曹明达，周忠发，张 强，等.岩溶洞穴水理化性质特征及其环境意义[J].中国岩溶，2016，35(3)：314－321.
DOI：10.11932/karst20160310

岩溶洞穴水理化性质特征及其环境意义
——以贵州织金洞为例

曹明达，周忠发，张 强，谢雅婷，张绍云
(1.贵州师范大学中国南方喀斯特研究院，贵州 贵阳 550001；
2.贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地，贵州 贵阳 550001)

摘 要：为揭示洞穴水地球化学特征的动态变化特征、控制因素及其环境意义，从2015年1月至2015年6月对贵州织金洞洞穴水的水化学指标进行了为期6个月的动态监测，结果表明：①织金洞洞穴水的水化学类型主要为 HCO_3^-－Ca^{2+}－Mg^{2+} 型水，阴离子中 HCO_3^- 占84.5%以上，阳离子中 Ca^{2+}、Mg^{2+} 为优势离子；②洞穴滴水 EC、Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^-、SO_4^{2-} 浓度均大于石灰岩石裂隙水、池水相应的浓度；③洞穴水滴率、滴量、Ca^{2+}、HCO_3^- 以及 Ca^{2+}/HCO_3^- 比值对气候有一定的响应，其地球化学指标具有显著的季节效应；④洞穴滴水中的EC与 Ca^{2+} 离子浓度呈显著线性关系。

关键词：岩溶洞穴水；理化特征；影响因素；织金洞；贵州
中图分类号：P641.3 **文献标识码**：A **文章编号**：1001－4810(2016)03－0314－08

0 引 言

洞穴相对与大气环境而言是一个封闭系统，洞穴环境包括洞穴沉积环境和洞穴微气候环境。国内外学者对于洞穴微气候环境研究较早，研究方法也较成熟，而对于洞穴沉积环境的深入研究起步较晚。由于洞穴水是碳酸钙沉积物景观形成的主要源泉，其水化学性质决定了碳酸钙沉积物景观的沉积与溶蚀，自20世纪末以来引起了研究者的广泛重视。最初，GONZALES等通过滴水的化学组成来研究碳酸盐岩的溶解和钟乳石的沉积[1]。LAIZ等对滴水的滴速、化学组成以及时空变化进行了研究。Derek Ford和Paul Williams系统地研究了白云岩岩溶和石灰岩岩溶的水文地质特征[2-3]。Alfred Bogli则对岩溶作用中的混合溶蚀进行研究，提出不同饱和的岩溶水混合后会提高其溶蚀能力[4]。20世纪末，国内学者通过开展岩溶动力系统及其运行规律的研究，逐渐形成了岩溶动力学基本理论[5]。2006年以来，运用高分辨率的自动化监测仪器，对岩溶水文、水的理化性质(水温、pH值、电导率、HCO_3^- 等)和土壤空气中 CO_2 进行连续监测，证明了岩溶作用的迅速变化过程，也揭示了水－岩－气耦合作用规律[6]。近年来，对于洞穴水的研究主要侧重于洞穴水的流速、雨水在碳酸盐岩层中的停留时间以及雨水和碳酸盐岩层物质交换等方面。大量研究表明，洞穴水的化学特性、运动方式及存在方式直接影响着沉积物的类型及形态特征。张美良等在研究洞穴滴水与洞穴碳酸钙沉积物以及沉积物特征与沉积环境之间的关系方面做出了很大的贡献，根据洞穴内石笋的沉积结构、颜色、沉积速率等特征以及近几年来的洞穴滴水理化性质指标，反演出石笋形成的相应地质历史时期的外界气候变化特征，为洞穴的形成、发展过程等阶段性划分提供了科

基金项目：国家自然科学基金地区项目“岩溶洞穴 CO_2 迁移变化机制及对洞穴岩溶环境的影响研究”(41361081)；贵州省科技计划“贵州省洞穴调查数据技术服务”(黔科合G字[2014]4004－2号)；贵州省重大应用基础研究项目“喀斯特石漠化生态修复及生态经济系统优化调控研究－岩土类型格局”(黔科合JZ字[2014]200201)
第一作者简介：曹明达(1991－)，男，硕士，研究方向：岩溶地貌与洞穴。E-mail：cmd965621@sina.com。
通讯作者：周忠发(1969－)，男，硕士，教授，博士生导师，研究方向：岩溶资源环境，GIS与遥感。E-mail：fa6897@163.com。
收稿日期：2015－08－11

万方数据

学的依据[7-8]。此外，洞穴上覆土壤中的 CO_2 对洞穴内滴水和洞穴微气候环境也有重要影响，土壤 CO_2 浓度具有明显的季节变化特征，并且洼地处的土壤 CO_2 浓度比坡地处 CO_2 浓度要高，显示出与气温、降水、土壤深度和生物活动密切关系[9]。在旅游洞穴，洞穴环境的变化通过影响洞穴水的水化学平衡来作用于洞穴景观[10]。因此，通过研究洞穴水理化特性来研究洞穴景观的稳定性，对于保护洞穴资源和促进旅游业的可持续发展具有重要科学意义。国内外许多学者对洞穴水开展了多方面的监测研究，主要集中在洞穴水的水文特征、化学组分、来源和运移过程以及 $\delta^{18}O$、$\delta^{13}C$ 同位素变化、岩溶碳汇等方面[11]。织金洞是一个高位旱洞，已经处于洞穴发展的消亡期，开发成为旅游洞穴的时间较长，但对于其洞穴水化学特征的研究较少，本文试图通过分析织金洞不同时段洞穴水的理化特征，探讨洞内外地理环境对其的影响，为织金洞的合理开发和保护提供科学依据。

