

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

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(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM_{2.5}中水溶性离子特征分析 杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明(4325)

2013年北京市不同方位PM_{2.5}背景浓度研究 李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨(4331)

APEC期间北京空气质量改善对比分析 李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达(4340)

嘉兴市春季PM、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应 沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王聿(4348)

烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响 赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁(4358)

典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡 张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤(4366)

上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应 刘飞,褚慧敏,郑祥民(4374)

重庆金佛山降雪中飞灰颗粒物特征及来源解析 于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立(4381)

利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究 梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤(4389)

低浓度CO₂在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附 刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真(4396)

红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制 郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞(4403)

中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征 安思危,孙涛,马明,王定勇(4414)

基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射漫射衰减系数 张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮(4420)

白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征 郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明(4430)

小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应 李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰(4436)

湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响 余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治(4444)

贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义 沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖(4455)

碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析 邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国(4464)

钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征 张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳(4471)

长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价 田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣(4479)

城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例 齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁(4486)

柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响 覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇(4494)

微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响 左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩(4501)

扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律 陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍(4509)

生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应 张树楠,肖润林,刘锋,吴金水(4516)

开放系统下方解石对磷的去除 李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文(4523)

铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系 李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生(4531)

基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究 程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良(4539)

ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验 周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵(4546)

基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价 符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春(4553)

北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析 张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平(4561)

广州市小学生多环芳烃内暴露水平 苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞(4567)

构建三元混合污染物的三维等效图 刘雪,刘树深,刘海玲(4574)

化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新(4582)

不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性 严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑(4591)

基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图 施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩(4600)

土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究 谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰(4609)

纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响 李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳(4615)

蜈蚣草中砷与铈的赋存特征及其相互作用 张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚(4623)

纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响 熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟芬琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(4630)

黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响 陈永勤,江玲,徐卫红,迟芬琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭(4642)

耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化 马聪,秦丹,孙倩,于昌平(4651)

浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征 李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎(4659)

缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化 曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源(4667)

华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响 张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊(4676)

再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估 田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙(4682)

《环境科学》第36卷(2015年)总目录 (4690)

《环境科学》征订启事(4347) 《环境科学》征稿简则(4454) 信息(4463,4530,4573,4581)

贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义

沈蔚¹, 王建力^{1,2*}, 王家录¹, 蒋先淑¹, 毛庆亚¹, 陈挚秋¹, 刘肖¹

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

摘要: 对贵州关岭纳朵洞 2012 年 12 月至 2014 年 12 月期间, 三处滴水 (S1、S2、S3) 和一处池水 (SC) 的地球化学指标进行动态监测. 结合当地气象资料, 分析了观测期间纳朵洞洞穴水水文地球化学季节变化及其对外界气候变化的响应. 结果表明, 纳朵洞洞穴水的水化学类型主要为 HCO_3^- - Ca^{2+} 型, 除每年降水量最大的月份外, 滴水 and 池水长期处于沉积状态; 纳朵洞 3 个滴水点的离子浓度由于岩溶水在洞顶的运移路径和时间不同存在一定差异, 池水因受到洞穴混合水和洞穴空气较高 CO_2 浓度的影响, 其离子浓度高于滴水且变化幅度偏大; 纳朵洞洞穴水地球化学指标具有显著的季节变化规律, 可以很好地响应外部气候环境变化; 离子浓度对极端气候事件引起的年际间降水变化的响应比较敏感: 2013 年雨季的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度高且平稳, 而 2014 年雨季其浓度偏低且波动大, 不同观测点的响应程度和时间并不一致.

关键词: 地球化学特征; 洞穴水; 环境意义; 纳朵洞; 贵州

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4455-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.12.017

Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research

SHEN Wei¹, WANG Jian-li^{1,2*}, WANG Jia-lu¹, JIANG Xian-shu¹, MAO Qing-ya¹, CHEN Zhi-qiu¹, LIU Xiao¹

(1. School of Geographical Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing 400715, China)

Abstract: During the period from December 2012 to December 2014, three dripping water sites (S1, S2, S3) and one pool water site (SC) have been selected for a long-term monitoring of geochemical indexes in Naduo Cave, Guanling county of Guizhou Province, China. Based on the local meteorological data, this paper analyzed the seasonal change of hydro-geochemical indicators and their feedbacks to climate events. The results indicated that the hydro-geochemical type of cave water was HCO_3^- - Ca^{2+} . Dripping water and pool water were in deposition all the year, except in the month with the maximum precipitation. There were some discrepancies of main ions' concentration among three dripping water sites due to the difference of the migration pathways and migration time. Affected by mixed water and high CO_2 concentration of cave air, the ion concentration of pool water was higher than dripping water, and there was considerable fluctuation. The geochemistry indexes of water in Naduo Cave showed extraordinary seasonal variation rules and could perfectly respond to the external climate environment. The concentration of ions was sensitive to the response of the annual precipitation change caused by extreme climate events. During the rainy season, the concentrations of Ca^{2+} , Mg^{2+} and SO_4^{2-} in 2013 were relatively higher and more stable than those in 2014. The response time and susceptibility of each monitoring site were inconsistent.

Key words: geochemical characteristics; cave water; environmental significance; Naduo Cave; Guizhou

岩溶洞穴次生沉积物已经成为研究岩溶地区气候演变的重要载体并且取得了令人瞩目的成果^[1-4]. 诸如石笋等次生沉积物中有着丰富的替代指标, 如 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ ^[5-8]、微量元素^[9-11]、生长速率^[12, 13]等, 可提供温度、大气降水、植被、水文条件等多种古气候古环境信息进行古气候重建.

