

# 金华北山洞穴水地球化学变化特征及气候指示意义

庞 征, 王天阳, 李凤全, 叶 玮

(浙江师范大学 地理与环境科学学院, 浙江 金华 321004)

**摘 要:**为揭示洞穴水地球化学变化特征及其气候指示意义,从 2014 年 5 月到 2015 年 4 月对金华北山双龙洞和二仙洞洞穴水进行了连续 12 个月的观测分析,并结合当地气温和降雨数据,得到以下结果:(1) 由于受上覆岩土作用、植被、运移路径等因素的影响,不同滴水点的离子浓度变化有所差异,常年性滴水点(除  $\text{Ca}^{2+}$  外)阳离子平均浓度均大于季节性滴水点、瀑布水和池水;(2) 金华北山洞穴水的  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  浓度变化具有明显的季节变化特征,总体上呈现出雨季高、旱季低的特点,5—8 月和次年 1—4 月随着降雨量的增多而升高,9—12 月由于外界降雨少而处于较高的值,外界干湿是影响阳离子浓度变化的主要因素;(3) 洞穴水中  $\text{Mg}/\text{Ca}$  比值对外界干湿有指示意义,但也受气温的影响;而  $\text{Sr}/\text{Ca}$ ,  $\text{Ba}/\text{Ca}$  比值除了受降雨影响,还受其他因素的影响。

**关键词:**洞穴水; 离子浓度; 元素比值; 气候指示

中图分类号:P641

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)05-0332-06

## Cave Water Hydrogeochemical Characteristics of Jinhua North Mountain Caves and Its Climate Implications

PANG Zheng, WANG Tianyang, LI Fengquan, YE Wei

(College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

**Abstract:** In order to reveal the geochemical characteristics of cave waters and its climate implication, we have monitored cave waters in Jinhua Beishan Mountain caves from May 2014 to April 2015. Combining with the local data of temperature and precipitation, we got the following conclusions. (1) Affected by overlying rock, vegetation, flow path and other factors, different drip points have different ion concentrations, ion concentrations (except  $\text{Ca}^{2+}$ ) of perennial drip point were higher than the seasonal average dripping point, waterfall and pond. (2) Trace element ion concentrations of cave water in Jinhua North Mountain caves showed seasonal variation characteristics that the ion concentrations were low in dry season, were high in rainy season, and increased with the precipitation from May to August and the following year from January to May, keeping the high values from September to December due to the decrease of outside rainfall, dry or wet condition outside is the main factor affecting ion concentration. (3)  $\text{Mg}/\text{Ca}$  ratio of cave water implicates the wet or dry condition outside, but also it is affected by temperature. The ratios of  $\text{Sr}/\text{Ca}$  and  $\text{Ba}/\text{Ca}$  were not only affected by the precipitation, but also were affected by the interference of other geological and hydrological factors.

**Keywords:** cave water; ion concentration; element ratios; climate implications

洞穴次生化学沉积物特别是石笋,由于分布范围广、易于采样、分辨率高等优点成为研究古环境、古气候变化的重要载体。国内外学者在利用石笋重建古气候方面取得了很多重要成果,但是研究过程中发现,替代性指标所含信息与外界环境变化具有不一致性,同一指标具有多解性,因此需要在现代环境条件

下对洞穴次生化学沉积物的替代性指标所含环境信息进行校正,以便更精确译读洞穴次生沉积物中所包含的环境信息<sup>[1-3]</sup>。洞穴滴水是形成洞穴次生化学沉积物的母液,是环境信息的携带者和传递者,在运移的过程中受到洞穴顶板、上覆植被等因素的影响,使携带的环境信息发生了改变,从而影响了洞穴次生化

收稿日期:2015-09-18

修回日期:2015-10-14

资助项目:浙江省自然科学基金“金华北山溶洞群洞穴滴水的气候信息指示”(LY16D010001);国家自然科学基金面上项目“中国南方晚第四纪风尘沉积的物质联系”(41071002),“基于 BHQ 岩芯的钱塘江中下游全新世环境重建研究”(41371206)

第一作者:庞征(1990—),男,河南南阳人,硕士研究生,研究方向为环境演变。E-mail:1067509423@qq.com

通信作者:王天阳(1977—),女,吉林长春人,副教授,主要从事环境变迁和水环境研究。E-mail:lygl59@zjnu.cn

学沉积物所携带的外界环境信息。对滴水的环境信息传递过程进行研究,是精确解译洞穴次生化学沉积物中所记录气候信息的重要基础。

滴水的化学变化能够灵敏反映洞穴环境和外部环境的变化,而这些环境信息最终会传输到洞穴化学沉积物并被保存下来<sup>[4]</sup>。近年来,国内很多学者对洞穴水的地球化学变化特征做了许多研究,取得了重要成果:如周运超等<sup>[5-6]</sup>在贵州凉风洞、犀牛洞的研究发现,洞穴滴水的化学组成有明显的季节变化特征,其变化主要受水运移过程中水—土、水—岩作用导致的方解石溶解—沉淀过程所控制,稀释作用、水来源的差异及活塞流也对滴水的地球化学性质产生了一定的干扰。王新中等<sup>[7]</sup>通过对北京石花洞滴水地球化学的观测,发现滴水中 Mg/Ca 比值旱季低而雨季高,对降雨有指示意义;但李珊英<sup>[8]</sup>却指出滴水 Mg/Ca 比值具有雨季低而旱季高的变化特征,分析方解石先期沉积作用(PCP)可能是主要控制因素。而李彬等<sup>[9]</sup>则认为当大气环流未发生显著变化和岩溶水文地质条件相似时,Mg/Ca、Mg/Sr 比值主要取决于环境气温变化;当大气环流发生显著变化时,Mg/Ca、Mg/Sr 比值主要取决于降雨条件的变化。可见,虽然滴水化学组成可以指示洞外环境的变化,但由于滴水来源的多样性和传输过程的复杂性,可能会导致在解译元素所记录的环境信息时存在不确定性和多解性。