1　研究区概况

研究区位于贵州省西部毕节地区的织金县境内，距织金县城 23 km，属于亚热带季风性湿润气候区，雨热同期，无霜期长；多年平均气温 18.1 ℃，1 月份气温最低，月均温 6.5 ℃；7－8 月气温最高，多在 25～31 ℃。降水受南亚季风和东亚季风共同影响，季节差异明显，夏季多暴雨，多年平均降水量 1 105 mm，其中冬春季节还受到昆明准静止锋的影响。

织金洞区域地表水系主要有三条，第一条为乌江的北支六冲河，为本区的岩溶排泄基准面，分布在本区的 NE 面，距织金洞 2～3 km，由 NW 流向 SE，呈深切河谷，区段内河水面高程 950～960 m，在河谷岸边海拔为 1 000、1 100 及 1 290 m，可见零星的高阶地砾石层，以及当时河流宽谷形态。第二条是位于织金洞 NW 约 1.5 km 处的绮结河，发源于织金县城 SW，为六冲河较大支流，在本区河谷深切，形成 150～200 m 深的峡谷、塌陷天窗及暗河，河水面高程999.8～1 040 m。第三条为新寨河，发源于高寨及马口两地，在新寨汇合，向北至箐脚，又转向西流，在打铁洞附近潜入地下，流向绮结河。绮结河主流全长 8.2 km，汇水面积约 20 km^2，夏季暴雨后，落水洞消水不及，打铁洞一带岩溶谷地被淹没[12-14]。

织金洞原名“打鸡洞”，发育于三叠系下统夜郎组（T_1y）黄椿坝段（T_1y^2）地层中，厚 210 m，T_1y^2 下部为灰色薄－中厚层含泥质亮晶砂屑灰岩，中、上部为灰色厚层－块状鲕粒亮晶灰岩，而织金洞发育在上部。洞口有三条断层经过，洞穴发育在单斜岩层中，明显受 NE68∠80°和 SE∠79°两组优选节理裂隙的控制。现已开发长度 12.1 km，其中，主洞全长超过 3 300 m，相对高差 150 m，洞内最宽处 175 m，一般宽和高在 60～100 m，堆积物平均高度 40 m 左右，最高 70 m，全洞容积 500 万 m^3，织金洞洞口且唯一的天窗出露于山坡上，因此洞穴的发育与现代地形、地貌无关[15-16]。

2　数据来源与研究方法

2.1　数据来源

在织金洞区域内，选取降水采样点、洞内池水点、滴水点，其中滴水点又分为灰岩裂隙水、鹅管水和钟乳石滴水共 6 处水样点（图 1，表 1）。

2.2　实验研究方法

本次实验数据共采集 6 次，历时 6 个月，所有监测设备均在 2014 年 12 月 31 日前安装完毕，从 1 月 1 日起开始收集数据，采样时间见表 2。对于不同的采样点，采用不同的采集方式。在滴水现场，把两个 60 mL 聚乙烯瓶放置于滴水点下方收集滴水，收集到足够水量进行现场滴定并记录采样时间即可。一般情况下，快速常年性滴水和雨季时的季节性滴水的滴速比较快，当日可以完成取样。而常年慢速滴水和旱季时的季节性滴水，滴速较慢，一般是放置聚乙烯瓶后次日取得。对于池水和泉水，则直接用干净的聚乙烯瓶取装。采样时现场用秒表滴率 ，用水温计测量水温，用温度计测量洞温，用酸碱测试盒测量水样中的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的浓度；用德国 WTW Multi 3430 便携式多参数水质分析仪（2FD470）现场测水样的电导率，水温和 pH 值。将采集的水样带回实验室送到中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室测定其他水化学数据。其中阴离子采用美国 Dionex 公司生产的 IS90 型离子色谱仪测定，K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Sr^{2+} 采用美国 Varian 公司生产的 VBTA MPX 型电感耦合等离子体－光发射光谱仪测定，SIc 通过 USGS 开发的 PHREEQC3.7 软件计算得出[17]，硬度通过对 Ca^{2+}、Mg^{2+} 浓度统一换算成 CaO 质量浓度而得出。

