

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靓, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽孢杆菌及其芽孢对苣的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究

刘肖^{1, 2, 3}, 杨琰^{1, 2, 3*}, 彭涛⁴, 赵景耀^{1, 2, 3}, 任小凤^{1, 2, 3}, 张银环^{1, 2, 3}, 聂旭东^{1, 2, 3}, 李建仓⁵, 凌新有⁵, 张志钦⁵

(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. 国土资源部岩溶生态环境-重庆南川野外基地, 重庆 408435; 3. 西南大学地球化学与同位素实验室, 重庆 400715; 4. 中国气象局武汉暴雨研究所, 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430074; 5. 河南省鸡冠洞风景名胜区管理处, 栾川 471500)

摘要: 为揭示洞穴水地球化学动态的变化特征及其控制因素, 从2009年10月至2013年12月对黄土高原东南缘河南西部栾川县鸡冠洞洞穴水的水化学指标进行了4个完整水文年的动态监测。结果表明: ①鸡冠洞洞穴水的化学类型主要是 HCO_3^- - Ca^{2+} - Mg^{2+} 和 HCO_3^- - Mg^{2+} - Ca^{2+} 型, 阴离子中 HCO_3^- 占80%以上, 阳离子中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 是优势离子, 地下河常年处于溶蚀状态, 池水、滴水处于沉积状态。②鸡冠洞洞穴滴水、池水可以很好地响应外部气候环境的变化, 其地球化学指标具有显著的季节效应。③ Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 能够敏感地响应极端气候事件引起的年际降水量变化, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度洪涝年升高, 干旱年降低。 HCO_3^- 主要受 CO_2 浓度控制, 对极端气候事件响应不明显。④鸡冠洞地下河中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 浓度波动幅度较小, 且无明显的季节变化规律。对2010年和2013年的极端降水事件响应不明显。

关键词: 地球化学指标; 洞穴水; 气候事件; 鸡冠洞; 豫西

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1582-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.05.010

Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China

LIU Xiao^{1, 2, 3}, YANG Yan^{1, 2, 3*}, PENG Tao⁴, ZHAO Jing-yao^{1, 2, 3}, REN Xiao-feng^{1, 2, 3}, ZHANG Yin-huan^{1, 2, 3}, NIE Xu-dong^{1, 2, 3}, LI Jian-cang⁵, LING Xin-you⁵, ZHANG Zhi-qin⁵

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Field Scientific Observation & Research Base of Karst Eco-environments at Nanchuan in Chongqing, Ministry of Land and Resources, Chongqing 408435, China; 3. Laboratory of Geochemistry and Isotope, Southwest University, Chongqing 400715, China; 4. Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074, China; 5. Administrative Office of Luoyang Jiguan, Luanchuan 471500, China)

Abstract: Geochemical dynamics of cave water were monitored to unveil its variation and controlling factors from October 2009 to December 2013 in Jiguan Cave, west of Henan province, southeastern coast of the loess plateau. The results showed that: ①the hydrochemical types of the cave water are HCO_3^- - Ca^{2+} - Mg^{2+} and HCO_3^- - Mg^{2+} - Ca^{2+} . HCO_3^- are over 80% of the anions, Ca^{2+} and Mg^{2+} are the dominate cations, and ground river keeping in erosion and pool water drips in deposition all the year. ②Dripping water and pool water in Ji guan cave can respond perfectly to the change of external climate environment, which geochemistry indexes possess the extraordinary seasonal effects. ③The concentration changes of the Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} responded sensitively to annual precipitation change. Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} rise in waterlogging year and fall in drought year. Because HCO_3^- controlled by CO_2 concentration. HCO_3^- concentration showed a un conspicuous response to the change of external climate environment. ④The concentration changes of Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} have no obvious seasonal variation and showed a un conspicuous response to the change of external climate environment.

Key words: geochemical indicators; cave water; climate event; Jiguan Cave; West of Henan Province

岩溶洞穴次生沉积物因其具有记录高分辨率环境信息的特征, 成为人们了解过去、预测未来气候变化的重要载体^[1~6]。洞穴水是环境信号的直接传递者, 已有研究证明洞穴水的地球化学特征能够记录在石笋的微量元素中^[7~9]。但是, 洞穴水在传递、记载外界环境信号的过程十分复杂, 受到方解石的先期沉积作用(PCP)^[8,10]、位置^[11]、滴水的水动力类型、水在洞穴顶板内的水文地球化学过程^[12]等

因素的综合影响。因此, 加强现代洞穴的监测工作, 充分理解岩溶洞穴的水文化学性质是应用石笋进行高分辨率的古气候重建工作的先决条件^[13,14]。

收稿日期: 2014-09-12; 修订日期: 2014-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372177, 40902053); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20090182120005); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2011B004)

作者简介: 刘肖(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为全球变化, E-mail: jiaoshi248@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yy2954@hotmail.com

洪涝与干旱是极端气候的表现之一,探讨极端气候事件与洞穴水中微量元素的响应关系是解译石笋中微量元素古气候意义的重要窗口. 在国内,叶明阳等^[15]发现极端干旱时, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度提高;而洪涝年时,稀释效应明显, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度偏低. 在国外,McDonald 等^[16]研究 Koorringa Cave 中滴水发现,在厄尔尼诺事件导致的干旱期间, Mg/Ca 增加,滴水滴率下降. 上述研究皆表明洞穴外部的极端气候事件信息可能记录在洞穴水的水文地球化学变化特征中. 由于每个洞穴的水文动态并不相同,因此,只有对每个洞穴的环境进行单独的了解,才能获得有效的环境信息^[17]. 自 2009 年 10 月以来,对河南省栾川县鸡冠洞的滴水、池水、地下河进行了连续 4 a 的监测工作. 监测期间,栾川地区发生了两次较大的极端气候事件^[18,19]: 2010 年的“7.24”特大洪涝灾害和 2013 年极端干旱年,为解译洞穴水化学指标对极端气候事件响应提供了难得的机遇. 因此,探讨洞穴水中化学指标对于外界极端气候环境变化的响应关系,对明确石笋中环境指标的古气候意义很有价值.

