与风化作用进行研究, 表明在碳酸盐岩和蒸发盐岩控制下的江河流域中所发生的风化十分强烈, 突出了江河流域地球化学的敏感性和生态系统的脆弱性. 这种流域地球化学特征的敏感性和生态系统的脆弱性在西南喀斯特流域中体现更为明显^[5~8]. 本研究将通过对长江上游最大的支

流嘉陵江温塘峡段江水的水化学特征的季节性变化的考察, 分析出该流域中碳酸盐岩和蒸发盐岩的风化作用强弱与季节性变化, 探讨风化作用对喀斯特流域河流水化学季节性特征的影响.

1 研究区概况

嘉陵江是长江主要支流之一, 发源于陕西省凤县秦岭南麓, 自北向南流至重庆市朝天门码头后注入长江. 全长1 120 km, 流域面积 16 万 km^2 , 多年平

收稿日期: 2011-05-30; 修订日期: 2011-09-16

基金项目: 西南大学研究生创新基金项目(ky2010002); 国家自然科学基金项目(41072192); 重庆市科委院士专项(CSTC, 2010BC7004)

作者简介: 肖琼(1984~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为岩溶水资源, E-mail: xiaoqiong-8423@163.com

均流量为 $2\ 165\ \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 流域内主要有嘉陵江干流、渠江、涪江三大水系及干流西岸的西汉水和白龙江. 属亚热带季风气候, 降水季节分配不均, 夏秋多雨, 冬春少雨. 嘉陵江在合川至重庆的 89 km 江段中, 横截华蓥山南段三支脉, 形成了三座险峻的峡谷——沥鼻峡、温塘峡、观音峡, 合称嘉陵江小三峡 (图 1). 此段流域内碳酸盐岩广布, 埋藏型碳酸盐岩覆盖面积约为 80%, 裸露型碳酸盐岩覆盖面积为 10% 左右^[9], 由于在此流域范围内, 嘉陵江深切碳酸盐岩背斜, 使得埋藏于背斜中的地下河, 岩溶洞穴等出露江边, 岩溶地下水最终汇集到嘉陵江中. 温塘峡是嘉陵江深切温塘峡背斜核部形成的峡谷, 位于嘉陵江小三峡中间一个, 主要出露的地层为背斜核部的三叠系下统嘉陵江组 (T_{1j}) 碳酸盐岩, 厚大约 600 m, 是构成山的主体, 其岩性主要是浅灰、灰色、青灰色厚层块状灰岩、白云岩、白云质灰岩夹角砾状灰岩, 本区出露的部分是该层的上部, 下部未能全部出露. 其次为覆盖在山顶, 出露于两翼的上三叠统须家河组粉砂岩, 位于嘉陵江组灰岩和须家河组砂岩之间分布有很薄的一层中三叠统雷口坡组灰岩, 并含有石膏^[8~10].

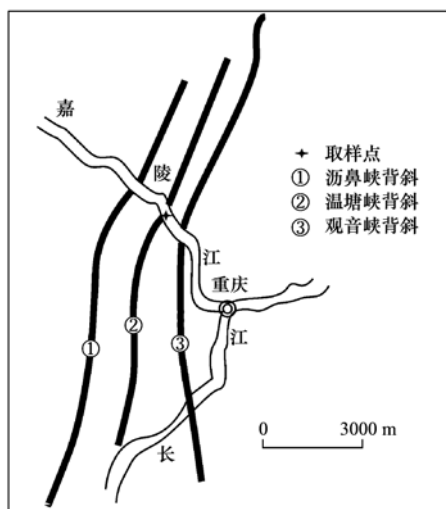


图 1 取样点位置示意

Fig. 1 Schematic diagram of sampling location

2 取样与实验分析

分别于 2009 年 1~12 月、2010 年 1~12 月在嘉陵江深切温塘峡背斜核部处取水样 24 个, 用于基本的阴离子分析、阳离子分析和同位素分析. 实验分析在西南大学水化学实验室和同位素地球化学实验室完成.

现场采用美国 Hach 公司便携式水质分析仪测

定水温、pH、电导率 (EC), 其精度分别为 0.1°C 、 0.01 和 $1\ \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$; HCO_3^- 和 Ca^{2+} 采用德国 Merck 公司便携式试剂盒, 精度分别为 $0.1\ \text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Cl^- 使用 AgNO_3 滴定法 ($0.1\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), SO_4^{2-} 采用紫外分光光度计分析; 阳离子在水样酸化防吸附后用 ICP-OES Optima 2100 DV 测定 ($0.001\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

水样中 DIC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值测定通过美国 Thermo 公司产 Delta V Plus 气体质谱仪测定, 前处理设备为 Gas Bench II 在线制样装置, 测定的 $\delta^{13}\text{C}$ 值采取相对于国际标准 PDB 以千分差 $\delta^{13}\text{C} (‰)$ 表示, 绝对误差 $< 0.2‰$. 硫同位素分析在宜昌地质矿产研究院完成, 将水样用碳酸钠-氧化锌半熔法转化为硫酸钡 (BaSO_4), 再用五氧化二钒 (V_2O_5) 法将 BaSO_4 转化成二氧化硫 (SO_2), 用气体同位素质谱计分析硫同位素组成, 使用质谱仪为德国产 MAT-251, 精密密度为 $\pm 0.2‰$, 重复样品分析的相对误差 $< \pm 0.5‰$.