洞穴水是形成洞穴次生沉积物的重要基础, 洞穴水的来源是大气降水, 降水到达地表, 穿过土壤和岩层, 携带一定的生态环境信号形成洞穴水. 因此, 对洞穴水的地球化学指标进行研究, 分析各类代用指标在年际、季节尺度上的变化特征有助于加深洞穴沉积物形成机制的理解^[14]. 然而, 洞穴水在传递、记录外界环境信号的过程十分复杂, 受到方解石前期沉积作用 (prior calcite precipitation,

PCP)^[15, 16]、位置^[17]、滴水水动力类型、水在洞穴顶板内的水文地球化学过程^[18]等因素的综合影响. 故而, 加强现代洞穴的监测工作, 充分理解岩溶洞穴的水文化学过程, 对应用洞穴次生沉积物进行高分辨率的古气候重建具有重要意义.

在国外, Fairchild 等^[16]通过对爱尔兰西南部 Crag 洞进行监测, 认为洞穴滴水地球化学性质受到降水量、岩溶水来源、上覆土壤的淋滤作用以及发生在流经路径上的稀释作用和方解石前期沉积作用

收稿日期: 2015-06-05; 修订日期: 2015-07-22

基金项目: 贵州省科技厅联合基金项目 (黔科合 J 字 LKA[2012]09 号; 黔科合 J 字 LKA[2012]18 号)

作者简介: 沈蔚 (1989 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶学与环境变化, E-mail: shenw7@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wangjl@swu.edu.cn

等因素共同影响. Tooth 等^[19]的研究发现,岩溶含水层的溶解效应、活塞效应、方解石前期沉积效应对岩溶水化学组成有显著影响;而且土壤水的混合效应等也对岩溶水化学特征产生重要影响. Musgrove 等^[20]的研究则指出岩溶水的化学组成受到地下水滞留时间、与土壤和基岩的水岩相互作用等因素的影响. McDonald 等^[21]通过对 Wombeyan 洞滴水滴速与滴水微量元素的变化,发现 2002 ~ 2003 年的厄尔尼诺带来的干旱,使得滴水滴率下降, Mg 和 Sr 含量相对增加.

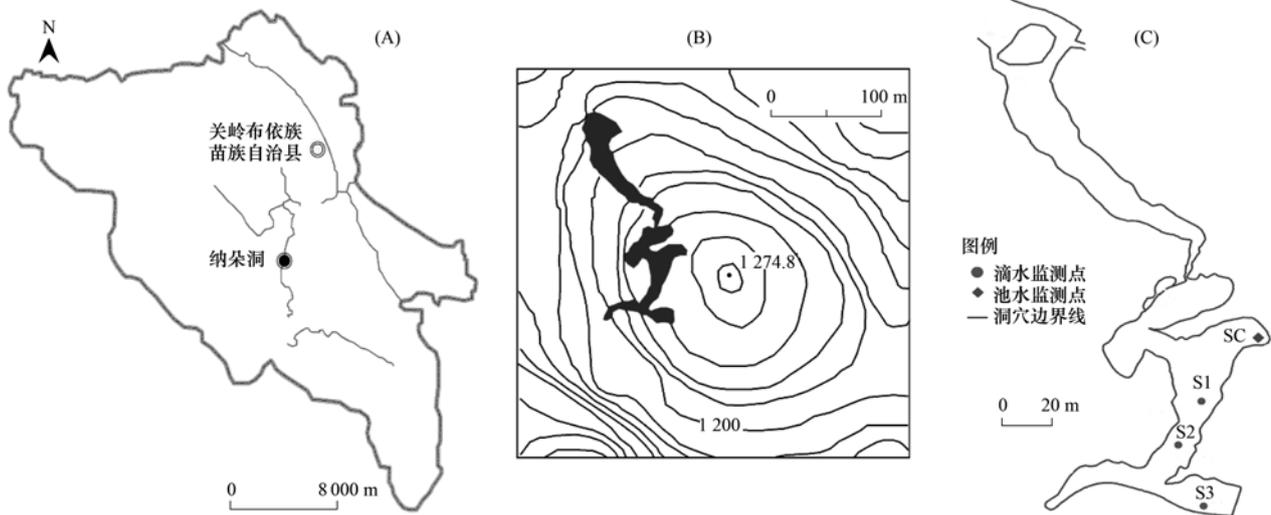
在国内,部分学者在北京石花洞、广西盘龙洞、重庆芙蓉洞、贵州七星洞、犀牛洞及将军洞等地开展了洞穴监测工作. 如周运超等^[18]通过对贵州 4 个洞穴的滴水监测,建议以多个点的研究结果来保证岩溶次生沉积物对过去环境变化指标解译的正确性. 张美良等^[22]通过对桂林盘龙洞滴水物理化学指标的研究发现洞穴滴水的物理化学特性受降水、洞顶基岩厚度及渗入水的滞留时间、滴水速度快慢的影响. 叶明阳等^[23]对重庆芙蓉洞的监测,发现干旱时, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度上升,而在洪涝年,稀释效应明显, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度偏低. 上述研究为后续的相关研究提供了参考,但是不同地区的地质条件和气候条件的差异,使得不同地区的洞穴水文动态并不

相同,因此,只能对每个洞穴的环境进行单独的了解,才能提取有效的环境信息^[24].

本文选取贵州关岭纳朵洞为研究地点,对洞内 4 处洞穴水进行长期定点监测和实验分析,并结合当地气象资料,分析了各个观测点洞穴水的地球化学变化特征及其与降水和温度的关系,对纳朵洞洞穴水水文地球化学季节变化及其对外界气候变化的响应做了初步探讨,以期了解洞穴次生沉积物所记录的环境信息提供理论参考.