1 研究概况

鸡冠洞(111°34'E, 33°46'N)位于黄土高原东南缘,河南省西部栾川县城西 4 km 处的鸡冠山上(图 1). 鸡冠山出露的地层为陶湾群碳酸盐岩建造,岩性组成包括大理岩、片岩、砾岩等^[20],其所属地层区为秦岭地层区北秦岭分区西峡-南召小区^[21]. 主构造线为 NWW-SEE 向,主要构造包括一系列为向南逆冲的推覆断层,褶皱形态复杂,轴面多北倾,局部南倾,受到逆冲作用多形成倒转褶皱或歪斜褶皱^[20,22]. 在次级褶皱构造的轴部,因构造应力比较集中,各种性质的裂隙以及低次级构造面发育,特别是垂直于轴部走向的张裂隙往往呈羽毛状排列.

鸡冠洞洞口海拔大约 900 m,入口距地面约 50 m. 山上乔木主要有栓皮栎(*Quercus variabilis* Bl.)、麻栎(*Quercus acutissima* Carr.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、侧柏(*Platycladus orientalis* (Linn.) Franco),森林属中幼龄林^[23]. 林下和坡下的灌丛由小叶鼠李(*Rhamnus parvifolia* Bunge)、牡荆(*Vitex negundo* L.)、小果蔷薇(*Rosa cymosa* Tratt.)、扁担杆(*Grewia biloba* G. Don)等组成. 山体上覆土壤为棕壤,30%的基岩裸露,土层较薄(厚度 < 30 cm),有枯枝落叶层. 土壤颜色为棕色,质地

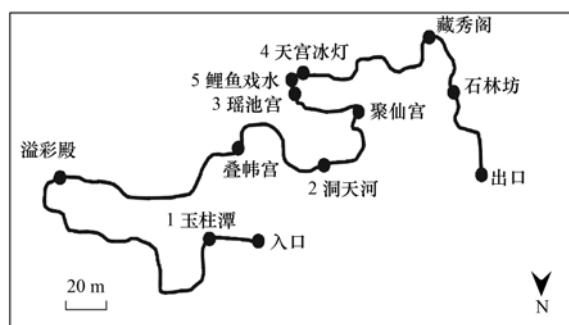


图 1 鸡冠洞采样点分布

Fig. 1 Location of water sampling sites in Jiguan cave

为壤土,结构为粒状.

研究区处于长江、黄河两大流域分水岭北侧,属于湿润区与干旱区之间的过渡地带地区. 特殊的地理位置决定了该区对亚洲夏季风变化响应敏感. 气温方面,据 1957 ~ 2013 年栾川气象资料统计,年均温 12.35℃. 1 月月均温最低,平均温度在 0℃ 以下. 7 月为最高,约 25℃ 左右;降水方面,据栾川县气象站 1957 ~ 2013 年降雨资料统计,年均降水量 844.58 mm. 受季风影响,每年 6 ~ 9 月为集中降水期,降水量约占全年的 63.3%. 鸡冠洞已探明洞长 3 800 m,面积 50 000 m². 目前已开发洞长 1 800 m,分有 8 个观赏大厅,观赏面积 23 000 m². 监测期间,洞内温度变化范围为 14.5 ~ 19.5℃,平均温度 15.7℃.

2 材料与方法

2.1 野外水样采集与保存

在降水发生时放置洁净干燥的大气降水收集装置于露天环境,收集大气降水. 漏斗中放入一个洁净的乒乓球,防止杂物进入收集装置. 所有样品均为一次完整降水过程的雨水样品,每次降水结束 0.5 h 内,及时将水样装入干燥洁净的取样瓶中,并放入冰箱冷藏,以防止蒸发分馏. 2009 年 10 月 ~ 2013 年 12 月间采集了 159 次栾川地区的大气降水样品.

从 2009 年 10 月 ~ 2013 年 12 月,共采集了洞穴水水样 110 个. 每两个月入洞采集一次水样,依次选取了池水点——玉柱潭、地下河——洞天河、池水点——瑶池宫、滴水点——鲤鱼戏水 (LYXS) 和天宫冰灯 (TGBD),5 采样点. 每个采样点分别用四小瓶,其中 2 个 50 mL 的纯净聚乙烯瓶,用来装取测试阴离子、阳离子的水样,2 个 25 mL 的聚乙烯瓶用来装取测试氧、氦同位素和 DIC 的水样. 所有塑料

瓶在使用前均用稀硝酸泡洗,并用去离子水冲洗 3 遍以上,烘干后再进行野外的装样. 在采样前先将取样瓶及其瓶盖用采样点的水润洗 3 次. 采集阳离子水样时,取样后立即在瓶内加 1:1 的纯硝酸数滴,调节其 pH < 2; 装氧、氦同位素的水样时,小瓶在水下装满,保证小瓶中无气泡. 最后在当天将样品放入冰箱进行冷藏. 在对于地下河、池水采集时,直接用小瓶装取. 采集滴水时,采用未曾使用过娃哈哈纯净水瓶,在滴水点下部接水,在正式收集滴水前,纯净水瓶内壁需用滴水进行润洗,最后将收集的滴水按上述方法装入 4 个小瓶中. 滴速用秒表计数测定,连续测量 3 次并取平均值,单位为:滴·min⁻¹; 滴量用 5 mL 量杯收集滴水,测量取 3 次平均值,单位为: mL·滴⁻¹. 另外,在采样过程中,同时测试了入口、出口、洞内若干景点和采样点的温度和 CO₂ 含量.

