

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析	王洪强, 贺千山, 陈勇航, 亢燕铭 (1215)
乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征	陆辉, 魏文寿, 崔彩霞, 何清, 王瑶 (1223)
典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布	吴辉, 金军, 王英, 李明圆, 何松洁, 徐萌, 孙一鸣 (1230)
某焦化厂周边大气 PM ₁₀ 重金属来源及健康风险评价	董婷, 李天昕, 赵秀阁, 曹素珍, 王贝贝, 马瑾, 段小丽 (1238)
基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法	李润奎, 赵彤, 李志鹏, 丁文军, 崔骁勇, 许群, 宋现锋 (1245)
珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究	孙成玲, 谢绍东 (1250)
低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究	李华琴, 何觉聪, 陈洲洋, 黎宝仁, 黄倩茹, 张再利, 魏在山 (1256)
太子河流域莠去津的空间分布及风险评价	郑磊, 张依章, 张远, 朱鲁生, 王志强 (1263)
一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法	王燕, 朱春刚, 许笛, 丁士明 (1271)
外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化	傅玲, 赵凯, 王国祥, 欧媛, 范嫻, 毛丽娜, 张佳, 韩睿明 (1278)
基于物理过程的矿区地下水污染风险评价	孙法圣, 程品, 张博 (1285)
重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究	杨平恒, 卢丙清, 贺秋芳, 陈雪彬 (1290)
重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究	蓝家程, 杨平恒, 任坤, 陈雪彬, 徐昕, 胡宁 (1297)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 根系对沉积物中各形态磷的影响	李振国, 王国祥, 张佳, 马久远, 魏宏农, 俞振飞 (1304)
循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究	彭剑峰, 宋永会, 袁鹏, 张雪妍, 胡小明 (1311)
不同环境因素下太湖中四环素的自然消减	段伦超, 王凤贺, 纪莹雪, 张帆, 赵斌, 王国祥 (1318)
再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究	黄晶晶, 汤芳, 席劲璇, 庞宇辰, 胡洪营 (1326)
二级处理出水的 UV-TiO ₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验	王西峰, 龚昕, 胡晓莲, 任伯帆 (1332)
水中 C ₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究	方华, 沈冰冰, 荆洁, 陆继来, 王媛 (1337)
XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染	赵应许, 纵瑞强, 高欣玉, 谢慧君, 殷永泉, 梁爽 (1343)
纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究	付融冰 (1351)
共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响	王琪, 刘辉, 姜林, 唐军 (1358)
硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究	吴宣, 谭科艳, 胡希佳, 顾远, 杨宏 (1366)
基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究	姜应和, 刘佩炬, 王磊, 田中凯, 刘小英 (1372)
模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	陈燕, 黄芳, 谢鑫源 (1377)
电活性生物膜介导 Cu ²⁺ 生物还原的试验研究	刘毅, 周顺桂, 袁勇, 刘志 (1384)
模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收	程丹, 朱能武, 吴平霄, 邹定辉, 邢翊佳 (1391)
填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因	何小松, 余红, 席北斗, 崔东宇, 潘红卫, 李丹 (1399)
化学合成施氏矿物与 H ₂ O ₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究	王鹤茹, 宋永伟, 徐峙辉, 崔春红, 周立祥 (1407)
处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究	杨娜, 陈秀荣, 林逢凯, 黄华, 章斐, 赵骏, 丁毅 (1414)
剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌多样性的比较研究	董慧岭, 季民 (1421)
锰氧化菌 <i>Aminobacter</i> sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究	晏平, 姜理英, 陈建孟, 何智敏, 肖少丹, 蒋铁锋 (1428)
1 株铁基自养反硝化菌的脱氮特性	王弘宇, 杨开, 张倩, 季斌, 陈丹, 孙宇翀, 田俊 (1437)
碘普罗胺降解菌 <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 共代谢降解性能研究	徐冰洁, 高品, 薛翌, 何梦琦, 吴凡 (1443)
利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化	张梦露, 党志, 伍凤姬, 梁旭军, 郭楚玲, 卢桂宁, 杨琛 (1449)
毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究	陈善佳, 陈秀荣, 闫龙, 赵建国, 章斐, 江子建 (1457)
缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响	王珊, 赵树欣, 魏长龙, 于水燕, 史吉平, 张保国 (1462)
微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响	王妮敏, 邓琦, 邹华, 梁婢娟 (1468)
东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应	张巍巍, 王光华, 王美玉, 刘晓冰, 冯兆忠 (1473)
生物结皮的发育演替与微生物生物量变化	吴丽, 张高科, 陈晓国, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1479)
老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响	陈丽红, 刘征涛, 方征, 王晓南, 王婉华 (1486)
土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议	赵晓军, 陆泗进, 许人骥, 李伯苓, 吴国平, 魏复盛 (1491)
藏北可可西里地区土壤元素背景值研究	柏建坤, 王建力, 李潮流, 康世昌, 陈鹏飞 (1498)
三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析	胥焘, 王飞, 郭强, 聂小倩, 黄应平, 陈俊 (1502)
浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析	厉炯慧, 翁珊, 方婧, 黄佳蕾, 陆芳华, 卢宇浩, 张洪铭 (1509)
西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征	张海珍, 唐宇力, 陆骏, 周虹, 徐芸茜, 陈川, 赵赞, 王美娥 (1516)
生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价	解惠婷, 张承中, 徐峰, 李海凤, 田振宇, 唐琛, 刘文彬 (1523)
上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征	诸葛祥真, 毕春娟, 陈振楼, 张焕焕, 倪玮怡 (1531)
SDBS/Na ⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响	唐颖, 李航, 朱华玲, 田锐, 高晓丹 (1540)
稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究	赵述华, 陈志良, 张太平, 潘伟斌, 彭晓春, 车融, 欧英娟, 雷国建, 周鼎 (1548)
藻类水体 Cd ²⁺ 毒性快速监测新方法研究	段静波, 刘文清, 张玉钧, 赵南京, 殷高方, 肖雪, 余晓娅, 方丽 (1555)
用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究	龙峰, 施汉昌, 王洪臣, 盛建武 (1561)
Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO ₃ ⁻ 吸附性能的研究	钟琼, 李欢 (1566)
污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨	廖晓勇, 陶欢, 阎秀兰, 赵丹, 林龙勇, 李尤 (1576)
城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展	杨孟, 李凤英, 刁一伟, 吴丹 (1586)
水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 杨毅, 安代志 (1597)
六价铬细菌还原的分子机制研究进展	李斗, 赵由才, 宋立岩, 尹雅洁, 王洋清, 徐中慧 (1602)
农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术	魏源送, 郁达伟, 曹磊 (1613)
《环境科学》征稿简则 (1427) 《环境科学》征订启事 (1497) 信息 (1383, 1390, 1398, 1560)	