1 研究区概况

关岭纳朵洞(105°35'E, 25°49'N)位于云贵高原东部,贵州省关岭县花江镇境内,距关岭县城 13 km(图 1). 洞体所在地层为三叠纪永宁组,主要岩层为灰岩或白云岩夹泥沙岩,监测部分的山体厚度约 30 ~ 85 m,天然洞口海拔 1 191 m. 洞穴上覆土壤为黄壤,植被以草被和灌丛为主. 该地区是典型的中亚热带季风性湿润气候区,气候温和湿润,四季分明,据气象资料显示该地区多年平均降雨量为 1 268 mm,平均气温为 16.2℃,5 ~ 10 月为雨季,降雨量占全年的 80% 以上,11 月至次年 4 月为旱季,降水稀少. 由于受季风环流的影响,季节差异明显.



(A) 洞穴地理位置; (B) 洞穴系统区域概况; (C) 洞穴平面及采样位置

图 1 研究区位置与采样点分布示意

Fig. 1 Location of the Naduo Cave and the water sampling sites

2 研究方法

2.1 样品采集与保存

自 2012 年 12 月至 2014 年 12 月,在纳朵洞内选取离洞口较远、封闭条件好的 3 个滴水点(S1、

S2、S3)和 1 个池水点(SC)进行连续监测,以研究洞穴水的离子变化对外界环境的响应. 本研究每月一次现场采集滴水和池水样品,每个采样点收集 4 瓶水样. 其中 2 个约 80 mL 的聚乙烯塑料瓶用来装取测试阴离子和阳离子的水样,2 个 25 mL 的聚乙烯塑料

瓶装取测试氧、氘同位素和溶解无机碳(DIC)同位素的水样. 在水样采集前先将采样瓶用采样点的水润洗3次,采集池水时,将采样瓶放入水体中取样,并避免采集表层及底层的池水. 采集阳离子的水样中加入1:1浓度的 HNO_3 酸化,以保持离子活性. 最后将所有样品瓶口密封,带回实验室于 6°C 避光条件下冷藏,以备分析测试使用. 滴速用秒表计数测定,连续计数3次再取平均值,单位为 $\text{滴}\cdot\text{min}^{-1}$.

2.2 样品实验分析

水样pH值、水温和电导率使用美国HCAH公司生产的HQ340d多参数水质分析仪现场测试,精度分别为0.01 pH单位、 0.1°C 、 $1\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. 并利用德国Merck公司产碱度、硬度试剂盒测试水样的 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 浓度,精度为 $0.1\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子的浓度采用美国Perkin-Elmer公司生产的Optima2100DV电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-OES)进行测定,检测限为 $0.001\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,测量相对误差 $\leq 2\%$. SO_4^{2-} 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,其检测限至 $0.01\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,绝对误差 $< 1\%$. 金属阳离子和阴离子浓度测试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.

3 结果与分析

3.1 水化学类型

纳朵洞滴水和池水中的主要阴阳离子为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 等. 滴水和池水中优势阳离子为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,优势阴离子为 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} . 经过计算,滴水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 分别约占阳离子总量的96%和3%, HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 分别约占阴离子总量的75%、17%;池水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 分别约占阳离子总量的95%和3%, HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 分别约占阴离子总量的82%和14%;所以,滴水和池水的水化学类型均为 HCO_3^- - Ca^{2+} 型. 经计算,洞穴水方解石饱和度(SIc)全年多数月份大于0,处于沉积状态,两个观测年间,均在雨季达到最低值,6、7月甚至有滴水点SIc小于0,呈不饱和的溶蚀状态.

3.2 洞穴滴水水文特征

通过分析安顺当地降水和滴水的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 数据,求得安顺关岭大气降水线方程(图2)为: $\delta\text{D} = 9.02\ \delta^{18}\text{O} + 20.93$, $r = 0.99$. 图2中可以看出纳朵洞洞穴水的氢氧同位素值均分布在当地大气降水线

附近稍偏于右下方,表明大气降水在经过土壤和基岩下渗进入洞穴的过程中的蒸发作用较小,洞穴水对当地降水有很好的继承性,可以有效反映外界环境变化.

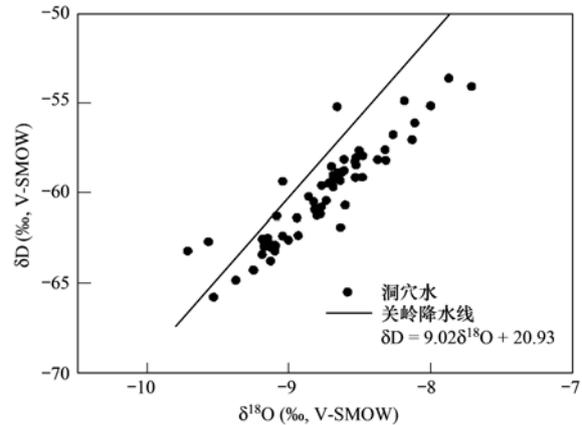


图2 关岭地区大气降水线

Fig. 2 Meteoric water line in Guanling

洞穴滴水的滴速对大气降水的响应,主要受到地表植被、土层厚度、洞顶基岩厚度以及渗流通道和路径等因素的影响. 纳朵洞洞顶上覆土壤层浅薄,植被较单一,基岩相对较薄,当大气降水出现变化时,滴速能对洞穴外部环境尤其是降水量的变化有很好的响应. 根据气象资料显示,2013年安顺地区的降水量为759.8 mm,较之往年平均值低555 mm,2014年该地区降水量与往年平均值持平,但却在2014年夏季出现了暴雨洪灾的极端天气,7~10月降水量是平常年份的2~3倍,这些大气降水的变化都较好地反映在滴水点滴速上(图3),因而对洞穴水的水化学特征研究有助于加深人们对其携带的地球化学信号的理解.