2.2 样品分析

大气降水、鸡冠洞洞穴水 δ¹⁸O 和 δD 数据来自西南大学地球化学与同位素实验室样品分析,共有 384 个数据,其中 2009 年 10 月~2012 年 12 月栾川降水 δ¹⁸O 和 δD 数据已发表,请参考文献[24],分析方法相同. pH 值、水温和电导率采用德国 WTW 公司生产的 Multi340i 多参数水质分析仪野外现场测定,精度分别为 0.01、0.5%、1 μS·cm⁻¹; 水体中 HCO₃⁻ 和 Ca²⁺ 用德国 Merck 公司产碱度计和硬度计试剂盒现场滴定,测量精度分别为 0.61 mg·L⁻¹ 和 0.2 mg·L⁻¹; Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺ 等阳离子采用美国 Perkin-Elmer 公司产的 Optima2100DV 全谱直读型(ICP-OES)在进行分析,检测精度可达 0.001 mg·L⁻¹,相对偏差 < 2%,具体操作方法和步骤见文献[25]; F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻ 等阴离子浓度采用瑞士 Metrohm 公司生产的 761 Compact IC 离子色谱仪测试,检测限为 0.01 mg·L⁻¹,分析误差小于 ± 2%. 金属阳离子和阴离子浓度的仪器测试工作分别在西南大学地理科学学院地球化学与同位素实验室和水化学实验室完成. 由于 Ca²⁺ 的 ICP-OES 测定精度较高(0.000 1 mg·L⁻¹),故本研究采用 ICP-OES 测定数据.

2.3 方解石饱和指数(SIc)和 CO₂ 分压(p_{CO₂})的计算

方解石饱和指数(SIc)和 CO₂ 分压(p_{CO₂})的计算通过水温、pH 值以及 7 种主要离子(K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻) 计算,使用 WATSPEC 软件^[26]完成.

$$p_{\text{CO}_2} \text{ 计算公式为: } p_{\text{CO}_2} = \frac{[\text{HCO}_3^-][\text{H}^+]}{[K_H K_1]}$$

式中,K_H 和 K₁ 分别是 H₂CO₃ 和 CO₂ 的平衡常数.

$$\text{SIc 计算公式得出: SIc} = \lg \left[\frac{[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}]}{K_c} \right]$$

式中,K_c 为方解石平衡常数.

3 结果与分析

3.1 水化学类型

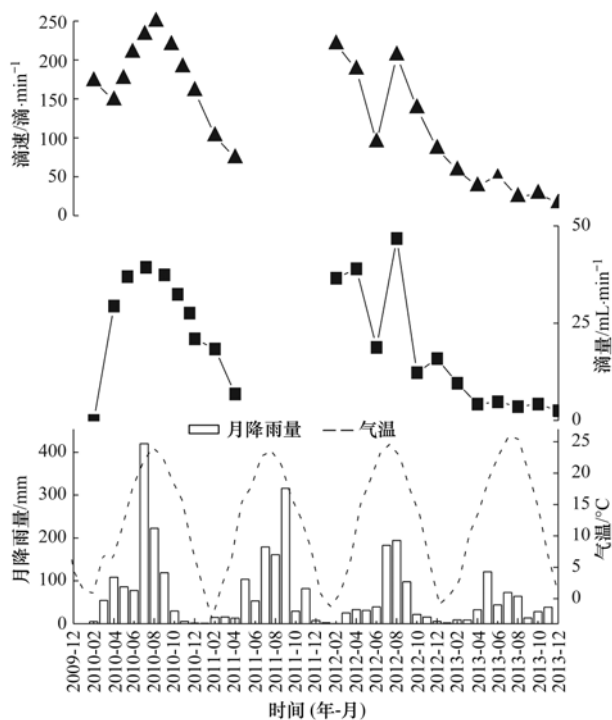
岩溶洞穴水的溶解组分主要来源于碳酸盐岩的溶解,Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 是主要阴阳离子. 滴水中优势阳离子为 Ca²⁺、Mg²⁺; 优势阴离子为 HCO₃⁻,其次是 SO₄²⁻. 经计算,Ca²⁺、Mg²⁺ 分别占其阳离子总量的 72% 和 26%,HCO₃⁻、SO₄²⁻ 分别占其阴离子总量的 78% 和 20%. 滴水的水化学类型为 HCO₃⁻-Ca²⁺-Mg²⁺. 池水优势阳离子为 Ca²⁺,其次为 Mg²⁺; 优势阴离子为 HCO₃⁻,其次是 SO₄²⁻. 经计算,Ca²⁺、Mg²⁺ 分别占其阳离子总量的 65% 和 28%,HCO₃⁻、SO₄²⁻ 分别占其阴离子总量的 75% 和 19%. 池水的水化学类型为 HCO₃⁻-Ca²⁺-Mg²⁺. 地下河中优势阳离子为 Ca²⁺,其次为 Mg²⁺; 优势阴离子为 HCO₃⁻. 经计算,Ca²⁺、Mg²⁺ 分别占其阳离子总量的 69% 和 20%,HCO₃⁻、SO₄²⁻ 分别占其阴离子总量的 84% 和 9%. 地下河的水化学类型为 HCO₃⁻-Ca²⁺-Mg²⁺.

