

曹敏, 蒋勇军, 贺秋芳, 等. 重庆丰都雪玉洞群洞穴现代监测与古环境研究回顾和展望[J]. 中国岩溶, 2022, 41(3): 414-428.

DOI: 10.11932/karst20220309

重庆丰都雪玉洞群洞穴现代监测与 古环境研究回顾和展望

曹敏¹, 蒋勇军², 贺秋芳², 殷建军³, 杨琰², 李廷勇⁴

(1. 云南大学地球科学学院, 云南 昆明 650500; 2. 西南大学地理科学学院, 岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715; 3. 自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004; 4. 云南师范大学地理学部, 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南 昆明 650500)

摘要: 重庆丰都雪玉洞群包括羊子洞、雪玉洞和水鸣洞, 西南大学的研究团队从2008年开始对雪玉洞群开展了系统的现代过程监测, 以了解洞穴系统气候和环境信息的传输、转化和记录过程。通过对雪玉洞洞穴内外的大气、植被、土壤、基岩、滴水和洞穴沉积物等的动态监测, 研究了碳酸盐沉积过程的水化学指标变化, 揭示了现代洞穴滴水的影响因素和变化过程, 以及碳酸盐沉积物对现代气候环境变化的响应, 也为古气候的定量化研究提供了基础支撑。现代过程监测记录表明: 雪玉洞CO₂主要来源于上覆土壤, 其季节变化受降水的影响较大; 在短时间尺度上受到游客旅游活动的影响明显, 但幅度远远小于自然过程引起的变化。雪玉洞内次生沉积物的沉积速率具有明显的旱季、雨季特征, 不同滴水点下方沉积物的沉积速率变化较大。雪玉洞群三个洞穴的石笋古环境记录研究表明, 本区石笋的²³⁰Th/²³²Th比值比较适合高精度铀系测年; 部分石笋沉积速率较快, 平均沉积速率达到0.25 mm·a⁻¹, 可以开展高分辨率的气候和环境变化研究。羊子洞YZ1石笋的年龄范围在116~3 ka B.P.之间(平均测年精度2σ, 269年), 覆盖了整个末次冰期, δ¹⁸O和δ¹³C的变化曲线和东亚季风区的其他记录具有明显的一致性。同位素测试的时间分辨率平均为88年, 成功记录了一些百年—千年尺度的气候突变事件, 如Heinrich事件、7.2 ka事件、小冰期等。在精确年代学的基础上, 雪玉洞群石笋具有重建高分辨率气候环境变化的潜力。

关键词: 现代过程; 洞穴CO₂; 石笋; 古气候; 雪玉洞群

中图分类号: P532; P931.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2022)03-0414-15 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

岩溶洞穴是特殊的自然条件下, 经过漫长地质历史时期逐渐演化而成, 因此, 洞穴形态、结构及沉积堆积物都保存了大量的环境信息。洞穴石笋因具

有分布广泛、定年准确、分辨率高和代用指标丰富等优点而成为晚第四纪以来高分辨率气候环境变化研究的理想载体^[1]。对洞穴滴水、洞穴空气环境和洞穴次生碳酸盐进行监测, 涉及滴水速率、沉积速率、洞穴温湿度、元素比值、稳定同位素等代用指标^[2-4]。

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金(2022J0005); 国家重点研发计划项目(2016YFC0502306); 云南省基础研究计划重点项目(202201AS070022), 国家自然科学基金项目(42172204, 42011530078, 41888101)

第一作者简介: 曹敏(1987—), 女, 博士, 讲师, 主要从事岩溶环境与全球变化研究。E-mail: caomina@163.com。

通信作者: 蒋勇军(1968—), 教授, 博士研究生导师, 主要从事岩溶环境/生态/水文地质和(生物)地球化学研究。E-mail: Jiangyj@swu.edu.cn。

收稿日期: 2022-04-20

结合多指标的洞穴监测手段研究洞穴石笋的沉积机理,有利于进一步认识洞穴石笋对气候变化的响应机制,也有助于石笋代用指标的解释。然而,某些石笋的代用指标存在不确定性或者多解性,对现代洞穴环境指标的综合研究,也有利于加深对洞穴形成环境的认识。

洞穴环境独特,次生化学沉积物形态各异,具有一定的旅游价值。雪玉洞是重庆著名的旅游洞穴,随着洞穴旅游发展,洞穴环境也有所变化,洞内次生化学沉积物景观也面临变色、老化等问题^[5-6]。对旅游洞穴环境进行长期、在线的现代观测研究,可为洞穴保护和可持续利用提供依据。

中国是岩溶大国,岩溶洞穴遍布,尤其是在南方地区。对洞穴碳酸盐的研究虽可上溯到17世纪旅行地理学家徐霞客的相关描述^[7],然而现代科学研究起步较晚^[8],朱学稳^[9]于1988年对桂林的岩溶地貌和洞穴进行了研究;袁道先^[10]基于岩溶作用对环境变化的敏感性,明确提出岩溶记录可以提供高分辨率的环境变化信息,一些学者对桂林^[11]、福建^[12]、北京^[13]等地区的石笋进行了石笋与古气候的相关研究,并将其研究成果相继在国内刊物发表。Wang等^[14]在《Science》上发表末次冰期75~11 ka BP时段南京葫芦洞有准确定年的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录,显示了东亚夏季季风强度变化与北半球夏季太阳辐射变化的一致性

并且精确标定了多个气候变化事件,而贵州董哥洞的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录重建了160 ka BP以来的东亚季风变化,精确揭示了冰期终止期的突变特征和时间^[15]。随后的研究成果不仅揭示了南方地区千年尺度季风气候变化规律^[16-17],也将石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的年龄拓展到640 ka BP的U-Th测年上限^[18]。全新世石笋的高分辨率记录则更丰富,展示了 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的空间一致性^[19]和早—中全新世的季风强弱变化^[20]。Tan等^[21]系统阐述了利用石笋年纹层来定量重建气候变化的方法,短时间尺度上石笋的稳定同位素、纹层和微量元素记录等被用来反映区域水文气候事件^[22]和人类活动的影响^[23]。

水文气候学指标的建立离不开对洞穴的现代监测。目前,在这一领域的成果包括在广西盘龙洞^[24]、湖北和尚洞^[25]、北京石花洞^[26]、南京葫芦洞^[14]、重庆芙蓉洞^[27]和雪玉洞^[28]等许多洞穴的现代监测研究。综合上述研究成果可以发现,中国从南到北的石笋古气候研究对全球气候变化的响应和反馈占据了重要位置。虽然研究成果显著,但是仍有许多重要的科学问题还有待解决。如石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录到底反映的是季风强度、气温还是降水?如何区分和定量化,石笋的年代学问题等。为了解开这些问题,在重庆地区丰都雪玉洞群、金佛山羊口洞和武隆芙蓉洞等成为石笋古气候的理想研究基地(图1)。羊口洞的石

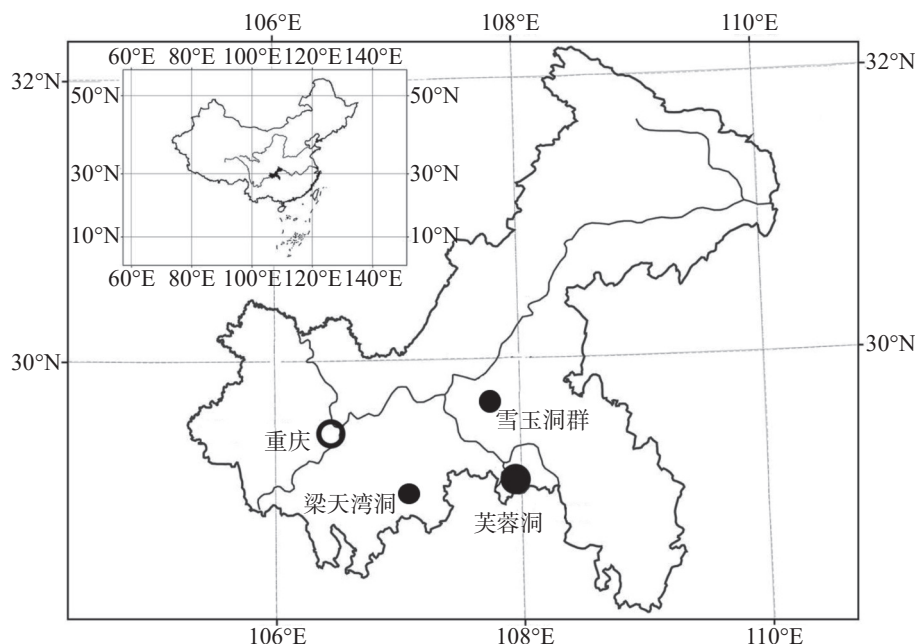


图1 重庆丰都雪玉洞群、金佛山羊口洞和梁天洞、武隆芙蓉洞位置图

Fig. 1 Locations of Xueyu cave group, Yangkou cave and Liangtian cave, Furong cave in Chongqing

笋重建了重庆地区 206—24 ka BP 时段的夏季风降水变化^[29]。研究人员较早地对雪玉洞群开展了连续的洞穴监测研究,并在石笋的高分辨率古气候研究领域发表了一系列成果。经过十来年的发展,有必要对雪玉洞群的石笋古气候研究以及现代监测成果进行梳理,旨在加强对该区域气候环境变化的认识,并对未来生态环境可持续发展提供借鉴和参考。

过去 10 年的研究成果表明,在雪玉洞群进行现代观测、并开展对古气候和古环境研究的优势非常明显:(1)因所处的地理位置优越,气候和环境对全球变化的响应非常敏感;(2)同一地区,相似的气候背景下发育着不同水平高度的洞穴,其观测数据可以相互印证和补充;(3)广泛发育的洞穴石笋所含的指标具有一致性,雪玉洞群洞穴内石笋生长连续、年层清晰,可以构建逐年高分辨率 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 记录,为古气候和古环境重建提供合适的代用指标。这些研究主要回答的科学问题是:雪玉洞内的 CO_2 浓度高且变化迅速的原因?雪玉洞群内的沉积物颜色非常白且沉积速率快的原因是什么?雪玉洞群区域的石笋是否适合高精度古气候重建?