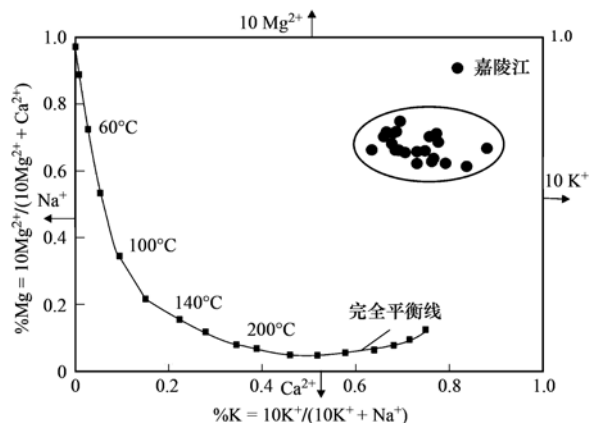
3 结果与讨论

3.1 主要离子成分以及水化学类型

通过对嘉陵江温塘峡段水体 2 a 的取样和分析, 发现嘉陵江水常年 pH 值在 7.33~8.40 之间, 电导率为 $312 \sim 435\ \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, 水温约 $10 \sim 35^\circ\text{C}$, 所有样品的阳离子当量浓度 ($\text{TZ}^+ = \text{Na}^+ + \text{K}^+ + 2\text{Mg}^{2+} + 2\text{Ca}^{2+} + 2\text{Sr}^{2+} + 2\text{Ba}^{2+}$) 年际变化范围为 $3.65 \sim 5.49\ \text{meq} \cdot \text{L}^{-1}$, 阴离子的总当量浓度 ($\text{TZ}^- = \text{Cl}^- + 2\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{NO}_3^-$) 变化范围为 $3.43 \sim 5.19\ \text{meq} \cdot \text{L}^{-1}$, 电价平衡之差为 $-2\% \sim 9\%$, 与其他大江大河一样, 主要表现为 TZ^+ 大于 TZ^- ^[11,12], 主要是因为在对江河水的阴阳离子分析时, 忽略了对有机酸的分析. 嘉陵江水中阴阳离子当量高于世界河流的平均值 ($\text{TZ}^+ = 0.725\ \text{meq} \cdot \text{L}^{-1}$)^[13], 但是与我国长江、乌江接近.

基于阳离子比率来反映水-岩作用平衡的图解模型是 Gignenbach^[14] 提出 Na-K-Mg-Ca 图解. 图 2 是基于本研究水化学资料计算得到的 Na-K-Mg-Ca 图解, 其上显示的是所有样品中 $10\text{Mg}^{2+}/(10\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+})$ 与 $10\text{K}^+/(10\text{K}^+ + \text{Na}^+)$ 的关系. 由图 2 可知, 嘉陵江水没有达到水岩平衡状态, 但其所有点投影的位置比较集中, 表明各个季节嘉陵江水的物质来源基本一致, 所以表现出 Mg/Ca 相对比较稳定.

将所有样品的各离子组成做阴阳离子三角图, 用以判断出河水中物质来源的不同风化作用. 由图 3 可以看出, 主要阳离子为 Ca^{2+} , 占有阳离子浓度

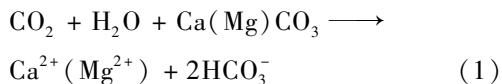


根据文献[14]修改

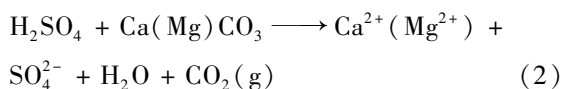
图2 Na-K-Mg-Ca 图解

Fig. 2 Na-K-Mg-Ca diagram

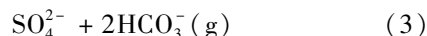
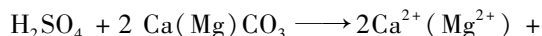
的60%以上,其次为 Mg^{2+} , 然后为 Na^+ 、 K^+ , 主要阴离子为 HCO_3^- , 占主要阴离子的70%左右, 其次为 SO_4^{2-} , 然后为 Cl^- 、 NO_3^- , 表明嘉陵江温塘峡段江水水化学类型为 HCO_3^- -Ca 型。在三角图中, 纯碳酸盐岩与水作用, 以及硅酸盐岩在碳酸作用下的产物主要阴离子以 HCO_3^- 为主, 各点数据的投影应该落在靠近 HCO_3^- 峰值一端; 蒸发岩风化和硫酸对硅酸盐岩的侵蚀, 其各点投影一般在 SO_4^{2-} 一端; 而如果是碳酸盐岩在被硫酸侵蚀后发生沉积钙化, 最终释放 CO_2 , 这种水体所投的点一般落在三角图的中间。具体地讲, 在阳离子三角图中, 石灰石或者石膏与水作用, 数据点投影应落在 Ca^{2+} 的峰值一端; 白云岩与水作用, 水体投点一般落在 Mg^{2+} - Ca^{2+} 线中间 ($Ca:Mg = 1:1$), 而硅酸盐岩风化则偏向 $K^+ + Na^+$ 一端。如图3所示, 在阳离子三角图中, 数据投影主要落在 Ca^{2+} 一端, 表明其主要是石灰石或者石膏的风化, 其次为白云岩的风化; 阴离子三角图中, 所有点投在基于碳酸的风化和硫酸溶解碳酸盐岩的风化之间, 偏向于基于碳酸的风化, 表明该流域中主要反应为:



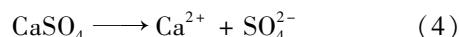
其次还有其他酸参与反应, 在开放系统中, H_2SO_4 或者 HNO_3 参与可能发生如下反应 (以 H_2SO_4 表示):



当 H_2SO_4 或者 HNO_3 浓度低到一定程度可能发生下列反应:



另外在水的作用下, 还有石膏的溶解:



由此可以推断出在嘉陵江流域中主要风化作用是基于碳酸的风化, 主要是在 CO_2 的参与下, 碳酸对石灰岩以及白云岩的溶解, 其次还有其他酸对碳酸盐岩的风化, 由于地层原因, 该地区还有石膏的存在, 所以风化作用中也存在石膏的溶解。

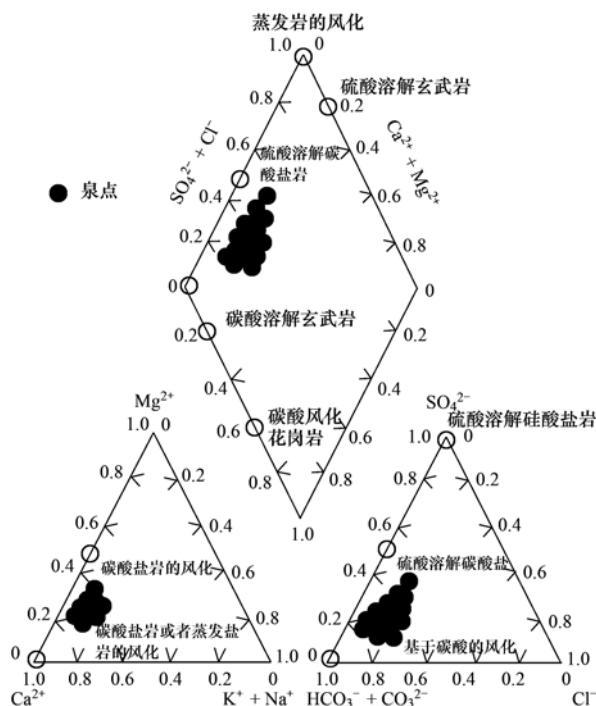


图3 嘉陵江水水化学类型手风琴图

Fig. 3 Ternary diagrams showing major ion concentrations for Jialing River

3.2 主要离子季节性变化以及风化强度的季节性变化

分析嘉陵江温塘峡段主要离子的季节性变化如图4所示, 以4~9月为雨季, 其余月为旱季, 可以发现雨季pH值偏低, 旱季pH值偏高。电导率是水中离子强度的体现, 与pH值一致, 也表现出雨季电导率偏低, 旱季电导率偏高。pH值与电导率的变化主要是由于雨季降水多为阵雨或者中强度降雨, 大量的雨水经过地表径流汇入嘉陵江中, 起到稀释作用, 导致pH值降低、电导率降低, 而旱季江水水量减小, 降雨强度弱, 雨水渗入土壤, 或者由裂隙进入岩石, 发生风化作用后慢慢通过地下河或者裂隙等汇入江水, pH值增大, 电导率升高。同时, 嘉陵江温塘峡段江水主要离子浓度雨季明显偏小, 旱季偏大, 而 NO_3^- 却刚好相反。这主要与其来源有关。 SO_4^{2-} 和

