

雷佳琪,伍坤宇,由超,等.雪玉洞母岩沉积地质特征及其对次生沉积物的影响[J].中国岩溶,2017,36(3):296-305.
DOI:10.11932/karst20170302

雪玉洞母岩沉积地质特征及其对次生沉积物的影响

雷佳琪¹,伍坤宇^{1,2},由超²,姜雪萌³,王鹏^{1,4},蒋勇军¹

- (1. 西南大学地理科学学院,重庆 400715;
2. 中国石油天然气股份有限公司青海油田分公司勘探开发研究院,甘肃 敦煌 736202;
3. 中国石油天然气股份有限公司青海油田分公司测试公司,甘肃 敦煌 736202;
4. 暨南大学地下水与地球科学学院,广州 510275)

摘要:为了研究洞穴母岩对洞穴系统及次生沉积物产生的影响,以重庆丰都雪玉洞母岩为研究对象,对其沉积地质特征进行了详细的研究,同时还探讨母岩的沉积地质特征与洞穴发育及次生沉积物特征之间的关联。结果表明,雪玉洞的母岩层位为下三叠统飞仙关组第二段,其沉积相为颗粒滩。母岩的岩性为砂屑灰岩、鲕粒灰岩、砾屑灰岩,夹少量微晶灰岩。母岩和洞穴次生沉积物的主要矿物成分是低镁方解石(LMC, low magnesium calcite)。母岩较低的Mg/Ca导致洞穴滴水的Mg/Ca也较低,这使得组成次生沉积物的低镁方解石晶体快速侧向生长,并导致方解石晶体纯净、粗大且自形程度高。雪玉洞母岩顶底板岩层沉积期稳定的滩间海沉积环境有助于形成高强度的厚层微晶灰岩从而为洞穴系统的发育提供有效的支撑。这表明洞穴母岩的沉积地质特征会在物质基础的层面对洞穴系统的发育以及洞穴次生沉积物的特征产生显著影响。

关键词:碳酸盐岩;沉积地质特征;次生沉积物;低镁方解石;雪玉洞

中图分类号:P512.2;P588.245 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-4810(2017)03-0296-10

0 引言

重庆丰都雪玉洞因其洞穴次生沉积物“洁白如雪,纯净如玉”而被《国家地理杂志》评为“中国最美洞穴”之一。沉积地球化学的研究成果表明,洞穴次生沉积物性质会受到植被类型、温度、孔隙流体的Mg/Ca(摩尔比)、二氧化碳分压(p_{CO_2})以及洞内的蒸发状况等因素的影响,所以环境条件对次生沉积物形成过程及其特征的影响成为研究重点^[1-6]。

为了了解影响雪玉洞次生碳酸盐沉积物性质的环境控制因素,前人从水文地球化学、地貌学和矿物学等方面对该洞穴进行了一系列研究,认为雪玉洞沉积环境极其脆弱,并受到洞穴 p_{CO_2} 的季节性控制^[7-9]。但以往研究主要针对洞穴系统内部的环境

因素,并未对雪玉洞及其次生沉积物发育的基础——母岩进行系统地研究。母岩作为岩溶洞穴发育的基础和载体,其沉积地质特征会对洞穴形态、规模和次生沉积物性质等产生很大的影响。因此,为了进一步深入了解母岩对洞穴次生沉积物性质的影响,并有效地管理和保护洞穴旅游资源,对雪玉洞母岩的沉积地质特征开展系统研究是十分必要的。

1 研究区概况

雪玉洞(29°47'00" N,107°47'13" E)位于重庆市城区180 km外的丰都县(图1),其所处区域属于亚热带湿润季风气候区,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,多年平均降水量和气温分别为1 072 mm·a⁻¹和

资助项目:喀斯特槽谷区土地石漠化过程及综合治理技术研发与示范(2016 YFC0502300)

第一作者简介:雷佳琪(1992-),女,硕士研究生,主要从事岩溶环境地球化学研究。E-mail: langkong0408@hotmail.com。

通信作者:伍坤宇(1986-),男,博士,工程师,主要从事油气储层及岩溶地质学研究。E-mail: wukunyu1986@126.com。

收稿日期:2017-03-08

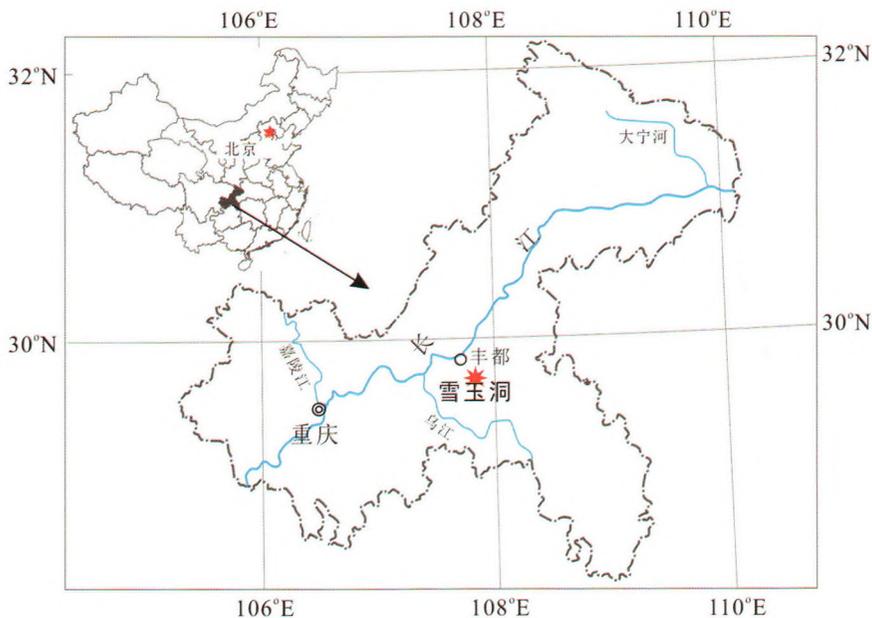


图 1 研究区的位置

Fig. 1 Location of study area

16.5 °C^[10]。该区域受西南季风和东亚季风的双重影响,降水主要集中在每年的 3—10 月。雪玉洞上覆土层的土地利用类型以林地和旱地为主,植被类型主要以亚热带常绿阔叶林和灌丛为主,上覆土层厚度约为 0~50 cm。洞穴的顶板岩石厚约 150~250 m,洞内次生碳酸盐沉积物主要以鹅管、钟乳石、石笋、石柱和石旗等形态产出^[7](图 2)。