重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究

杨平恒^{1,2,3}, 卢丙清⁴, 贺秋芳^{1,3}, 陈雪彬^{1,3}

(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, 重庆 400715; 2. 国土资源部岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004; 3. 国土资源部岩溶生态环境-重庆南川野外基地, 重庆 408435; 4. 重庆市地质勘查开发局南江水文地质工程地质队, 重庆 401121)

摘要: 以重庆青木关岩溶地下水系统为例, 分析了地下水系统入口地表水和出口地下水两年的水文过程、物理化学及部分 δD 、 $\delta^{18}O$ 数据, 目的是掌握地下河系统地球化学在时间及空间上的特征及变化规律。结果表明, 研究区地下水系统流量受降雨的影响存在丰水期和枯水期, 地下水中化学组分在岩溶含水层运移的过程中受水岩作用、人类活动和雨水稀释作用的共同影响, 并表现出较为明显的时间和空间规律性。地下河系统入口的地表水 δD 、 $\delta^{18}O$ 值分布于重庆大气降水线的下方, 地表水蒸发作用强烈, 且旱季 δD 、 $\delta^{18}O$ 值重于雨季, 存在明显的季节效应; 出口地下水的 $\delta^{18}O$ 、 δD 值较入口偏负, 且相对稳定, 认为雨水主要是以通过落水洞直接灌入和通过岩溶非饱和带扩散流等两种形式转换为地下水。

关键词: 岩溶; 地下水系统; 水文地球化学; $\delta^{18}O$; δD ; 青木关

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1290-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.04.012

Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing

YANG Ping-heng^{1,2,3}, LU Bing-qing⁴, HE Qiu-fang^{1,3}, CHEN Xue-bin^{1,3}

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. The Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources, Guilin 541004, China; 3. Field Scientific Observation & Research Base of Karst Eco-environments at Nanchuan in Chongqing, Ministry of Land and Resources, Chongqing 408435, China; 4. Nanjiang Hydrogeological & Engineering Geology Brigade, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 401121, China)

Abstract: The two-year hydrologic process, hydrochemistry, and a portion of δD , $\delta^{18}O$ of both the surface water at the inlet and the groundwater at the outlet, were investigated to identify the spatial and temporal variations of hydrogeochemistry in the Qingmuguan karst groundwater system. Research results show that there are wet and dry periods in the groundwater system owing to the striking influence of seasonal rainfall. The evolution of the chemical compositions in the groundwater is significantly influenced by the water and rock interaction, anthropogenic activities and rainwater dilution. The variations of the chemical compositions in the groundwater exhibit obvious spatiality and temporality. The δD and $\delta^{18}O$ of the surface water beneath the local Meteoric Water Line of Chongqing indicate that the surface water is strongly evaporated. Furthermore, the δD and $\delta^{18}O$ of the surface water are more positive in the dry period than in the wet period, showing a distinct seasonal effect. The δD and $\delta^{18}O$ of the groundwater are quite stable and much negative compared with those of the surface water, which suggests that the rainwater recharge the groundwater via two pathways, one directly through sinkholes and the other via the vadose zone.