3.2 极端气候事件与洞穴水点离子浓度的关系

3.2.1 滴水

研究表明厄尔尼诺年大多对应河南雨涝年,拉尼娜年大多对应干旱年^[27]. 2010 年的降水量高达 1 129.9 mm,比平均值高 277 mm. 而 2013 年降水量则比平均值低 414 mm. 通过 SOI、Nino 3.4 和 Nino 4 区海表温度距平指数可以看出,2010 年 3、4 月 SOI 指数调整为正相位,Nino 3.4 和 Nino 4 区海表温度距平指数也均 < 0.5℃. 说明厄尔尼诺事件的结束,但是海-气系统范围大、传输机制复杂,热带、副热带大气对下垫面的变化具有滞后性. 因此,2010 年仍属厄尔尼诺年,降水量偏多于平均年份. 同理,可以看出到 2010 年下半年至 2013 年为拉尼娜年. 而受拉尼娜影响最为明显的年份则为 2013 年. 在厄尔尼诺年向拉尼娜年转变的过程中,研究区的年降水量出现了阶梯式下降. 与此同时,滴水点的水动力特征也表现出类似的变化(图 2).

2010 年雨季时滴水成线无法统计滴速,2013 年



未连线部分表示滴水成线数据无法统计部分

图2 LYXS 滴速、滴量和降水量

Fig. 2 Comparison the dripping rate, dripping discharge and precipitation

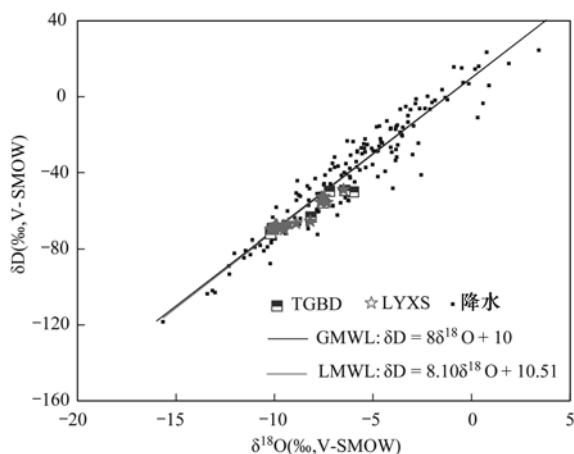
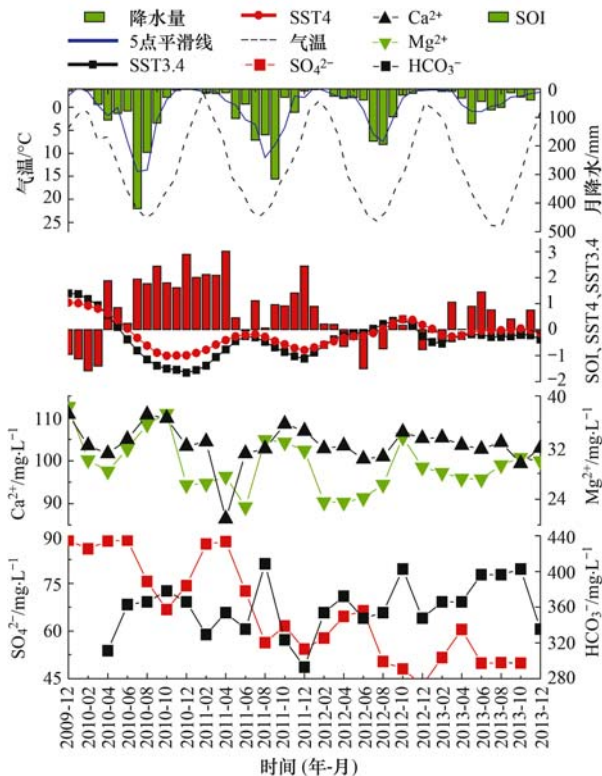


图3 栾川地区大气降水线分析

Fig. 3 Equation of Luanchuan meteoric water line

36 滴·min⁻¹, 反映了滴水点对洞穴外部环境尤其是降水量的变化有很好的响应, 降水是滴水的主要补给来源。同时, 通过分析栾川当地降水和滴水的氧、氘数据, 发现滴水点的数据大部分都在当地大气降水线附近, 说明滴水受蒸发作用较小, 滴水对当地降水有很好的继承性(图3)。

在岩溶系统中, 水是岩溶作用发生的物质基础之一, 是进行岩溶作用发生的介质。滴水中 Ca²⁺ 主要来



SOI, SST 数据来源于 www.cru.uea.ac.uk/cru/data/;

温度、降水取自栾川县城气象国家基站

图4 滴水点阴阳离子与降水量、SOI、SST 对比

Fig. 4 Comparison of anion and cation concentration, precipitation, SOI and SST

源于上覆土壤的淋滤和碳酸盐岩的溶解。雨季时, 较多的降水可以不断地溶解来自洞穴上覆土壤的 CO₂, 并在进入基岩前形成偏酸性的岩溶水, 进而使得上覆岩层不断溶解, 增加了雨季 Ca²⁺ 的浓度; 旱季时, 滴水补给来源(雨水)减少, 上覆含水层易处于缺水状态, 岩溶水在岩层中滞留时间增加, 导致岩溶水 CO₂ 脱气, 发生方解石沉淀。最终, 导致滴水中 Ca²⁺ 的浓度降低。由图4可知, Ca²⁺ 浓度雨季高于旱季, 最高值出现雨季的8月, 最低值出现在旱季的4月。