1 基本概况

重庆市国土面积约 $8.24 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中碳酸盐岩分布区占总面积的 35%^[29],为岩溶洞穴的发育提供了重要的物质基础。雪玉洞群位于亚热带湿润季风气候区,多年平均气温为 $17.5\text{ }^\circ\text{C}$,多年平均降水 $1\,072\text{ mm}$,70% 的降水集中在 5-10 月,其中 8 月受副热带高压控制时降水偏少^[30]。洞穴上覆植被以常绿阔叶林和灌丛为主。在区域地壳抬升、河流快速下切过程中,为多层溶洞的形成、发育和丰富的次生化学沉积创造了良好条件。对雪玉洞的研究工作起源于朱学稳等^[31]对雪玉洞群的洞穴沉积物和洞穴特征的阐述,他首次提出了“雪玉洞群”的概念,该洞穴群内发育碳酸盐类方解石、文石和硫酸盐类石膏等次生沉积物(图 2)。雪玉洞是旅游洞穴,洞内的次生沉积物“洁白如雪,纯净如玉”,被《国家地理杂志》评为“中国最美洞穴”之一。目前,雪玉洞是国家 4A 级旅游景区,游客量较大,疫情前平均每月约 5 500 人入洞参观^[32]。从 2004 年开始,在雪玉洞内开始了初步的现代洞穴学研究,积累了一些游客数据和洞内空气 CO_2 变化等记录数据^[33]。2008 年以来,西南



图 2 雪玉洞照片(曾泽提供,摄于 2017 年)

Fig. 2 Photo of stalagmites in the Xueyu cave (captured by Zeng Ze, in 2017)

大学在雪玉洞建立了岩溶研究基地,对雪玉洞群开展了系统的现代岩溶学研究:包括对洞穴发育基础水文地质调查、洞穴上覆植被—土壤监测,洞穴内环境要素的监测和石笋定年以及同位素分析等。

雪玉洞群位于重庆市丰都县,由羊子洞、雪玉洞和水鸣洞共同构成,位于长江的支流龙河下游左岸(经纬度 $29^\circ 46' 30'' \sim 29^\circ 47' 20'' \text{N}$; $107^\circ 47' 00'' \sim 107^\circ 48' 30'' \text{E}$),距离丰都新县城 18 km,洞穴群发育于川东平行岭谷方斗山背斜的翼部,下三叠统灰岩中^[31](图 3),是重庆重要的岩溶研究基地。三个洞穴的分布情况、岩性特征、地层产状等基础资料见表 1^[31]。

2 雪玉洞群洞穴现代环境过程监测

2.1 雪玉洞环境特征与碳迁移

对雪玉洞内气温的同步监测发现:受灯光和游客的影响,雪玉洞内不同洞穴层位气温略有差异:上层 $17.7 \sim 18.3\text{ }^\circ\text{C}$,中层 $17.4 \sim 18.1\text{ }^\circ\text{C}$,下层 $16.6 \sim 17.6\text{ }^\circ\text{C}$ ^[35]。这种上暖下冷的三层温度结构,使得洞内空气层相对稳定,不容易产生气流运动。雪玉洞地下河水温变幅较小,为 $16.3 \sim 16.7\text{ }^\circ\text{C}$ ^[36]。

重庆雪玉洞内年均气温与丰都地区的年均气温几乎一致。旅游开发两三年后,洞内年均温并没有显著变化^[33]。许多洞穴在旅游开发后有增温的现象,如意大利的 Castellana 洞穴,灯光和游客呼吸使洞内温度升高 $3.0\text{ }^\circ\text{C}$ ^[37];贵州织金洞内气温自 1985 年以

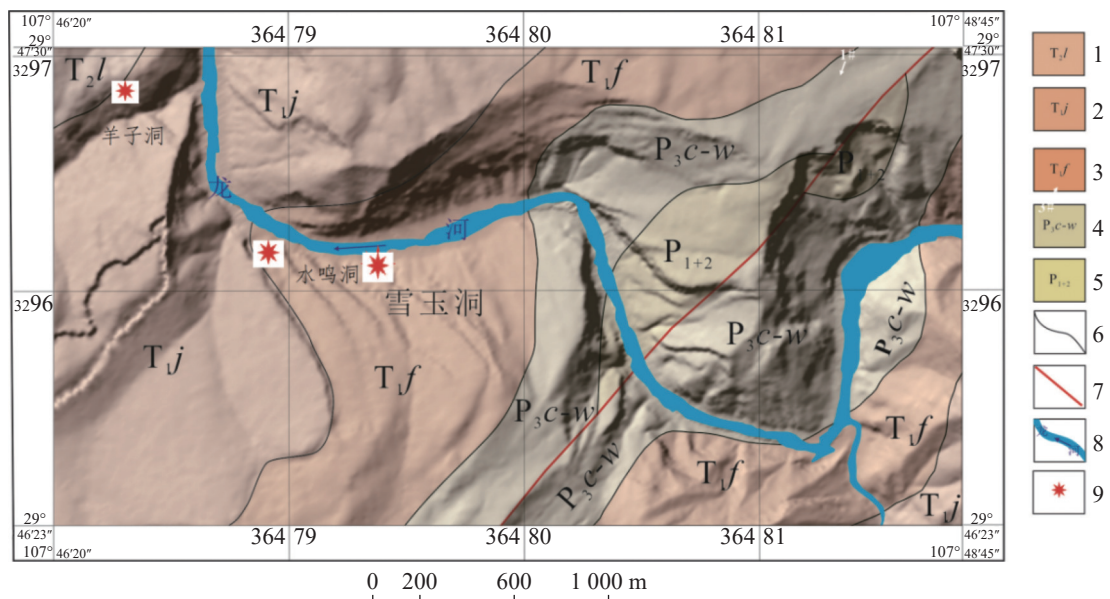


图 3 雪玉洞群区域地质图(修改自 Wu 等^[34])

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.上二叠统长兴—吴家坪组,
5.下二叠统栖霞—茅口组 6.地层界线 7.断层 8.河流 9.洞穴位置

Fig. 3 Regional geological map of Xueyu caves(modified from Wu et al^[34])

表 1 雪玉洞群各洞穴位置与特征比较^[31]

Table 1 Locations and strata of Xueyu caves^[31]

名称	相对位置	沉积物类型与特征	洞穴走向	汇水面积/km ²	洞穴长度/m	洞口相对高度(高出龙河河床)/m	地下水排泄形式	发育地层	主要研究内容
羊子洞	高	大型的洞道和大厅; 大面积的大型流石坝池群; 高大的石幕、石笋、石旗、高台池中沉积(晶锥池)和大型卷曲石	顺地层走向发育(NW-SE)	10~15	500	100~120	泉	下三叠统嘉陵江组(T _{3j})	古气候与环境
雪玉洞	中	多层洞穴与峡谷型地下河; 石笋、钟乳石、鹅管、塔林等			1 643	55	泉/地下河	下三叠统飞仙关组(T _{3f})	现代水文与碳循环过程
水鸣洞	低	地下水通道、泉华水池、石笋			未测	>10	地下河	下三叠统嘉陵江组(T _{3j})	古气候与环境

来升高了 2~3.5 ℃^[38]。河北临城白云洞, 在 2000 年“五一”期间, 洞穴内某些狭窄处温度日增幅达到 2.0~2.4 ℃^[39]。长期来看, 雪玉洞地区的降雨量、气温和地下河 PCO₂ 呈上升趋势, 地下河水温变化则呈现微弱的下降趋势(图 4)。

洞穴空气 CO₂ 浓度是影响洞穴次生化学沉积过程的重要因素之一, 也是衡量旅游洞穴环境质量的一个重要指标^[40]。一些洞穴在开放几年后, 随着游客量逐年增加, 洞内 CO₂ 浓度也会升高^[17]。自 2009 年以来, 雪玉洞的 CO₂ 浓度也呈现上升趋势, 不过王

翱宇等^[36]认为旅游活动对洞穴 CO₂ 变化的影响较弱; 徐尚全等^[32]发现只有在旅游旺季且游客容量超过一定阈值时才会带来明显的 CO₂ 累积, 而这种累积很容易在洞穴自身的净化作用下消除, 回归到自然状态。由于地下河水体对洞内 CO₂ 的调节, 雪玉洞旅游开发带来的 CO₂ 累积效应并不明显。研究表明, 当游客量为 50~200 人/每天时, 游客的呼吸对洞穴空气的贡献量为 55.02~207.74 mol, 即 2.4~9.14 kg, 占比较小^[32]。此外, 雪玉洞在管理上一直是采取控制人数和分批次进入的方式, 可以防止洞穴 CO₂ 过度