目前国内关于洞穴水中的地球化学的研究,多集中于西南地区,而浙江省在利用碳酸盐次生沉积物解译古环境信息方面的研究还较缺乏,洞穴水的地球化学季节变化及环境指示意义方面基本处于空白状态,仅王学焯等<sup>[10]</sup>对北山洞穴水的理化性质做了初步研究。浙江省位于我国华东沿海地区,为典型的中亚热带季风气候,处于海陆过渡带,与同纬度的内陆季风区相比,其自然环境具有强烈的过渡性和不稳定性,是研究古气候变化的理想地区。本文在前人研究的基础上对金华北山双龙洞和二仙洞利用 ICP-MS 对金华北山洞穴水常、微量元素进行连续 1 年多的观测,并结合当地气温和降雨数据,揭示北山洞穴水地球化学变化与气候变化的响应关系,为正确解译碳酸盐化学次生沉积物中替代性指标的气候意义奠定基础。

## 1 研究区概况

金华北山溶洞群(29°12′19″N,119°37′10″E)位于浙中丘陵盆地和浙西中山丘陵交接部的金华山山地上,属龙门山脉,以栖霞组燧石灰岩夹粉砂岩、船山组厚层纯灰岩和页岩为物质基础<sup>[11]</sup>。该地区四季分

明,热量充足,雨量丰沛,为典型的中亚热带季风气候。夏季受东南季风影响显著,冬季易受冬季风影响。金华地区年均温约 18℃,1 月平均气温为 4.8℃,7 月平均气温为 29℃,多年平均降雨量 1 414.3 mm,但季节分配不均匀,一般春季和 6—7 月的梅雨季节降雨丰沛,3—6 月降雨量约占全年降雨量的 53.8%,而 7 月、8 月多为伏旱天气,秋冬降雨亦较少。

本文选取金华北山溶洞群的二仙洞和双龙洞为研究对象。其中,双龙洞是北山开发较早的水平型溶洞之一,由内外两个大厅及龙耳支洞组成,其洞口向内朝东 95°,向外朝西 275°,洞口高程达 375 m。外洞较宽敞,洞顶似穹窿,洞底较平坦,面积约 1 200 m<sup>2</sup>。内外大厅相距 5 m,由狭窄的地下河沟通,河长约 15 m,宽约 3 m。地下河流经内大厅北侧洞底。双龙洞主要的地质遗迹有石钟乳、边石坝、天生桥和穿洞等。二仙洞洞口高程约 395 m,由 3 个大厅和 1 个小厅组成,为长廊型溶洞,总面积约 2 000 m<sup>2</sup>。该溶洞内的沉积物主要为一些滴石、流石,形态规模均较小,许多还在生长中,且洞顶和灰岩岩壁上生长有少量鹅管和卷曲石花。

## 2 研究方法

### 2.1 样品采集与测定

为了研究洞穴水化学组成的时空变异特征,在结合双龙洞和二仙洞的具体环境的基础上,同时考虑到对环境的响应,本文选取了离洞口相对较远,滴水量较大的 8 个采样点(图 1),各采样点基本情况见表 1。其中双龙洞 4 个(Sld<sub>1</sub>, Sld<sub>2</sub>, Sld<sub>4</sub>, Sld<sub>5</sub>),二仙洞 4 个(Exd<sub>1</sub>, Exd<sub>2</sub>, Exd<sub>3</sub>, Exd<sub>4</sub>)。每个月上旬和下旬各采样 1 次,暴雨时期适当进行加密。期间也收集了 3 次雨水进行对比研究。监测时间从 2014 年 5 月到 2015 年 4 月。

用纯水清洗干净的 100 ml 聚乙烯瓶放在采样点正下方滴取样品,每瓶装满水不留空气,并在每瓶加入 3~5 滴 1:1 的 HNO<sub>3</sub> 酸化(保证阳离子的活性),贴上标签,密封带回实验室。在浙江师范大学地理与过程实验室用 PerkinElmer 公司生产的电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, NEXion 300X)测定水样中的阳离子浓度<sup>[12]</sup>,检出限均优于 0.001 mg/L,方法相对标准偏差优于 2%。

### 2.2 数据处理与分析

所有试验数据均以 Excel 电子表格的形式进行储存和处理,以便进行数据运算和数据分析。各采样点的阳离子浓度在 Excel 中进行有效数字处理和计算平均值。采样点示意图利用 ArcGIS 10 软件进行绘制,

箱图用 OriginLab OriginPro v8.0 SR5 进行绘制,双坐标轴柱状图和折线图在 OriginLab OriginPro v8.0 SR5 中采用多个图层进行叠加绘制。