2 数据采集与分析测试

为了确定雪玉洞母岩的层位,在原有 1:20 万区调资料的基础上采用穿越法对研究区地层的出露点进行了进一步的勘察;洞穴三维空间展布数据的测量采用三维激光测洞仪完成。为了确定雪玉洞母岩的岩性和沉积相,对该洞穴母岩的露头进行了实测和样品采集。此外,还对洞穴内部的次生沉积物进行了取样,采用偏光显微镜对母岩和次生沉积物的组构进行鉴定。洞穴滴水、母岩和洞穴次生沉积物的化学组分测试采用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-OES),仪器精度为 0.001 mg·L⁻¹。前处理过程分别为:①水样用广口玻璃瓶收集,经 0.25 μm 玻璃纤维滤膜过滤后滴加 1 mol·L⁻¹ 优级纯硝酸,冷藏保存(8 °C)待上机;②岩石样品采用玛瑙研钵研磨至 60 目,分别从每个样品中称取 0.5 g 粉末,用 1:1 的硝酸消解,然后用去离子水稀释至 100 mL,冷藏(8 °C)待上机。

3 结果

3.1 地质背景与洞穴形态

雪玉洞位于华蓥山脉与雪峰山脉之间的四川盆地东部,该地区在晚中生代发生构造运动并形成了多期断层^[11]。基于前人的区域地质资料和新的地层单元控制点,我们编绘了研究区更详尽的区域地质图(图 3)。根据区域地质图,可以发现雪玉洞所处地区在构造上整体为一背斜,二叠系地层组成该背斜的核部。雪玉洞则位于该背斜的北西翼。依据新的调查数据和前人的地层划分方案,研究区内地层被划分为了五个不同的岩石地层单元,包括:下—中二叠统(P₁₋₂)泥岩、含泥质灰岩;上二叠统吴家坪组—长兴组(P_{3c-w})硅质结核(条带)灰岩;下三叠统飞仙关组(T_{1f})灰岩、泥质灰岩,底部和顶部夹泥岩、页岩和粉砂岩;下三叠统嘉陵江组(T_{1j})白云质灰岩,顶部夹角砾岩;中三叠统雷口坡组(T_{2l})泥质灰岩夹粉砂质页岩。

多年来,关于雪玉洞的母岩的地层划分一直存在争议,主要有两种观点:一种认为雪玉洞的母岩属于嘉陵江组^[12];另外一种观点则认为其母岩属于飞仙关组^[9]。造成这种分歧的原因主要是以往针对雪玉洞母岩的岩石学和沉积地质学研究不够充分。我们在对研究区进行了更为详尽的地质调查之后,认为区内地层展布与洞穴的空间关系均表明洞穴与飞仙



图2 雪玉洞地下河出口和沉积物一览

Fig. 2 The outlet of the subterranean stream and different types of sediments in Xueyudong Cave
a—雪玉洞的地下河出口 b—钟乳石 c—石盾(直径超过3 m) d—流石 e—钟乳石和石笋 f—鹅管 g—石膏花

关组更具空间匹配性(图 3a);此外,以鲕粒灰岩为岩相标志层,可以发现雪玉洞内出露的母岩层位与露头上飞仙关组鲕粒灰岩发育段具有可对比性(图 3b、c、d)。因此,根据沉积学、岩石学特征以及地层和洞穴空间匹配关系,认为雪玉洞发育于飞仙关组地层中。

基于激光测洞仪测得的洞穴几何学数据,建立了雪玉洞的三维网络模型(图 3e、f、g)。结果表明,雪玉洞具有明显的三层结构,洞厅发育不完全,其最大的洞厅位于第二层,直径大概为 22 m。洞穴系统的走向与母岩岩层走向一致。

3.2 母岩岩石组构和矿物特征

通过分析组成母岩和沉积物岩石样品的薄片,发现该洞穴母岩存在四种类型的灰岩,包括:微晶灰岩、

砂屑灰岩、鲕粒灰岩、砾屑灰岩。

飞仙关组的微晶灰岩是由较细的方解石晶体(白色颗粒)和灰泥基质组成的(图 4 a-1, 2, 3)。薄片深色和棕色斑块为岩石中含有的金属矿物和黏土矿物。由于微晶灰岩中大部分为小孔隙和低孔隙度的细颗粒成分,阻碍了流水的通过从而抑制了方解石的溶解,所以雪玉洞的顶板主要是由微晶灰岩构成。

洞穴发育段主要由砂屑灰岩,鲕粒灰岩和砾屑灰岩构成。其中砂屑灰岩是由砂级碳酸盐岩内碎屑构成,在薄片亦可观察到较多鲕粒(图 4 b-1, 2, 3);鲕粒灰岩结构特征较为明显,由鲕粒和亮晶方解石胶结物构成(图 4c-1, 2, 3);砾屑灰岩由大于 2 mm 的砾屑和充填于砾屑间的鲕粒和亮晶方解石胶结物组成(图 4d-1, 2, 3)。从亮晶方解石胶结的