3.3 离子浓度特征

对4个采样点 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 的分析表明,不同点的岩溶水化学组成有较大差别(图4). S1、S2、S3的 Ca^{2+} 浓度变化范围和均值非常接近,3个滴水点的平均浓度约为 $(58.3 \pm 0.6)\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Mg^{2+} 的平均浓度分别为1.7、1.32和 $1.04\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SO_4^{2-} 的平均浓度分别为24.86、19.03和 $16.87\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, HCO_3^- 的平均浓度分别为148、120和 $114\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 3个滴水点存在这种差别,推测主要受到空间位置差异的影响^[25],不同滴水点的岩溶水在洞顶运移路径不一致,水-土-岩反应时间不同. S1、S2、S3的上覆土壤和岩层厚度在逐渐递减,与之同时其水-土-岩反应时间可能因此也逐渐减少,进而导致3个滴水点的离子浓度S1最高,S2次之,

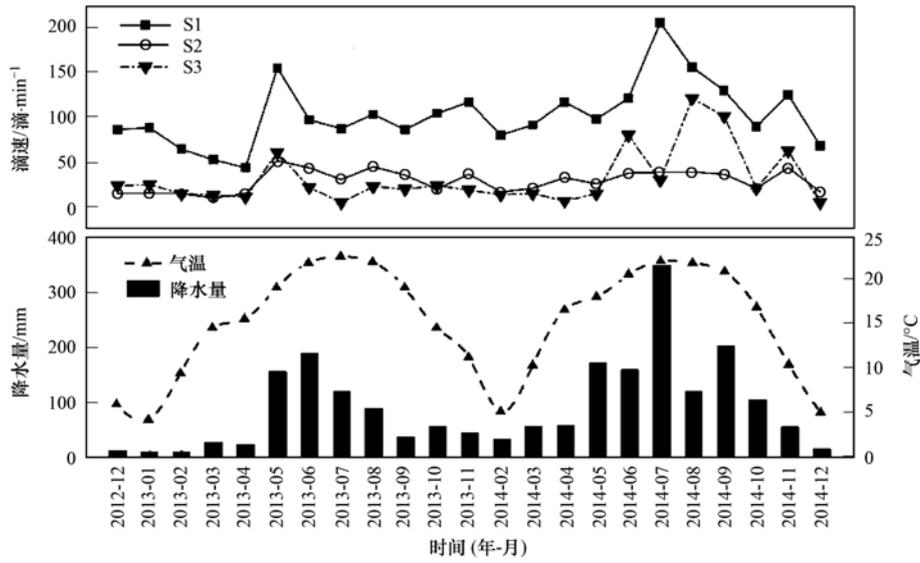


图3 滴速与降水

Fig. 3 Dripping speed and precipitation

S3 相对最低。

池水 SC 的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 的平均浓度分别为 63.6、2.3 和 26.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，相对 3 个滴水点偏高，且变化幅度较之也偏大。而在重庆芙蓉洞、河南鸡冠洞等地的研究中发现，由于池水中次生沉积

物的沉积，池水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子浓度显著小于滴水^[26, 27]。纳朵洞池水的离子浓度出现这种差别原因可能是池水补给来源较复杂——洞穴顶部不同滴水和裂隙水等水源；同时，纳朵洞封闭性好，洞内 CO_2 浓度较高，夏季甚至达到洞外 CO_2 浓度的 5 倍

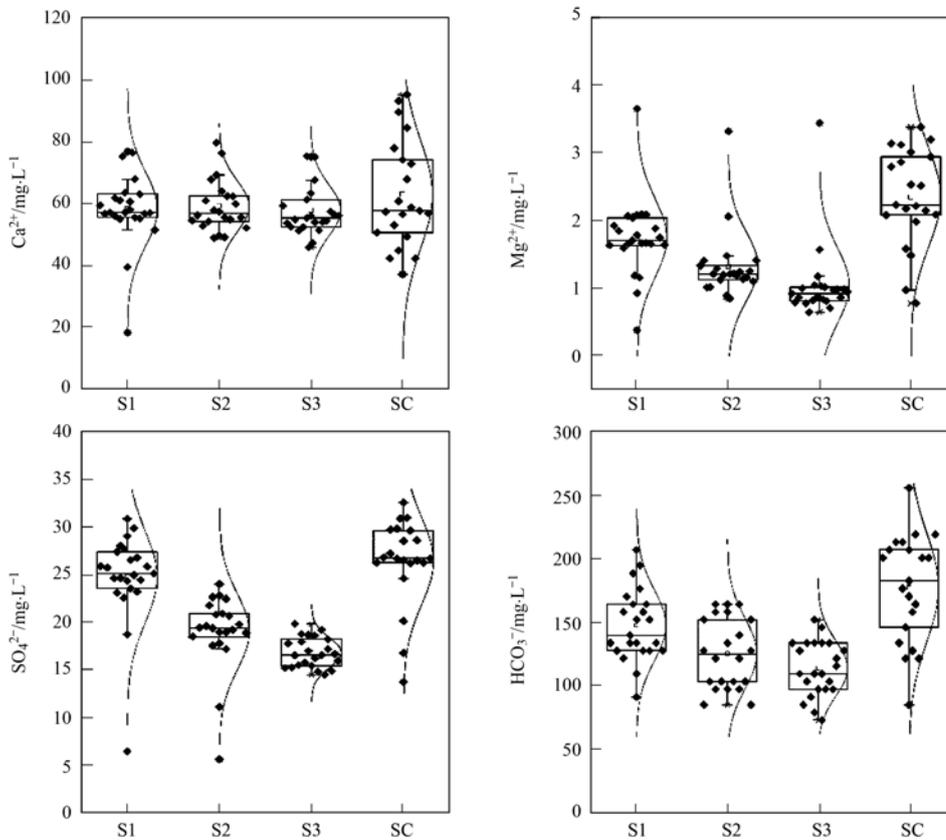


图4 纳朵洞洞穴滴水、池水 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 变化范围

Fig. 4 Variation ranges of Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} and HCO_3^- concentrations in drip water and pool water

(外 59.3 Pa, 内 240.2 Pa), 洞穴空气 p_{CO_2} 显著高于池水, 这些差异可能直接导致池水在汇入水池之后, 没有发生脱气作用, 反而还在继续吸收 CO_2 , 进而继续溶蚀水池下部基岩直至饱和, 导致池水 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 的浓度偏大. 池水的 HCO_3^- 浓度高于滴水, 也较好地印证了上面的推测.