万方数据

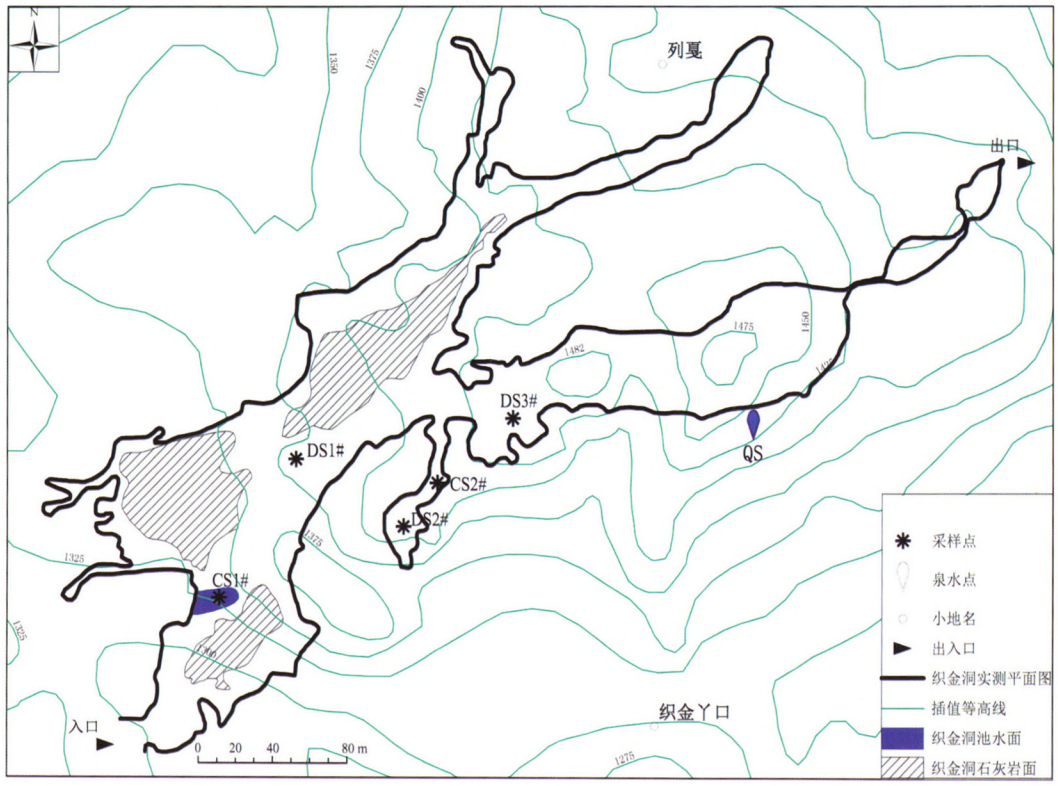

图 1 织金洞洞穴水采样点分布图

Fig. 1 Map showing distribution of water sampling sites

表 1 织金洞洞穴水样采集点特征

Table 1 Characteristics of water sampling sites in Zhijin Cave

序号	样品编号	采样点	水样类型	样品类型	滴水池水类型	滴水高度	景点－沉积物类型
1	DS1＃	雪压青松	灰岩裂隙水	滴水点	季节性滴水	19 m	石笋、石钟乳
2	DS2＃	卷曲石洞	钟乳石滴水	滴水点	慢速常年性滴水	46 cm	卷曲石、石盾
3	DS3＃	玉兔宫	鹅管滴水	滴水点	快速常年性滴水	78 cm	卷曲石、石钟乳
4	CS1＃	讲经堂	池水	池水点	长期池水点	—	石笋、石钟乳
5	CS2＃	卷曲石洞	池水	池水点	季节性池水点	—	卷曲石、石盾
6	JS	织金洞管理局	大气降水	大气降水	——	—	——

3 数据分析与讨论

3.1 洞穴水的物理性质

水的主要物理性质包括温度、颜色、硬度、透明度、味和气味等。首先，按水的温度，通常把地下水分为过冷水（＜0 ℃）、冷水（0～20 ℃）、热水（20～40 ℃）为低温热水，40～60 ℃为中温热水，60～100 ℃为高温热水）。由表 2 可以看出，除了降水温度与外界气温关系密切之外，洞穴内的水温对外界气温变化的响应比较弱，全年基本保持在稳定的状态。通过六个月的监测数据可以看出，织金洞的滴水、灰岩裂隙水、池水具有无色透明、无味的性质。洞内水温均在 20 ℃以下，0 ℃以上，因此属于冷水（表 2）[18]。

表 2 织金洞洞穴水的温度变化

Table 2 Changes of water temperature in Zhijin Cave

时间	采样点/℃					
	DS1＃	DS2＃	DS3＃	CS1＃	CS2＃	JS
2015.1.26	11.4	15.7	15.9	6.5	15.4	7.5
2015.2.26	11.2	15.6	15.3	6.3	15.7	7.6
2015.3.26	11.3	15.9	16.5	7.8	15.4	19.0
2015.4.26	12.8	15.3	16.1	8.6	15.5	18.0
2015.5.26	12.9	15.5	15.9	8.7	15.5	17.9
2015.6.26	13.1	15.6	15.8	8.8	15.6	18.1

万方数据

其次是水的硬度。水的总硬度指水中钙、镁离子的总浓度,包括碳酸盐硬度(即通过加热能以碳酸盐形式沉淀下来的钙、镁离子,故又叫暂时硬度)和非碳酸盐硬度(即加热后不能沉淀下来的那部分钙、镁离子,又称永久硬度)。本文对水的硬度采用国际通用的德国度表示法,即把水中的 Ca^{2+}、Mg^{2+} 浓度统一转化为 CaO 的质量浓度,即可得到水样的硬度(表 3),当硬度大于 8 度时,表示该测试用水是硬水。表 3 可看出,除了 JS 降水水样的硬度较小,属于软水以外,其余的洞穴水硬度均大于 8 度,均属于硬水[18]。

表 3　织金洞洞穴水硬度变化

Table 3　Changes of water hardness in Zhijin Cave

时间	DS1#	DS2#	DS3#	CS1#	CS2#	JS
2015.1.26	15.99	14.57	12.68	9.55	14.99	3.64
2015.2.26	13.25	13.44	10.55	12.52	15.70	2.94
2015.3.26	13.57	10.96	12.62	11.46	16.05	3.94
2015.4.26	11.38	11.70	13.68	13.44	17.89	3.50
2015.5.26	14.46	15.94	15.95	13.58	18.65	3.71
2015.6.26	13.10	15.60	15.80	13.68	20.17	3.58

从图 2 可以看出,水样的硬度与 5 种主要金属阳离子浓度呈现正相关关系。而以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为优势离子的洞穴水中,其 Ca^{2+}、Mg^{2+} 浓度越高,方解石饱和指数(SI_C)和白云石饱和指数(SI_d)也越高,从图 3 可以看出,总硬度与 Ca^{2+} 浓度的拟合度达到 0.867 6,表现为显著性相关,同时,SI_C 与 SI_d 之间的拟合度也达到了 0.877 66,表现为显著性相关。K^+、Na^+ 两种离子的浓度变化幅度不大,其原因是贵州所属的西南地区为亚热带季风气候区,其降水主要是由从印度洋经过的西南季风携带而来,海水中 K^+、Na^+ 的含量比较高,所以相对应的在降水中 K^+、Na^+ 的含量也相应较高,但是雨水渗入土壤层的过程中,游离的 K^+、Na^+ 极易被生物吸收,因此在经过复杂的洞穴顶板运移到洞穴内部的时候,水样中的 K^+、Na^+ 含量就会减小。此外,其他阳离子浓度均与方解石饱和指数(SI_C)和白云石饱和指数(SI_d)存在一定的正相关关系。