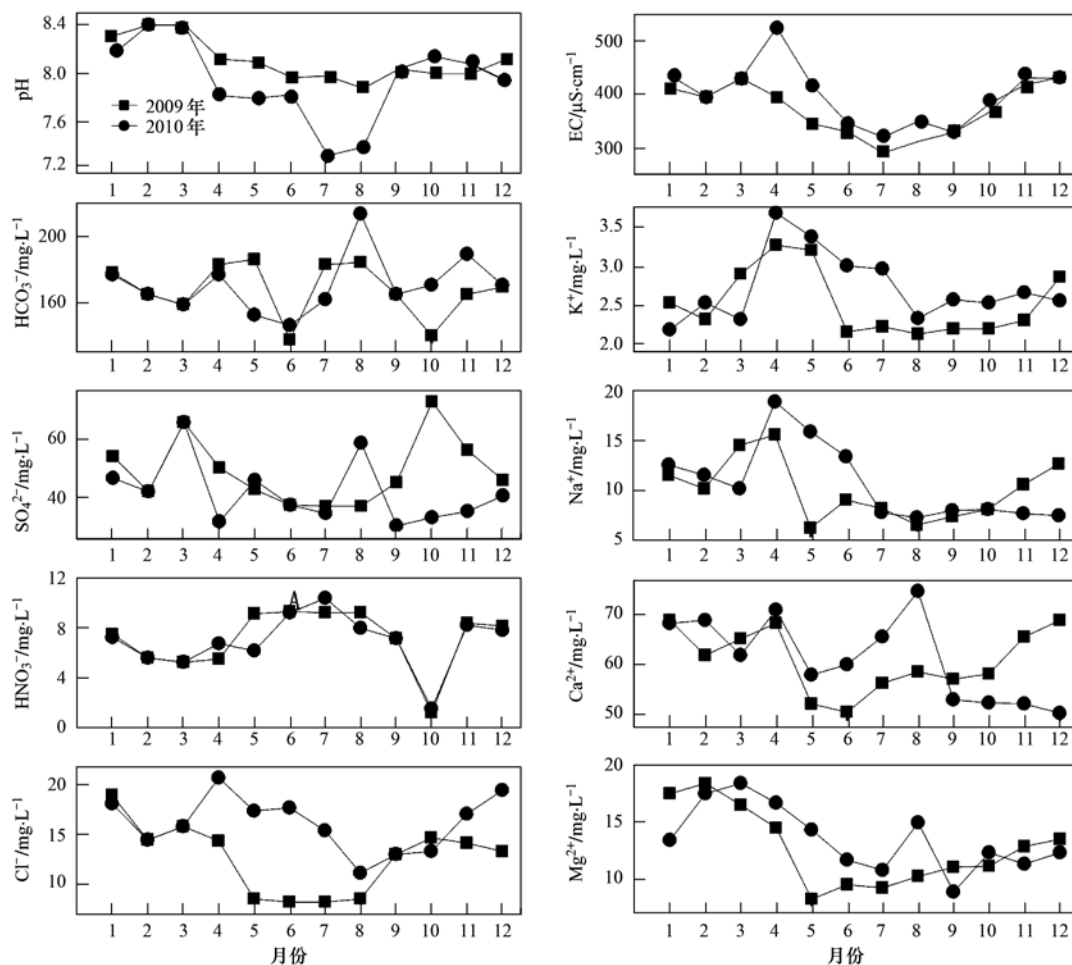


图4 2009年和2010年嘉陵江水中各离子浓度月季变化

Fig. 4 Monthly variation of ions of Jialing River in 2009 and 2010

HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要来源于岩石和土壤的风化,所以离子浓度变化相对一致,均在每年的3、4月达到最高值,排除3、4月,表现为雨季偏低,旱季偏高的特点.3、4月正好是每年第一场强降雨来临的时候,第一场强降雨往往会把旱季在岩石裂隙和地下水里的高浓度老水冲出,流入江河中,所以3、4月河水中各离子浓度会增大,而随后的大量降水随地表径流进入江河中,对江水起到一定的稀释作用. K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 的变化一致,雨季在降雨的稀释作用下偏低,旱季偏高.此段嘉陵江水中 K^+ 、 Na^+ 浓度之和与 Cl^- 浓度均比鲍丽然^[15]、夏学齐等^[16]所测的嘉陵江离子浓度偏高,主要原因为该段嘉陵江水深切温塘峡背斜,江边和江底很多温泉出露,同时该处正好位于北泉镇附近,工业及生活用污水进入江水中. NO_3^- 多数来源于农田施肥,每年的5月为施肥季节,雨季的到来使得土壤中的 NO_3^- 大量的进入降水中,从而导致 NO_3^- 浓度的增高.

按照方程式(1),碳酸风化碳酸盐岩所形成的 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 和 HCO_3^- 离子浓度之比为1:2,如果有其他酸参与反应,存在反应式(2),则所生成的 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 和 HCO_3^- 离子浓度之比1:2;当其他酸很弱的时候,存在反应式(3),则 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ (浓度比)介于1:2~1:1之间.如图5所示,2009年和2010年所有样品 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ (浓度比)的点均投在0.5~1之间,表明嘉陵江风化作用主要是碳酸的风化和硫酸风化碳酸岩盐,其次为硫酸盐岩的风化.如果没有方程(4)的进行,那么, $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ (浓度比)应该介于1/2~2/3之间,如果有方程(4)的进行,则应该介于1/2~1之间.如图6所示 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ (浓度比)仍然大部分处于0.5~1之间,且有一半以上的时间>2/3,表明存在硫酸盐岩的风化.同时,从月季变化趋势可以看出,4~9月 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ (浓度比)偏向于0.5这边,

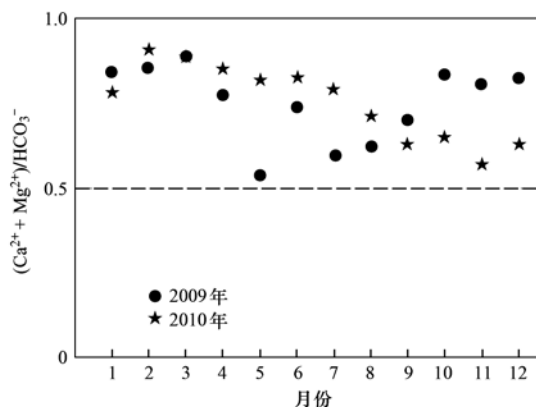


图5 嘉陵江水月 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ (浓度比)

Fig. 5 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ of Jialing River

其他月偏向于1,雨季 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ (浓度比)基本上 $< 2/3$,旱季高于 $2/3 < 1$. 由此可以看出,雨季硫酸盐岩的风化相对于旱季较强,碳酸盐岩的风化相对于旱季较弱. 这与 pH 值、电导率的变化也存在一致性,碳酸盐岩风化越强, pH 值越高;碳酸盐岩风化越弱, pH 值越低.