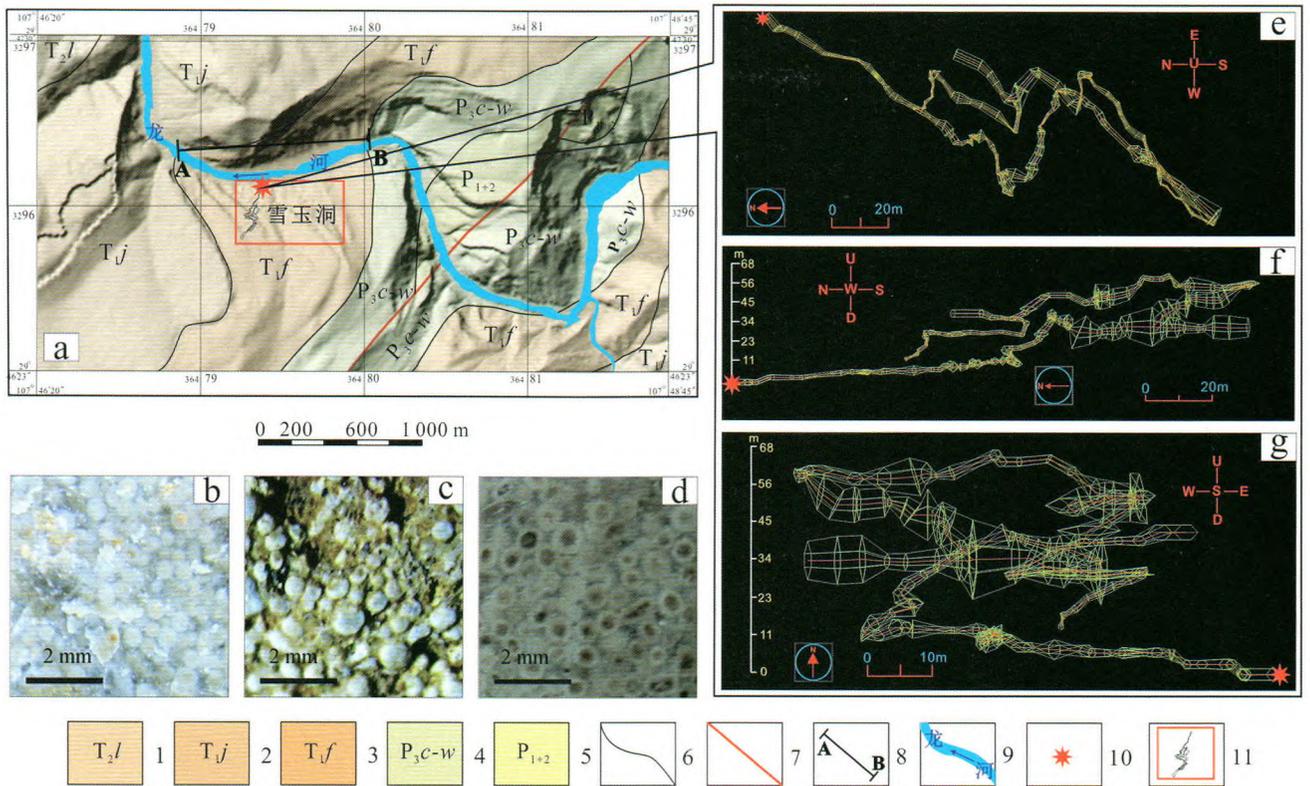


图 3 雪玉洞区域地质图与洞穴形态图

Fig. 3 Regional geological map and diagram of cave morphology of Xueyudong Cave

a—研究区域的地形与地质图(1—中三叠统雷口坡组 2—下三叠统嘉陵江组 3—下三叠统飞仙关组 4—上二叠统吴家坪组—长兴组 5—下—中二叠统 6—地层界线 7—断层 8—所测地质剖面 9—河流 10—洞口 11—雪玉洞) b, c, d—洞穴内及露头上母岩的鲕粒结构 e, f, g—雪玉洞顶视图、后视图和右视图

程度可以看出岩石经历了强烈的大气淡水成岩改造, 从而使其致密化。通过对雪玉洞母岩结构和矿物特征的分析, 表明其主要岩性为颗粒灰岩, 质纯且层厚, 为洞穴和质纯的次生碳酸盐沉积物的形成奠定了基础。雪玉洞次生碳酸盐沉积物的主要矿物成分为方解石, 并且大部分的方解石晶体偏大且自形程度好, 洁白通透(图 5a, b)。从现代滴水沉积物薄片图像中则可以观察到方解石单晶体的结构(图 5c)。所有的方解石晶体都是宽板状的菱面体, 表明方解石晶体的形成于低 Mg/Ca 的溶液中。

3.3 母岩沉积相划分

沉积和成岩期的环境对碳酸盐岩性质有控制作用, 进而间接地影响洞穴次生碳酸盐沉积物的性质。近期对灰岩成岩过程的研究表明较强的水动力条件有利于形成质纯的碳酸盐岩沉积^[13], 这意味着形成于高能环境的灰岩的碳酸盐矿物组分纯度更高。除沉积环境外, 成岩阶段良好的胶结作用可以使岩石致密化, 从而阻止其他杂质混入, 使得组成岩石的碳酸

盐矿物进一步纯化, 为形成质纯的洞穴次生碳酸盐沉积物奠定基础。

通常, 海相碳酸盐沉积发生于热带地区的碳酸盐台地上, 世界上厚层的碳酸盐沉积一般都形成于这一沉积相带^[12]。飞仙关组地层形成于 252.6 ± 0.2 Ma 至 245.2 Ma 之间的早三叠世^[14-15]。在此期间, 泛大陆解体, 扬子台地漂移至赤道附近。古地理学研究表明其沉积环境为碳酸盐台地^[16]。

为了深入了解雪玉洞母岩形成时的沉积环境, 对飞仙关组的露头剖面(图 3)进行了详细测量和研究(图 6)。飞仙关组沉积期, 扬子地台经历了两次海平面升降旋回, 这对地层的岩石学和沉积学特征产生了很大的影响。岩相变化和层序关系表明, 研究区飞仙关组可划分为四个段。

第一段, 底部一层水云母黏土岩构成了飞仙关组与长兴组的界线, 其上的红色页岩和钙质泥岩为典型的潮坪相沉积; 往上随着海平面的持续上升, 红层以上的岩性逐渐转变为薄层微晶灰岩和钙质泥岩, 这类