Key words: karst; groundwater system; hydrogeochemistry; $\delta^{18}O$; δD ; Qingmuguan

水是生命之源、生产之要、生态之基, 是自然系统中最积极、最活跃的要害之一, 在国民经济建设中发挥着不可替代的作用。重庆市地下水天然资源量为 $160.66 \text{ 亿 m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 其中岩溶地下水资源量为 $118.33 \text{ 亿 m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 占地下水资源量的 73.65%^[1]。重庆市碳酸盐岩分布在 36 个区县, 总面积达 $3.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占土地面积的 40%, 主要集中于渝东南、渝东北和都市经济圈的各区县, 其中已知岩溶地下河总数约 380 条, 总长约 2155 km ^[2]。近年来重庆市经济社会迅速发展, 对水资源的需求不断扩大, 一些岩溶地区的地下水受到严重的污染, 地下水中各种污

染物质的浓度呈逐年上升的趋势, 水质在逐年恶化, 呈现污染源多样化, 污染由点向面发展, 有机污染与无机污染并存等特点^[3], 直接影响到当地人民群众的身体健康, 逐渐成为制约重庆经济社会发展的瓶颈因素。

收稿日期: 2013-08-21; 修订日期: 2013-10-22

基金项目: 2011 年度重庆市国土房管局科技计划项目; 岩溶动力学重点实验室开放基金项目 (KDL2012-08); 中央高校基本科研业务费专项 (XDJK2012B005); 国家自然科学基金项目 (41103068); 重庆市院士专项 (cstc2013jcyjys20001)

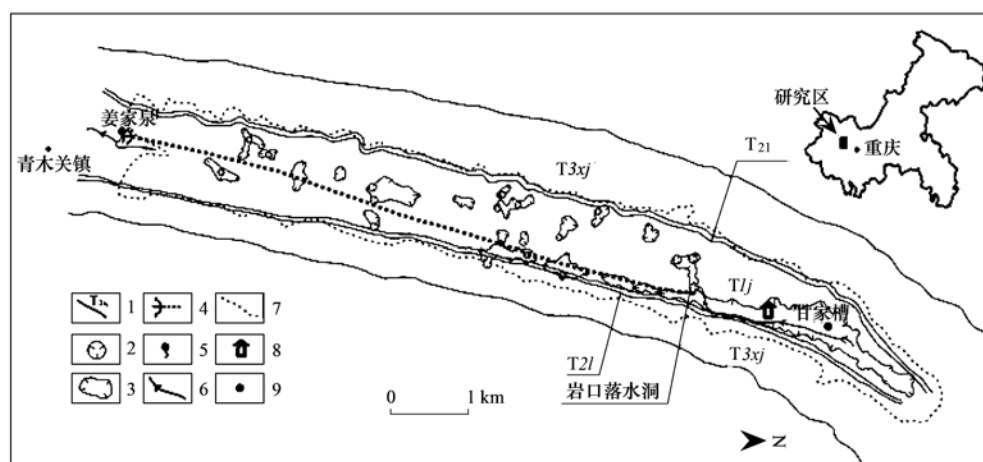
作者简介: 杨平恒 (1983 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为岩溶环境学, E-mail: balacne@swu.edu.cn

岩溶地下河系统水文地球化学动态是地下水在降水、径流、岩性、地质构造等自然因素及人类活动因素^[4~9]影响下, 随时间和空间变化而演化的过程, 它反映了岩溶地下河系统中水化学的形成和迁移变化规律. 由于蒸发和凝结等作用, 自然界中水体在运移的过程中发生不同程度的同位素分馏, 导致各种水体中的 δD 、 $\delta^{18}O$ 具有不同的特征值, 故 δD 、 $\delta^{18}O$ 被广泛地应用在大气降水、地表水和地下水及其之间的相互转化的研究中^[10~17]. 作为对地下河系统外界影响因素的反映, 地下水物理、化学指标及 δD 、 $\delta^{18}O$ 的动态变化特征, 是了解自然因素和人为因素对地下河系统影响程度的一个重要手段, 是研究岩溶地球化学的一个重要途径.

本研究以重庆典型岩溶地下水系统——青木关地下河为例, 对该地下河系统入口地表水和出口地下水的水文过程、水化学组分及 δD 、 $\delta^{18}O$ 等水文地球化学信息进行分析, 旨在掌握地下河系统水文地球化学在时间及空间上的特征及变化规律, 为宝贵的岩溶地下水资源开发和利用奠定理论基础.