3.4 洞穴水水化学特征与气候事件关系

3.4.1 洞穴水 pH、 HCO_3^- 和 EC

纳朵洞洞穴水的 pH、 HCO_3^- 和 EC 有一定的时空变化, 其中滴水 and 池水 pH 的季节性同步变化最为明显, 如图 5 所示. 其中 S1、S2、S3、SC 的 pH 变化幅度分别为 7.76 ~ 8.63、7.49 ~ 8.63、7.48 ~ 8.50、7.68 ~ 8.46; 平均值分别为 8.18、8.09、8.12、8.15, 为中性偏碱性水. 滴水和池水 pH 的动态过程和变化趋势基本趋于一致, 与洞外气温和降水的变化有一定关系. 夏季气温升高, 降水增多, 洞穴水的 pH 值较低; 冬季气温低, 降水少, 洞穴水的 pH 值较高. 滴水 pH 主要指示滴水中酸性物质或离子如 H_2CO_3 和 SO_4^{2-} 的含量, 在岩溶区主要受控于滴水中溶解 CO_2 的量^[28]. 纳朵洞位于安顺关岭, 属于亚热带季风气候, 每年 5 ~ 9 月温度升高, 植物生命活动旺盛, 微生物活动增强, 土壤中的 CO_2 含量增加, 使得大气降水在下渗过程中溶解大量源于土壤的高浓度 CO_2 , 并在进入基岩前形成具有较强侵蚀能力的酸性岩溶水, 冬季则相反. 此外夏季降水

量多, 岩溶裂隙和管道系统饱水, 不易发生 CO_2 脱气, 而在冬季岩溶裂隙和管道系统属包气带, 水中 CO_2 易脱气, 故 pH 夏季低冬季高. 对比两个观测年, 发现 2014 年的洞穴水 pH 值整体偏高, 推测可能是 2014 年夏季, 特别是 7 月降水量的异常偏大, 使得降水在洞顶土壤层和围岩裂隙中下渗速度加快, 滞留时间短, 水中溶解的 CO_2 减少, 即降水对洞穴水的稀释作用增强.

纳朵洞洞穴水中 HCO_3^- 含量具有明显的季节变化, 夏季高于冬季. CO_2 气体是岩溶作用发生的重要驱动力, 是影响 HCO_3^- 浓度高低的重要因素^[29]. 夏季高温多雨, 地表植被及微生物活动更加活跃, 产生较多的 CO_2 气体, 进而导致降水在土壤层向下运移的过程中吸收更多的 CO_2 , 使得洞穴水 HCO_3^- 含量偏高, 冬季则正好相反. 对比 2013 年和 2014 年洞穴水的 HCO_3^- 含量, 2014 年的含量相对略微偏低, 与 pH 值的变化规律非常一致, 同时证实了之前 pH 偏高的解释, 是由于降水大幅度增多, 对洞穴水的稀释作用更显著, 不过由于 HCO_3^- 含量主要受 CO_2 浓度控制, 故而两个年份间的差异很小.

水溶液的电导率 EC 高低取决于其内含有溶质盐的浓度, 或其他能够分解为电解质的化学杂质的含量. 纳朵洞内滴水和池水的 EC 具有夏季偏高, 冬季偏低的季节变化特征. 这是由于在夏季高温多雨的条件下, 土壤水溶蚀能力增强, 从而溶解更多土壤