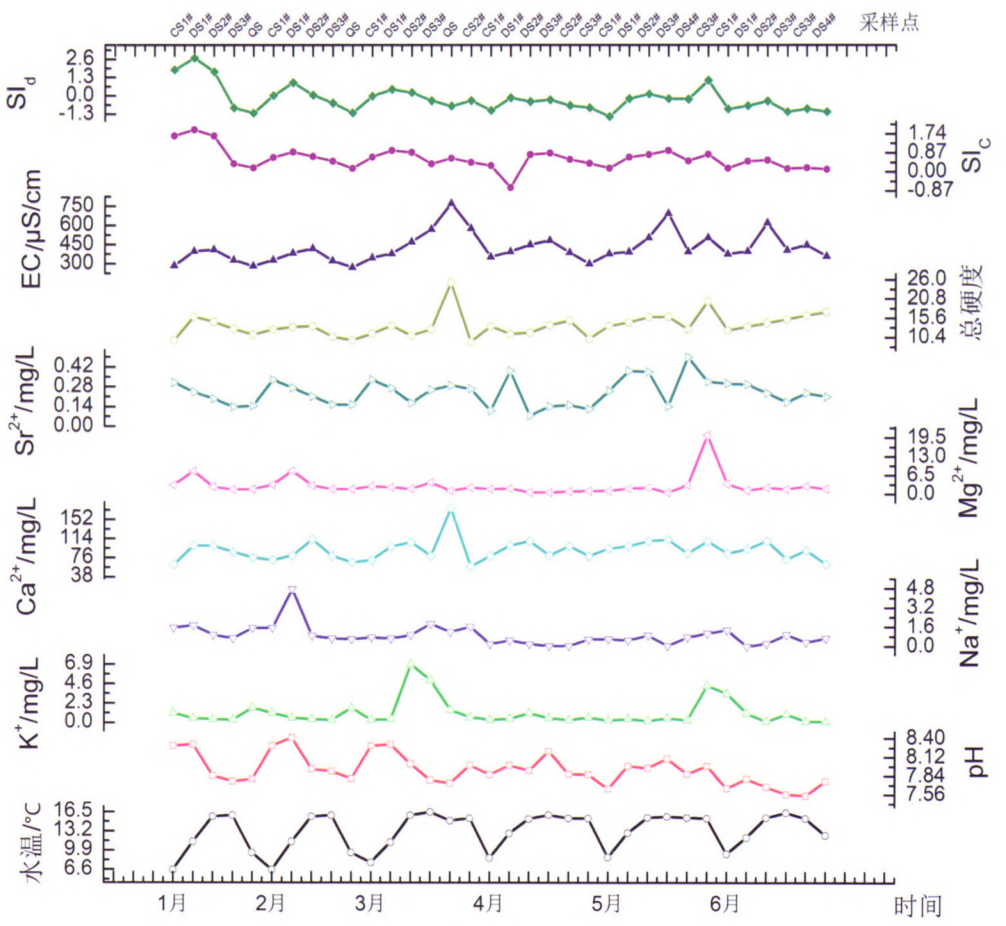

图 2　织金洞洞穴滴水、池水及洞外泉水阳离子浓度及硬度变化图

Fig. 2　Diagram showing variations of cationic concentration and water hardness in drip water and pool water in Zhijin Cave and spring water outside cave

万方数据

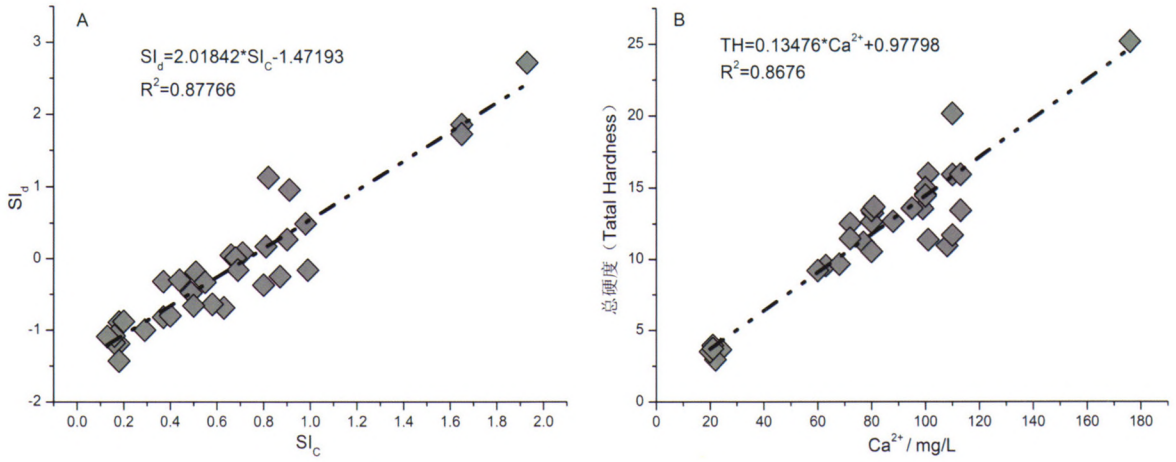

图 3 织金洞水样中 Ca^{2+} 与总硬度(A)、SI_c 与 SI_d(B)关系图

Fig. 3 Relationship between Ca^{2+} and total hardness of sample water in Zhijin Cave