1 研究区概况

青木关地下河系统位于川东平行岭谷区重庆境内的华蓥山帚状褶皱束縊云山脉南延段, 行政位置处于沙坪坝区、北碚区和璧山县的交界处. 区内碳酸盐岩地层主要由下三叠统嘉陵江组 (T_{1j}) 厚层块状灰岩、白云岩、白云质灰岩夹角砾状灰岩, 及中三叠统雷口坡组 (T_{2l}) 白云质灰岩、白云岩及泥灰岩, 夹角砾状灰岩及灰绿、黄绿色页岩组成. 碳酸盐岩地层被两侧上三叠统须家河组 (T_{3xj}) 灰色长石石英砂岩及煤层包围. 碳酸盐岩地层为背斜核部, 须家河组地层为背斜两翼. 由于岩性差异, 导致背斜成山, 向斜成谷, 表现为“一山二岭一槽”的典型岩溶槽谷地貌. 区内地势呈北高南低, 碳酸盐岩地层内发育有一条自 NNE 向 SSW 流动的地下河, 直线距离长约 7.4 km (图 1). 该地下河起源于流域北端甘家槽洼地南缘的岩口落水洞 (海拔约 530 m), 流域面积约 13.4 km². 地下河沿途不断接受两侧地表水通过落水洞灌入以及裂隙的补给. 地下河主要在流域南端的姜家泉以泉水的形式 (海拔约 320 m) 出露^[18], 注入青木溪, 最终流入长江.



1. 地层界线及代号; 2. 落水洞; 3. 洼地; 4. 青木关地下河展布及出口; 5. 泉点; 6. 地表水流向; 7. 地表分水岭; 8. 气象站; 9. 地物名

图 1 研究区水文地质示意

Fig. 1 Sketched map of hydrogeology at the study site

研究区地下河岩溶管道介质的平均直径 2.27 ~ 2.72 m^[19], 但其储水空间占整个研究区地下空间的比例不到 10%; 而岩溶非饱和带扩散流 (裂隙) 含水介质形态非常发育, 其比例达 90% 以上^[19,20], 在水资源的存储和调节上起到了非常重要的作用.

研究区属于亚热带湿润季风型气候, 多年平均降水量为 1 250 mm, 多年平均气温为 18.5℃. 土地

利用类型主要为林地, 占流域面积的 82%, 主要分布在山坡两侧; 水田面积占流域面积的 6%, 主要分布在流域上游的甘家槽洼地; 旱地面积占流域面积的 8%, 主要分布在上中游的洼地内或其边缘的坡地上. 区内土壤覆盖以地带性黄壤和非地带性石灰土为主.

在研究区内人类活动以农业活动为主. 由于历史原因, 曾经开采过小型煤矿.

2 研究方法

2.1 野外仪器在线记录

在姜家泉出口安装 WGZ-1 型光电数字水位计(重庆华正水文仪器有限公司)实时监测水位,精度为 1 mm,根据经验公式^[19]将水位换算成流量.在甘家槽洼地设有 HOBO 小型自动气象站(美国 ONSET 公司),观测区内的降雨量,精度为 1.0%.

2.2 野外水样采集和保存

选取地下河系统入口岩口落水洞地表水和出口姜家泉地下水为研究载体.岩口落水洞地表水主要来自大气降水、甘家槽洼地水田排水(来源于大气降水)及洼地周边居民的生活废水.每月于岩口落水洞和姜家泉采集水样,雨季适度加密取样,并避开雨天.阴离子水样采样方法:将水样装于洁净的 1 L 聚乙烯样瓶中;阳离子水样取样方法:将水样装于洁净的 60 mL 聚乙烯样瓶中,加 1:1 硝酸溶液若干滴,调 pH < 2. δD 和 $\delta^{18}O$ 水样采样方法:在水下装满 10 mL 离心管,使离心管内不留气泡,用胶带纸密封.所有水样在采集当日内运至实验室,4℃ 保存直到测试.

2.3 测试分析方法

电导率、pH 值和水温由 HQ40 d 便携式多参数水质分析仪(美国 Hach 公司)野外现场测定,精度分别为 $1 \mu S \cdot cm^{-1}$ 、0.01 和 0.1℃.阴离子测试方法参考文献[21]. NO_3^- 测定采用紫外分光光度法, SO_4^{2-} 测定采用硫酸钡比浊法, PO_4^{3-} 测定采用钼酸铵比色法,使用仪器为 UV2450 紫外-可见分光光度计(Shimadzu 公司); Cl^- 测定采用硝酸银滴定法; HCO_3^- 采用碱度试剂盒(德国 Merck 公司)现场测定.所有阳离子使用 ICP-OES Optima 2100DV (PerkinElmer 公司)检测,仪器 1 h 内相对标准偏差 $\leq 0.5\%$.

δD 和 $\delta^{18}O$ 值用连有 Gas Bench II 装置的 Delta V plus 测定. δD 值的测定方法:取 200 μL 水样加入样品反应试管中,在 2% $H_2 + He$ 的混合气体和 25℃ 的条件下,用 Pt 棒作为催化剂平衡 40 min, H_2 气在 He 气流的载带下去除水汽后,进入质谱仪进行测定分析;每隔 5 个样品,放置一组有 2 种国际标准和 5 种不同 δD 值的工作标样;样品与国际标准和实验室工作标准同时测定分析;同位素值表示为相对于 V-SMOW.重复样品的分析显示外精度为 $< 1\%$. $\delta^{18}O$ 值的测试方法:取 200 μL 水样加入样品反应试管中,在 2% $CO_2 + He$ 的混合气体环境下和

25℃ 条件下,使水汽平衡 18 h, CO_2 在 He 气流的载带下,除去水汽,进入质谱仪进行分析;每隔 5 个样品,放置一组有 2 种国际标准和 5 种不同 $\delta^{18}O$ 值的工作标样.样品与国际标准和实验室工作标准同时测定分析;同位素值表示为相对于 V-SMOW,样品分析内精度优于 0.2‰,重复样品的分析测试显示外精度 $< 0.5\%$.