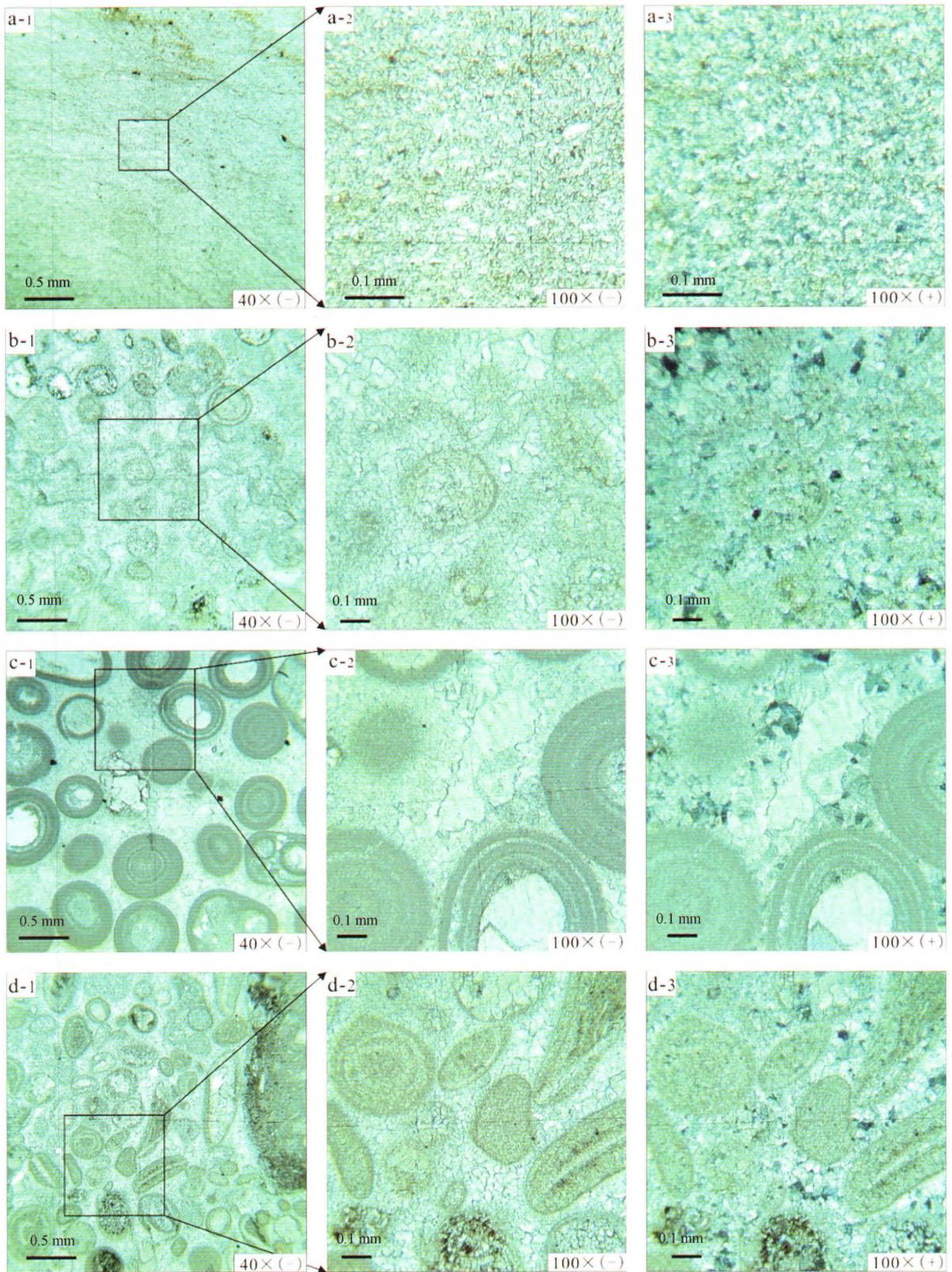


图 4 雪玉洞母岩的薄片

Fig. 4 Thin slice images of parent rock of Xueyudong Cave

a-1,2,3 微晶灰岩 b-1,2,3 砂屑灰岩 c-1,2,3 鲕粒灰岩 d-1,2,3 砾屑灰岩 40×和 100× 分别为放大 40 和 100 倍 图像中的(-)平面偏振光(+)正交偏光

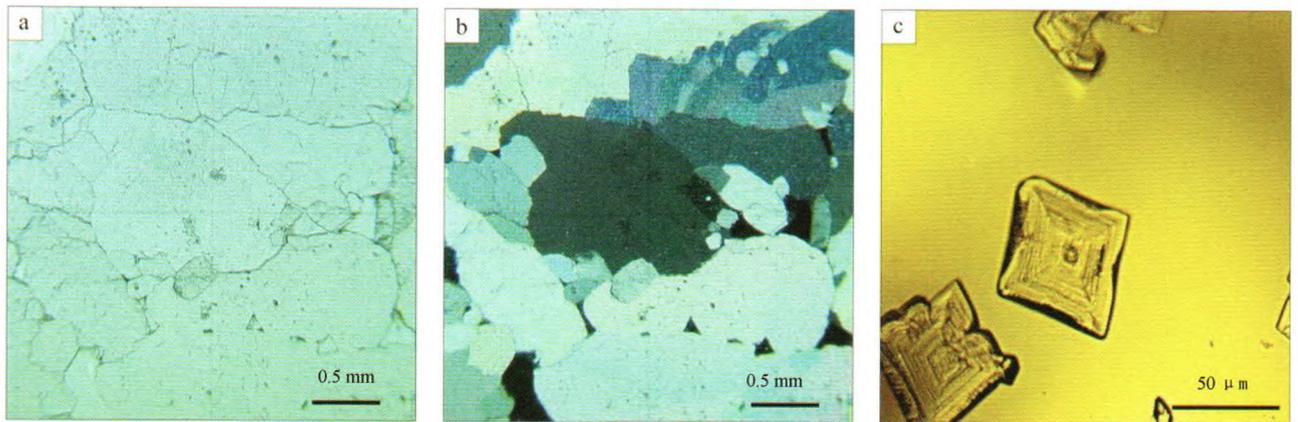


图5 雪玉洞沉积物和现代滴水沉积物的纹理和矿物特征

Fig. 5 Lamination and mineralogy of deposits and modern drip water sediments in Xueyudong Cave

a—沉积物的主要矿物成分是具有较大晶体的方解石(单偏光) b—方解石晶体(正交偏光) c—现代滴水沉积物中形成的方解石晶体(单偏光)