从电导率来看，洞穴水的导电性主要取决于水溶液中离子的种类与含量，水中各种离子含量，尤其是金属离子的含量越高，导电性也就越强。从图 4 可以看出，各个洞段水样的电导率呈现整体涨落的现象，在时间上，6 个水样点从 1 月至 6 月，呈现增加的趋势；在空间上，同一时段，不同采样点水样电导率也有明显变化，DS1＃、DS2＃、DS3＃为三个滴水点，分别为灰岩裂隙水、钟乳石滴水和鹅管滴水，其导电率较高；而 CS1＃ 、CS2＃为池水点，其电导率相对较低。从滴水点的滴率与滴量来看，从 2015 年 1 月至 6 月，所有滴水点的滴率和滴量及其他水体量的变化与洞外实测监测的降水量呈较好的正相关关系，反映了洞穴水对气候变化的响应[18]。

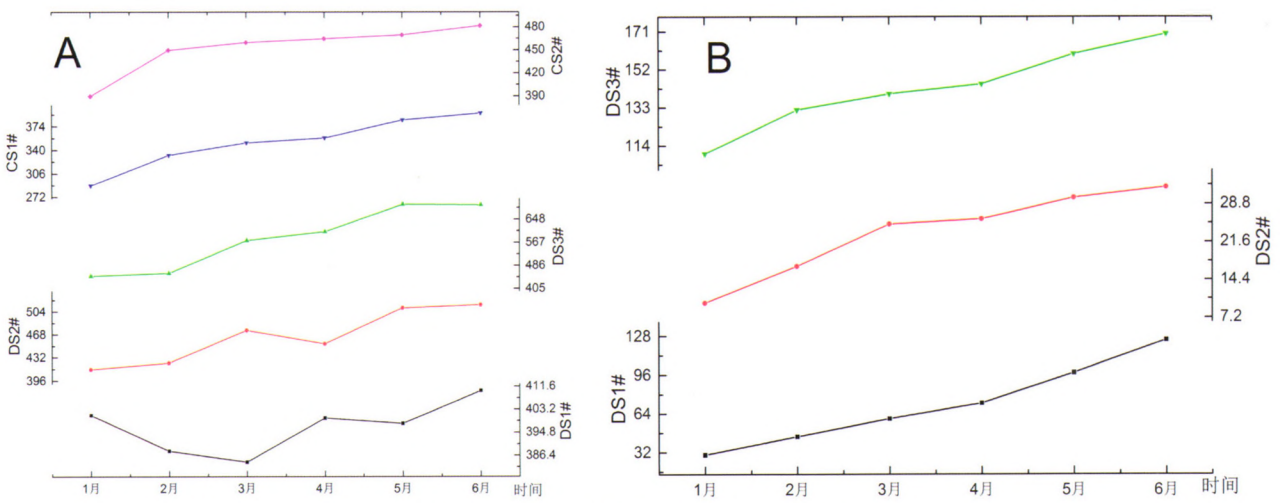

图 4 织金洞监测水样点电导率值(A)与滴率滴数(B)变化

Fig. 4 Changes of conductivity value(A) and dripping water rate and volume(B) at observation points in Zhijin Cave

3.2 洞穴水的化学性质

图 5 为各水样的酸碱度变化情况，除了大气降水呈现中性(pH 值在 5.9～6.1 之间)外，其余样品均呈现弱碱性(pH 值为 7.8～8.3)。

阳离子的总质量浓度的变化范围为 69.18～151.44 mg/L，以 Ca^{2+}、Mg^{2+} 为主，分别占总阳离子质量的 87.5％和 6.4％；阴离子的总质量浓度变化范围为 186.07～365.62 mg/L，以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主，分别占总阳离子浓度的 84.5％和 11.6％。图 6 给出了所有水样点的水化学分类特征，可以看出，所有样品均为 $HCO_3^- - Ca^{2+} - Mg^{2+}$ 型，充分反映了碳酸盐岩对洞穴水化学特征的控制作用[19]。