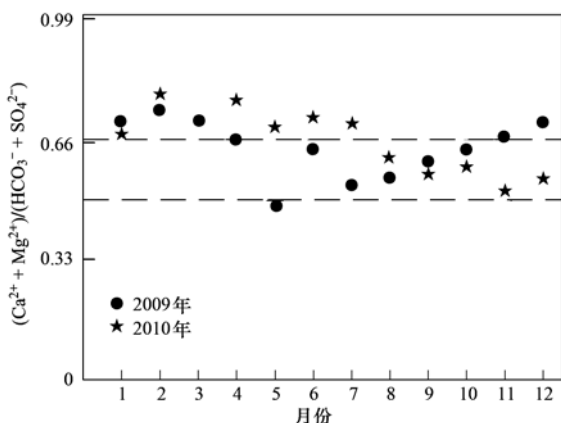


图6 嘉陵江水 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ (浓度比)

Fig. 6 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ of Jialing River

3.3 研究区风化类型的碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$) 和硫同位素 ($\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}}$) 证据

3.3.1 $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$ 与 HCO_3^-

水体中溶解态的碳元素因其物质来源的不同形态,转化过程而有所不同,从而可以根据其不同的同位素特征判断其来源. 喀斯特流域河水中的 DIC (dissolved inorganic carbon) 主要由 HCO_3^- 组成,占整个 DIC 浓度的 96% 以上^[17],所以,研究中往往用 $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$ 来表示水体中 DIC 的碳同位素值. 根据前人

研究资料, C_3 植物根呼吸作用生产的 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤有机质氧化分解的 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 基本一致,约为 -23‰ 左右^[18],重庆地区三叠系碳酸盐岩地层为 0.74‰ ^[19]. 由于雨水中的 HCO_3^- 含量相当少,忽略不计,仅以方程式(1)来计算,土壤中的 CO_2 与碳酸盐岩参与反应比为 1:1,也就是说,所生成的水中的 HCO_3^- 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -11.13‰ 左右,如果是仅有方程式(3),硫酸参与碳酸盐岩的风化,那么,其硫酸溶解碳酸盐岩产生的 HCO_3^- 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 0.74‰ . 由此根据所检测的嘉陵江水的稳定碳同位素值,可以计算出碳酸盐岩的风化中碳酸风化碳酸盐岩和硫酸风化碳酸盐岩的比例. 假定碳酸风化碳酸盐岩所占的同位素组分为 x ,则其他酸风化碳酸盐岩所占比例为 $1 - x$,由此,嘉陵江水中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$ 值可以表示为:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^- \text{ 嘉陵江}} = x \times (-11.13\text{‰}) + (1 - x) \times 0.74\text{‰}$$

根据表1中所测嘉陵江水中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$ 值,可以计算出在碳酸盐岩的风化中,碳酸风化碳酸盐岩的比例为 72% ~ 91%,其他酸风化碳酸盐岩的比例为 28% ~ 9%. 同时还可以看出,实验所得的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$ 值越低,表明 CO_2 参与风化碳酸盐岩生成 HCO_3^- 越少. 将表中 4 ~ 9 月作为雨季,其余月份作为旱季,将其每次实验所得 $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$ 值计算出其 CO_2 参与碳酸盐岩风化的比重作图7,可以看出雨季 CO_2 风化碳酸盐岩的比重相对较少,旱季相对较多,而其他酸如硫酸等风化碳酸盐岩的比重在旱季相对较少,雨季相对较多,这主要与该地区硫酸根的来源有关. 嘉陵江流域内硫酸的来源主要是酸雨,雨季降雨多,所以雨水中的 H_2SO_4 风化碳酸盐岩相对于冬季较多.

3.3.2 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$

为进一步说明研究流域的风化作用,对该地区嘉陵江水的硫同位素进行分析,分析得出 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}}$ 值旱季为 14.43‰ ^[20],雨季为 12.21‰ . 研究区域硫

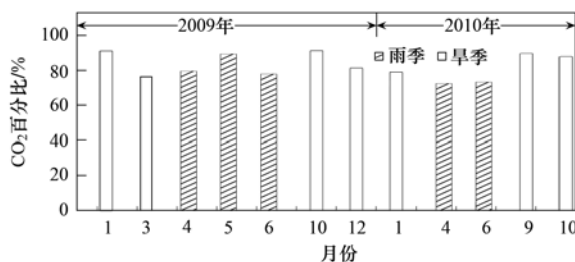


图7 CO_2 参与碳酸盐岩风化百分比

Fig. 7 Percentage of the CO_2 weathering carbonate rocks

酸根的来源主要有两方面,一是方程(2)或者方程(3)中参与反应的 H_2SO_4 ;二是来源于方程(4)中石膏的 SO_4^{2-} . 据 Li 等^[21] 报道,重庆附近江津地区 2004 年雨季降水 SO_4^{2-} 浓度变化为 $0.08 \sim 0.23 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,平均约 $0.15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $3.0\text{‰} \sim 5.6\text{‰}$,平均 4.3‰ ,较为偏正. 又根据林耀庭等^[22] 对四川盆地三叠系岩石硫同位素的研究,川东平行岭谷地区三叠系中石膏的硫同位素值介于 $14.7\text{‰} \sim 35.9\text{‰}$ 之间,平均值为 25.3‰ . 由此,如果只有硫酸对碳酸盐岩的风化,则 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}}$ 值偏轻;如果只有硫酸盐岩的风化,则 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}}$ 值偏重. 分析得出嘉陵江 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}}$ 值旱季为 14.43‰ ,雨季为 12.21‰ ,表明流域内既存在硫酸对碳酸盐岩的风化,也存在硫酸盐岩自身的风化,且雨季硫酸盐自身的风化作用更强.