岩石构成了第一段的主要岩相,表明此阶段沉积环境为滩间海。随着海平面的上升,水动力逐渐减弱,加之湿润气候条件下更多的陆源泥质沉积物的输入,这使得碳酸盐岩纯度降低。此外,由于沉积环境动荡,该相带的灰岩矿物组分不纯,且为薄层状构造,这使得该段岩石强度较低,不足以支撑岩溶洞穴系统的发育。

第二段形成于海退旋回,其下部主要岩性为微晶灰岩,沉积环境依然为滩间海。随着海平面的持续下降,此段中部及以上部的沉积环境转变为碳酸盐颗粒滩。由于这类沉积环境具有较强的水动力条件,使得该相带内冲刷、淘洗作用强烈,阻止了泥质成分沉积,从而形成了纯度和孔隙度较高的碳酸盐沉积物。在经历后期成岩改造后,大部分粒间孔会被亮晶方解石胶结物所填充,从而形成致密、质纯的厚层碳酸盐岩,为洞穴系统和次生碳酸盐沉积物的发育奠定了基础。

在海退旋回后,研究区的海平面再次开始上升,水动力下降,沉积环境变为滩间海。与第一段沉积时期不同的是,第三段沉积时期沉积环境较为稳定可形成厚层的微晶灰岩,这套强度较高的厚层灰岩构成了雪玉洞洞穴系统的顶板。

飞仙关组的第四段形成于海退旋回的局限台地环境,该沉积相带可细分为潟湖和潮坪两个微相。形成潟湖相带的主要岩性为微晶灰岩和泥质灰岩,而潮坪相带内形成的则主要是泥岩。

对露头的详细测量和研究,表明雪玉洞发育于飞仙关组第2段中上部的颗粒碳酸盐岩段,受沉积环境的控制,该段岩石为质纯的灰岩段,这有助于雪玉洞

形成质纯的次生低镁方解石沉积物;同时,也表明母岩的沉积环境会间接地对洞穴的发育和次生沉积物的形成产生影响。

3.4 地球化学特征

母岩的地球化学性质在沉积物形成过程中起到了重要作用。 Mg^{2+} 的含量被认为是方解石沉积中最重要的控制因素,在地表环境中,溶液中Mg含量偏低对方解石沉积有促进作用^[3,18]。母岩的Mg含量会对洞穴次生沉积物的化学组成和结晶学行为产生显著影响。为了定量研究母岩与次生沉积物的地球化学特征,我们对采集的10个母岩样品和6个次生碳酸盐沉积物样品进行了化学组分分析。

通过对次生沉积物和母岩中的Ca、Mg、Sr元素含量进行分析发现,Ca是主要的元素,约占总量的38%,而Mg和Sr均小于1%(表1)。沉积物的Ca含量(约39.4%)与颗粒灰岩(39.41%)非常相近。微晶灰岩的Mg含量最高,颗粒灰岩和次生沉积物的Mg含量分别为0.34%和0.37%。颗粒灰岩和微晶灰岩的Sr含量很相近(0.02%),而次生沉积物的Sr含量(0.01%)较低。母岩及次生沉积物的Mg/Ca在0.002和0.042之间浮动。由于Mg/Ca小于4%的方解石为低镁方解石(LMC, low magnesium calcite)^[19],因此除了微含白云质灰岩的R06号样品外,其余母岩和次生沉积物样品的方解石都属于低镁方解石。此外,颗粒灰岩的孔隙几乎都被低镁亮晶方解石胶结物所充填,其含钙量比微晶灰岩更高,镁含量更低。

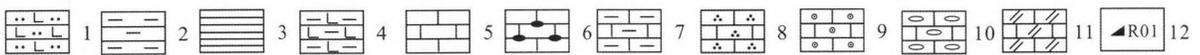
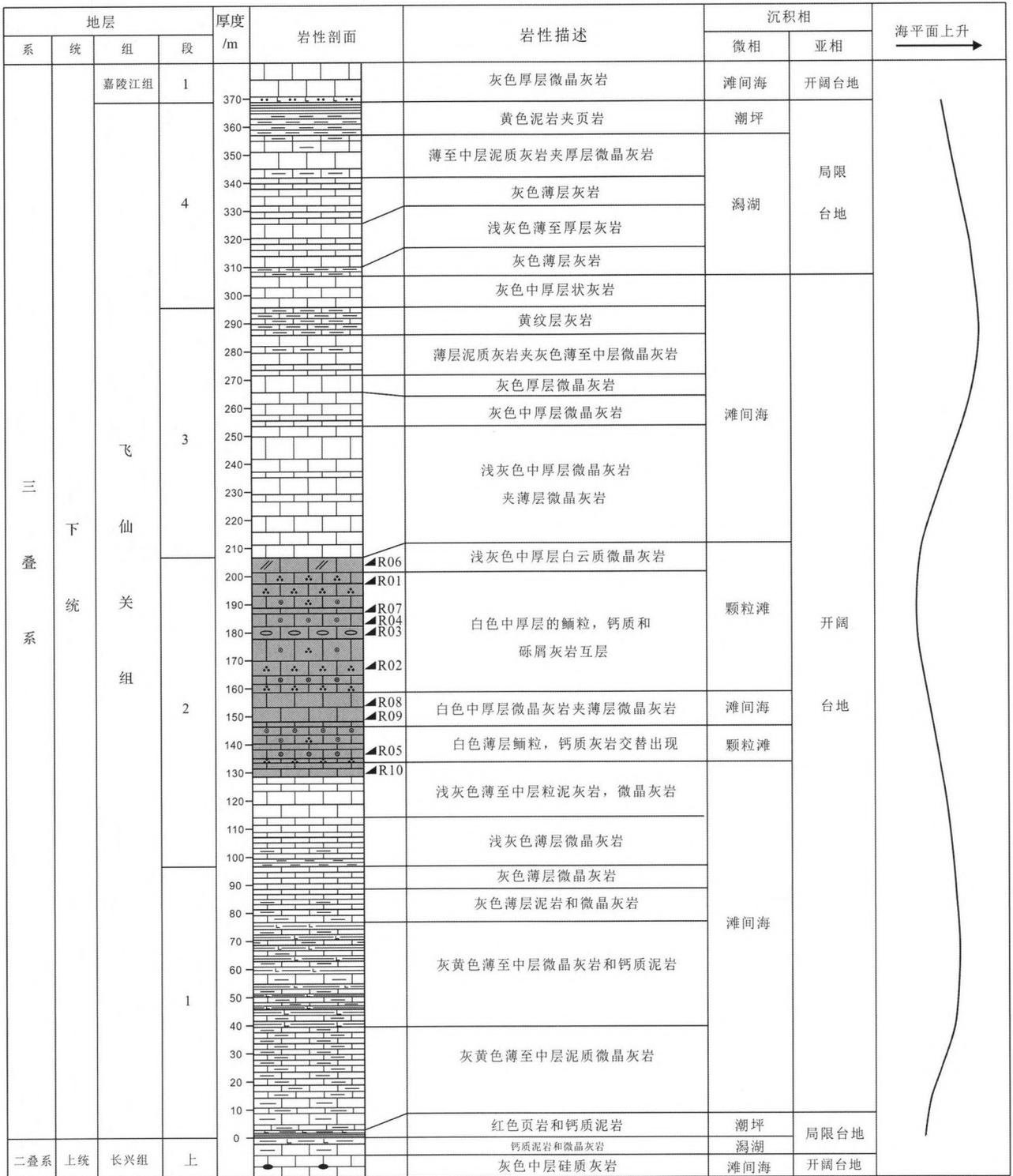