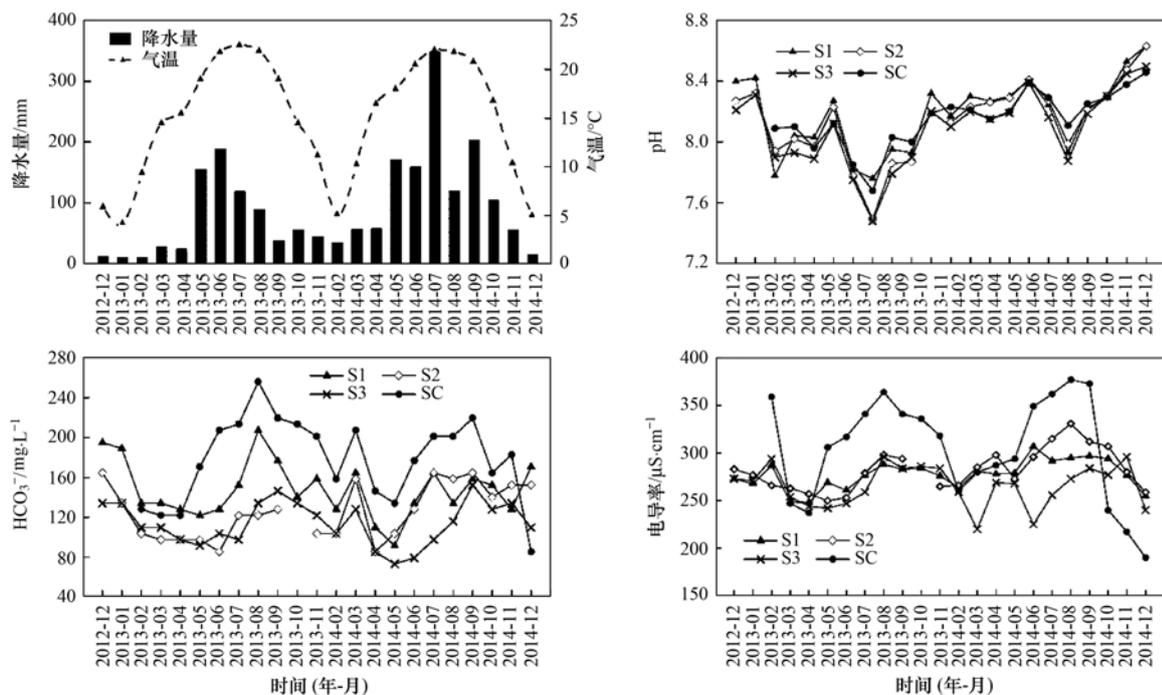


图 5 纳朵洞洞穴水 pH、 HCO_3^- 、EC 变化

Fig. 5 Variation of pH, HCO_3^- and EC concentrations in drip water and pool water

和基岩中的矿物,最终导致洞穴滴水和池水的 EC 增大. 此外,洞内池水的 EC 变化幅度比滴水大,与上文中池水的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度高于滴水,且变化幅度大的现象表现一致. 原因可能是池水的来源复杂,且夏季纳朵洞内 CO_2 浓度特别高,池水 pH 偏低,对下部基岩产生溶蚀,进而产生池水电导率偏高且变化幅度大的结果.

综合纳朵洞洞穴水的 pH、 HCO_3^- 和 EC 的变化,可以发现洞外气温和大气降水与洞穴水的水化学特征季节性变化有一定关系. 说明纳朵洞洞穴水的水化学特征可以反映洞外的气候变化情况. 两个观测年对比,洞穴水化学特征由于受到气温、降水以及 CO_2 浓度等物理条件变化的影响,使得洞穴水对 CO_2 存在吸收和溢出情况的差异,进而影响洞穴水 pH、 HCO_3^- 、EC 的变化. 特别是 2014 年雨季大气降水的偏多对洞穴水的稀释作用在其 pH 值和 HCO_3^- 浓度的变化上也显而易见.

3.4.2 洞穴水离子浓度变化

在岩溶系统中,水是岩溶作用发生的物质基础之一,是岩溶作用反应的介质. 滴水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要来源于上覆土壤的淋滤和基岩的溶解. 2013 年期间, Ca^{2+} 浓度呈现出旱季浓度低,雨季浓度高的总体变化趋势. 雨季时,较多的降水不断溶解来自洞穴上覆土壤的 CO_2 并在进入基岩前形成偏酸性的岩溶水,进而溶解更多的上覆基岩,使得雨季 Ca^{2+} 浓度上升;旱季时,滴水补给源减少,上覆含水层易处于缺水状态,岩溶水与基岩长时间作用达到饱和,导致岩溶水 CO_2 脱气,发生碳酸钙前期沉淀. 最终,滴水中 Ca^{2+} 的浓度降低. 由图 6 可知 Ca^{2+} 浓度雨季高于旱季,最高值出现在雨季的 9 月,最低值出现在旱季的 4 月. Mg^{2+} 的季节性变化与 Ca^{2+} 类似,基本保持旱季低、雨季高的特征. Mg^{2+} 浓度的影响机制与 Ca^{2+} 基本类似. 区别在于 Mg^{2+} 浓度同时还受到分配系数的影响,而分配系数与温度成正比.

而在 2014 年夏季研究区发生了暴雨洪灾的极端天气,7~10 月降水量是平常年份的 2~3 倍,仅 7 月降雨量就达到了 384.2 mm,远超 2013 年同期的 118.8 mm. 滴水中的 Ca^{2+} 受降水稀释作用影响,在 6~8 月浓度明显偏低. 降水的波动大,导致 2014 年 6 月至当年年底 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度出现较大幅度变化,但二者时间上有差异,并非同步出现. Ca^{2+} 浓度在 2014 年滴水 S1 的 7、9 月,S2 的 10 月,S3 的 7、10 月,池水 SC 的 6、7、10 月均有不同程度的降低;这一时期 Mg^{2+} 浓度同样出现异常波动,S1 和 SC 在

7、9、11 月,S2 在 10 月,S3 在 7、8、10 月,分别出现低值.

Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度降低主要是当地特大暴雨事件对洞穴水的稀释作用导致^[19,30],同时,纳朵洞各个点所在上覆岩层厚度、倾角、岩溶裂隙发育程度的差异使得降水对各个点洞穴水稀释程度不同. 说明纳朵洞洞穴水 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度对当地降水尤其是特大降水事件有明显的响应,但时间上并非同步出现,在探讨时应该综合考虑降水强度、山体地貌、地层特点和岩溶裂隙发育程度等多方面因素对洞穴水离子浓度的影响. 同时,研究中要注意降水变化对洞穴水离子浓度的影响:适量降水有利于离子浓度的增加,但降水量太大将形成稀释作用,使离子浓度减小^[23].