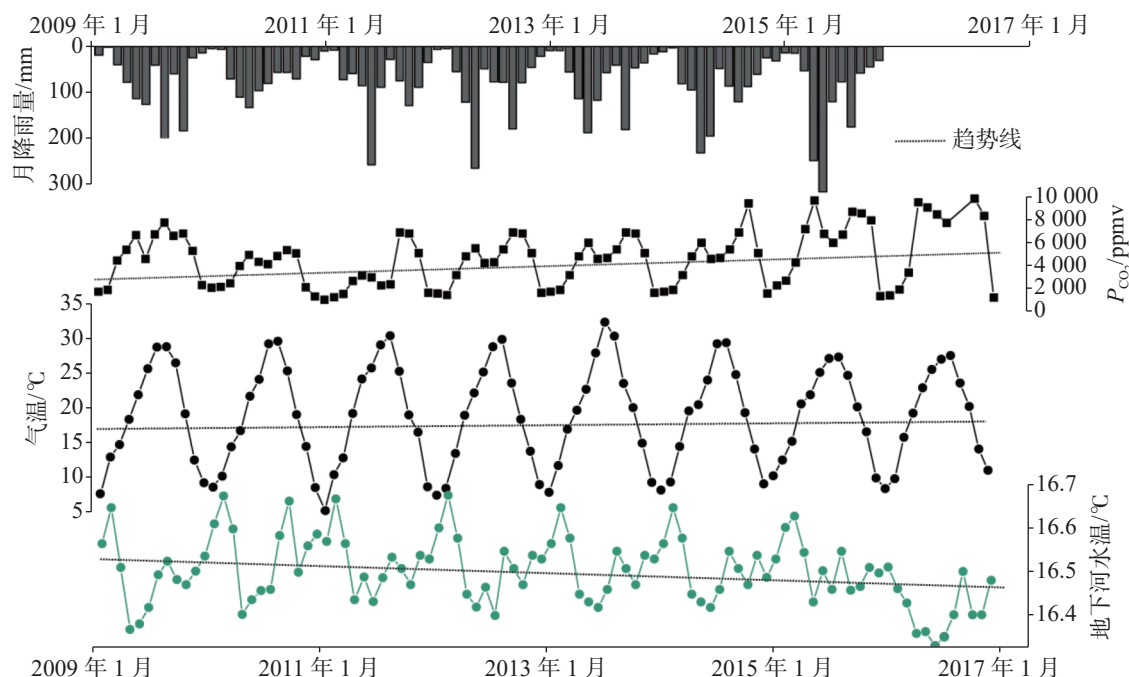


图4 雪玉洞洞外气温、降水和洞内地下水水温、 PCO_2 月变化图

Fig. 4 Monthly variations of air temperature, precipitation, subterranean river temperature and PCO_2 at the Xueyu cave

增加。但是在月尺度上,洞穴 CO_2 的变化与降雨(月降雨小于 250 mm)的关系更密切($R^2=0.41$, $p<0.01$)。

CO_2 和水是岩溶碳循环中最活跃、最关键的因素。 CO_2 进入水中,形成碳酸,溶解碳酸盐岩; CO_2 从水中逸出,引起碳酸盐的沉淀^[41]。诸多学者都对雪玉洞 CO_2 的季节变化进行过阐述,王翱宇等^[36] 最先监测到雪玉洞的空气 CO_2 和地下河 PCO_2 存在明显的季节效应(2 000~10 000 ppmv),且二者具有良好的协同变化规律($R^2=0.97$, $p<0.01$)。在时间序列上,地下河的 PCO_2 高值和低值要早于洞穴空气^[42],地下河通过脱气和吸气过程,主导了洞穴内 CO_2 的变化。

Faimon 等^[43] 对捷克 Punkevní jeskyně 和 Sloup-Šošůvka 两个洞穴上覆土壤 CO_2 和洞内 CO_2 进行了监测,认为不同植被下的土壤中 CO_2 含量差异较大,且都影响洞穴中 CO_2 浓度。王晓晓等^[44] 通过上覆土壤和洞穴水化学的月监测结果发现,土壤 CO_2 浓度的变化和地下河水化学、电导率变化具有一致性。进一步对地下河 PCO_2 和土壤 CO_2 的同步监测发现,日时间尺度上或暴雨时,地下河 PCO_2 对土壤 CO_2 变化的响应非常迅速^[45],也证明了土壤 CO_2 会直接或者间接地影响地下河 PCO_2 和洞穴空气 CO_2 ^[46]。土壤 CO_2 通过岩石裂隙可以直接进入洞穴系统,土壤与基岩共同组成了一个双层膜介质。干旱时,土壤水分蒸发,其孔隙构成了洞内外气体连接的管道;而

湿润时,土壤水充填,无法形成通道,导致 CO_2 在洞内累积,这是地中海区域的洞穴冬季 CO_2 浓度高的主要原因^[47]。不过雪玉洞的情况刚好相反,夏季是雨季,土壤水饱和,而洞穴顶部又构成了比较封闭的空间,因此有利于洞穴内部空间维持高浓度 CO_2 。在高温多雨的季节,有更多土壤 CO_2 进入雪玉洞;低温少雨的季节,进入洞穴内的土壤 CO_2 减少,洞穴 CO_2 浓度也较低;氮浓度的季节变化也佐证了这一点^[48]。降雨可以溶解土壤 CO_2 渗入地下洞穴,也可以通过活塞效应将土壤和裂隙中的 CO_2 直接压入洞穴,使得洞穴 CO_2 的碳同位素较好地继承了土壤 CO_2 的同位素特征(图 5),并且能够通过端元模型计算出来源于土壤 CO_2 部分的比例介于 47%~76% 之间^[49]。通过对暴雨期间雪玉洞地下河的流量以及 DIC 等的分析发现,降雨期间雪玉洞地下河的碳通量显著增加,主要受流量增大的影响^[50]。利用 DIC 计算碳通量表明,2009-2015 年碳通量呈上升趋势,从 $3.46 \text{ t C} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ 上升到 $5.64 \text{ t C} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$,7 年间岩溶地下水碳通量增加 38%,与该时期降水增加有较大的关系。

2.2 雪玉洞群水文地球化学特征与控制因素

石笋领域研究的两个主要方向是:(1)沉积速率及其控制机理、元素运移等;(2)高分辨率古气候重建。其中滴水 and 沉积物元素变化能够很好地响应外

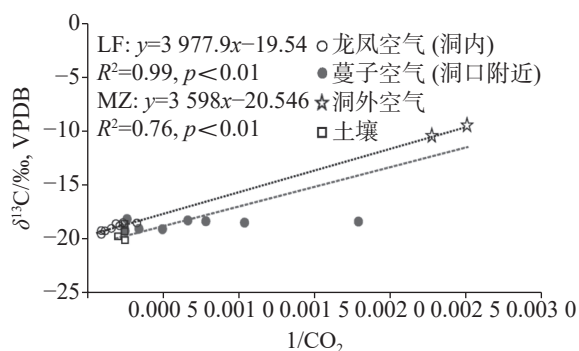


图 5 雪玉洞洞穴 CO_2 浓度、土壤和空气 CO_2 浓度及其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 同位素的关系^[49]

Fig. 5 Correlations of CO_2 concentration and its $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ in Xueyu Cave air, soil air and external air^[49]

界环境变化^[51]。雪玉洞和水鸣洞的滴水水化学类型都为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型,主要受到水岩作用控制^[52]。蒲俊兵等^[53]对雪玉洞进行监测,发现滴水的主要水化学指标在一个水文年内具有明显的季节变化趋势:洞穴上层滴水的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度高于下层滴水, Mg/Ca 表现为雨季低、旱季高的特征,可以用来指示降水条件的变化。

水岩相互作用和滞留时间对元素比值的变化有着显著的影响。滞留时间可以反映在滴水中,在雪玉洞按照滴量变幅可分成“敏感”滴水点(滴率 1~63 mL/min)和“稳定”滴水点(0.9~5.0 mL/min),前者可以很好地反映当月降雨量,后者对降雨的响应具有显著的滞后性^[28]。雪玉洞的基岩 Mg/Ca 为 0.59%~3.53%,属于低镁方解石^[34]。雨水和滴水的 Mg/Ca 范围分别为 4.96%~35.94% 和 2.39%~11.95%。大气降水本身以及其对土壤和基岩的淋滤作用,会使得滴水和石笋中 Mg 元素增加^[54]。 Mg^{2+} 含量不仅和水岩作用时间长短、母岩性质以及水土流失等有关,而且还可能与温度和地下水运移路径有关^[55],如在水流到达洞穴前 CaCO_3 优先沉积(PCP),将导致滴水中的 Mg/Ca 比升高^[56]。在外界气候干旱条件下,降水减少,进入含水层中的补给水量减少且流速缓慢,岩溶水在含水层的滞留时间增加,水岩相互作用增强。在 Wombeyan 洞的监测也印证了滴水 Mg/Ca 的增大与厄尔尼诺(2002-2003 年)带来的干旱和 PCP 作用增强有关^[57]。2006 年长江流域发生严重干旱事件,和尚洞所在区域夏季降水减少 30%,洞穴滴水速率对降水的响应没有出现往年的峰值^[58]。与此同时,干旱时期较慢滴水速率会引起滴水中更多的 CO_2 脱

气,发生 PCP 作用, Ca 离子浓度相对降低, Mg/Ca 、 Sr/Ca 偏高。因此,雪玉洞滴水 Mg/Ca 、 Sr/Ca 的变化在某种程度上可以反映干湿变化。

洞穴滴水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度对区域特大降水事件有明显的响应,但不同滴水点由于其运移路径不同,响应机制和表现也不同,在雪玉洞只有“稳定”滴水点中的 Mg/Ca 可以反映外界的干湿变化^[32]。这种短时间尺度的变化可能随沉积作用被记录在洞穴沉积物中,如石笋中,从而为高分辨率古气候的重建提供物质基础。

3 沉积速率与年代数据

洞穴石笋的沉积速率是反映外界气候环境变化及洞穴内部地质背景条件变化的综合指标,也是气候演变、冷/暖气候事件以及降水强度等的识别标志之一^[59]。雪玉洞发育于三叠系飞仙关组,为质纯的颗粒灰岩,其矿物组成以低镁方解石为主^[34]。雪玉洞滴水中的 Mg/Ca 比也低,从而促进次生沉积物晶体一边继承母岩低的 Mg/Ca 特征,一边快速侧向生长,形成自形程度好、洁白通透的沉积物^[60]。

石笋的沉积速率可以通过高分辨率 U-Th 测年获得,根据石笋定年数据可以精确计算各时段的沉积速率。已发表的雪玉洞群石笋年代最老可以达 330~268 ka B.P.,记录了 MIS9/8 的转换时期为 278~281 ka B.P.^[61],年代较新的可以提供时间分辨率达 1a 的过去 500a 的气候信息记录^[62]。重庆地区洞穴石笋平均沉积速率差异较大(表 2)。雪玉洞群的洞穴石笋沉积速率较快,相对于已发表的金佛山羊口洞、梁天洞的石笋沉积速率。当然,不同的气候条件下,石笋的沉积速率存在差异,即便是同一个洞穴,石笋沉积速率也有差异。