以上室内测试工作在西南大学岩溶环境实验室完成.

3 结果与分析

3.1 降雨和水文过程

图 2 为 2007 年 4 月 ~ 2009 年 4 月期间青木关地下河系统地下河入口地表水及出口地下水水文地球化学过程.根据气象站记录的降雨量数据统计,2007 年 4 月 ~ 2009 年 4 月研究区的总降雨量为 2 306 mm,其中 2007 年 4 月 ~ 2008 年 4 月的降雨量为 1 273 mm,2008 年 4 月 ~ 2009 年 4 月的降雨量为 1 033 mm.从图 2 还可以看出,研究区降雨比较集中的时段在 4 ~ 11 月,尤其是 6 ~ 9 月,这 4 个月的降雨量占全年降雨量的 50% 以上,研究区的这种降雨时间分布充分体现了季风气候的特点.

地下河入口和出口的流量存在丰水期和枯水期两个不同的水文阶段,其中丰水期约占全年流量的 80% 以上.另外,虽然地下河入口的流量小于同期出口的流量,但二者的变化趋势基本一致(图 2).

综合以上降雨量和地下河系统流量的特点,表明地下河系统流量对降雨的响应具有及时、迅速的特点.

3.2 地下河系统入口地表水与出口地下水的地球化学动态变化

3.2.1 水物理化学特征对比分析

包括 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 在内的常量成分是地下水中分布最广、含量最高的 8 种离子,在很大程度上决定了地下水的物理性质和化学特征.在岩溶区高钙弱碱性的环境下,这些离子的相对含量和绝对含量随着水文地质条件和其他外界环境的变化而变化,从而形成各种不同的水质特点.

水温:岩口落水洞处由于是地表水,其水温受气温影响大,表现为夏秋季节高,冬春季节低(图 2),与当地气温变化规律一致.而姜家泉为地下水,水温常年基本稳定在 18.5℃ 左右(图 2),与当地的年均气温基本一致,表明姜家泉为浅层岩溶地下水,也反