图6 飞仙关组的地层和沉积相的划分

Fig. 6 Subdivision of strata and sedimentary facies of Feixianguan Formation

1—钙质粉砂岩 2—泥岩 3—页岩 4—钙质泥岩 5—微晶灰岩 6—硅质灰岩 7—泥质灰岩 8—砂屑灰岩 9—鲕粒灰岩 10—砾屑灰岩 11—白云质灰岩 12—样品编号及位置(阴影部分为雪玉洞母岩层段)海平面变化曲线据文献^[17]

表 1 岩石样品的 Ca, Mg, Sr 含量

Table 1 Content of Ca, Mg, and Sr in rocks samples

ID	Ca/%	Mg/%	Sr/%	Mg/Ca	Sr/Ca	岩石/沉积物
S01	38.868	0.763	0.005	0.033	0.000 06	鹅管
S02	39.120	0.556	0.001	0.024	0.000 01	石笋
S03	39.622	0.212	0.015	0.009	0.000 17	流石
S04	39.543	0.255	0.017	0.011	0.000 20	鹅管
S05	39.863	0.059	0.017	0.002	0.000 19	钟乳石
* S06	37.579	1.684	0.027	0.075	0.000 33	流石
R01	39.720	0.141	0.024	0.006	0.000 28	砂屑灰岩
R02	38.991	0.580	0.021	0.025	0.000 25	砂屑灰岩
R03	39.169	0.510	0.020	0.022	0.000 23	砂屑灰岩
R04	39.615	0.227	0.013	0.010	0.000 14	鲕粒灰岩
R05	39.577	0.244	0.026	0.010	0.000 30	鲕粒灰岩
R06	38.281	0.976	0.042	0.042	0.000 50	微含白云质灰岩
R07	39.452	0.331	0.008	0.014	0.000 09	微晶灰岩
R08	39.567	0.248	0.012	0.010	0.000 14	微晶灰岩
R09	39.379	0.276	0.028	0.012	0.000 32	微晶灰岩
R10	38.317	0.812	0.009	0.035	0.000 11	微晶灰岩

注: Mg/Ca 和 Sr/Ca 是摩尔比; * S06 是芙蓉洞样品。

另外,我们还采集了芙蓉洞的流石样品来进行对比分析,与雪玉洞的母岩和沉积物样品比较可以看出它的含钙量相对较低(约 37.58%),而含镁量较高(约 1.68%),硅含量无明显差别。基于 Mg/Ca vs Sr/Ca 图解(图 7),样品可以分为两类,大部分的雪玉洞母岩和沉积物是低镁方解石,而 R06 和 * S06 是镁方解石/文石。

滴水的地球化学性质会直接影响洞穴次生沉积物的地球化学特征和结晶行为。从测试结果(表 2)

表 2 雪玉洞与芙蓉洞的滴水 Ca²⁺、Mg²⁺ 浓度及 Mg/Ca 摩尔比

Table 2 Mole ratios of Ca²⁺ and Mg²⁺ concentrations of drip water in Furongdong Cave and Xueyudong Cave

离子类型	芙蓉洞						雪玉洞		
	Dw # 1	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	1 #	2 #	3 #
Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	61.6	60.9	63.9	66.8	67.4	61.4	176.3	72.7	79.6
Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	35.6	35.4	39.9	34.7	40.0	40.9	4.0	7.6	9.0
Mg/Ca	0.96	0.97	1.05	0.87	0.99	1.11	0.04	0.17	0.19

注:芙蓉洞数据引用自文献[20]; Mg/Ca 是摩尔比;以上数据均为年平均值。

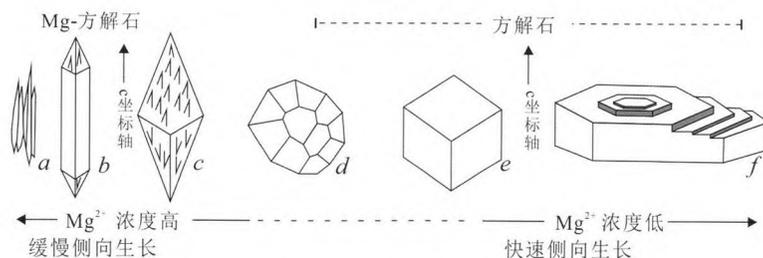


图 8 受制于 Mg/Ca 摩尔比的方解石结晶习惯(据文献[21])