3 结果与分析

3.1 洞穴水  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  浓度变化特征

对 8 个采样点  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  浓度的分析得出,不同点岩溶水阳离子浓度变化有所差异(图

2)。  $\text{Ca}^{2+}$  为洞穴水化学成分中的主要阳离子,其浓度变化范围为 26.2~273.7 mg/L,常年滴水点  $\text{Exd}_3$  (53.1~127 mg/L)变幅最小,而季节性滴水点  $\text{Sld}_2$  (49.1~273.6 mg/L)变幅最大。比较分析可知,常年性滴水点  $\text{Sld}_1$ ,  $\text{Exd}_1$ ,  $\text{Exd}_3$  的  $\text{Ca}^{2+}$  平均浓度均大于季节性滴水点  $\text{Exd}_2$  以及池水  $\text{Exd}_4$ ,瀑布水  $\text{Sld}_5$  和岩溶裂隙水  $\text{Sld}_4$ 。其中,  $\text{Sld}_1$  点平均浓度最大为 153.2 mg/L,  $\text{Sld}_4$  点  $\text{Ca}^{2+}$  浓度最小为 75.7 mg/L。

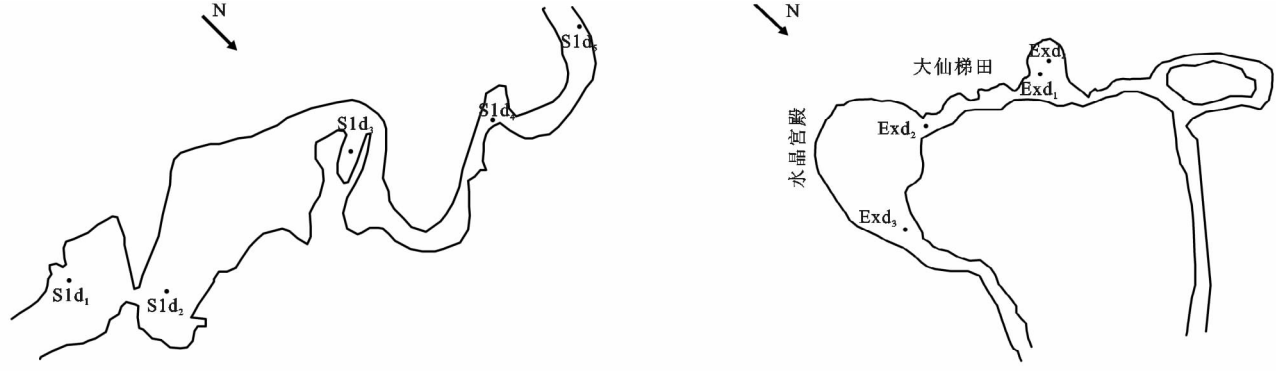


图 1 双龙洞和二仙洞采样点示意图

表 1 采样点概况

采样点	采样点名称	水样类型	水文特征描述
Sld <sub>1</sub>	铁栅栏西侧	常年性滴水	对外界降雨响应较快,降雨停止后逐渐减少
Sld <sub>2</sub>	仙人帐处	季节性滴水	对降雨响应快,滴水量大雨停止后很快减少,在干旱月份没有滴水
Sld <sub>4</sub>	冰壶洞口	岩溶裂隙水	水量季节变化明显
Sld <sub>5</sub>	母子瀑布	瀑布水	水量有明显的季节变化
Exd <sub>1</sub>	大仙梯田	常年性滴水	对外界降雨响应不敏感,滴水量变化不大
Exd <sub>2</sub>	众仙赴会	季节性滴水	降雨较多时呈线性滴水,干旱季基本滴水停止,但上方石钟乳常年保持湿润状态
Exd <sub>3</sub>	水晶宫殿处	常年性滴水	对降雨响应不敏感,干旱季节滴水也较快,下方有现代碳酸盐化学次生沉积物生成
Exd <sub>4</sub>	大仙梯田	池水	降雨多的季节池水较多,而干旱季节池水较少,流动性差