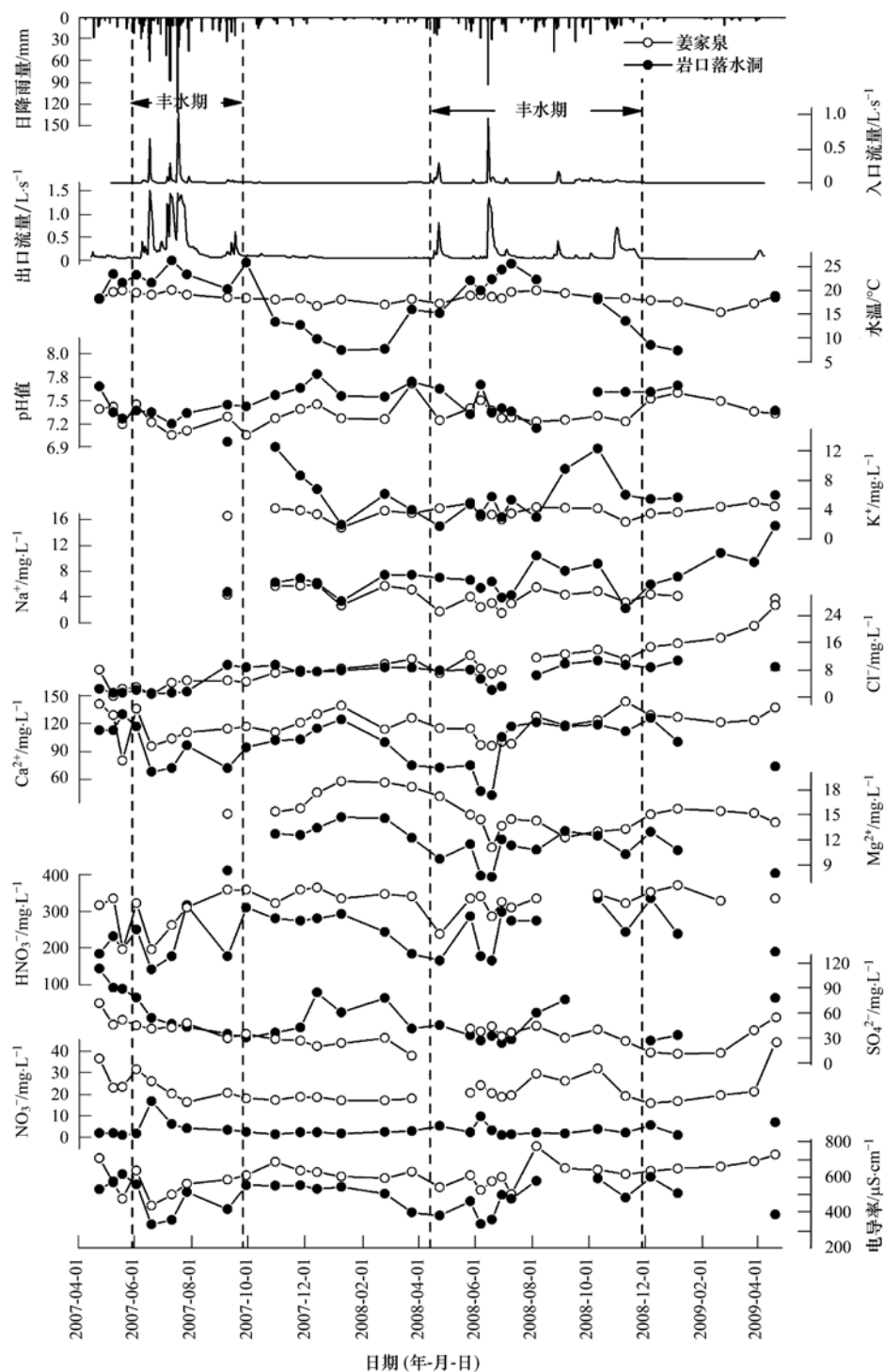


图2 2007年4月~2009年4月青木关地下河系统入口地表水及出口地下水水文地球化学过程

Fig. 2 Hydrogeochemical processes of surface water at the inlet and groundwater at the outlet from April, 2007 to April, 2009

映了研究区岩溶含水层具有较强的调蓄功能。

pH值: 岩口落水洞处为 7.14 ~ 7.84, 均值为 7.49; 姜家泉 pH 值变化为 7.05 ~ 7.72, 均值为 7.33(表1)。总体上姜家泉的 pH 值要低于岩口落水洞处的值(表1、图2), 主要是因为地下水在运动的过程中不断接受溶有土壤 CO_2 的扩散流补给。地下

河入口和出口的 pH 值还表现为旱季高, 雨季低, 这很可能也与土壤 CO_2 浓度有关, 因为雨季气温高, 土壤中的微生物呼吸作用强烈, 产生了大量的 CO_2 , 雨水经土壤淋滤, 溶解了呼吸作用产生的 CO_2 的缘故。

K^+ : 岩口落水洞处的变化较大(图2), 变化范

围为 $1.65 \sim 13.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其均值为 $6.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1); 姜家泉变化相对较为稳定 (图 2), 变化范围为 $1.42 \sim 4.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其均值为 $3.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1)。

Na^+ : 岩口落水洞处的浓度明显要高于姜家泉 (图 2), 二者的均值分别为 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1)。

K^+ 、 Na^+ 主要来源于生活废水和农业施肥, 岩口落水洞处汇集甘家槽洼地大部分的人畜废水和农业施肥残余组分, 而甘家槽洼地及其附近为流域内人畜和水田最集中处。因此, 岩口落水洞处 K^+ 、 Na^+ 含量高, 下游浓度低, 表明 K^+ 、 Na^+ 随地下水快速

的运移过程中可能是一个稀释的过程。

Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- : 这 3 种离子主要是碳酸盐岩溶解的产物。岩口落水洞处 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 浓度均值分别为 97 、 11.37 和 $242 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1), 而姜家泉的浓度均值分别为 117 、 15.23 和 $321 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1), 后者比前者分别高了 20.6% 、 33.9% 和 32.6% 。说明由于基岩的溶解, 地下水中这些与碳酸盐岩溶解有关的离子在地下水的运动过程中, 不断接受围岩溶解的成分而富集。另外, 从图 2 中可以看出, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 浓度在夏季相对较低, 主要受季风气候的影响, 受雨水的稀释作用表现得尤为明显^[22]。

表 1 水物理化学统计信息¹⁾

Table 1 Statistics of physical and chemical data

指标	地表水 (岩口落水洞)			地下水 (姜家泉)		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
pH 值	7.84	7.14	7.49	7.05	7.72	7.33
水温	7.3	26.3	18.1	15.4	20.1	18.5
K^+	1.65	13.29	6.23	1.42	4.94	3.64
Na^+	2.20	15.10	7.00	1.42	5.92	4.03
Ca^{2+}	43	129	97	80	142	117
Mg^{2+}	7.63	14.74	11.37	11.15	19.04	15.23
HCO_3^-	140	336	242	195	372	321
SO_4^{2-}	25.35	114.07	54.31	9.83	121.12	40.90
NO_3^-	1.10	16.73	3.69	15.84	43.77	22.29
Cl^-	1.14	10.82	6.34	0.33	27.07	9.46
电导率	619	337	493	775	444	612

1) 单位: 电导率: $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, 水温: $^{\circ}\text{C}$, 其他离子和元素: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

SO_4^{2-} : 岩口落水洞处 SO_4^{2-} 的浓度比姜家泉高 (图 2), 二者的均值分别为 $54.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $40.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1)。其主要是原因可能是岩口落水洞上游甘家槽洼地两侧须家河组地层中分布着一些废弃的煤洞, 且其地下水 (SO_4^{2-} 浓度 $> 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 源源不断地补岩口落水洞的地表水。