Fig. 8 Crystal behavior of CaCO₃ controlled by Mg/Ca ratio

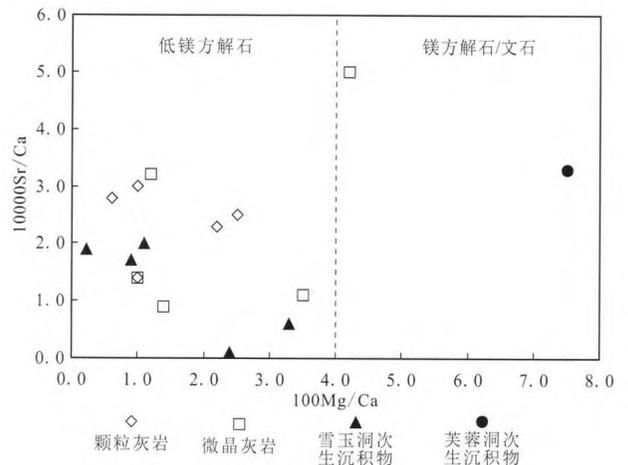


图 7 Sr/Ca 与 Mg/Ca 摩尔比

Fig. 7 Mole ratio of Sr/Ca to Mg/Ca

可以看出,雪玉洞与芙蓉洞滴水化学性质有很大的差别。芙蓉洞滴水的 Ca²⁺ 浓度(60.9~67.4 mg·L⁻¹)比雪玉洞(72.7~176.3 mg·L⁻¹)低,而芙蓉洞滴水的 Mg²⁺ 浓度(34.7~40.9 mg·L⁻¹)要明显高于雪玉洞(4.0~9.0 mg·L⁻¹)。因此,芙蓉洞滴水的 Mg/Ca 要远高于雪玉洞滴水。由于滴水的化学成分是受母岩控制,因此,滴水之间化学性质的差异可以反应母岩化学组成的不同。实际上,芙蓉洞的母岩是寒武系白云岩,从而导致芙蓉洞滴水的 Mg/Ca 远高出雪玉洞滴水。低 Mg/Ca 比值的溶液会促进方解石快速的侧向生长^[21](图 8),因此,以低镁方解石为主的母岩使雪玉洞洞穴次生沉积物的方解石晶体要比芙蓉洞次生沉积物的方解石晶体更为粗大。

4 讨论

岩溶动力系统(KDS, Karst Dynamic System)中气、液、固相的转换关系,可以解释沉积物在岩溶洞穴中的形成过程及动力机制。在KDS中,方解石(母岩)是 Ca^{2+} (包括 Mg^{2+} , Sr^{2+} 等)和一半 HCO_3^- 的来源,从而强烈影响着沉积物及滴水的性质。

除了物质来源,碳酸盐矿物的溶解和沉积动力学也是KDS的关键因素。母岩的快速溶解,可以为沉积物的形成提供丰富的过饱和溶液,从而加快次生沉积物的沉淀过程。Dreybrodt等^[22]指出由碳酸盐矿物表面的溶解动力学可知溶解速率主要取决于溶液体积和反应物的表面积。后来,实验发现湍流溶液中碳酸盐矿物的溶解与沉淀受到扩散边界层(DBL, diffusion boundary layer)的控制^[23]。实际上, DBL的厚度在很大程度上受控于流体动力条件。因此,兼具良好的水-岩接触条件,高孔隙度和渗透性的母岩有利于产生大量过饱和溶液。

受控于有利的沉积环境,雪玉洞母岩为质纯、致密且厚层的灰岩组成;同时,母岩较低的Mg/Ca,使得滴水的Mg/Ca比也较低,促进了方解石晶体快速侧向生长^[22],从物质基础的层面使得沉积物生长更快,自形程度更高,晶体更粗大且更纯净。

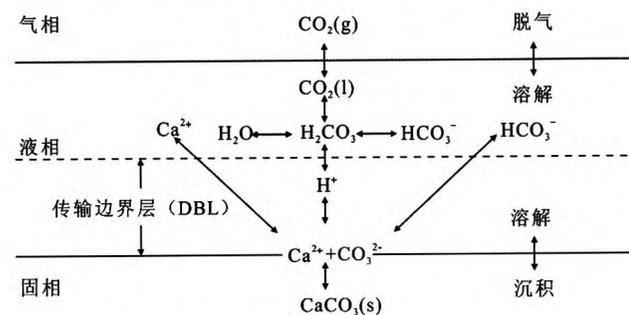


图9 岩溶动力系统的概念模型(修改自文献^[24])

Fig. 9 Conceptual model of karst dynamic system (KDS)

5 结论

(1)区内地层出露情况和洞穴发育区的空间关联性,以及母岩岩石学特征表明,雪玉洞发育于飞仙关组的露头区域,因此其母岩属于飞仙关组地层。

(2)雪玉洞发育于飞仙关组第二段的中至上部,受沉积环境影响,该层段岩石类型主要为质纯的颗粒灰岩,其矿物组成以低镁方解石为主,为洞穴次生沉积物提供了稳定的低镁方解石来源;同时,母岩段顶