王翱宇^[63]在雪玉洞的监测发现每年 11 月至次年 5 月的日平均沉积速率达 $6.94 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$,即沉积物主要沉积的时期是在洞穴 CO_2 浓度较低的冬春季,其沉积速率达 $0.33 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,可能是夏季洞穴空气中 CO_2 浓度升高,会抑制滴水中 CO_2 的脱气,不利于方解石生长的原因^[64]。因此洞穴空气 CO_2 浓度和滴水速率的季节变化会影响方解石的沉积。徐尚全等^[11]在洞内的 3 个滴水点放置玻璃片监测,发现雨季的平均沉积量为 0.445 g,旱季的平均沉积量为 0.249 g,雨季沉积量较旱季高 78.7%,表现为雨季高、旱季低;

表 2 重庆地区石笋 U 系年龄和沉积速率

Table 2 U-Th dating and deposition rates of stalagmites in Chongqing

编号	底部年龄/ka B.P.	顶部年龄/ka B.P.	长度/cm	沉积速率 /mm(100 a) ⁻¹
SM1	26.5	24.17	57.5	24.68
SM3	107.96	97.59	40	3.86
SM4	36.89	29.61	34.5	4.74
SM5	125.31	123.95	30	22.06
SM6	149.55	146.62	43	14.68
SM9	127.27	125.78	28	18.79
SMY	330.46	269.22	66	10.78
XY1	112.73	109.96	19	6.86
YZ2	76.23	69.59	14	2.11
YZ1	116.83	4.70	69	0.60
LT3	225.5	185.3	44	1.09
LT9	225.7	192.2	29	0.87
YK5	189.8	197.6	18.5	0.97
JFYK7	59	49	20.6	2.06
FR5	37	0.2	50	1.36

注: SM、XY、YZ、LT、YK、FR分别代表水鸣洞、雪玉洞、羊子洞、梁天洞、羊口洞和芙蓉洞,数据来源于文献[68-71]

这和芙蓉洞的监测结果一致^[65]。可知,同一个洞穴,不同滴水点的洞穴沉积物的季节沉积速率并不完全一致^[66]。一两年或者个别滴水点的数据具有较大的不确定性,因此高分辨率和长时期的滴水监测仍然是十分必要的^[67]。石笋生长速率的影响因素较为复杂,不能简单地和降水、气温、植被变化等对应起来,那么在考虑使用石笋沉积速率重建古气候的时候还需要特别谨慎。

以水鸣洞取的一根 SM1 石笋为例,何潇等^[72]按照石笋剖面沉积特征及年龄数据分布,认为沉积速率非常快:在 26.5~24.1 ka.B.P. 期间内共沉积了 57.5 cm,平均沉积速率为 0.25 mm·a⁻¹,和雪玉洞地区的现代监测记录接近;最高沉积速率达到 0.72 mm·a⁻¹,且从石笋底部到顶部,不存在百年尺度以上的沉积间断(图 6)。而对于具有沉积间断的石笋在计算沉积速率时,需要扣除沉积间断时间^[73]。水鸣洞的 SMY2 石笋定年在 29.9~3.1 ka B.P.^[74],沉积速率为 0.01 mm·a⁻¹。由于出现了两次沉积间断,仅在 8.0~7.0 ka B.P.连续沉积,扣除沉积间断的影响之后,平均沉积速率为 0.25 mm·a⁻¹,也接近 SM1 的沉积速率。

4 碳氧稳定同位素与古气候重建

石笋的沉积速率及其稳定同位素和微量元素等

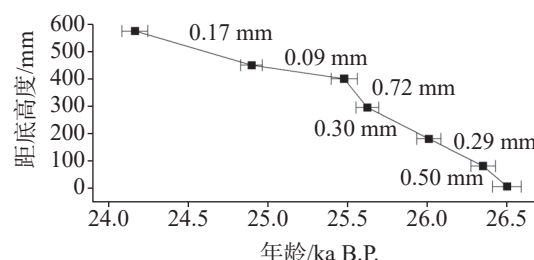


图 6 水鸣洞 SM1 石笋沉积速率图
(图中速率单位为 mm·a⁻¹)^[72]

Fig. 6 Growth rates of the stalagmite SM1 from Shuiming Cave^[72]

都可作为气候和环境的替代指标^[75-77]。因此,前面提到的微量元素比值(Mg/Ca)、沉积速率等可以反映降水的变化,为利用地球化学指标重建古降水提供理论依据。但是单一指标往往具有不确定性,需要结合多指标进行研究。

对雪玉洞“林海雪原”附近滴水点洞穴沉积物的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 分析表明, $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 的范围-13.56‰~-9.30‰,平均值为-12.17‰,也存在季节性波动,冬半年偏重,夏半年偏轻^[30]。王翱宇等^[63]对当地大气降水的现代监测发现,大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值表现出明显的夏季偏轻、冬季偏重的趋势。滴水点下方玻璃板块上的方解石沉积物 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 范围为-7.57‰~-5.94‰,平均-6.89‰;沉积物中 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 具有较好的

正相关关系^[30]。Wu等^[71]对116~3ka BP以来的YZ1石笋的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 进行了去趋势化比较,发现二者也具有相关性($p<0.01$)。

对于亚洲季风区石笋的氧同位素,不同的学者有不同的解译:反映东亚季风的强弱变化^[18]、西南季风的年际变化^[78]、水汽来源的“雨量效应”,以及“环流效应”^[79]。水鸣洞SM1石笋剖面沉积时间较短,沉积速率快,沉积物为白色,较纯;其 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围-9.0‰~-7.5‰,呈现阶梯式变化^[72]。SM1的氧同位素变重,沉积速率降低,也记录了东亚季风整体减弱,降水逐步减少的过程,与该时段的Henrich事件(H2)相对应。

水鸣洞NSM03的石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录则反映了过去500年间气候环境演变,时间分辨率达1a,显示小冰期开始时间大约为1300 A.D.,同时石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏重,平均值为-8.05‰,也显示亚洲季风在迅速减弱,该区域进入小冰期时期^[80]。在公元1450年和公元1600年前后发生两次显著的夏季风减弱事件;根据功率谱分析发现,主要的驱动因素是太阳活动变化^[81]。水鸣洞SMY2石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ (-9.3‰~-8.5‰)和 $\delta^{13}\text{C}$ (-9.1‰~-6.5‰)记录表明在8000~7000 a B.P.期间出现了多个百年-十年际尺度的气候波动^[74]。此外,SMY2的微量元素分析显示,Ca的含量比较稳定,变化幅度较小(55%~68%);Mg含量范围为0.91%~3.32%。在弱季风事件发生时,Mg/Ca、Sr/Ca、Ba/Ca出现了较高值。与 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 记录相比,7.3 ka BP前SMY2石笋的Mg/Ca、Sr/Ca和Ba/Ca呈现出频繁的年际振荡。在7.3 ka BP后,微量元素比值的持续增加,直到大约7.15 ka BP才开始逐渐恢复到平均状态。在研究期间,Mg/Ca、Sr/Ca和Ba/Ca的比值变化非常同步。

梁沙^[82]利用羊子洞石笋YYZ1的²³⁰Th测年数据和稳定碳氧同位素数据建立了116.5~68.9 ka B.P.期间高分辨率的石笋氧碳同位素时间序列。该石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录了MIS 25-20的6个千年尺度事件,揭示了夏季风强度的变化。石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 在夏季风强盛期(MIS 5c、MIS 5a)偏负,衰弱期(MIS 5d、MIS 5b、MIS 4)偏正。与Mg/Ca、Sr/Ca和Ba/Ca比值的变化相对应,反映了洞外干湿条件和水文过程。基于多指标记录的93.1~91.5 ka BP期间,发生了一次明显的干旱事件,即92 ka事件^[83]。Wu等^[71]对羊子洞YZ1石笋的年龄进行了研究(4.695 ± 0.071 ka BP~ 116.83 ± 0.92 ka BP),石笋的沉积期为118.17 ka BP~3.68 ka

BP, YZ1的平均沉积速度为6.04 mm/ka,平均分辨率约为269年,覆盖了整个末次冰期。石笋YZ1的 $\delta^{18}\text{O}$ 和其他洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录指示的亚洲季风在轨道-千年尺度上也具有一致性^[8],在细节上YZ1具有更完善的记录特征。在同位素阶段MIS 5d时,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值比末次冰期MIS 2时偏重近1.5‰(图7),可能与东亚夏季风水汽源的同位素组成不同以及季风环流的动态变化有关^[71]。

5 问题与未来展望

雪玉洞群末次冰期以来的气候变化研究取得了以下主要进展:

(1)对雪玉洞内的 CO_2 变化规律和来源有了比较清晰的认识,证明了现代水文过程和地下河对于洞穴 CO_2 变化的重要驱动作用。发现并量化了土壤 CO_2 是雪玉洞 CO_2 的主要来源,同时地下河的脱气和吸气对雪玉洞 CO_2 也有着重要的调节作用。

(2)雪玉洞滴水的现代监测,揭示了不同水文地质结果对不同滴水的影响。雪玉洞洞穴各滴水的Mg/Ca表现不同,只有“稳定”滴水点的Mg/Ca表现出雨季低、旱季高的特征,可以用来指示降水条件的变化。

(3)雪玉洞群石笋精确记录了一系列气候事件,验证了受亚洲夏季风影响的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 响应北半球太阳辐射变化,千年事件还受到海气过程的影响。确定了“7.2 ka事件”的起止及持续时间,丰富了多全新世气候事件的认识。发现了不稳定的“小冰期”,为准确认识小冰期降水的空间差异提供了新数据。洞穴沉积物中 $\delta^{13}\text{C}$ 可以记录亚洲夏季风的演变,反映了表层岩溶带水文条件的变化。 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 结合,反映了亚洲季风变化和区域水文条件的变化。