万方数据

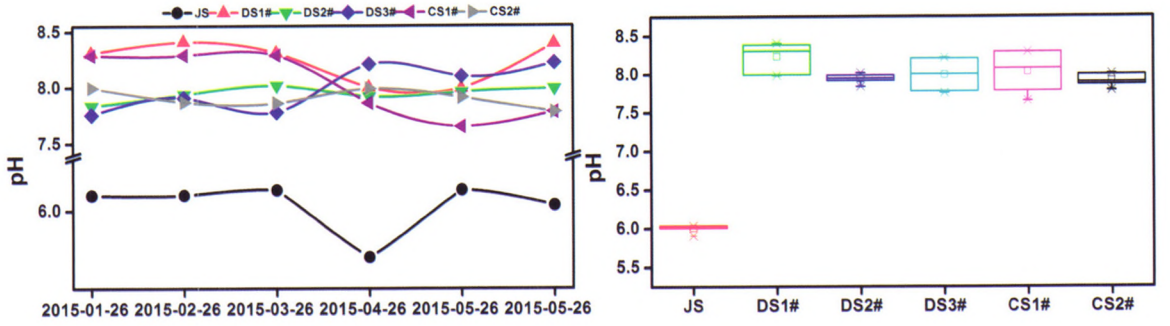

图 5　织金洞监测点水样 pH 变化

Fig. 5　Changes of pH at observation points in Zhijin Cave

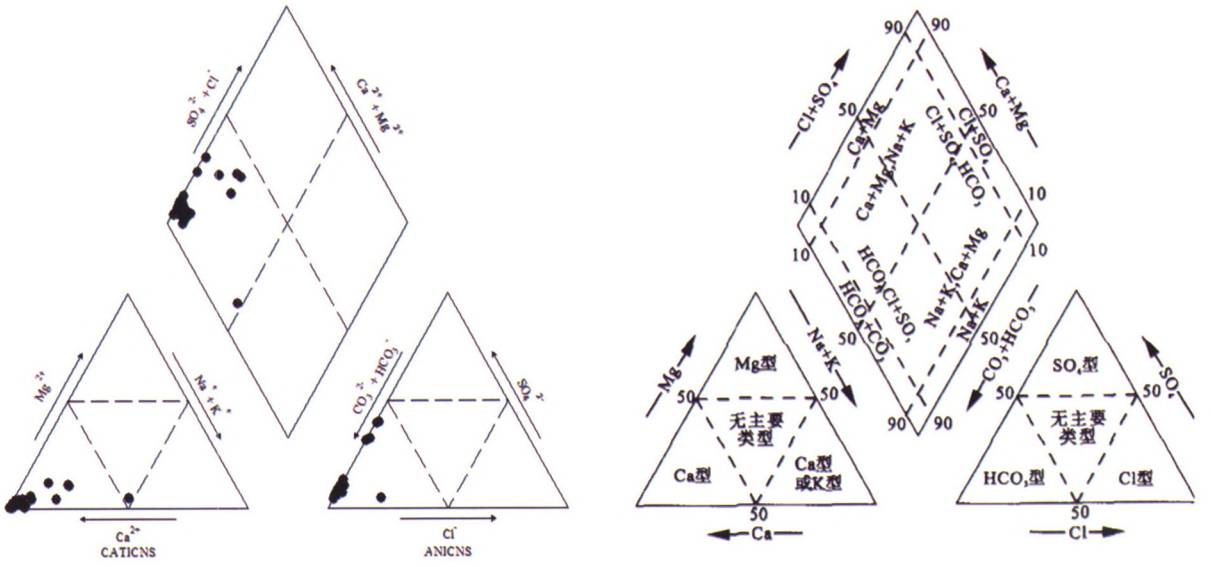

图 6　织金洞 42 个水样点 piper 图

Fig. 6　Piper diagram of 42 spring sampling sites in Zhijin Cave

选取含量最高的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 及 SO_4^{2-}，运用 SPSS19.0 软件计算 Ca^{2+}、HCO_3^- 与电导率 EC 之间的拟合度，其结果为 0.805，表明它们与电导率之间存在较好的线性关系，而 SO_4^{2-} 浓度虽然没有上述两种离子浓度变化幅度大，但是其微弱的变化趋势与 Ca^{2+}、HCO_3^- 与电导率 EC 之间的总变化趋势是一致的，表现为同增同减，如图 7 所示。

表 4 为织金洞水体的离子浓度实测值，可以看出，除降水水样点的各项离子(除 SO_4^{2-})浓度较低外，洞内其他监测点的水样的离子浓度都维持在较高水平，尤其是 DS1＃、DS2＃、DS3＃这三个滴水点水样，Ca^{2+} 浓度与 HCO_3^- 浓度呈显著正相关关系，虽然 SO_4^{2-} 与 Cl^- 呈现相应涨落，但是变化幅度较小。对于大气降水中的 SO_4^{2-} 浓度远高出正常值的现象，推断织金县区域的降水受到当地工业生产排放影响较大；从 Ca^{2+}/HCO_3^- 的比值来看，除降水监测点外，其他洞内监测点的 Ca^{2+}/HCO_3^- 计算得出的结论基的比值均在 1/2 处上下波动，这与陈生华等[19]碳酸盐岩

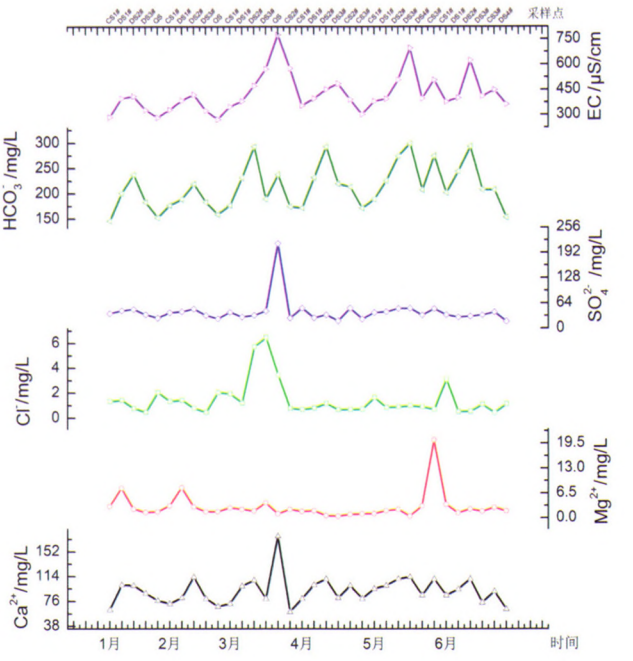

图 7　织金洞监测点水样 Ca^{2+}、Mg^{2+}、阴离子与 EC 变化关系图

Fig. 7　Change of Ca^{2+}, Mg^{2+}, negative ions and EC at different observation points in Zhijin Cave

万方数据

侵蚀方程：

$(C_{a1-x}Mg_x)CO_3 + H_2CO_3 = (1-x)Ca^{2+} + xMg^{2+} + 2HCO_3^-$

基本相符：若 Ca^{2+}/HCO_3^- 的比值等于 1/2，则代表石灰岩地区的溶蚀；若 Ca^{2+}/HCO_3^- 的比值等于 1/4，则代表白云岩地区的溶蚀。

表 4 织金洞水体的基本特性及离子浓度

Table 4 Basic characteristics and ion concentrations of water samples in Zhijin Cave