同时, 滴水的滴量和滴速也是雨季高于旱季。说明雨季时, 更多的经土壤过滤后较酸性的岩溶水与基岩充分反应, 使得雨季 Ca²⁺ 浓度增加。旱季时, 滴水点的 pCO₂ 低于雨季(表1), 说明由于旱季含水层较为缺水, 岩溶水在含水层中可能发生了 CO₂ 脱气, 导致方解石沉淀^[28]。

在明显受拉尼娜影响的干旱年(2013年)。降水的减少, 导致可溶解碳酸盐岩的介质减少, 同时也易增加渗透水在岩层的运移时间, 导致方解石沉积作用的发生。经计算2010年和2013年雨季时二者的 SIc 分别是0.66和0.90。同时与2010年相比, 滴

速也由滴水成线变为 36 滴·min⁻¹. 两年的 Ca²⁺ 浓度分别是 107.42 mg·L⁻¹ 和 98.47 mg·L⁻¹, 证明降水的减少可能会使岩溶水在岩层中滞留时间增长, 有利于方解石沉积, 最终影响 Ca²⁺ 浓度变化^[29]. 因此, 也表明滴水中的 Ca²⁺ 可以反映洞穴外部环境的变化, 尤其是降水量的变化.

滴水中 Mg²⁺ 主要来源于自上覆土壤和下覆基岩的溶解和淋滤^[30]. Mg²⁺ 浓度季节变化与 Ca²⁺ 类似, 除了 2013 年外, 基本保持雨季高、旱季低的特

征. 但是季节的波动幅度小于 Ca²⁺. Mg²⁺、Ca²⁺ 是岩溶水中主要的阳离子, 对其浓度影响的机制类似. 区别在于 Mg²⁺ 同时还受到分配系数的影响, 而分配系数与温度成正比^[31], 这是导致 Mg²⁺ 浓度在 2011 年 4 月发生突降的原因^[32]. 纵观 4 a 的变化 (图 4), Mg²⁺ 浓度季节波动幅度较小, 且未像降水量一样, 出现明显的下降趋势. 这可能源于当地年平均温度并未出现大的变化, 年均温变化的较小导致了年际上 Mg²⁺ 浓度变化稳定^[33].

表 1 滴水旱季、雨季的水化学特征

Table 1 Hydrochemical characteristic of dripping water

洞穴水	项目	温度/℃	降水/mm	SIc	p _{CO₂} /Pa	Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹
滴水点 LYXS	雨季均值	16.61	80.45	0.66	28.07	100.70	32.95	372.86	61.34
	旱季均值	16.65	19.22	0.80	26.60	96.30	31.66	344.93	66.98
池水 YCG	雨季均值	16.38	80.45	0.47	42.58	68.65	32.41	259.25	67.06
	旱季均值	15.82	19.22	0.53	80.43	51.54	29.22	220.71	67.84
地下河 DTH	雨季均值	14.11	80.45	-0.12	26.46	50.87	15.11	131.26	31.46
	旱季均值	13.94	19.22	-0.11	39.86	45.28	12.44	108.58	32.49

滴水点 SO₄²⁻ 浓度变化具有明显的年季变化, 冬春季节高、夏秋季节低. 最高值出现在 4 或 6 月, 最低值出现在 10 月或 12 月. 季节变化趋势与 Ca²⁺、Mg²⁺ 浓度的变化趋势正好相反 (图 4). 这可能与本身的溶解性质有关: SO₄²⁻ 从硫化物中氧化进入溶液, 其浓度要经过几周甚至几个月的时间才能达到明显的浓度^[34]. 由上文可知, 本研究区上覆岩层为大理岩, 但其中可能会包含有硫化物^[35]. 同时, 夏秋季节, 研究区降水量多, 稀释效应对 SO₄²⁻ 的作用更加明显, 也可能导致 SO₄²⁻ 浓度偏低. 冬春季节时一方面降水较少, 稀释效应减弱. 另一方面, 冬春季节风沙扬尘较多, 加之燃煤的影响, 是土壤中 SO₄²⁻ 富集的季节. 到春季降水增加时, 会将土壤中的硫酸盐物质带入洞穴中, 导致滴水 SO₄²⁻ 浓度增加, 使得 SO₄²⁻ 浓度在旱季浓度较高.

在厄尔尼诺年向拉尼娜年转变期间, SO₄²⁻ 浓度与降水量一样呈现阶梯式的下降: 降水由 2010 年的 1129.9 mm, 降到 2013 年的 434.6 mm, SO₄²⁻ 含量也由 2010 年的 79.91 mg·L⁻¹ 降到 2013 年的 52.36 mg·L⁻¹, 反映了滴水点中 SO₄²⁻ 可以很好地对极端气候转变做出响应.