NO_3^- : 姜家泉和岩口落水洞处分别为 $22.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $3.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1), 前者约为后者的 6 倍, 说明地下水在运移的过程中不断富集, 其可能的来源是沿途不断接受农业施肥、土壤硝化作用产生的 NO_3^- 随土壤水下渗进入地下河, 并指示地下河水可能受到一定程度的硝酸盐污染^[23]。

Cl^- : 岩口落水洞处、姜家泉的浓度变化趋势基本一致, 但总体上前者比后者低 (图 2), 其均值分别为 $6.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $9.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1), 说明地下水在运移的过程中不断富集。

电导率: 是衡量水体导电性的综合指标, 是水体中电解质数量的表征, 电解质愈多, 往往电导率越

高, 反之亦然。姜家泉的电导率高于岩口落水洞处 (图 2), 二者均值分别为 $612 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 和 $493 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ (表 1)。这主要是因为地下水在含水层运移的过程中, 溶解了大量围岩中的碳酸盐岩可溶性组分, 同时接受含有地表农业活动产生的高浓度营养成分扩散流的补给。受夏天雨水的稀释作用的影响, 岩口落水洞和姜家泉 6、7 月的值较低, 冬春季较高 (图 2)。

3.2.2 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的对比分析

Craig^[13] 通过研究发现大气降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间存在密切的线性关系, 全球平均大气降水线的方程为 $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$, 被称为全球大气降水线。全球各地大气降水氢氧同位素组成的线性关系因各自然环境及气候条件的不同, 而表现出不同的斜率和截距。郑淑蕙等^[14] 于 1983 年给出了中国现代大气降水线方程为 $\delta\text{D} = 7.9\delta^{18}\text{O} + 8.2$, 随后有学者研究了不同地区的大气降水氢氧同位素的关系^[16,17]。

研究区地表水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围在 -3.23‰

~ -6.61‰, 平均值为 -4.65‰, δD 值的变化范围在 -19.26‰ ~ -41.60‰, 平均值为 -30.57‰. δD 和 $\delta^{18}O$ 值主要集中于重庆大气降水线 ($\delta D = 8.3\delta^{18}O + 15.46$)^[11] 的右下方, 其拟合而成的线性方程为 $\delta D = 5.63\delta^{18}O - 4.41$ 的直线 (蒸发线), 相关系数 $r = 0.92$ (图 3). 这主要是由于蒸发作用所致, 特别是 2007 年 10 月后 (旱季) 的数据, 这表明地表水经历了不同程度的蒸发. 另外从图 3 可以看出, δD 、 $\delta^{18}O$ 值从 8 月至次年 1 月逐渐变大, 表明在旱季由于地表水很少有雨水补给, 水体未得以快速更新, 导致地表水停留久, 其水体大量蒸发, 进而引起地表水的 δD 与 $\delta^{18}O$ 同位素的季节效应非常明显.

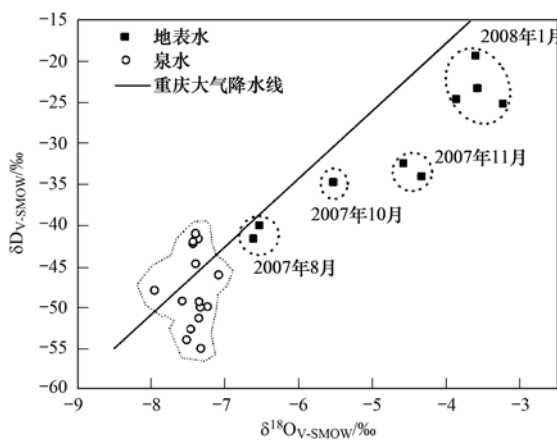


图 3 地表水、地下水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 值的关系

Fig. 3 δD and $\delta^{18}O$ of surface water vs. groundwater

而地下水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值相对于地表水较稳定, δD 值的变化范围在 -46.08‰ ~ -49.86‰, 平均值为 -48.13‰, $\delta^{18}O$ 值的变化范围在 -7.08‰ ~ -7.95‰, 平均值为 -7.41‰. $\delta^{18}O$ 和 δD 值大致落在重庆大气降水线的两侧 (图 3), 表明地下水基本未发生蒸发或发生蒸发作用的强度较小. 另外, 地下水的 $\delta^{18}O$ 和 δD 值比地表水明显偏负 (图 3), 表明地下水接受强烈蒸发作用后的地表水的补给较少. 结合流量衰减法^[19] 和示踪试验^[20] 的结果, 可以推断出研究区地下水主要存在两种主要的补给方式: 一是降雨形成的地表径流快速通过落水洞灌入地下河, 二是雨水快速通过土壤层渗入岩溶非饱和带的裂隙中, 以扩散流的形式补给地下河, 而很少接受滞留地表较长时间的地表水补给.