采样点	采样日期	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	Cl^-	HCO_3^-	Ca^{2+}/HCO_3^-
JS	2015.1.26	24	0.975	34.371 4	0.957 3	30.5	0.787
	2015.2.26	22	0.964	32.371 1	0.957 3	24.4	0.901
	2015.3.26	21	0.875	28.529 4	0.877 1	30.5	0.688
	2015.4.26	20	0.764	41.502 8	1.370 1	30.5	0.655
	2015.5.26	21	0.654	29.561 9	1.296 5	30.5	0.688
	2015.6.26	23	0.834	28.458 9	1.123 6	24.5	0.938
CS	2015.1.26	63	2.834	39.078 7	1.343 7	146.4	0.430
	2015.2.26	72	2.875	41.079 7	1.343 7	176.9	0.407
	2015.3.26	72	2.874	42.203 8	1.929 1	176.9	0.407
	2015.4.26	80	2.965	52.621 3	0.687 5	171.4	0.466
	2015.5.26	95	3.265	54.538 9	1.652 1	189.1	0.502
	2015.6.26	97	3.214	55.452 1	1.568 2	192.6	0.503
DS1#	2015.1.26	101	3.175	46.535	1.432 9	201.3	0.502
	2015.2.26	80.5	4.157	43.624	1.432 9	189.1	0.425
	2015.3.26	99	4.256	29.747 9	1.223 9	231.8	0.427
	2015.4.26	101	4.364	27.495	0.813 6	231.8	0.435
	2015.5.26	100	4.269	27.561 9	0.985 2	225.7	0.443
	2015.6.26	102	4.457	27.478 5	0.975 3	230.4	0.442
DS2#	2015.1.26	100	3.542 3	49.421 6	0.787 7	237.9	0.420
	2015.2.26	113	3.452 8	50.522 4	0.787 7	219.6	0.514
	2015.3.26	108	2.489 3	34.187 8	5.735 4	292.8	0.368
	2015.4.26	110	3.269 7	35.397 3	1.179 8	29208	0.375
	2015.5.26	110	2.354 1	35.425 6	1.247 5	274.5	0.400
	2015.6.26	111	3.521 2	34.254 1	1.254 8	275.6	0.402
DS3#	2015.1.26	88	2.541 2	36.085 6	0.469	183	0.481
	2015.2.26	80	2.631 4	34.083 1	0.469	183	0.437
	2015.3.26	80	2.179 8	45.326 6	6.469 7	189.1	0.423
	2015.4.26	81	2.145 2	19.957 2	0.679 1	219.6	0.368
	2015.5.26	113	3.159 6	20.548 2	0.564 1	298.9	0.378
	2015.6.26	112	3.014 9	22.214 7	0.628 7	296.4	0.377

4 结 论

通过对织金洞 2014 年 12 月至 2015 年 5 月 6 个月间的各种水体的理化特性分析研究，初步得出以下结论：

(1)织金洞三个滴水监测点 DS1#、DS2#、DS3#的滴速变化有着明显的季节性倾向，即随着旱季过渡到雨季，外界降水量的逐渐增加而增加，pH 值随着降水量的增加而降低，体现出“稀释效应”[20]，使得滴水更具有侵蚀性；但是滴水的 Ca^{2+}、HCO_3^-、EC 没有明显的季节性响应，依然保持彼此间正相关的关系。

万方数据

(2)两个常年稳定池水点 CS1＃和 CS2＃的水温相差很大，初步探讨认为 CS1＃位于织金洞洞道垂向的最底层，且为未开发洞段，拥有较大洞腔体积且没有游客经过，CO_2浓度相对较低，因池水量大，受外界因素影响较小，池水来源为岩石裂隙渗透水，故温度较低；而 CS2＃位于整个洞道的中高层洞段，洞腔狭小封闭，有大量卷曲石分布，且有游客通过，CO_2浓度较大，外界干扰因素相对较多，水温相对较高。

(3)织金洞洞穴水均属于冷水，并呈现出弱碱性，pH 值变化范围是 7.8～8.3。洞穴滴水的各种离子含量均大于池水点。从方解石饱和指数(SI_C)来看，3 个洞穴滴水的 SI_C均为正值，综合分析认为织金洞洞穴滴水均为偏弱碱性的碳酸钙过饱和溶液，具备碳酸钙沉积的条件，但是由于受到洞穴滴水采样过程以及实验过程中误差的影响，该饱和指数只能，说明洞穴水沉积或侵蚀的一种倾向，其与实际饱和指数和实际的沉积或侵蚀作用的发生仍然存在一定的差距，此问题待以后继续深入研究。

(4)洞穴水滴率、滴量、Ca^{2+}、HCO_3^- 以及 Ca^{2+}/HCO_3^- 比值对气候有一定的响应。在温度升高和降水量增加的 4 月份，水中 Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^- 都有明显增加，而在温度较低且降水较少的 1 月份，Ca^{2+}/Mg^{2+} 呈现低值[21－22]。

(5)洞顶岩石性质、植被土壤条件对洞穴水化学成分有一定的影响。由于织金洞是典型的石灰岩岩层中发育的洞穴，其岩石中方解石成分较高，所以在洞穴水中 Ca^{2+} 的含量要远远高于 Mg^{2+} 的含量。洞顶土壤的厚度、植被覆盖程度以及季节的变化都会影响土壤空气中 CO_2 的含量，也影响到洞穴滴水的水化学特性[23]，但是土壤水与洞穴水的相应关系还有待更多的示踪实验和长时间的数据观测。

参考文献

[1] Gonzales L A, Carpenter S J, Lohmann K C. Inorganic calcite morphology: roles of fluid chemistry and fluid flow[J]. Journal of Sedimentary petrology, 1983, 18(62): 382－399.