滴水中 HCO₃⁻ 具有明显的季节变化, 雨季高于旱季 (图 4). CO₂ 气是岩溶作用发生的重要驱动力, 是影响 HCO₃⁻ 浓度高低的主要因素. 同时, 也说明确降水的“稀释效应”不明显^[36]. 对比洪涝年与干

早年 HCO₃⁻ 浓度, 发现浓度变化与滴水中 Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻ 相反. 2010 年平均浓度为 59.48 mg·L⁻¹, 2013 年为 62.86 mg·L⁻¹, 呈现出与降水量相反的趋势. 推测可能与全球变化有关, 因为受人类大量 CO₂ 释放的影响, 大气中的 CO₂ 含量呈逐年增加趋势, 因此生物作用的强度也在增加^[37]; 另一方面, 推测是近几年景区绿化工作效果的显现. 上覆植被的生长、繁殖, 也促进了 CO₂ 含量增加, 从而导致 2013 年 HCO₃⁻ 浓度高于 2010 年. 所以, 滴水点 HCO₃⁻ 在反映年际间具有明显的降水量差异时, 可能由于受 CO₂ 气的影响而表现得不是很明显.

3.2.2 池水和地下河水

无论雨季或是旱季, HCO₃⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻ 浓度均表现出滴水 > 池水的特点 (表 1). 将 4 a 测量的洞内的 CO₂ 浓度求均值值得 41.2 Pa, 小于池水的 p_{CO₂} = 61.51 Pa, 说明池水中可能发生了脱气作用.

叶明阳等^[15] 在研究芙蓉洞洞穴水过程中, 证明池水中 Ca²⁺、Mg²⁺ 浓度的高低分别响应当地的大旱和强降水天气状况. Huang 等^[38] 在研究 Ernesto 洞穴水中发现, 由于方解石的沉积作用导致池水中 Mg/Ca、Sr/Ca 比滴水具有明显的季节变化. 鸡冠洞中池水的 HCO₃⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻ 浓度也具有很好季节变化规律. 其变化趋势与滴水点类似, HCO₃⁻、Ca²⁺、Mg²⁺ 浓度高值出现在雨季, 低值出现在旱季 (图 5), 表明池水、滴水可能具有一致的来

源. 同时, 将 2010 年主要阴阳离子数据与 2013 年进行对比, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度分别下降了 5.03、2.49 和 24.44 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 而 HCO_3^- 浓度则上升了 18.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 亦发现主要的阴阳离子变化趋势与滴水点相同. 说明滴水和池水的来源可能相同, 受控机制类似. 二者中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度对外界环境变化, 尤其是降水量的变化有很好的响应.

与前人许多研究不同^[39,40], 鸡冠洞地下河中主要阴阳离子并未表现有明显的季节、年际变化规律特征(图 6). Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 浓度波动幅度较小, 其最低值在雨季和旱季均有分布. 2011 年 4 月到 2012 年 6 月维持在高位水平, 其他时间浓度较低、变幅小, 与年际间的降水差异无明显的相关性. 地下河阴阳离子的无序变化, 推测与地下河水文形成过程中控制因素较多有关^[41~43]. 因此, 其对外界的气候环境变化表现出无明显的响应关系.

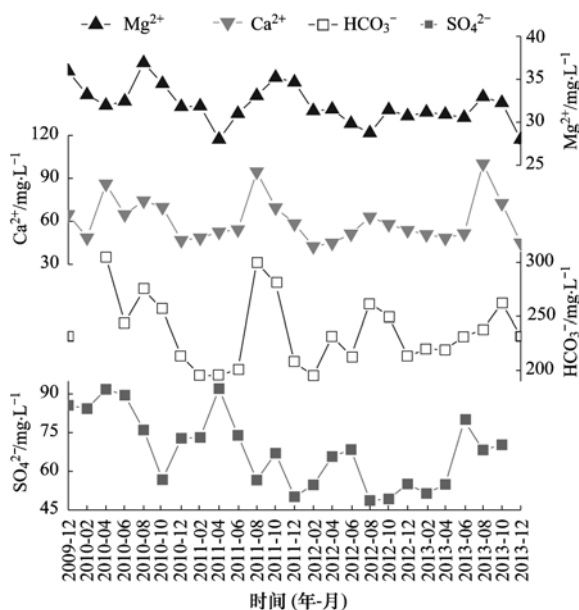


图 5 池中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 浓度变化

Fig. 5 Variations of $[\text{Ca}^{2+}]$, $[\text{Mg}^{2+}]$, $[\text{HCO}_3^-]$ and $[\text{SO}_4^{2-}]$ concentration in pool water

4 结论

(1) 通过对鸡冠洞洞穴水地球化学特征分析, 基岩的溶解和上覆土壤的淋滤是控制不同性质洞穴水地球化学特征的主要因素. 其化学类型主要是 HCO_3^- - Ca^{2+} - Mg^{2+} 和 HCO_3^- - Mg^{2+} - Ca^{2+} 型, 阴离子中 HCO_3^- 占 80% 以上, 阳离子中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 是优势离子, 地下河常年处于溶蚀状态, 池水、滴水处于沉积状态.