4 结论

(1) 研究区存在丰水期和枯水期两个水文阶段, 地下河系统含水介质的特征决定了地下河流量

对降雨的响应具有及时、迅速的特点.

(2) 地下水中化学组分在岩溶含水层运移的过程中受水岩作用、人类活动和雨水稀释作用的共同影响. 与碳酸盐岩溶解有关的离子表现出两种效应: 一是在岩溶管道的运移过程中, 不断地接受围岩溶解的成分而富集, 二是在雨季叠加了稀释效应; K^+ 、 Na^+ 和 SO_4^{2-} 在岩溶管道地下水的运移过程逐步被稀释; NO_3^- 和 Cl^- 在地下水运移的过程中不断富集.

(3) 地表水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分布于重庆当地大气降水线的右下方, 表明地表水蒸发作用强烈, 且旱季地表水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 值比雨季明显偏正, 存在明显的季节效应; 地下水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分布于重庆当地大气降水线的两侧, 且比地表水明显偏负, 表明地下水基本未接受经过强烈蒸发的地表水的补给, 而主要是来自降雨快速通过落水洞集中灌入及岩溶非饱和带扩散流的补给.

参考文献:

- [1] 朱永琴, 彭先孚. 重庆市岩溶地下水的开发与利用[J]. 中国岩溶, 2000, 19(2): 147-151.
- [2] 蒲俊兵, 袁道先, 蒋勇军. 重庆市地下河的空间分布及水资源[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(2): 34-39.
- [3] 李晓明. 袁道先院士研究表明: 西南岩溶区地下水环境告急[N]. 科学时报, 2009-2-19 A1.
- [4] Yang P H, Yuan D X, Yuan W H, et al. Formations of groundwater hydrogeochemistry in a karst system during storm events as revealed by PCA[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(14): 1412-1422.
- [5] 罗鉴银, 杨平恒, 袁道先, 等. 岩溶洼地消水流量的推算——以重庆市青木关地下河甘家槽洼地为例[J]. 中国岩溶, 2010, 29(1): 70-74.
- [6] Panagopoulos G. Application of MODFLOW for simulating groundwater flow in the Trifolia karst aquifer, Greece [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67(7): 1877-1889.
- [7] Hess J W, White W B. Groundwater geochemistry of the carbonate karst aquifer, southcentral Kentucky, USA [J]. Applied Geochemistry, 1993, 8(2): 189-204.
- [8] Mohammadi Z, Raeisi E, Bakalowicz M. Evidence of karst from behaviour of the Asmari limestone aquifer at the Khersan 3 Dam site, southern Iran[J]. Hydrological Sciences Journal, 2007, 52(1): 206-220.
- [9] Long D T, Voice T C, Niagolova N D, et al. Effects of human activities on karst groundwater geochemistry in a rural area in the Balkans[J]. Applied Geochemistry, 2012, 27(10): 1920-1931.
- [10] Aragués L, Froehlich K, Rozanski K. Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture [J]. Hydrological Processes, 2000, 14(8): 1341-1355.

- [11] 李廷勇, 李红春, 沈川洲, 等. 2006~2008 年重庆大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 特征初步分析[J]. 水科学进展, 2010, **21**(6): 757-764.
- [12] Dutton A, Wilkinson B H, Welker J M, *et al.* Spatial distribution and seasonal variation in $^{18}O/^{16}O$ of modern precipitation and river water across the conterminous USA[J]. Hydrological Processes, 2005, **19**(20): 4121-4146.
- [13] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [14] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1983, **28**(13): 801-806.
- [15] 于津生, 虞福基, 刘德平. 中国东部大气降水氢、氧同位素组成[J]. 地球化学, 1987, (1): 22-26.
- [16] 刘东生, 陈正明, 罗可文. 桂林地区大气降水的氢氧同位素研究[J]. 中国岩溶, 1987, **6**(3): 225-231.
- [17] 章新平, 姚檀栋. 我国江水中的 $\delta^{18}O$ 的分布特点[J]. 地理学报, 1998, **53**(4): 356-363.
- [18] 杨平恒, 罗鉴银, 彭稳, 等. 在线技术在岩溶地下水示踪试验中的应用——以青木关地下河系统岩口落水洞至姜家泉段为例[J]. 中国岩溶, 2008, **27**(3): 215-220.
- [19] 杨平恒. 重庆青木关地下河系统的水文地球化学特征及悬浮颗粒物运移规律[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [20] 扈志勇. 不同降雨过程下岩溶水文系统信息的响应研究——以重庆青木关岩溶槽谷为例[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [21] GB/T 8538-2008, 饮用天然矿泉水检测方法[S].
- [22] Liu Z H, Li Q, Sun H L, *et al.* Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China: soil CO_2 and dilution effects[J]. Journal of Hydrology, 2007, **337**(1-2): 207-223.
- [23] 杨平恒, 袁道先, 任幼蓉, 等. 川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中 NO_3^- 的存储和运移[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3124-3131.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban	WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes	WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria natans</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene	ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LI Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area	XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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)

2014年4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行