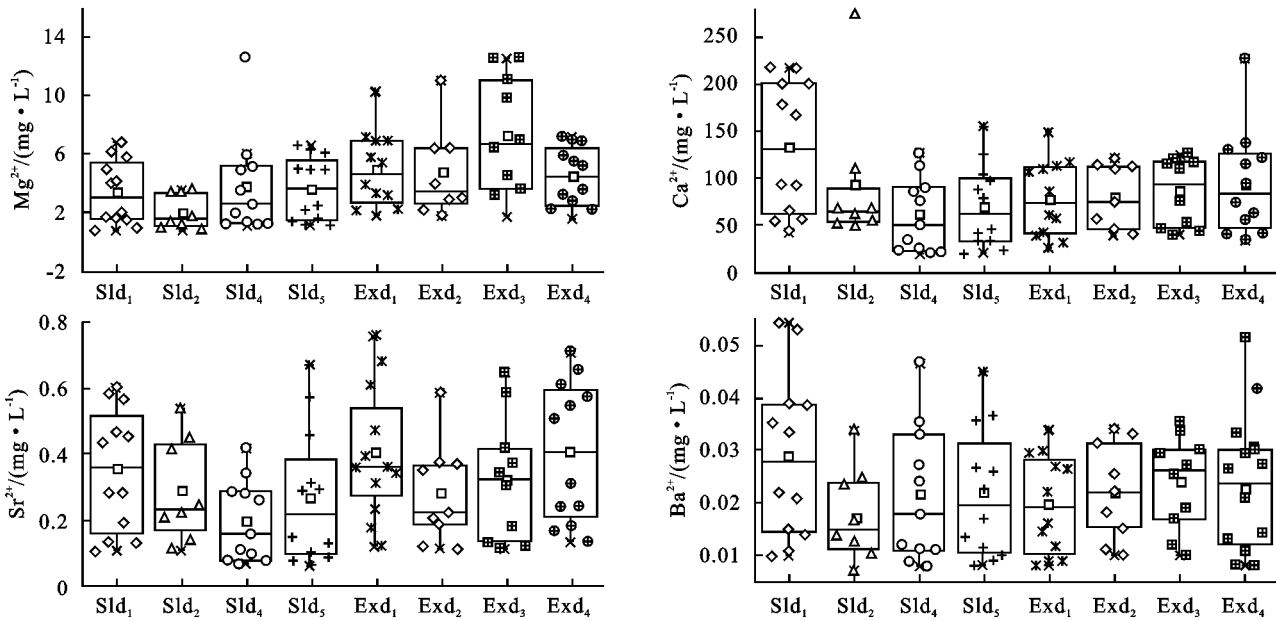


图 2 北山洞穴水  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  浓度变化范围

观测期间,各采样点  $\text{Mg}^{2+}$  浓度值的变化幅度为 1.1~12.6 mg/L,其中,季节性滴水点  $\text{Sld}_2$  变幅最小

(1.1~3.5 mg/L),而岩溶裂隙水  $\text{Sld}_4$  变幅最大(1.4~12.6 mg/L)。相比较而言,常年性滴水点  $\text{Sld}_1$  (1.6~

6.8 mg/L)、Exd<sub>1</sub> (3.3~10.3 mg/L) 和 Exd<sub>3</sub> (4.6~12.6 mg/L) 的变幅均大于季节性滴水点 Sld<sub>2</sub> (1.1~3.5 mg/L) 和瀑布水 Sld<sub>5</sub> (1.5~6.6 mg/L), 且常年性滴水点 Sld<sub>1</sub>, Exd<sub>1</sub> 和 Exd<sub>3</sub> 平均浓度要大于季节性滴水点 Sld<sub>2</sub> 以及岩溶裂隙水 Sld<sub>4</sub>。

各采样点 Sr<sup>2+</sup> 浓度的变化幅度相对 Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 都小, 但不同采样点浓度变化范围和平均值也有所差异。常年性滴水点 Sld<sub>1</sub>, Exd<sub>1</sub> 和 Exd<sub>3</sub> 平均浓度均比瀑布水、季节性滴水点要高, 而池水 Exd<sub>4</sub> 的平均浓度值相对于其上方滴水点 Exd<sub>1</sub> 平均浓度高 0.012 mg/L, 这与池水中 Sr<sup>2+</sup> 常年的累积有关。

各采样点 Ba<sup>2+</sup> 平均浓度值和分布范围变化不大, 变化差异较小, 这说明 Ba<sup>2+</sup> 有一个较为稳定来源, 受岩溶水的运移过程影响作用小。

周福莉等<sup>[13]</sup>对芙蓉洞的观测发现, 洞穴内不同分布位置的滴水, 其地球化学指标空间差异主要受到各点的渗流通道、流经途径以及上覆基岩及土壤成分等差异的影响。周长春等<sup>[14]</sup>对山东九天洞研究也发现受洞顶岩石及裂隙性质的影响, 不同滴水点对降雨的响应速度不同, 会对滴水的地球化学性质产生影响。金华北山洞穴水 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 和 Sr<sup>2+</sup> 浓度有明显的空间差异, 总体上表现为, 常年性滴水点的平均浓度值较季节性滴水点、池水、瀑布水和岩溶裂隙水高, 这可能是受运移路径和洞穴顶板的影响所致。

### 3.2 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ba<sup>2+</sup>, Sr<sup>2+</sup> 浓度季节变化特征及与气温、降水的关系

洞穴滴水中各种微量元素主要来源于洞穴上方土壤和洞顶基岩。滴水中 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Sr<sup>2+</sup>, Ba<sup>2+</sup> 等微量元素离子浓度与各元素离子性质、水—土—岩相互作用时间以及岩溶水对土壤和基岩的溶蚀能力等因素有关<sup>[12,15]</sup>。为探究北山洞穴水地球化学性质对外界气候的响应, 本文将北山洞穴水阳离子浓度变化与气温、降雨量变化进行对照分析(图 3)。

金华北山洞穴水中各点 Ca<sup>2+</sup> 浓度有明显的季节变化, 总体趋势是在 5—8 月份和次年 1—4 月份随着降雨量的增加而增大, 而在降雨较少的 9—12 月份 Ca<sup>2+</sup> 浓度较降雨较多 5—8 月份和次年 1—4 月份高。在 5—8 月份和次年 1—4 月份金华地区的气温升高, 降水量增加, 湿热的地表使岩溶水中 CO<sub>2</sub> 浓度升高, 溶蚀能力增强, 使洞穴滴水中 Ca<sup>2+</sup> 浓度增大, Ca<sup>2+</sup> 浓度在 8 月份达到了一个峰值<sup>[16-17]</sup>。地下水在基岩溶蚀过程中的滞留时间是岩溶水化学组成变化的重要影响因素。金华北山洞穴水中 Ca<sup>2+</sup> 浓度降雨较少的 9—12