(2) 鸡冠洞洞穴滴水、池水的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、

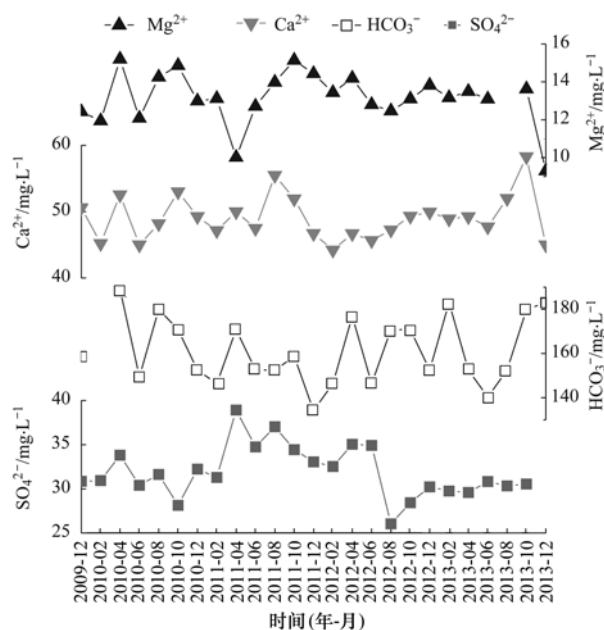


图 6 地下河中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 浓度变化

Fig. 6 Variations of $[\text{Ca}^{2+}]$, $[\text{Mg}^{2+}]$, $[\text{HCO}_3^-]$ and $[\text{SO}_4^{2-}]$ concentration in groundwater

HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 地球化学指标可以很好地响应外部气候环境的变化, 但是, 影响离子浓度变化的机制存在差异. ①对比洪涝年(2010)、干旱年(2013)数据, Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度能够敏感地响应极端气候事件引起的年际间降水量的变化. 原因在于降水增加, 增强了下渗岩溶水的淋滤作用和溶解能力, 导致 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度升高. 反之则相反, Mg^{2+} 、 HCO_3^- 分别受温度、 CO_2 浓度的影响, 对年际间的降水差异响应不明显. ② Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 浓度雨季高于旱季. 雨季降水量、 CO_2 浓度较高, 促进了可溶性基岩和上覆土壤的溶解和淋滤, 最终导致其含量雨季高于旱季; 由于降水在雨季时, 对 SO_4^{2-} 浓度主要起稀释作用, 导致 SO_4^{2-} 浓度的变化趋势与上述 3 种离子正好相反.

(3) 鸡冠洞地下河的水文形成过程中控制因素较多, 导致 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 浓度波动幅度较小, 无明显的季节变化规律. 对 2010 年和 2013 年的极端气候事件引起的降水差异响应不明显.

致谢: 感谢西南大学地理科学学院地球化学与同位素实验室杨平恒副教授在论文完成过程中给予的指导和帮助; 感谢河南省栾川县鸡冠洞景区管理处对本研究野外采样的大力支持.

参考文献:

- [1] Jo K, Woo K S, Yi S, et al. Mid-latitude interhemispheric hydrologic seesaw over the past 550, 000 years[J]. Nature,