不同岩溶水的 SO_4^{2-} 浓度存在显著差异,具有一定的季节变化特征. 2013 年夏秋季节 SO_4^{2-} 浓度略高于冬春季节. 洞穴水的 SO_4^{2-} 主要来源于大气降水以及岩石和土壤中矿物成分的风化和淋溶. 上覆土壤中 SO_4^{2-} 含量的变化受到土壤物理化学和生物学过程所控制^[31]. Dail 等^[32] 采用 $\text{Na}_2^{35}\text{SO}_4$ 作为示踪剂研究表明土壤与硫酸盐之间有 48% 的硫酸盐在极短的时间内会被土壤固定,一是土壤的物理化学吸附,二是被转换为有机态硫. 此外,动植物死亡后的分解作用或细菌转化等也会在土壤中产生硫累积效应^[33]. 当大气降水携带的 SO_4^{2-} 进入土壤后快速被固定并转化为土壤硫,因此在土壤层形成一个较大的硫源. 季节上的差异可能是,在旱季降水偏少,岩溶水在下渗过程中与基岩的接触时间长,基岩中管道、裂隙等通风程度的增强导致硫酸盐前期沉积作用加强,岩溶水中 SO_4^{2-} 浓度偏低. 随着雨季到来,降水携带 SO_4^{2-} 进入土壤后被快速固定,并转化为土壤硫,同时对土壤的淋溶作用加强,加大了 SO_4^{2-} 的浓度^[33];洞穴水在雨季过后直到 12 月才开始整体呈现缓慢下降的趋势,说明土壤和基岩中潜在的蓄水层可能作为洞穴滴水的来源,使得雨季优先流消失过后,洞穴水 SO_4^{2-} 浓度仍能在偏高浓度水平维持一段时间.

而池水 SC 在 2013 年 5、8 月和 2014 年 7 月,滴水 S1 在 2014 年 7 月,S2 在 2014 年 8 月出现异常低值,推测是由于研究区降水量增多,稀释作用对 SO_4^{2-} 的作用导致. 不同点对降水的响应程度及时间不同,可能是受到岩溶水运移路径,水-土-岩反应时间等因素的综合影响^[30]. 总之,不同位置的土壤和基岩的硫酸盐含量的差异以及降水的变化共同决

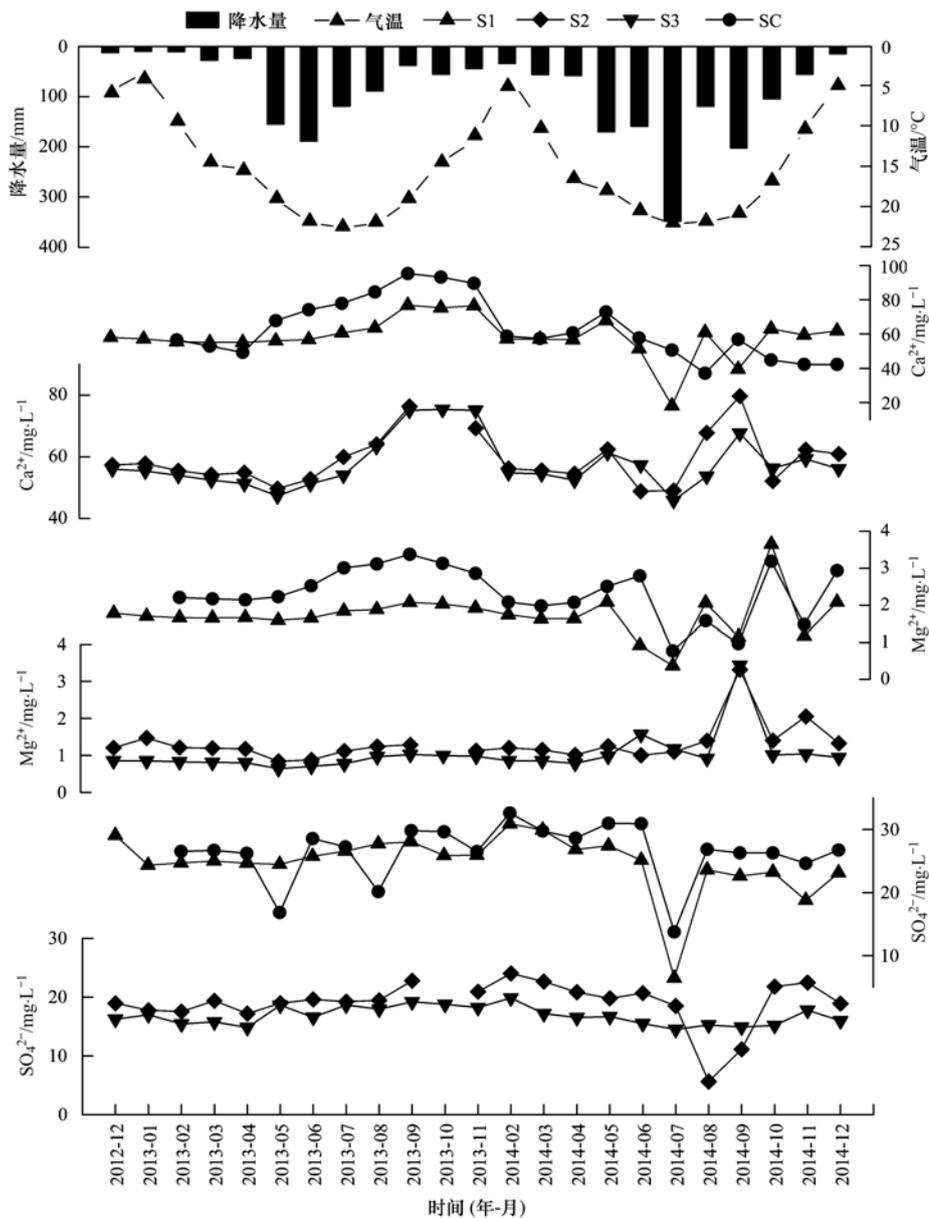


图6 纳朵洞洞穴滴水、池水中主要元素动态变化

Fig. 6 Dynamics of major elements in drip water and pool water of Nadduo Cave

定了洞穴水中 SO_4^{2-} 浓度的变化。

4 结论

(1) 通过对纳朵洞洞穴水地球化学特征分析, 不同性质洞穴水地球化学特征主要受到基岩的溶解和上覆土壤淋虑的控制。其洞穴滴水 and 池水的化学类型是 HCO_3^- - Ca^{2+} 型, 阴离子中 HCO_3^- 占 75% 及以上, 阳离子中 Ca^{2+} 是优势离子, 占 95% 以上。除每年雨季降雨量最大的月份外, 池水和滴水均长期处于沉积状态。