月份较降雨较多 5—8 月份和次年 1—4 月份高, 在降雨较少的 9—12 月份, 降水较少岩溶水与基岩相互作用时间相对较长, 使得 Ca<sup>2+</sup> 的浓度较高<sup>[18]</sup>。

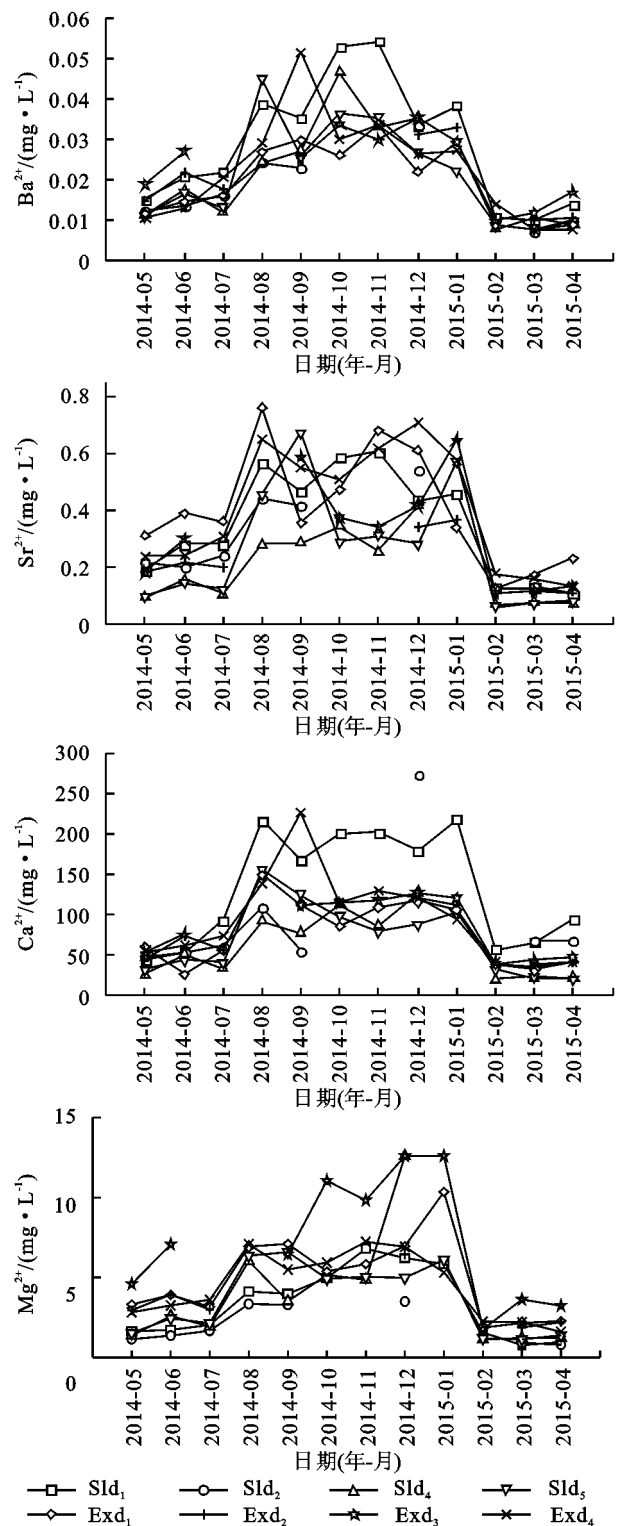


图 3 北山洞穴水 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ba<sup>2+</sup>, Sr<sup>2+</sup> 浓度季节变化

洞穴滴水中 Mg<sup>2+</sup> 含量主要受土壤和基岩的组成与性质、水—土—岩相互作用时间、岩溶的溶解能力和运移路径等因素的影响<sup>[19]</sup>。Mg<sup>2+</sup> 浓度大小与岩溶水在含水层中的停留时间呈正相关<sup>[20]</sup>, 金华北山洞穴

Mg<sup>2+</sup> 浓度呈现出 5—8 月份和次年 1—4 月份比 9—12 月份高的特点,这主要因为 9—12 月份降雨少岩溶水与基岩作用时间变长,而降雨多的月份雨水的稀释作用明显,因此在 9—12 月份 Mg<sup>2+</sup> 浓度较高。谭明等<sup>[21]</sup>研究发现,降雨初期滴水 Mg<sup>2+</sup> 浓度的升高很可能是由于发生“活塞效应”,使得滴水中 Mg<sup>2+</sup> 浓度的增大。Mg<sup>2+</sup> 浓度在降雨量较多 5—8 月份和次年 1—4 月份总体上呈增高趋势,这主要因为这些月份降雨量增多,对上覆土壤和基岩的淋溶作用增强。