尽管这十几年来在雪玉洞群的监测和研究取得了诸多进展,但是依旧有许多问题还有待解决。

5.1 现代过程方面

现代降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 监测已经取得很大进展,但在不同时间尺度上如何区分降水信号来源,如单场降雨中水汽来源的影响以及在区域空间尺度上,不同洞穴对于全球变化响应的差异。

此外,多年的洞穴监测有助于理解石笋的沉积机制,解译洞穴石笋气候环境指标。但外界气候变

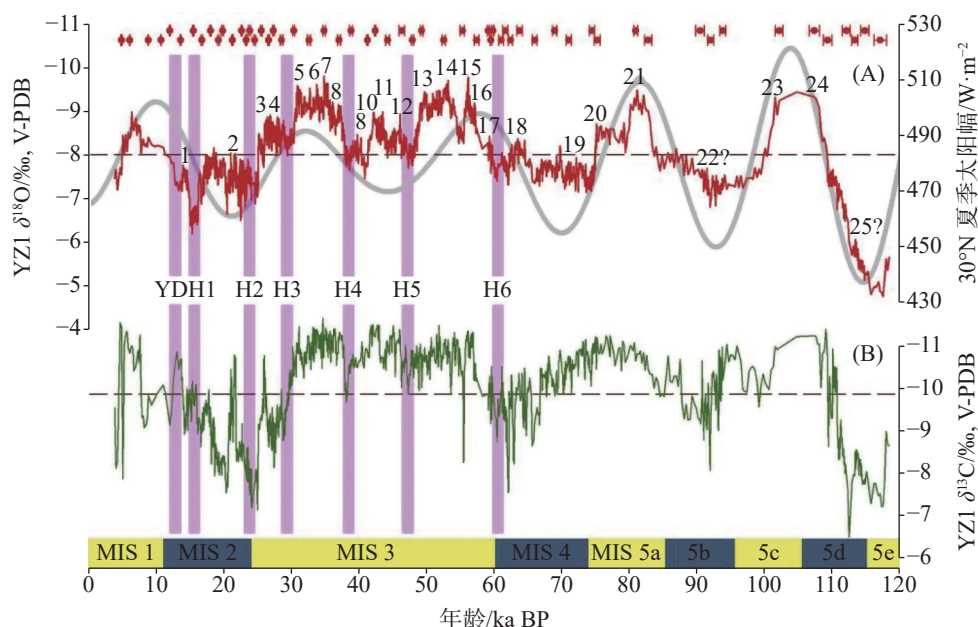


图7 116~3 ka B.P.期间羊子洞石笋 YZ1 的 $\delta^{18}\text{O}$ (A) 和 $\delta^{13}\text{C}$ (B) 变化图^[71]

红点为 U-Th 测年样品的深度和年龄, 误差条表示测年误差 ($\pm 2\sigma$)。虚线分别为 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值 (-8.0‰) 和 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值 (-9.9‰)。灰色曲线表示 30°N 的夏季太阳辐射。字母 YD、H 和阿拉伯数字分别表示 YD、Heinrich 事件和 D-O 事件。MIS 对应海洋同位素阶段 (Wu 等, 2020)。

Fig. 7 YZ1 stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ (A) and $\delta^{13}\text{C}$ (B) records; red dots are the depth and age of the U-Th dating samples, and the error bars indicate the dating error ($\pm 2\sigma$). The two dotted lines show the average values of $\delta^{18}\text{O}$ (-8.0‰) and $\delta^{13}\text{C}$ (-9.9‰), respectively. The gray curve shows the 30°N summer insolation. The pink vertical bars indicate YD and Heinrich events, the Arabic numbers indicate the D-O event. The yellow and cyan bands indicate Marine Isotope Stages (MIS) (Wu et al 2020, and references therein)^[71]

化、洞穴上覆土壤、植被变化对洞穴滴水 and 沉积物的影响, 仍需开展持续性的连续监测。如对雪玉洞的 CO_2 来源、迁移变化和影响因素都有较为详细的研究, 但不同滴水类型的指标差异, 如何影响洞穴次生沉积物沉积过程, 以及如何影响石笋指标的选择仍需要进一步的研究。

全球变暖背景下, 极端干旱和降雨事件发生的概率都将显著增加。现有的监测如 Mg/Ca 、 Sr/Ca 比值等如何响应极端干旱和降水, 过去的石笋极端事件的高分辨率重建和未来极端事件预测研究也有待进一步发展。

5.2 年代学方面

雪玉洞群的石笋非常适合铀系高精度测年, 但目前的年代数据大都集中在 120 ka B.P. 以来, 缺乏连续的记录, 尤其缺乏比较古老的石笋样品。考虑到三个不同层次的洞穴形成时间, 羊子洞石笋可能具有更大潜力。但是水鸣洞和雪玉洞的沉积速率明显更快, 在年际、百年际高分辨率记录上更有优势, 部分样品达到了 1a 际的高分辨率。然而长时间、高精度的连续性记录依旧是缺乏的。

5.3 古气候、古环境重建方面

目前的研究还主要是利用石笋代用指标进行古气候重建和区域对比分析, 如何结合附近的芙蓉洞、梁天洞、羊口洞等不同高程分布的各级岩溶洞穴, 构建区域古水文变化空间格局和地貌演化可能是未来的重要方向, 可以为恢复长江中游古水文、古气候重建提供重要的支撑。尤其是随着一些微生物指标的出现, 对于石笋形成环境的气温和降水的定量化重建有较大的研究潜力。

参考文献

- [1] CHENG Hai, EDWARDS R. Lawrence, SINHA Ashish, SPÖTL Christoph, YI Liang, CHEN Shitao, KELLY Megan, KATHAYAT Gayatri, WANG Xianfeng, LI Xianglei, KONG Xingcong, WANG Yongjin, NING Youfeng, ZHANG Haiwei. The Asian monsoon over the past 640, 000 years and ice age terminations[J]. Nature, 2016, 534(7609): 640-646.
 - [2] 张美良, 彭稳, 朱晓燕, 林玉石, 邹丽霞, 陈坤琨. 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.
- ZHANG Meiliang, PENG Wen, ZHU Xiaoyan, LIN Yushi, ZOU lixia, CHEN Kunkun. Study on the variation of physical-chemi-

- cal properties of dripping water in the Panlong Cave in Guilin and its significance[J]. *Earth and Environment*, 2009, 37(1): 1-10.
- [3] ZHOU Houyun, FENG Yuexing, ZHAO Jianxin, SHEN Chuanchou, YOU Chenfeng, LIN Yin. Deglacial variations of Sr and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio recorded by a stalagmite from Central China and their association with past climate and environment[J]. *Chemical Geology*, 2009, 268(3/4): 233-247.
- [4] YIN JianJun, TANG Wei, WANG Zhijun, PU Junbing, LAN Gaoyong, YANG Hui, WU Xia, LI Jianhong. Deciphering the hydroclimatic significance of dripwater $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ variations in monsoonal China based on modern cave monitoring[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126882.
- [5] 杨晓霞, 翁子凡, 向旭. 重庆武隆芙蓉洞灯光照明系统的优化研究[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(1): 131-138.
- YANG Xiaoxia, WENG Zifan, XIANG Xu. Optimization of the lighting system at the Furong cave in Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(1): 131-138.
- [6] 张美良, 朱晓燕, 吴夏, 张碧云, 潘谋成. 旅游活动对巴马水晶宫洞穴环境及碳酸钙沉积物景观的影响[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(1): 119-130.
- ZHANG Meiliang, ZHU Xiaoyan, WU Xia, ZHANG Biyun, PAN Moucheng. Impact of tourism activities on the cave environment and landscape of calcium carbonate (CaCO_3) deposits at Shuijingong cave, Bama county[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(1): 119-130.
- [7] 徐宏祖著. 褚绍唐, 吴应寿 整理. 徐霞客游记[M]. 上海: 上海古籍出版社, 1980, 182.
- XU Hongzu, CHU Shaotang, WU Yingshou. Travel notes of Xu Xiake[M]. Shanghai: Shanghai ancient books publishing house. 1980, 182.
- [8] 程海, 张海伟, 赵景耀, 李瀚瑛, 宁有丰, Gayatri. 中国石笋古气候研究的回顾与展望[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(10): 1565-1589.
- CHENG Hai, ZHANG Haiwei, ZHAO Jingyao, LI Hanying, NING Youfeng, KATHAYAT Gayatri. Review and prospect of palaeoclimatic studies on stalagmites in China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2019, 49(10): 1565-1589.
- [9] 朱学稳. 桂林岩溶地貌与洞穴研究[M]. 北京: 地质出版社. 1988: 96-131.
- Zhu Xuwen. Study on Karst geomorphology and caves in Guilin[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1988: 96-131.
- [10] 袁道先. 岩溶作用对环境变化的敏感性及其记录[J]. *科学通报*, 1995, 40(13): 1210-1213.
- YUAN daoxian. Sensitivity of karstification to environmental change and its record[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(13): 1210-1213.
- [11] 覃嘉铭. 古气候变化的石笋同位素记录研究: 以桂林盘龙洞为例[J]. *地球学报*, 1996, 18(3): 255-260.
- QIN Jiaming. Studies on Stalagmite Isotope Records of Paleoclimatic Changes[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1996, 18(3): 255-260.
- [12] 李平, 彭子成, 文启彬, 李玉成, 杨辉, 洪阿实, 许志峰, 王明亮, 业渝光, 和杰, 刁少波. 福建宁化天鹅洞石笋年代和古温度[J]. *沉积学报*, 1996, 14: 149-154.
- LI Ping, PENG Zicheng, WEN Qibin, LI Yucheng, YANG Hui, HONG Ashi, XU Zhifeng, WANG Mingliang, YE Yuguang, HE Jie, DIAO Shaobo. Stalagmite age and paleo-temperature in Swan Cave, Ninghua, Fujian Province[J]. *Acta sedimentologica sinica*, 1996, 14: 149-154.
- [13] 李红春, 顾德隆, 陈文寄, 袁道先, 李铁英. 高分辨率洞穴石笋中稳定同位素应用: 北京元大都建立后对森林资源的破坏— $\delta^{13}\text{C}$ 记录[J]. *地质论评*, 1998, 44: 456-462.
- LI Hongchun, GU Delong, CHEN Wenji, YUAN Daoxian, LI Tieying. Application of high-resolution carbon isotope record of a stalagmite from the Shihua Cave, Beijing— $\delta^{13}\text{C}$ record of deforestation after the establishment of the Grand Capital Beijing in 1272 [J]. *Geological Review*, 1998, 44: 456-462.
- [14] WANG Yongjin, CHENG Hai, EDWARDS R L, AN Zisheng, WU Jiangyin, SHEN Chuanchou, DORALE J A. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China[J]. *Science*, 2001, 294: 2345-2348.
- [15] YUAN Daoxian, CHENG Hai, EDWARDS Rawrence L, DYKOSKI Carolyn A, KELLY Megan J, ZHANG Meiliang, QING Jiaming, LIN Yushi, WANG Yongjin, WU Jiangyin, DORALE Jeffery A, AN Zisheng, CAI Yanjun. Timing, duration, and transitions of the Last Interglacial Asian Monsoon[J]. *Science*, 2004, 304: 575-578.
- [16] ZHANG Taotao, LI Tingyong, CHENG Hai, EDWARDS Lawrence, SHEN Chuanchou, SPÖTL Christoph, LI Hongchun, HAN Liyin, LI Junyun. Stalagmite-inferred centennial variability of the Asian summer monsoon in southwest China between 58 and 79 ka BP[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 160: 1-12.
- [17] DU Wenjing, CHENG Hai, XU Yao, YANG Xunlin, ZHANG Pingzhong, SHA Lijuan, LI Hanying, ZHU Xiaoyan, ZHANG Meiliang, STRÍKIS N M, CRUZ F W, EDWARDS R L, ZHANG Haiwei, NING Youfeng. Timing and structure of the weak Asian Monsoon event about 73000 years ago[J]. *Quaternary Geochronology*, 2019, 53: 101003.
- [18] WANG Yognjun, CHENG Hai, EDWARDS R L, KONG Xing-gong, SHAO Xiaohua, CHEN Shitao, WU Jiangying, JIANG Xiouyang, WANG Xianfeng, AN Zisheng. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224000 years[J]. *Nature*, 2008, 451: 1090-1093.
- [19] CAI Yanjun, TAN Liangcheng, CHENG Hai, AN Zisheng, EDWARDS Rawrence L, KELLY Megan J, KONG Xinggong, WANG Xianfeng. The variation of summer monsoon precipitation in central China since the last deglaciation[J]. *Earth Planetary Science Letter*, 2010, 291: 21-31.
- [20] YANG Xunlin, YANG Hong, WANG baoyan, HUANG Lijung,