板高强度的厚层微晶灰岩,为洞穴系统的发育提供了支撑。

(3)由低镁方解石组成的雪玉洞母岩,使得滴水的Mg/Ca也很低,有助于次生沉积物晶体的快速侧向生长。

致谢:感谢西南大学地理科学学院的沈立成和中国地质科学院岩溶地质研究所的肖琼的帮助。感谢雪玉洞风景区对本研究的支持与配合。

参考文献

- [1] Bar-Matthews M, Matthews A, Ayalon A. Environmental Controls of speleothem mineralogy in a karstic dolomitic terrain (Soreq Cave, Israel)[J]. The Journal of Geology, 1991, 99(2): 189-207.
- [2] 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.
- [3] Frisia S, Borsato A, Fairchild I J, et al. Aragonite-calcite relationships in speleothems (Grotte De Clamouse, France): Environment, fabrics, and carbonate geochemistry[J]. Journal of Sedimentary Research, 2002, 72(5): 687-699.
- [4] Self C A, Hill C A. How speleothems grow: An introduction to the ontogeny of cave minerals[J]. Journal of Cave & Karst Studies, 2003.
- [5] Oster J L, Montañez I P, Kelley N P. Response of a modern cave system to large seasonal precipitation variability [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2012, 91(5): 92-108.
- [6] 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.
- [7] 朱学稳,张远海,韩道山,等. 重庆丰都雪玉洞群的洞穴特征和洞穴沉积物[J]. 中国岩溶, 2004, 23(2): 85-90.
- [8] Pu J, Wang A, Shen L, et al. Factors controlling the growth rate, carbon and oxygen isotope variation in modern calcite precipitation in a subtropical cave, Southwest China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 119: 167-178.
- [9] Wang A, Junbing P U, Shen L, et al. Natural and human factors of CO_2 concentration variations in Xueyu Cave, Chongqing [J]. Tropical Geography, 2010, 30(3): 272-277.
- [10] 王翔宇,蒲俊兵,沈立成,等. 重庆雪玉洞 CO_2 浓度变化的自然与人为因素探讨[J]. 热带地理, 2010(3): 272-277.
- [11] Wang Z, Zhang L, Tao T, et al. Structural analysis of the multi-layer detachment folding in eastern Sichuan Province[J]. 地质学报(英文版), 2010, 84(3): 497-514.
- [12] Jun-Bing P U, Shen L C, Wang A Y, et al. Space-time variation of hydro-geochemistry index of the Xueyu cave system in Fengdu county, Chongqing [J]. Carsologica Sinica, 2009, 28(1): 49-54.
- [13] 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 地质出版社, 2010, 148-150.
- [14] Huang S J, Qing H R, Huang P P, et al. Evolution of strontium isotopic composition of seawater from Late Permian to Ear-

- ly Triassic based on study of marine carbonates, Zhongliang Mountain, Chongqing, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2008, 51(4): 528-539.
- [15] 黄思静,张萌,孙治雷,等. 川东 L2 井三叠系飞仙关组碳酸盐样品的铍同位素年龄标定[J]. *成都理工大学学报(自科版)*, 2006, 33(2): 111-116.
- [16] Zharkov M A, Chumakov N M. Paleogeography and sedimentation settings during Permian-Triassic reorganizations in biosphere[J]. *Stratigraphy & Geological Correlation*, 2001, 9(4): 340-363.
- [17] Yin H. Late Permian-Middle Triassic sea level changes of Yangtze Platform[J]. *Journal of Earth Science*, 1996, 19(1): 101-104.
- [18] Choudens-Sanchez V D, Gonzalez L A. Calcite and aragonite precipitation under controlled instantaneous supersaturation: Elucidating the role of CaCO_3 saturation state and Mg/Ca ratio on calcium carbonate polymorphism[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(6): 363-376.
- [19] Stanley S M, Ries J B, Hardie L A. Low-magnesium calcite produced by coralline algae in seawater of Late Cretaceous composition[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002, 99(24): 15323-15326.
- [20] 周福莉,李廷勇,陈虹利,等. 重庆芙蓉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.
- [21] Folk R L. The natural history of crystalline calcium carbonate: Effect of magnesium content and salinity. [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1974, 44(1): 40-53.
- [22] Dreybrodt W, Lauckner J, Liu Z, et al. The kinetics of the reaction $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ as one of the rate limiting steps for the dissolution of calcite in the system $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CaCO}_3$ [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(18): 3375-3381.
- [23] Liu Z, Dreybrodt W. Dissolution kinetics of calcium carbonate minerals in $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ solutions in turbulent flow: The role of diffusion boundary layer and the slow reaction $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(14): 2879-2889.
- [24] 袁道先. 中国岩溶动力系统[M]. 地质出版社, 2002, 42-49.

Characteristics of sedimentary geology of parent rock at the Xueyudong Cave and its impact on secondary sediments

LEI Jiaqi¹, WU Kunyu^{1,2}, YOU Chao², JIANG Xuemeng³, WANG Peng^{1,4}, JIANG Yongjun¹

(1. School of Geographical Sciences, Chongqing 400715, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Qinghai Oil Field, CNPC, Dunhuang, Gansu 736202, China;

3. Testing Institute of Petroleum Exploration and Development, Qinghai Oil Field, CNPC, Dunhuang, Gansu 736202, China;

4. College of Groundwater and Earth Sciences, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract The purpose of this work is to explore the effect of parent rock at caves on the cave system and its secondary sediments. Taking the Xueyudong Cave in Fengdu, Chongqing City as an example, we have made a detailed investigation to characterize its sedimentary geology, and study the relationship between sedimentary characteristics of parent rock and development of the cave and its secondary deposits. The results indicate that the parent rock of Xueyudong Cave belongs to the second member of Triassic Feixianguan Formation with main sedimentary facies as grain shoal. The main types of the rock are calcarenite grainstone, oolitic grainstone, calcirudite grainstone with a little micrite sandwiched. The predominant mineral compositions of the parent rock and secondary sediments are low magnesium calcite (LMC). The low Mg/Ca ratio of the parent rock led to a low Mg/Ca ratio of drip water in the cave, resulting in fast sideward growth of calcite crystals in LMC which are pure, coarse and of highly idiomorphic, that constitute the secondary sediments. The interbank, a relatively quiet sedimentary environment when the roof strata of the Xueyudong Cave were deposited, provided a good condition for the formation of thick-bedded limestone with high strength, thus helpful for development of the cave system. It means that the features of sedimentary geology of the parent rock in the cave can produce obvious influence on the evolution of the cave system and its secondary sediments.

Key words carbonate parent rock, sedimentary facies, speleothem properties, low magnesium calcite, Xueyudong Cave

(编辑 吴华英)