洞穴滴水中 Sr<sup>2+</sup>, Ba<sup>2+</sup> 含量主要来自于洞穴上方地表覆盖的土壤及碎屑物, Ba 元素很容易被土壤中高价阳离子选择性地吸附,被认为是土壤中不活动的元素之一<sup>[22]</sup>。植被发育越好土壤中微生物的活动及风化作用就会越强烈,溶解在下渗水中的 Sr<sup>2+</sup>, Ba<sup>2+</sup> 含量就越高<sup>[23]</sup>。5—8 月份 Sr<sup>2+</sup>, Ba<sup>2+</sup> 有明显的升高,这主要是因为 5—8 月份地表湿热,生物活动作用强,分解土壤中的 Sr<sup>2+</sup>, Ba<sup>2+</sup> 增加。周运超等<sup>[24]</sup>在七星洞研究发现各种离子含量的变化主要受岩溶水溶蚀能力的大小与运移路径的长短、运移时间等因素的影响。北山洞穴水 Sr<sup>2+</sup>, Ba<sup>2+</sup> 浓度在降雨较少的 9—12 月份较降雨多的 5—8 月份和次年 1—4 月份均高,这主要由于降雨少的月份水的重力作用较小,运移速度减慢,与顶板作用时间长,而降雨多的月份雨水的稀释作用也会对 Sr<sup>2+</sup>, Ba<sup>2+</sup> 浓度产生影响,使 Sr<sup>2+</sup>, Ba<sup>2+</sup> 呈现出雨季低、旱季高。

3.3 洞穴水元素比变化特征及环境指示意义

Mg/Ca 比值的变化取决于岩溶系统干湿条件的变化,干旱季节岩溶水在岩层中滞留时间较长, Ca<sup>2+</sup> 在岩溶水还未到达洞顶之前就已经在运移通道中发生了前期沉淀作用,导致滴水中 Mg/Ca 比值增大<sup>[25]</sup>。同时,根据白云石与方解石的不相容溶解性及溶解速率的不同<sup>[26-27]</sup>,在足够长的水岩作用时间内,方解石先达到饱和,而白云石还继续溶解,使洞穴水中 Mg<sup>2+</sup> 浓度升高,从而也使 Mg/Ca 比值增大<sup>[28]</sup>。金华北山洞穴水 Mg/Ca 变化特征可以支持以上观点(图 4)。8—11 月份随降雨量逐渐减少各点 Mg/Ca 比值呈现不断升高趋势。当由旱季进入雨季时大气降雨增多会对阳离子浓度产生稀释效应,同时气温也会对阳离子浓度产生影响,当气温升高时,岩溶水对 Ca<sup>2+</sup> 溶解速率高于 Mg<sup>2+</sup>,使 Ca<sup>2+</sup> 的比重有所升高,5—7 月份除 Sld<sub>2</sub> 点和 Sld<sub>4</sub> 点外其他各点 Mg/Ca 比值均随着降雨量的增加和气温的升高呈减小趋势。11 月一次年 1 月份 Mg/Ca 比值有所下降,主要是因