- 2014, **508**(7496): 378-382.
- [2] 杨琰, 袁道先, 程海, 等. 末次冰消期亚洲季风突变事件的精确定年: 以贵州衙门洞石笋为例[J]. 中国科学(D辑), 2010, **40**(2): 199-210.
- [3] Zhou H Y, Zhao J X, Feng Y X, *et al.* Heinrich event 4 and Dansgaard/Oeschger events 5-10 recorded by high-resolution speleothem oxygen isotope data from central China [J]. *Quaternary Research*, 2014, **82**(2): 394-404.
- [4] 李珊英, 杨琰, 李廷勇, 等. MIS8-MIS9 阶段亚洲季风的轨道尺度气候变率: 柴川老母洞石笋记录[J]. 地质论评, 2011, **57**(5): 754-760.
- [5] Webb M, Dredge J, Barker P A, *et al.* Quaternary climatic instability in south-east Australia from a multi-proxy speleothem record[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2014, **29**(6): 589-596.
- [6] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, *et al.* Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years[J]. *Nature*, 2008, **451**(28): 1090-1093.
- [7] Fairchild I J, Baker A, Borsato A, *et al.* Annual to sub-annual resolution of multiple trace-element trends in speleothems [J]. *Journal of the Geological Society*, 2001, **158**(5): 831-841.
- [8] Fairchild I J, Treble P C. Trace elements in speleothems as recorders of environmental change [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, **28**(5): 449-468.
- [9] McMillan E A, Fairchild I J, Frisia S, *et al.* Annual trace element cycles in calcite - aragonite speleothems: evidence of drought in the western Mediterranean 1200-1100 yr BP [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2005, **20**(5): 423-433.
- [10] Fairchild I J, Borsato A, Tooth A F, *et al.* Controls on trace element (Sr-Mg) compositions of carbonate cave waters: implications for speleothem climatic records [J]. *Chemical Geology*, 2000, **166**(3-4): 255-269.
- [11] McDonald J, Drysdale R, Hill D, *et al.* The hydrochemical response of cave drip waters to sub-annual and inter-annual climate variability, Wombeyan Caves, SE Australia [J]. *Chemical Geology*, 2007, **244**(3-4): 605-623.
- [12] 周运超, 王世杰, 谢兴能, 等. 贵州4个洞穴滴水对大气降雨响应的动力学及其意义[J]. 科学通报, 2004, **49**(21): 2220-2227.
- [13] Spötl C, Fairchild I J, Tooth A F. Cave air control on dripwater geochemistry, Obir Caves (Austria): Implications for speleothem deposition in dynamically ventilated caves [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, **69**(10): 2451-2468.
- [14] Riechelmann D F C, Schröder-Ritzrau A, Scholz D, *et al.* Monitoring Bunker Cave (NW Germany): a prerequisite to interpret geochemical proxy data of speleothems from this site [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, **409**(3-4): 682-695.
- [15] 叶明阳, 李廷勇, 王建力, 等. 芙蓉洞洞穴水 Ca^{2+} , Mg^{2+} 浓度变化对气候事件的响应[J]. 水土保持学报, 2009, **23**(3): 82-86.
- [16] McDonald J, Drysdale R, Hill D. The 2002-2003 El Niño recorded in Australian cave drip waters: implications for reconstructing rainfall histories using stalagmites [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**(22):, doi: 10.1029/2004GL020859.
- [17] Hu C Y, Henderson G, Huang J H, *et al.* Report of a three-year monitoring programme at Heshang Cave, Central China [J]. *International Journal of Speleology*, 2008, **37**(3): 143-151.
- [18] 张丽娟, 陈红霞, 袁鹏飞, 等. 洛阳2010年7月23~25日强降水极端天气气候事件成因分析[A]. 见: 河南省气象学会. 天气、气候与可持续发展——河南省气象学会2010年年会论文集[C]. 郑州: 河南省气象学会秘书处, 2010. 2.
- [19] 李艳红, 宋自福, 张珍, 等. 副高西北侧一次区域性暴雨天气过程分析及数值模拟[A]. 见: 河南省气象学会. 天气、气候与可持续发展——河南省气象学会2010年年会论文集[C]. 郑州: 河南省气象学会秘书处, 2010. 25.
- [20] 孙社良, 张寿庭, 顾文帅, 等. 河南柴川 Mo 多金属矿集区构造地球化学特征及找矿预测[J]. 地质与勘探, 2013, **49**(3): 405-416.
- [21] 彭祖武. 柴川县泥石流灾害危险性区划研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013. 8-11.
- [22] 陆永德. 东秦岭洛南—柴川断裂带的形成和演化[J]. 石油实验地质, 2009, **31**(2): 148-153.
- [23] 周亮. 河南省柴川县生态林业可持续发展研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012. 19-21.
- [24] 赵景耀, 杨琰, 彭涛, 等. 河南鸡冠洞降水, 滴水和现生碳酸钙的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其环流意义[J]. 第四纪研究, 2014, **34**(5): 1106-1116.
- [25] 唐亮亮. 洞穴滴水水文水化学特征及其意义[D]. 重庆: 西南大学, 2008. 12-13.
- [26] Wigly T M L. WATSPEC: A computer program for determining the equilibrium speciation of aqueous solutions [M]. London: British Geomorphological Research Group, 1997. 1-48.
- [27] 程炳岩, 孙卫国. 厄尔尼诺事件对河南省降水的可能影响[J]. 灾害学, 2002, **17**(2): 22-27.
- [28] Baldini J U L, McDermott F, Fairchild I J. Spatial variability in cave drip water hydrochemistry: Implications for stalagmite paleoclimate records[J]. *Chemical Geology*, 2006, **235**(3-4): 390-404.
- [29] Musgrove M L, Banner J L. Controls on the spatial and temporal variability of vadose dripwater geochemistry: Edwards Aquifer, central Texas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, **68**(5): 1007-1020.
- [30] 王新中, 班凤梅, 潘根兴. 洞穴滴水地球化学的空间和时间变化及其控制因素——以北京石花洞为例[J]. 第四纪研究, 2005, **25**(2): 258-264.
- [31] Gascoyne M. Trace-element partition coefficients in the calcite-water system and their paleoclimatic significance in cave studies [J]. *Journal of Hydrology*, 1983, **61**(1-3): 213-222.
- [32] 任小凤, 杨琰, 彭涛, 等. 豫西鸡冠洞洞穴水及现代沉积物 Mg, Sr 和 Ba 记录及其意义[J]. 中国岩溶, 2014, **33**(1): 57-63.
- [33] Sinclair D J. Two mathematical models of Mg and Sr partitioning into solution during incongruent calcite dissolution: Implications

- for dripwater and speleothem studies [J]. *Chemical Geology*, 2011, **283**(3-4): 119-133.
- [34] Fairchild I J, Killawee J A, Sharp M J, *et al.* Solute generation and transfer from a chemically reactive alpine glacial – proglacial system [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, **24**(13): 1189-1211.
- [35] 张维吉, 李育敬. 陶湾群层序及时代研究 [J]. *西安地质学院学报*, 1989, **11**(2): 1-10.
- [36] 刘再华, 袁道先. 中国典型表层岩溶系统的地球化学动态特征及其环境意义 [J]. *地质论评*, 2000, **46**(3): 324-327.
- [37] 刘再华, 何师意, 袁道先, 等. 土壤中的 CO_2 及其对岩溶作用的驱动 [J]. *水文地质工程地质*, 1998, (4): 42-45.
- [38] Huang Y M, Fairchild I J, Borsato A, *et al.* Seasonal variations in Sr, Mg and P in modern speleothems (Grotta di Ernesto, Italy) [J]. *Chemical Geology*, 2001, **175**(3-4): 429-448.
- [39] 王晓晓, 徐尚全, 沈立成. 雪玉洞岩溶地下水, 地表水 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 变化特征研究 [J]. *中国岩溶*, 2013, **32**(1): 43-50.
- [40] 杨平恒, 卢丙清, 贺秋芳, 等. 重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1290-1296.
- [41] 蒲俊兵, 沈立成, 王翱宇, 等. 重庆丰都雪玉洞水文地球化学指标的时空变化研究 [J]. *中国岩溶*, 2009, **28**(1): 49-54.
- [42] 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.
- [43] 陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 等. 降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 123-130.

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoextraction of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《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)

2015年5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 15, 2015

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