结合研究区域的碳同位素特征可以看出(表 1),尽管研究流域内主要风化类型是碳酸对碳酸盐岩的风化,即土壤中的 CO_2 与水一起与碳酸盐岩反应,但雨季反应方程式(2)~(4)均比旱季要强,即硫酸对碳酸盐岩的风化作用和硫酸盐自身的风化作用在雨季均表现明显,其中,硫酸岩盐自身的风化作用在雨季强度更大. 而旱季碳酸对碳酸盐岩的风化作用比较强. 原因可以理解为由于雨季降水多,酸雨对碳酸盐岩的风化较早季更强,同时雨水促进了硫酸盐岩的溶解. 而水体中由于硫酸风化碳酸盐岩产生的 HCO_3^- 离子的增多,势必会影响碳酸对碳酸盐岩的风化,无独有偶,硫酸岩盐(石膏)自身的溶解也会影响碳酸盐岩的风化.

表 1 嘉陵江水 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$ 同位素信息/ ‰

Table 1 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$ in Jialing River/ ‰					
取样时间 (年-月)	$\delta^{13}\text{C}$	取样时间 (年-月)	$\delta^{13}\text{C}$	取样时间 (年-月)	$\delta^{34}\text{S}$
2009-01	-8.72	2010-01	-7.44	2005-12	14.43
2009-03	-7.16	2010-04	-6.79	2009-07	12.21
2009-04	-7.53	2010-06	-6.88		
2009-05	-8.55	2010-09	-8.57		
2009-06	-7.36	2010-10	-8.39		
2009-10	-8.74				
2009-12	-7.69				

4 结论

(1)嘉陵江温塘峡段水中主要阳离子为 Ca^{2+} , 主要阴离子为 HCO_3^- , 水化学类型为 HCO_3^- -Ca 型, 其水化学特征表明流域内主要风化作用是基于碳酸的风化,主要为土壤中的 CO_2 与水对碳酸盐岩的风

化. 其次研究区域还有其他酸(主要表现为硫酸)对碳酸盐岩的风化,以及硫酸盐岩的风化作用,硅酸岩盐的风化作用不明显.

(2)由主要离子的季节性变化分析得出其主要的阴离子和阳离子受地层的控制,雨季在稀释作用下较早季离子浓度偏小, HNO_3^- 在人类活动影响下表现出相反的现象.

(3)根据 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ (浓度比)与 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ (浓度比)表明,雨季硫酸盐岩的风化相对于旱季较强,碳酸盐岩的风化相对于旱季较弱.

(4)稳定的碳硫同位素研究表明硫酸对碳酸盐岩的风化作用和硫酸盐自身的风化作用在雨季均表现明显,其中,硫酸岩盐自身的风化作用在雨季强度更大. 而旱季碳酸对碳酸盐岩的风化作用比较强.

致谢:感谢王鹏等在野外取样的帮助,感谢孙玉川老师、刘子琦老师在实验室内的帮助.

参考文献:

[1] Hu M H, Stallard R F, Edmond J M. Major ion chemistry of some large Chinese rivers [J]. Nature, 1982, **298**(5874): 550-553.

[2] Zhang J, Huang W W, Liu M G, et al. Drainage basin weathering and major element transport of two large Chinese rivers (Huanghe and Changjiang) [J]. Journal of Geophysical Research, 1990, **95**(C8): 13277-13288.

[3] Gao Q Z, Tao Z, Huang X K, et al. Chemical weathering and CO_2 consumption in the Xijiang River basin, South China [J]. Geomorphology, 2009, **106**(3-4): 324-332.

[4] 童胜琪, 刘志飞, Le K P, 等. 红河盆地的化学风化作用: 主要和微量元素地球化学记录 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, **25**(3): 218-225.

[5] 袁道先, 刘再华. 碳循环与岩溶地质环境 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[6] 邱会东, 贾云, 赵鹏林, 等. 嘉陵江重庆主城区段水域中氮和磷的形态特征分析 [J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2005, **7**(2): 56-58.

[7] 刘文杰, 苏永中, 杨荣, 等. 民勤地下水水化学特征和矿化度的时空变化 [J]. 环境科学, 2009, **30**(10): 2911-2918.

[8] 何守阳, 朱立军, 董志芬. 典型岩溶地下水系统地球化学敏感性研究 [J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1176-1183.

[9] 李铁松, 张桥英. 嘉陵江的起源及流域自然环境研究 [J]. 四川师范学院学报(自然科学版), 1999, **20**(2): 107-108.

[10] 杨晓霞. 略论嘉陵江三峡旅游资源的保护 [J]. 河北工程技术职业学院学报, 2004, **6**(1): 5-8.

[11] Zhang J, Huang W W. Dissolved trace metals in the Huanghe: the most turbid large river in the World [J]. Journal of Water Research, 1993, **27**(1): 1-8.

[12] Dixon J C, Thorn C E. Chemical weathering and landscape

- development in mid-latitude alpine environments [J]. *Geomorphology*, 2005, **67**(1-2): 127-145.
- [13] Meybeck M. Pathways of major elements from land to ocean through river [A]. In: Martin J M, Burton J D, Eisma D. River inputs to ocean system [M]. New York: United Nations Press, 1981. 18-30.
- [14] Giggenbach W F. "Andesitic water": a phantom of the isotopic evolution of water-silicate systems [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, **120**(3-4): 519-522.
- [15] 鲍丽然, 李晓东, 刘小龙. 嘉陵江河水主要离子化学组成的时间和空间变化特征 [J]. *水利水电科学进展*, 2010, **30**(4): 35-41.
- [16] 夏学齐, 杨忠芳, 王亚平, 等. 长江水系河水主要离子化学特征[J]. *地学前缘*, 2008, **15**(5): 3-5.
- [17] 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.
- [18] Cerling T E, Solomon D K, Quade J, *et al.* On the isotopic composition of carbon in soil carbon dioxide [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, **55**(11): 3403-3405.
- [19] 王翱宇, 蒲俊兵, 沈立成, 等. 重庆雪玉洞 CO₂ 浓度变化的自然与人为因素探讨 [J]. *热带地理*, 2010, **30**(3): 272-277.
- [20] 曹云. 重庆市北温泉景区温泉和钙华的地球化学研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- [21] Li X D, Masuda H, Kusakabe M, *et al.* Degradation of groundwater quality due to anthropogenic sulfur and nitrogen contamination in the Sichuan Basin, China [J]. *Geochemical Journal*, 2006, **40**(4): 309-332.
- [22] 林耀庭, 高立民, 宋鹤彬. 四川盆地海相三叠系硫同位素组成及其地质意义 [J]. *地质地球化学*, 1998, **26**(4): 43-49.