为 11 月一次年 1 月份降雨量增加对阳离子浓度产生了稀释效应。由此可以看出,金华北山溶洞群洞穴水 Mg/Ca 比值对降雨有指示性,但也受气温的影响。

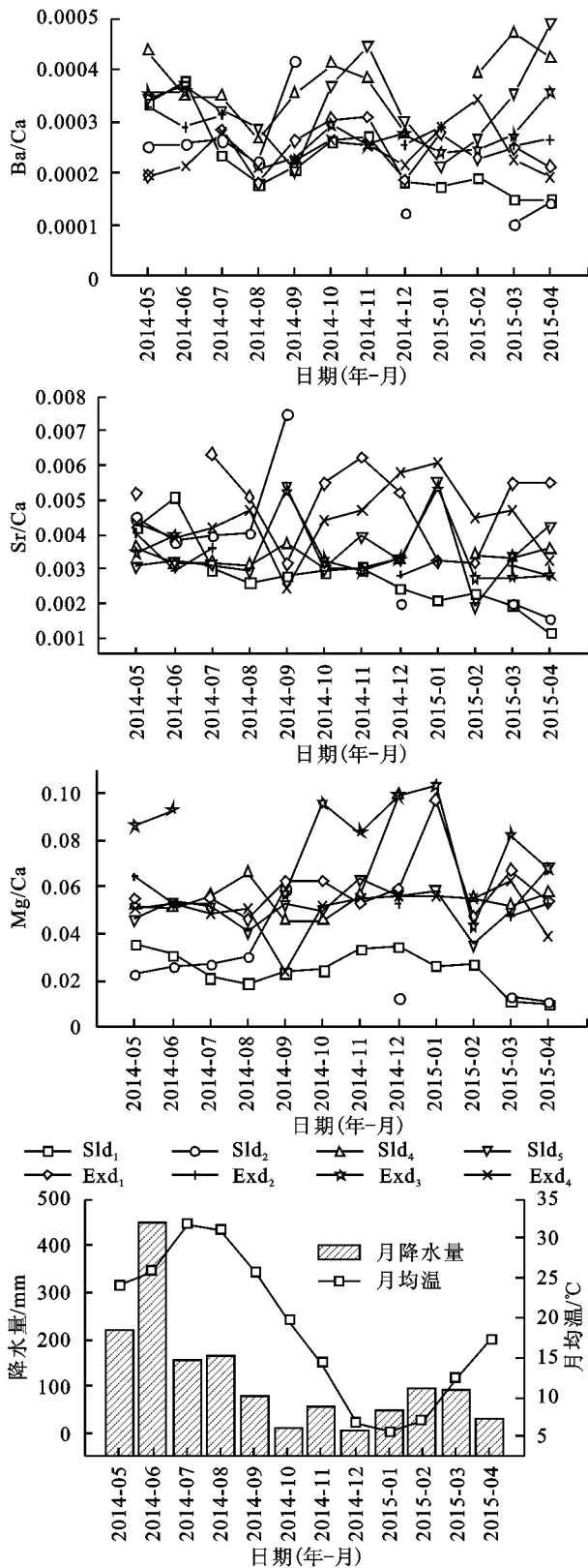


图 4 元素比季节变化和降雨量、气温的关系

洞穴水中 Sr/Ca 比值主要受到洞穴上覆土壤、植被以及土壤中微生物活动的影响,但外界气温和降雨

的变化也会对其产生一定的干扰<sup>[29]</sup>。当滴水中 Sr/Ca 比值变化趋势与 Mg/Ca 一致时,滴水中 Sr/Ca 比值可能主要受大气降雨的影响;当 Sr/Ca 比值与 Mg/Ca 比值的变化趋势不一致时,说明滴水中 Sr/Ca 比值除了受大气降雨的影响外,还受到其他影响因素的干扰<sup>[23]</sup>。由图 4 可以看出,各点 Sr/Ca 比值与 Mg/Ca 比值的变化趋势不一致:如 Sld<sub>1</sub> 点从 2014 年 6—10 月 Sr/Ca 比值呈降低趋势,而 Mg/Ca 比值呈上升趋势;2014 年 9—12 月 Sld<sub>5</sub> 点 Sr/Ca 比值呈降低趋势,而 Mg/Ca 比值呈上升趋势,这说明 Sr/Ca 比值变化在一定程度上还受其他因素的影响。

研究发现<sup>[23]</sup>,当洞穴水中 Ba/Ca 比值与 Mg/Ca 比值的变化趋势相一致时,说明 Ba/Ca 比值主要受大气降雨的影响;反之,则表明 Ba/Ca 比值主要指示土壤生物活动的强烈程度。从图 4 可知,双龙洞和二仙洞各采样点水中 Ba/Ca 比值呈现明显的季节变化特征;5—8 月 Ba/Ca 比值不断降低,由于 5—8 月份降雨量大,雨水对阳离子浓度有稀释作用;8—10 月 Ba/Ca 比值又升高,8—10 月份降雨量减小,生物活动作用还较强,而此时降雨已减少,降雨的稀释作用较弱,Ba/Ca 比值升高主要是生物活动作用导致的;10—12 月份又呈降低趋势,这可能与 10—12 月份气温低生物活动作用弱有关。Ba/Ca 比值与 Mg/Ca 比值的变化趋势并不完全一致,这说明 Ba/Ca 比值受降雨和土壤生物活动两个因素的影响。比较各点的变化趋势不尽相同,常年性滴水点 Exd<sub>1</sub>, Sld<sub>2</sub> 变化幅度较大,而 Sld<sub>4</sub>, Sld<sub>5</sub> 和池水 Exd<sub>4</sub> 池水变化幅度较小,而其他季节性滴水点变化幅度介于常年性滴水点和池水之间。常年性滴水点 Ba/Ca 比值对外界环境响应更明显,这说明运移路径对 Ba/Ca 比值也有影响。

## 4 结论与讨论

(1) 常年性滴水点的阳离子平均浓度均大于季节性滴水点、岩溶裂隙水和瀑布水;北山洞穴水阳离子浓度有明显的季节变化,雨季较低,旱季较高。

(2) 外界气温和降雨量对洞穴水中的阳离子浓度变化都有影响,但降雨对阳离子浓度影响作用更明显。降雨较多季节“稀释作用”是影响影响阳离子浓度的重要因素,降水较少季节滞留时间是影响阳离子浓度的重要因素。

(3) 洞穴水中 Mg/Ca, Sr/Ca, Ba/Ca 比值对外界降雨有很好的指示性,但也受气温的影响, Mg/Ca 比值变化主要是由外界降雨引起的,但也受气温的影响;而 Sr/Ca 比值变化除了受降雨作用影响也受其他因素的

影响, Ba/Ca 比值受降雨和动物活动都有影响。

本文对金华北山洞穴中阳离子浓度的研究, Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 浓度变化与前人的研究有所不同,王学焯等<sup>[10]</sup>研究中发现, Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 浓度雨季高旱季低,而本文研究中却是雨季低旱季高的特点,有明显的不同,可能与两个水文年的气候特征不一样。这说明影响地球化学性质的因素具有复杂性,需要长期的观测。本文也存在一些不足之处,监测时间较短,由于缺乏必要的条件洞穴顶板的厚度了解甚少,不能从深层次上揭示洞穴水地球化学性质的变化及影响因素,需要继续更深入地对金华北山洞穴水的地球化学性质及环境指示意义进行长期的研究。

## 参考文献:

- [1] 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): 213-222.
- [2] Fairchild I J, Treble P C. Trace elements in speleothems as recorders of environmental change[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(5): 449-468.
- [3] 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): 237-246.
- [4] 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.
- [5] 周运超, 王世杰. 贵州凉风洞洞穴滴水水文水化学过程分析[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 208-215.
- [6] 周运超, 王世杰. 洞穴滴水的水文地球化学过程: 贵州犀牛洞的研究[J]. *地球与环境*, 2005, 33(2): 23-30.
- [7] 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[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 258-264.
- [8] 李珊英. 洞穴石笋 ICP-MS 微量元素分析技术与豫西 MIS8/9 时段古气候变化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [9] 李彬, 李红春. 洞穴次生化沉积物中 Mg, Sr, Ca 及其比值的环境指代意义[J]. *中国岩溶*, 2000, 19(2): 115-122.
- [10] 王学焯, 王天阳, 叶玮, 等. 金华北山洞穴滴水氢氧稳定同位素的特征及气候意义[J]. *水资源与水工程学报*, 2014(4): 180-185.
- [11] 何开锋. 浅议金华双龙洞地质遗迹的合理开发与利用[J]. *浙江国土资源*, 2008(8): 50-53.
- [12] 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.
- [13] 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.