- SHEN Chuanchou, EDWARDS Rawrence L, CHENG Hai. Early-Holocene monsoon instability and climatic optimum recorded by Chinese stalagmites[J]. *Holocene*, 2019, 29: 1059-1067.
- [21] TAN Ming, BAKER Andy, GENTY Dominique, SMITH Claire, ESPER Jan, CAI Binggui. Applications of stalagmite laminae to paleoclimate reconstructions: Comparison with dendrochronology/climatology[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25: 2103-2117.
- [22] YIN JianJun, TANG Wei, WU Xia, PU Junbing, ZHU Xiaoyan, WANG Zhijun, LAN Gaoyong, YANG Hui. Individual event, seasonal and interannual variations in $\delta^{18}\text{O}$ values of drip water in Maomaotou Big Cave, Guilin, South China, and their implications for palaeoclimatic reconstructions[J]. *Boreas*, 2020, 49: 769-782.
- [23] ZHANG Haiwei, CAI Yanjun, TAN Liangcheng, CHENG Hai, QIN Shijiang, AN Zisheng, EDWARDS R L, MA Le. Large variations of $\delta^{13}\text{C}$ values in stalagmites from southeastern China during historical times: Implications for anthropogenic deforestation[J]. *Boreas*, 2015, 44: 511-525.
- [24] 张美良, 朱晓燕, 林玉石, 田明中, 王华. 洞穴滴(流)水的沉积及溶—侵蚀作用:以桂林盘龙洞为例[J]. *中国岩溶*, 2007,26(4): 326-333.
- ZHANG Meiliang, ZHU Xiaoyan, LIN Yushi, TIAN Mingzhong, WANG Hua. Drip water deposits and erosion-dissolution process by drip water in karst cave—Taking the Panlong cave as an example[J]. *Carsologica Sinica*, 2007, 26(4): 326-333.
- [25] RUAN Jiaoyang, HU chaoyong. Seasonal variations and environmental controls on stalagmite calcite crystal growth in Heshang Cave, Central China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55: 3929-3935.
- [26] CAI Binggui, ZHU Jian, BAN Fengmei, TAN Ming. Intra-annual variation of the calcite deposition rate of drip water in Shihua Cave, Beijing, China and its implications for palaeoclimatic reconstructions[J]. *Boreas*, 2011, 40: 525-535.
- [27] LI Tingyong, LI Hongchun, Xiang Xiaojing, KUO Tz-shing, LI Junyun, ZHOU Fuli, CHEN Hongli, PENG Lingli. Transportation characteristics of $\delta^{13}\text{C}$ in the plants-soil-bedrock-cave system in Chongqing karst area[J]. *Science China:Earth Sciences*, 2012, 55(4): 685-694.
- [28] 曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘婵, 雷佳琪. 重庆雪玉洞洞穴滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义[J]. *环境科学*, 2018, 39(6): 2641-2650.
- ZENG Ze, JIANG Yongjun, LÜ Xianfu, ZENG Sibao, HU Liuchan, LEI Jiaqi. Spatial and temporal variation characteristics of drip water hydrogeochemistry in the Xueyu cave of Chongqing and its implications for environmental research[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(6): 2641-2650.
- [29] LI Tingyong, SHEN Chuanchou, Huang L J, JIANG X Y, YANG Xunlin, MII Horngsheng, LEE S-Y, LO Li. Stalagmite inferred variability of the Asian summer monsoon during the penultimate glacial-interglacial period[J]. *Climate of the Past*, 2014, 10(3): 1211-1219.
- [30] PU Junbing, WANG Aoyu, SHEN Licheng, YIN Jianjun, YUAN Daoxian, ZHAO Heping. 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.
- [31] 朱学稳, 张远海, 韩道山, 文汝平, 陈炳清. 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.
- ZHU Xuewen, ZHANG Yuanhai, HAN Daoshan, WEN Ruping, CHEN Bingqing. Cave characteristics and speleothems in Xueyu cave group, Fengdu, Chongqing city[J]. *Carsologica Sinica*, 2004, 23(2): 85-90.
- [32] 徐尚全, 殷建军, 杨平恒, 周小萍, 沈立成. 旅游活动对洞穴环境的影响及洞穴的自净能力研究:以重庆雪玉洞为例[J]. *热带地理*, 2012, 32(3): 286-292.
- XU Shangquan, YIN Jianjun, YANG Pingheng, ZHOU Xiaoping, SHEN Licheng. Impacts of tourism activities on cave environments and self-purification ability of the cave: a case study of Xueyu cave, Chongqing[J]. *Tropical geography*, 2012, 32(3): 286-292.
- [33] 黄倩. 旅游活动对喀斯特洞穴环境的影响及其保护研究:以丰都县雪玉洞为例[D]. 重庆:西南大学硕士学位论文, 2010.
- HUANG Qian. A study on the environmental impact and the protections of karst caves of tourism activities—taking Xueyu cave of Fengdu as a case study[D]. Chongqing:Master thesis of Southwest University, 2010.
- [34] WU Kunyu, SHEN Licheng, ZHANG Tingshan, XIAO Qiong, WANG Aoyu. Links between host rock, water, and speleothems of Xueyu Cave in Southwestern China: lithology, hydrochemistry, and carbonate geochemistry[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8(11): 8999-9013.
- [35] PU Junbing, WANG Aoyu, YIN Jianjun, SHEN Licheng, YUAN Daoxian. PCO_2 variations of cave air and cave water in a subtropical cave, SW China [J]. *Carbonates and Evaporites*, 2018, 33(3): 1-11.
- [36] 王翔宇, 蒲俊兵, 沈立成, 何阳. 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, 30(3): 272-277.
- WANG Aoyu, PU Junbing, SHEN Licheng, HE Yang. Natural and human factors of CO_2 concentration variations in Xueyu Cave, Chongqing[J]. *Tropical geography*, 2010, 30(3): 272-277.
- [37] BAKER Andy, GENTY D. Environmental pressures on conserving cave speleothems: effects of changing surface land use and increased cave tourism[J]. *Journal of Environmental Management*, 1998, 53(2): 165-175.
- [38] 张强, 周忠发, 陈全, 谢雅婷. 织金洞 CO_2 浓度空间分布与昼夜变化的规律及成因分析[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(26): 18-27.
- ZHANG Qiang, ZHOU Zhongfa, CHEN Quan, XIE Yating. Study on spatial distribution and diurnal variation and causes of