CONTENTS

Quantitative Estimation Source of Urban Atmospheric CO ₂ by Carbon Isotope Composition	LIU Wei, WEI Nan-nan, WANG Guang-hua, <i>et al.</i> (1041)
Moisture Sources of Guangzhou During the Freezing Disaster Period in 2008 Indicated by the Stable Isotopes of Precipitation	LIAO Cong-yun, ZHONG Wei, MA Qiao-hong, <i>et al.</i> (1050)
Optical Properties of Aerosol During Haze-Fog Episodes in Beijing	YU Xing-na, LI Xin-mei, DENG Zen-grandeng, <i>et al.</i> (1057)
Secondary Organic Tracers in Summer PM _{2.5} Aerosols from Baima Spring Scenic Area, Yaan, Sichuan Province	DAI Dong-jue, LI Li, LIU Zi-fang, <i>et al.</i> (1063)
Source Profile and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Vehicle Exhaust	QIAO Yue-zhen, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1071)
<i>Platanus orientalis</i> Foliar N% and δ ¹⁵ N Responses to Nitrogen of Atmospheric Wet Deposition in Urban Area	WANG Yan-li, XIAO Hua-yun, XIAO Hong-wei (1080)
Distribution and Controlling Factors of Nitric Oxide Concentrations in Surface Seawater of Jiaozhou Bay and Adjacent Waters	XUE Chao, LIU Chun-ying, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (1086)
Uncertainty Characterization Approaches for Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Taihu Lake	GUO Guang-hui, WU Feng-chang, HE Hong-ping, <i>et al.</i> (1091)
Preliminary Analysis of Spatiotemporal Variation of Water Quality and Its Influencing Factors in the Jiulong River Watershed	HUANG Jin-liang, HUANG Ya-ling, LI Qing-sheng, <i>et al.</i> (1098)
Ecological Stoichiometric Relationships of Periphyton Community Elemental Composition and Variations of Water Quality in the Chaobai River	 CUI Jing-guo, SHAN Bao-qing, WANG Shuai (1108)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality of Panxi River in Spring	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (1114)
Weathering Seasonal Variations in Karst Valley in Southwest China	XIAO Qiong, SHEN Li-cheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (1122)
Algal Community Structure and Water Quality Assessment on Drawdown Area of Kaixian Waters in Three Gorges Reservoir During Winter Storage Period	 GUO Jing-song, XIE Dan, LI Zhe, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics of Phytoplankton Community Changes in Dianshan Lake During Peak Period of Algal Blooms	XU Chun-yan, YANG Jie, MA Ming-rui, <i>et al.</i> (1136)
Nitrogen and Phosphorus Release from Herbaceous Vegetation Under Simulated Inundation Experiment of Water-Level Fluctuation Zone in the Three Gorges Reservoir Area	 WANG Jian-chao, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (1144)
Output Characteristics of Non-point Phosphorus from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area Under the Special Rainfall	LI Zhen-wei, YU Xing-xiu, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (1152)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Urban Dusts from Hefei City	LI Ru-zhong, ZHOU Ai-jia, TONG Fang, <i>et al.</i> (1159)
Distribution and Pollution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Hedi Reservoir	ZHANG Hua-jun, CHEN Xiu-kang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (1167)
Heavy Metals Distribution and Risk Assessment of Sediments in the Riverine Wetland of Sanmenxia Reservoir	AO Liang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1176)
Regional Distribution and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in Surface Sediments from Coastal Wetlands of the Yellow River Delta	 LIU Zhi-jie, LI Pei-ying, ZHANG Xiao-long, <i>et al.</i> (1182)
Calculation of Environmental Dredging Depth of Heavy Metal Polluted Sediments in Zhushan Bay of Taihu Lake	JIANG Xia, WANG Wen-wen, WANG Shu-hang, <i>et al.</i> (1189)
Characteristics of PAHs Pollution in Sediments from Leizhou Coastal Marine Area, Liusha Bay and Shenzhen Bay	ZHAO Li-rong, SUN Sheng-li, KE Sheng (1198)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Black Carbon in Road Dusts from Typical Cities of China and India	PAN Su-hong, ZHANG Gan, SUN Ya-li, <i>et al.</i> (1204)
Waterborne Iron Migration by Groundwater Irrigation Pumping in a Typical Irrigation District of Sanjiang Plain	ZOU Yuan-chun, YU Xiao-fei, HUO Li-li, <i>et al.</i> (1209)
Research on Controlling Iron Release of Desalted Water Transmitted in Existing Water Distribution System	TIAN Yi-mei, LIU Yang, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (1216)
Exploration of Newly-Formed Ferric as the Coagulant	YANG Xue, ZHANG Jing-cheng, GUAN Xiao-hong (1221)