0.14) MPa。4种植物种内径级间平均最大折断变形量差异性不大,1~6 mm 平均最大折断变形量排序均为柠条(16.77 mm) > 沙柳(14.7 mm) > 沙棘(11.22 mm) > 白沙蒿(8.68 mm)。

#### 参考文献:

- [1] 张俊云,周德培.红层泥岩边坡生态防护机制研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(2):250-256.
- [2] 高德彬,倪万魁,杨泓全.黄土地区公路路堑高边坡植物防护探讨[J].路基工程,2007(5):125-127.
- [3] 江锋,张俊云.植物根系与边坡土体间的力学特性研究[J].地质灾害与环境保护,2008,19(1):57-61.
- [4] 晏益力,宋云.植物根系—土体的相互作用力学模型[J].湖南城市学院学报:自然科学版,2006,15(2):10-11.
- [5] 王库.植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J].土壤与环境,2001,10(3):250-252.
- [6] 李红丽,董智,王林和,等.浑善达克沙地榆树根系分布特征及生物量研究[J].干旱区资源与环境,2002,16(4):99-105.
- [7] 李为萍,史海滨,胡敏.沙地柏根系径级对根土复合体抗剪强度的影响[J].土壤通报,2012,43(4):934-937.
- [8] 封金财,王建华.植物根的存在对边坡稳定性的作用[J].华东交通大学学报,2003,20(5):42-45.
- [9] Stokes A, Atger C, Bengough A G, et al. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides[J]. Plant and Soil, 2009,324(1/2):1-30.
- [10] 陈丽华.林木根系固土力学机制[M].北京:科学出版社,2008.
- [11] 王韵秋,郝绍卿,于得荣,等.老参地土壤理化性状的变化[J].特产研究,1979(3),1-9.
- [12] Waldron L J, Dakessian S. Effect of grass, legume, and tree roots on soil shearing resistance[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982,46(5):894-899.
- [13] 乔娜,余芹芹,卢海静,等.寒旱环境植物护坡力学效应与根系化学成分响应[J].水土保持研究,2012,19(3):108-113.
- [14] 罗春燕,吴楚,芦光新,等.三江源区植物根—土复合体的抗拉拔力特征及影响因素分析[J].水土保持研究,2014,21(5):260-266.
- [15] 苑淑娟.4种植物单根抗拉力学特性的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- [16] 周长春,王晓青,武传震,等.洞穴滴水水化学特征及影响因素研究:以山东沂源九天洞为例[C]//中国地质学会,全国第十三届洞穴学术会议论文集.湖南郴州,2008.
- [17] 周文亮,姜光辉,陈国富,等.桂林硝盐洞滴水水文和水化学动态变化特征[J].中国岩溶,2013,32(1):51-56.
- [18] Liu Z, Li Q, Sun H, et al. Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China: soil CO<sub>2</sub> and dilution effects[J]. Journal of Hydrology, 2007,337(1):207-223.
- [19] 叶明阳,李廷勇,王建力,等.芙蓉洞次生碳酸盐沉积特征及与降水的关系研究[J].沉积学报,2009,27(4):684-690.
- [20] 衣成城,李廷勇,李俊云,等.芙蓉洞洞穴水离子浓度和元素比值变化特征及其环境意义[J].中国岩溶,2011,30(2):200-207.
- [21] 王新中.洞穴滴水化学过程及其动力学与上覆土壤驱动问题[D].南京:南京农业大学,2005.
- [22] 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[J].第四纪研究,2005,25(2):258-264.
- [23] 谭明,潘根兴.石笋与环境:石笋纹层形成的环境机理初探[J].中国岩溶,1999,18(3):197-205.
- [24] McBride M B. Environmental Chemistry of Soils[M]. Oxford University Press, 1994.
- [25] 马倩倩.山东半岛九天洞洞穴滴水微量元素季节变化及其气候环境意义研究[D].山东烟台:鲁东大学,2014.
- [26] 周运超,王世杰.贵州七星洞滴水的水文水化学特征及其意义[J].水文地质工程地质,2006,33(1):52-57.
- [27] 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):213-222.
- [28] 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):429-448.
- [29] 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):255-269.
- [30] Atkinson T C. Growth Mechanisms of Speleothems in Castleguard Cave, Columbia Icefields, Alberta, Canada [J]. Arctic & Alpine Research, 1983,15(4):523-536.
- [31] Chou L E I, Garrels R M, Wollast R. Comparative study of the kinetics and mechanisms of dissolution of carbonate minerals[J]. Chemical Geology, 1989, 78(3):269-282.

(上接第337页)