- carbon dioxide concentration in Zhijin cave environment[J]. *Science Technology and engineering*, 2016, 16(26): 18-27.
- [39] 宋林华, 韦小宁, 梁福源. 河北临城白云洞洞穴旅游对洞穴CO₂浓度及温度的影响[J]. *中国岩溶*, 2003, 22(3): 230-235.
- SONG Linhua, WEI Xiaolin, LIANG Fuyuan. Effect of speleotourism on the CO₂ content and temperature in Baiyun cave, Lincheng, Hebei[J]. *Carsologica Sinica*, 2003, 22(3): 230-235.
- [40] 蔡炳贵, 沈凛梅, 郑伟, 李克普, 白云志, 董春志. 本溪水洞洞穴空气CO₂浓度与温、湿度的空间分布和昼夜变化特征[J]. *中国岩溶*, 2009, 28(4): 348-354.
- CAI Binggui, SHEN Linmei, ZHENG Wei, LI Kepu, BAI Yunzhi, DONG Chunzhi. Spatial distribution and diurnal variation in CO₂ concentration, temperature and relative humidity of the cave air—a case study from Water cave, Benxi, Liaocheng, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2009, 28(4): 348-354.
- [41] 袁道先. 中国岩溶动力系统[M]. 地质出版社, 2002.
- YUAN Daoxian. Karst dynamic system in China[M]. Geological Publishing House, 2002.
- [42] 任坤, 沈立成, 袁道先, 王晓晓, 徐尚全. 2012-2013年重庆雪玉洞洞穴系统碳循环特征[J]. *地球科学:中国地质大学学报*, 2016, 8: 1424-1434.
- REN Kun, SHEN Licheng, YUAN Daoxian, WANG Xiaoxiao, XU Shangquan. Carbon cycle characteristics in karst cave system of Xueyu cave from 2012 to 2013[J]. *Earth Science:Journal of China University of Geosciences*, 2016, 8: 1424-1434.
- [43] FAIMON Jiří, LIČBINSKÁ Monika, ZAJÍČEK Petr. Relationship between carbon dioxide in Balcarka Cave and adjacent soils in the Moravian Karst region of the Czech Republic[J]. *International Journal of Speleology (Edizione Italiana)*, 2011, 41(1): 17-28.
- [44] 王晓晓, 殷建军, 徐尚全, 沈立成. 雪玉洞上覆土壤CO₂变化及对表层岩溶泉水化学特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 85-89.
- WANG Xiaoxiao, YIN Jianjun, XU Shangquan, SHEN Licheng. The variations of soil CO₂ and hydrochemistry of epikarst spring above Xueyu cave[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2): 85-89.
- [45] CAO Min, JIANG Yongjun, CHEN Yu, FAN Jiabin, HE Qiufang. Variations of soil CO₂ concentration and PCO₂ in a cave stream on different time scales in subtropical climatic regime[J]. *Catena*, 2020, 185: 104280.
- [46] LIU Zaihua, LI Qiang, SUN Hailong, WANG Jinliang. Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China: soil CO₂ and dilution effects[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 337(1-2): 207-223.
- [47] CUEZVA Soledad, FERNANDEZ-CORTES Angel, BENAVENTE D, SERRANO-ORTIZ Penelope, KOWALSKI A., SANCHEZ-MORAL S. Short-term CO₂(g) exchange between a shallow karstic cavity and the external atmosphere during summer: role of the surface soil layer[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(7): 1418-1427.
- [48] 杨晓霞, 子涛, 陈炳清, 向旭, 王晓晓. 重庆雪玉洞氡浓度变化特征及其危害防护[J]. *中国岩溶*, 2013, 32(4): 472-479.
- YANG Xiaoxiao, ZI Tao, CHEN Bingqing, XIANG Xu, WANG Xiaoxiao. Variation characteristics of the radon's concentration and protection to the harm in the Xueyu cave[J]. *Chongqing. Carsologica Sinica*, 2013, 32(4): 472-479.
- [49] CAO Min, LEI Jiaqi, HE Qiufang, ZENG Ze, LÜ Xianfu, JIANG Yongjun. Rainfall-driven and hydrologically-controlled variations in cave CO₂ sources and dynamics: Evidence from monitoring soil CO₂, stream flow and cave CO₂[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 595: 126060.
- [50] 王晓晓, 王凤康, 徐尚全. 暴雨过程中重庆雪玉洞地下河水文地球化学变化及碳汇量估算[J]. *西南大学学报:自然科学版*, 2013(12): 97-103.
- WANG Xiaoxiao, WANG Fengkang, XU Shangquan. Hydrochemical variations of groundwater during a rainstorm in Xueyu cave, Chongqing and the estimation of its carbon sink[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2013(12): 97-103.
- [51] CASTEEL Richard C., BANNER Jay L. Temperature-driven seasonal calcite growth and drip water trace element variations in a well-ventilated Texas cave: Implications for speleothem paleoclimate studies[J]. *Chemical Geology*, 2015, 392: 43-58.
- [52] 吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘. 旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响: 以重庆丰都两个洞穴为例[J]. *环境科学*, 2018, 39(5): 2389-2399.
- LÜ Xianfu, HE Qiufang, WANG Fengkang, ZHAO Ruiyi, ZHANG Hong. Impact of tourism on bacterial communities of karst underground river: a case study from two caves in Fengdu, Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(5): 2389-2399.
- [53] 蒲俊兵, 沈立成, 王翱宇, 贺秋芳, 袁文昊, 扈志勇, 陈炳清, 何洋. 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.
- PU Junbing, SHEN Licheng, WANG Aoyu, HE Qiufang, YUAN Wenhao, HU Zhiyong, Chen Bingqing, He Yang. Space-time variation of hydro-geochemistry index of the Xueyu cave system in Fengdu county, Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2009, 28(1): 49-54.
- [54] 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.
- WANG Xinzong, BAN Fengmei, PAN Genxing. Temporal and spatial variation of cave dripwater geochemistry in Shihua cave, Beijing, China[J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2): 258-264.
- [55] 谭明, 潘根兴, 秦小光, 滕永忠, 宋林华, 林玉石. 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.
- TAN Ming, PAN Genxing, WANG Xianfeng, QIN Xiaoguang, TENG Yongzhong, SONG Linhua, LIN Yushi. Stalagmites and environment —preliminary study on the formation of laminated

- stalagmites[J]. *Carsologica Sinica*, 1999, 18(3): 197-205.
- [56] FAIRCHILD Ian J, BORSATO Andrea, TOOTH Anna F, FRISIA Silvia, HAWKESWORTH Christopher J, HUANG Yiming, MCDERMOTT Frank, SPIRO B. 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.
- [57] MCDONALD Janece, DRYSDALE Russell, HILL David, CHISARI Robert, WONG Henri. 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.
- [58] HU Chaoyong, HENDERSON Gideon M, HUANG Junhua, CHEN Zhenghong, KATHLEEN Johnson. Report of a three-year monitoring programme at Heshang Cave, Central China[J]. *International Journal of Speleology*, 2008, 37(3): 143-151.
- [59] 林玉石, 张美良, 覃嘉铭. 洞穴石笋沉积速率研究中值得注意的几个问题[J]. *中国岩溶*, 2001, 20(2): 131-136.
- LIN Yushi, ZHANG Meiliang, QIN Jiaming. A study on the sedimentation rate of stalagmite in cave[J]. *Carsologica Sinica*, 2001, 20(2): 131-136.
- [60] 雷佳琪, 伍坤宇, 由超, 姜雪萌, 王鹏, 蒋勇军. 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.
- LEI Jiaqi, WU Kunyu, YOU Chao, JIANG Xuemeng, WANG Peng, JIANG Yongjun. Characteristics of sedimentary geology of parent rock at the Xueyudong Cave and its impact on secondary sediments[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(3): 296-305.
- [61] 刘肖. 重庆水鸣洞MIS9/8阶段高分辨率石笋记录的多指标研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- LIU Xiao. Multi-index study of MIS 9/8 stage high resolution stalagmite records in Shuimingdong, Chongqing[D]. Chongqing: Master thesis of Southwest University, 2016.
- [62] 鄢应燃, 刘睿恺, 杨勋林, 吕春艳, 张日萍, 张瑞. 东亚季风区最近1000a石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 空间变化特征及气候意义研究[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 46(4): 98-104.
- YAN Yingran, LIU Ruikai, YANG Xunlin, LV Chunyan, ZHANG Riping, ZHANG Rui. On spatial variation and its implications of stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ from east Asian monsoon region over the past 1000a[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 46(4): 98-104.
- [63] 王翱宇. 洞穴岩溶动力系统运行规律与环境信息保存的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- WANG Aoyu. Study on operation regularity and environmental information reservation of cave karst dynamic system—a case study of Xueyu cave[D]. Chongqing: Master thesis of Southwest University, 2010.
- [64] FENG Weimin, CASTEEL Richard, BANNER Jay, HEINZ-FRY Ayla. Oxygen isotope variations in rainfall, drip-water and speleothem calcite from a well-ventilated cave in Texas, USA: assessing a new speleothem temperature proxy[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 127: 233-250.
- [65] 黄春霞, 李廷勇, 韩立银, 李俊云, 袁娜, 王海波, 张涛涛, 赵鑫. 重庆芙蓉洞滴水现代次生化学沉积物沉积速率与元素特征[J]. *中国岩溶*, 2015, 34(3): 238-246.
- HUANG Chunxia, LI Tingyong, HAN Liyin, LI Junyun, YUAN Na, WANG Haibo, ZHANG Taotao, ZHAO Xin. Deposition rates and element features of active sediments under drip water in Furong cave of Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(3): 238-246.
- [66] SHERWIN Catherine M., BALDINI James UL. Cave air and hydrological controls on prior calcite precipitation and stalagmite growth rates: Implications for palaeoclimate reconstructions using speleothems[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(14): 3915-3929.
- [67] ZHANG Jian, LI Tingyong. Seasonal and interannual variations of hydrochemical characteristics and stable isotopic compositions of drip waters in Furong Cave, Southwest China based on 12 years' monitoring[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 572: 40-50.
- [68] LI Tingyong, WU Yao, SHEN Chuanchou, LI Junyun, CHANG Hongwei, LIN Ke, TAN Liangcheng, JIANG Xiuyang, CHENG Hai, EDWARDS Richard Lawrence. High precise dating on the variation of the Asian summer monsoon since 37 ka BP[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 9375.
- [69] 李廷勇. 重庆地区石笋古环境信息影响因素及末次冰期以来气候变化的初步研究[D]. 重庆: 西南大学.
- LI Tingyong. The controlling factors research on the paleoenvironmental informations in stalagmite and the paleoclimate reconstruction [D]. Chongqing: Dissertation of Southwest University, 2006.
- [70] 李辰丝, 杨勋林, 黄帆, 李国军, 吕春艳, 杨琰. 重庆羊子洞 MIS5a/MIS4转换时期石笋微量元素记录及其气候意义[J]. *沉积学报*, 2015, 33(2): 299-305.
- LI Chensi, YANG Xunlin, HUANG Fan, LI Guojun, LV Chunyan, YANG Yan. Stalagmite trace element and its implications from Yangzi Cave during 76~69 ka B. P[J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2015, 33(2): 299-305.
- [71] WU Yao, LI Tingyong, YU Tsai-Luen, SHEN Chuanchou, CHEN Chaojun, ZHANG Jian, LI Junyun, WANG Tao HUANG Ran, XIAO Siya. Variation of the Asian summer monsoon since the last glacialinterglacial recorded in a stalagmite from Southwest China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 234: 106261.
- [72] 何潇, 王建力, 李清, 李红春, 李廷勇, 程海. 重庆地区石笋沉积速率与古气候意义初探[J]. *中国岩溶*, 2007, 26(3): 196-201.
- HE Xiao, WANG Jianli, LI Qing, LI Hongchun, LI Tingyong, CHENG Hai. Growth rate and the paleoclimatic significance of stalagmites in Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2007, 26(3): 196-201.
- [73] 林玉石, 杨琰, 张美良, 覃嘉铭, 舒丽, 程海, 冉景丞, 康志强. 三论洞穴石笋沉积速率: 以衙门洞一号石笋为例[J]. *西北地质*, 2011, 44(1): 144-152.