Degradation of Medroxyprogesterone in Drinking Water by Ozone Oxidation	YUE Chan-yuan, MIAO Heng-feng, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (1227)
Synthesis of Core/Shell Structured Magnetic Carbon Nanoparticles and Its Adsorption Ability to Chlortetracycline in Aquatic Environment	 WANG Yi-xuan, ZHANG Di, NIU Hong-yun, <i>et al.</i> (1234)
Removal of Nickel from Aqueous Solutions Using Complexation-Ultrafiltration Process	QIN Shu, SHAO Jia-hui, HE Yi-liang, <i>et al.</i> (1241)
Degradation of Organic Pollutants by Photo-Fenton-Like System with Hematite	ZHANG Yu, GU Yan, YANG Hui, <i>et al.</i> (1247)
Study on the Degradation of Atrazine in Photo-Fenton-Like System Under Visible Light Irradiation Promoted by N-doped Ta ₂ O ₅	ZHAO Lu, DENG Yi-rong, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1252)
Degradation of Prometon by O ₃ /H ₂ O ₂	LI Shao-feng, SUN Chu (1260)
Photoelectrocatalytic Degradation Kinetics of Malachite Green by Pr-N Co-doped TiO ₂ Photocatalyst	SHA Shuang, ZHOU Shao-qi, ZHANG Xiao-na, <i>et al.</i> (1267)
Experimental Study on Acid Mine Drainage Treatment Using Mine Tailings of Xiangsi Valley, Tongling, China	ZHANG Nan, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (1272)
Effect of Polymeric Aluminum-iron on EPS and Bio-flocculation in A ² /O System	WEN Qin-xue, LIU Ai-cui, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Temperature on Pollutant Removal and Nitrous Oxide Emission of Wastewater Nitrogen Removal System	ZHANG Ting-ting, ZHANG Jian, YANG Fang, <i>et al.</i> (1283)
Effect of Temperature on Stability of Nitrogen Removal in the ANAMMOX Reactor	LI Xiang, HUANG Yong, ZHENG Yu-hui, <i>et al.</i> (1288)
Phosphorus Removal Characteristics by Aerobic Granules in Normal Molasses Wastewater After Anaerobic Treatment	WANG Shuo, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1293)
Physicochemical Characteristics of Granules with Different Size in a Granular Sludge System for Phosphorus Removal	LI Zhi-hua, ZHANG Yu-rong, YANG Fan, <i>et al.</i> (1299)
Denitrifying Bacteria of Constructed Wetland System Based on Nitrous Oxide Reductase Gene (<i>nosZ</i>)	WANG Xiao-jun, CHEN Shao-hua, ZHANG Zhao-ji, <i>et al.</i> (1306)
Improving Degradation Ability of an Aerobic Denitrifier by Ultraviolet Mutagenesis	YU Jia-jia, CHEN Jun, YANG Xuan, <i>et al.</i> (1313)
Characteristics of the Extracellular Polymeric Substances of a Heterotrophic Nitrifying Bacterium Strain	CHEN Zhe, ZHANG Bin, SEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1318)
Study on Toxic Effects of Ammonia on Embryonic and Yolk-sac Stage Larvae of Rare minnow	WANG Zhi-jian, LU Zeng-hui, SHI Ping (1323)
Effects of Continuous Cropping of Vegetables on Ammonia Oxidizers Community Structure	MENG De-long, YANG Yang, WU Yan-zheng, <i>et al.</i> (1331)
Impact of Biochar Amendment on the Sorption and Dissipation of Chlorantraniliprole in Soils	WANG Ting-ting, YU Xiang-yang, SHEN Yan, <i>et al.</i> (1339)
Quantifying Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Photo-assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	NIE San-an, ZHOU Ping, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1346)
Compositions and Diagnostic Ratios of Heavily Degraded Crude Oil Residues in Contaminated Soil in Oilfields	WANG Jian, ZHANG Xu, LI Guang-he (1352)
Study on Equilibrium Adsorption of Volatile Chlorinated Hydrocarbons on Humid Soils	MENG Fan-yong, LIU Rui, Kobayashi Takeshi, <i>et al.</i> (1361)
Toxicity and Accumulation of Copper and Nickel in Wheat Plants Cropped on Alkaline and Acidic Field Soils	HUANG Jin-sun, WEI Dong-pu, GUO Xue-yan, <i>et al.</i> (1369)
Change Traits of Phosphorous Consumption Structure in China and Their Effects on Environmental Phosphorous Loads	MA Dun-chao, HU Shan-ying, CHEN Ding-jiang, <i>et al.</i> (1376)
Research Based on 3MRA Model About the Risk Assessment Methods and Applications of the Landfill Waste	YUAN Ying, XI Bei-dou, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (1383)
Impacts of Initial Moisture Content of MSW Waste on Leachate Generation and Modified Formula for Predicting Leachate Generation	LAN Ji-wu, ZHAN Liang-tong, LI Yu-chao, <i>et al.</i> (1389)
Transformation of Dibutyl Phthalate in Bioreactor Landfill	FANG Cheng-ran, LONG Yu-yang, SHEN Dong-sheng (1397)
Kriging Analysis of Vegetation Index Depression in Peak Cluster Karst Area	YANG Qi-yong, JIANG Zhong-cheng, MA Zu-lu, <i>et al.</i> (1404)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2012年4月15日 33卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 4 Apr. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行