[2] Derek F , Paul W. Karst Hydrogeology and Geomorphology [M]. New Yark John Wiley &. Sons, Ltd , 2007: 36－180.

[3] Cowel D C, Ford D C. Hydrochemistry of a dolomite karst: the Bruce Peninsula of Ontario[J]. Canadian Journal of Earth, Science, 2011, 17(7): 520－526.

[4] Alfred B. Karst hydrology and physical speleology[M]. Berlin : Springer－Verlag 1980: 150－180.

[5] 袁道先，章程. 岩溶动力学的理论探索与实践[J]. 地球学报，2008，29(3)：361－371.

[6] 蒋忠诚，裴建国，夏日元，等. 我国“十一五”期间的岩溶研究进展与重要活动[J]. 中国岩溶，2010，29(4)：349－354.

[7] 张美良，朱晓燕，吴夏，等. 广西巴马县水晶宫洞穴沉积物特征及其沉积环境[J]. 中国岩溶，2013，32(3)：345－357.

[8] 张美良，朱晓燕，吴夏，等. 地下河水人工补给洞穴滴水、碳酸盐(钙)沉积特征及景观恢复探讨[J]. 中国岩溶，2015，34(1)：17－26.

[9] 李涛，曹建华，张美良，等. 桂林盘龙洞岩溶表层带土壤 CO_2 浓度的季节变化研究[J]. 中国岩溶，2011，30(3)：348－353.

[10] 袁道先. 中国岩溶动力系统[M]. 北京：地质出版社，2002：62－108.

[11] 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.

[12] 李景阳，安裕国. 暗河型溶洞的形成和演化过程：以贵州织金洞等为例 [J]. 贵州工学院学报，1991，20(3)：1－9.

[13] 安裕国，戎昆方，李景阳. 岩溶洞穴生物地质作用研究：以贵州织金洞等为例 [J]. 贵州地质，1996，3(48)：203－207.

[14] 贺卫，朱文孝. 织金洞扫尾豪猪灭迹之原因探讨[J]. 中国岩溶，1996，15(3)：239－245.

[15] 贵州省地层古生物工作队. 西南地区区域地层表(贵州省分册) [M]. 北京：地质出版社，1976：220－350.

[16] 贵州省地质矿产局. 全国地层多重划分对比研究—贵州省岩石地层 [M]. 武汉：中国地质大学出版社，1997：225－336.

[17] 孙钰霞，李林立，魏世强. 喀斯特槽谷区表层喀斯特水化学的暴雨动态特征[J]. 山地学报，2012，30(5)：513－520.

[18] 王学烨，叶玮，王天阳，等. 洞穴水理化特征及影响因素初探：以金华双龙洞为例 [J]. 广东微量元素科学，2013，20(3)：5－9.

[19] 陈生华，王世杰，肖德安，等. 典型喀斯特表层岩溶带地下水化学特征：以清镇王家寨喀斯特小流域为例 [J]. 生态环境学报，2010，19(9)：2130－2135.

[20] 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.

[21] 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)：258－262.

[22] 曹敏，沈立成，肖琼，等. 基于 SPSS 的岩溶地下水质变化及其影响因素：以重庆市金佛山表层岩溶地下水为例 [J]. 湖南师范大学自然科学学报，2012，35(2)：83－88.

[23] 刘肖，杨炎，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)：1582－1588.

(下转第 348 页)

万方数据

makes statistics to the values of ecological security at different landscape type. The results show that the ecological security of landscape types mainly concentrate at unsafe, critical, and secure levels. The urban areas mostly fall in a ill-conditioned level. With the increase of security levels, the proportion of occupying areas reduces gradually. The farmland landscape above in the safe level decreases and increases at other levels to some degree, but the overall trend is not obvious. The change trends of ecological security are roughly same in grasslands, forests and shrub landscapes. Wetland landscape type ecological security level is improved markedly. Comparing the ecological security of landscape types between 2000 and 2013, we find the ecological security indexes of all the landscape types tend to significantly decline except for wetlands. Degradation of farmland is more obvious and the wetland is the only improved landscape type. During the research period, landscape ecological security situation in Guiyang City indicates a trend of deteriorating. Therefore it suggests to optimize land use pattern in urban planning and construction in the future in order to raise the urban landscape ecological security level.

Key words Guiyang, landscape ecological security, PSR model, karst area

（编辑 黄晨晖）

（上接第 321 页）

Characteristics of physical and chemical properties and associated environmental implications of the karst water in Zhijin Cave of Guizhou Province

CAO Ming-da, ZHOU Zhong-fa, ZHANG Qiang, XIE Ya-ting, ZHANG Shao-yun

(1. *Institute of South China Karst, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou* 550001, *China*;
2. *The State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou* 550001, *China*)

Abstract The aim of this work is to reveal the characteristics of dynamic changes of geochemistry and control factors of the cave water and their environmental implications. A dynamic monitoring over a period of 6 months from January 2015 to June 2015 was conducted for the water chemistry index of the Zhijin Cave in Guizhou Province. The results show that the water chemistry of this karst cave water is dominated by HCO_3^- $-Ca^{2+}-Mg^{2+}$, where anion HCO_3^- is accounting for 84.5% and Ca^{2+} and Mg^{2+} are the dominant cations. The value of EC and concentrations of Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^- and SO_4^{2-} of cave drip water are higher than those of rock fissure water and pool water. The ratios of cave dripping water rate, drop volume, Ca^{2+}, HCO_3^- and Ca^{2+}/HCO_3^- have certain responses to climate. Their geochemical constituents have conspicuous seasonal effects. The EC value and Ca^{2+} concentration of the cave dripping water have a notable linear relationship.

Key words karst cave water, physicochemical characteristics, influencing factor, Zhijin Cave, Guizhou Province

（编辑 张 玲）

万方数据