(2) 纳朵洞 3 个滴水点 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和

HCO_3^- 的浓度变化范围和均值存在一定差异, 推测是不同滴水点的岩溶水在洞顶运移路径不一致, 水土-岩反应时间不同的影响。而洞穴池水由于其补给来源多样以及洞穴内部较高 CO_2 浓度在一定程度上抑制了池水脱气、沉淀作用等原因, 导致池水的离子浓度和变化幅度均高于 3 个滴水点。

(3) 纳朵洞洞穴滴水、池水的 pH、 HCO_3^- 、EC 和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 等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 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 浓度雨季高于旱季。雨季降水量增多, CO_2 浓度偏

高,洞穴水 pH 降低,增强了岩溶水在下渗过程中对土壤和基岩的溶解和淋滤作用,最终导致其离子浓度雨季相对旱季偏高;②对比 2013、2014 年数据, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度对极端气候事件引起的年际间降水变化的响应比较敏感. 2013 年雨季的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度高且平稳,而 2014 年雨季其浓度偏低且波动大. 原因在于 2014 年降水的异常偏多,使得降水的稀释作用在对洞穴水地球化学特征的影响程度上超过了其对可溶性基岩和上覆土壤的溶解和淋滤作用. 各个观测点对强降水事件的响应程度和时间并不一致,其具体的响应过程与降水强度、研究区岩层特点以及岩溶裂隙发育程度等多方面因素有关.

参考文献:

- [1] Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, *et al.* Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon [J]. *Science*, 2004, **304**(5670): 575-578.
- [2] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, *et al.* A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China [J]. *Science*, 2001, **294**(5550): 2345-2348.
- [3] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, *et al.* The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate [J]. *Science*, 2005, **308**(5723): 854-857.
- [4] 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**(7182): 1090-1093.
- [5] 汪永进, 吴江滢, 刘殿兵, 等. 石笋记录的东亚季风气候 H_1 事件突变性特征 [J]. *中国科学(D 辑)*, 2002, **32**(3): 227-233.
- [6] Li T Y, Yuan D X, Li H C, *et al.* High-resolution climate variability of southwest China during 57-70 ka reflected in a stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record from Xinya Cave [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, **50**(8): 1202-1208.
- [7] Hu C Y, Huang J H, Fang N Q, *et al.* Adsorbed silica in stalagmite carbonate and its relationship to past rainfall [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, **69**(9): 2285-2292.
- [8] 李廷勇, 李红春, 李俊云, 等. 重庆芙蓉洞洞穴沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及意义 [J]. *地质论评*, 2008, **54**(5): 712-720.
- [9] Roberts M S, Smart P L, Baker A. Annual trace element variations in a Holocene speleothem [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, **154**(1-4): 237-246.
- [10] 李彬, 袁道先, 林玉石, 等. 洞穴次生化学沉积物中 Mg、Sr、Ca 及其比值的环境指代意义 [J]. *中国岩溶*, 2000, **19**(2): 115-122.
- [11] 马志邦, 李红春, 夏明, 等. 距今 3ka 来京东地区的古温度变化: 石笋 Mg/Sr 记录 [J]. *科学通报*, 2002, **47**(23): 1829-1834.
- [12] 邵晓华, 汪永进, 孔兴功, 等. 南京葫芦洞石笋生长速率及其气候意义讨论 [J]. *地理科学*, 2003, **23**(3): 304-309.
- [13] Baker A, Asrat A, Fairchild I J, *et al.* Analysis of the climate signal contained within $\delta^{18}\text{O}$ and growth rate parameters in two Ethiopian stalagmites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, **71**(12): 2975-2988.
- [14] 彭玲莉, 李廷勇. 岩溶洞穴滴水环境监测研究进展 [J]. *中国岩溶*, 2012, **31**(3): 316-326.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Tooth A F, Fairchild I J. Soil and karst aquifer hydrological controls on the geochemical evolution of speleothem-forming drip waters, Crag Cave, southwest Ireland [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, **273**(1-4): 51-68.
- [20] Musgrove M, 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.
- [21] 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): L22202.
- [22] 张美良, 朱晓燕, 林玉石, 等. 桂林盘龙洞滴水的物理化学指标变化研究及其意义 [J]. *地球与环境*, 2009, **37**(1): 1-10.
- [23] 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.
- [24] Hu C Y, Henderson G M, 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.
- [25] 赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 等. 岩溶泉水化学性质及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 影响因素 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2430-2436.
- [26] 刘肖, 杨琰, 彭涛, 等. 河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1582-1589.
- [27] 周福莉, 李廷勇, 陈虹利, 等. 重庆芙蓉洞洞穴水水文地球化学指标的时空变化 [J]. *水土保持学报*, 2012, **26**(3): 253-259.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Liu Z H, Groves C, Yuan D X, *et al.* Hydrochemical variations during flood pulses in the south-west China peak cluster karst: Impacts of CaCO_3 - H_2O - CO_2 interactions [J]. Hydrological Processes, 2004, 18(13): 2423-2437.
- [31] 向晓晶, 李廷勇, 王建力, 等. 重庆芙蓉洞上覆基岩、土壤元素分布特征及其对洞穴滴水水化学影响[J]. 中国岩溶, 2011, 30(2): 193-199.
- [32] Dail D B, Fitzgerald J W. S Cycling in soil and stream sediment: Influence of season and in situ concentrations of carbon, nitrogen and sulfur[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(10): 1395-1404.
- [33] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 248-256.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaying	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zeolite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《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12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 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

国内外公开发行人