- LIN Yushi, YANG Yan, ZHANG Meiliang, QIN Jiaming, SHU Li, CHENG Hai, RAN JingCheng, KANG Zhiqiang. On the growth rate of cave stalagmite for the third time—case study of No. 1 stalagmite in Yamendong[J]. *Northwestern Geology*, 2011, 44(1): 144-152.
- [74] FENG Xiangxiang, YANG Yang, CHENG Hai Cheng, ZHAO Jingyao, KONG Xinggong, ZHANG Ping, HE Zhili, SHI Xiao, Edwards R Lawrence. The 7.2 ka climate event: Evidence from high-resolution stable isotopes and trace element records of stalagmite in Shuiming Cave, Chongqing, China[J]. *The Holocene*, 2020, 30(1): 145-154.
- [75] 邵晓华, 汪永进, 孔兴功. 南京葫芦洞石笋生长速率及其气候义讨论[J]. *地理科学*. 2003, 23(3): 304-309.
- SHAO Xiaohua, WANG Yongjin, KONG Xinggong, WU Jiangying. Approach to the growth rate and the climatic significance of stalagmites in Hulu Cave, Nanjing[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(3): 304-309.
- [76] WANG Yongjin, WU Jiangying, LIU Dianbing, WU Jinquan, CAI Yanjun, CHENG Hai. A quick cooling event of the east asian monsoon responding to Heinrich event 1: evidence from stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records[J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 2002, 45(1): 88.
- [77] MA Zhibang, LI Hongchun, XIA Ming, KU Tehlung, PENG Zicheng, CHEN Yushu, ZHANG Zhaofeng. Paleotemperature changes over the past 3000 years in eastern Beijing, China: A reconstruction based on Mg/Sr records in a stalagmite[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(4): 395-400.
- [78] YANG Xunlin, ZHANG Pingzhong, CHEN Fahu, HUH Chih-an, LI Hong chun, CHENG Hai, KATHLEEN R. Johnson, LIU Jinghua, AN Chunlei. Modern stalagmite oxygen isotopic composition and its implications of climatic change from a high-elevation cave in the eastern Qinghai-Tibet Plateau over the past 50 years[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52: 1238-1247.
- [79] 张键, 李廷勇. “雨量效应”与“环流效应”: 近1 ka亚澳季风区石笋和大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的气候意义[J]. *第四纪研究*, 2018, 38(6): 1532-1544.
- ZHANG Jian, LI Tingyong. 'Amount effect' vs. 'Circulation effect': The climate significance of precipitation and stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ in the Asian-Australian monsoon region over the past 1 ka[J]. *Quaternary Sciences*, 2018, 38(6): 1532-1544.
- [80] 张月明, 杨勋林, 黄帆, 程海, 杨琰, 吕春艳, 李辰丝. 重庆丰都高分辨率石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与AD 1250-1750a季风气候变化[J]. *西南大学学报:自然科学版*, 2013(3): 117-123.
- ZHANG Yueming, YANG Xunlin, HUANG Fan, CHENG Hai, YANG Yan, LÜ Chunyan, LI Chensi. A high-resolution stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ record from Shuiming cave over the past 500 years[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2013(3): 117-123.
- [81] 杨勋林, 陈发虎, 袁道先, 程海, 张月明, 黄帆. 高分辨率石笋记录的三峡库区小冰期气候变化[J]. *地理科学*, 2013, 33(5): 629-634.
- YANG Xunlin, CHEN Fahu, YUAN Daoxian, CHENG Hai, ZHANG Yueming, HUANG Fan. Climate change during little ice age with high-resolution stalagmite record in the Three-gorges reservoir area[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(5): 629-634.
- [82] 梁沙. 重庆羊子洞116~69ka BP高分辨率石笋记录的多指标研究. 重庆: 西南大学[D]. 2018.
- LIANG Sha. Research on multi-proxies, high-resolution stalagmite records during 116~69ka BP from Yangzi cave, Chongqing, China[D]. Chongqing: Master thesis of Southwest University, 2018.
- [83] XIAO Shiya, YANG Yan, CHENG Hai, ZHAO Jingyao, LI Tingyong, Lei Lidan, Liang sha, Feng xiangxiang, Edwards R. Lawrence. Influences on Asian summer monsoon during Dansgaard-Oeschger events 19 to 25 (70–115 kyr B. P.) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 587: 110798.

Review and prospect of modern monitoring and paleoclimate research in Xueyu cave group, Fengdu, Chongqing

CAO Min¹, JIANG Yongjun², HE Qiufang², YIN Jianjun³, YANG Yan², LI Tingyong⁴

(1. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650500, China; 2. School of Geographical Sciences, Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China; 4. Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographical Processes and Environmental Changes, Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract Karst caves are well developed due to karstification in carbonate reservoirs. Speleothems in the caves are of great significance to evaluate the evolutionary history of past climate and environment as speleothems record all climatic and environmental information when they were formed. A comprehensive link between paleoclimate change and modern climate based on detailed monitoring, precise chronology and high-resolution records is essential to explore the correlation and interaction between climate and the earth system in the geological history. Here, we review

a series of modern monitoring and stalagmite-based Asian Summer Monsoon (ASM) records spanning the past 120 thousand years (ka B.P.) from Xueyu cave group, southwestern China. The Xueyu cave group includes Yangzi cave, Xueyu cave, and Shuiming cave, Xueyu cave is also a famous show cave. The three caves are all located in the Triassic limestone strata on the left bank of the Dragon river, which is the tributary of the Yangzi river, Fengdu, Chongqing. The overlying vadose zone is thick, and the elevations of the three caves are 10-100 m above the level of the Dragon river. Yangzi cave, Xueyu cave and Shuiming cave are respectively located at high-, middle- and low-elevation. These caves from different altitudes are excellent for modern monitoring and paleoclimate reconstruction. Since 2008, regular modern process monitoring has been carried out in the Xueyu cave to observe the transmission, transformation, and recording process of climate and environmental information. External air, overlying vegetation and soil, rock, precipitation, cave atmosphere (temperature, humidity, CO_2 , etc.), hydrochemical properties of the subterranean river, drip water, and cave deposits are monitored to understand the detailed mechanisms connecting cave environmental variables and properties of cave deposits. A monitoring program conducted from 2009 to 2016 recorded the characterization of external air temperature, precipitation, and the subterranean water temperature and PCO_2 dynamics in the cave. Monthly measurements of cave air CO_2 in the Xueyu cave show regular seasonal variations. High-resolution monitoring of cave air CO_2 revealed the effects of rainfall events and tourist activities. Precipitation is one of the main factors responsible for transferring the CO_2 signal from the soil to the cave. On a short time scale, PCO_2 is significantly affected by tourist activities, but the magnitude is far less than that caused by seasonal or rainstorm-driven variation. Cave drip-water flow can be classified into two types-'fast flow' and 'slow flow', which reflects climatic events in different ways and may result in distinct speleothem paleoclimate records. Variations in drip water chemistry (Mg/Ca, and Sr/Ca) indicate that the Prior Calcite Precipitation (PCP) may occur when drip rates are slow. Only the 'slow flow' could reflect wet-dry variations as the drip rate variability can provide the primary control on trace element variations that are finally trapped in speleothems. The deposition rates are relatively high in winter, which could reach up to $0.33 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$. The isotopic and chemical variability observed in Xueyu cave drip waters also support previous interpretations of speleothem records from Yangzi cave and Shuiming cave where a series of stalagmite proxies is published. The stalagmite records of the Shuiming cave and Yangzi cave indicate that the stalagmites in this area have fast depositional rates. From 120 ka B.P. to 3 ka B.P., the variation of $\delta^{18}\text{O}$ is basically consistent with the change curve of solar radiation at 65°N . The resolution of the dating in some periods was 269a, while the time resolution of isotopic composition is close to 88a, which successfully records some abrupt climate events at the scale of hundreds of or thousands of years, such as the Heinrich event, the 7.2 ka event, and the Little Ice Age. $\delta^{13}\text{C}$ records of the stalagmite confirmed that the "7.2 ka event" started from 7.29 ± 0.03 ka B.P. and its summit was 7.1 ± 0.04 ka B.P. and the main drought period sustained about 50a. During the Little Ice Age, especially from 1,400-1,650 AD, $\delta^{18}\text{O}$ records of stalagmites showed severe fluctuation, which indicated Asian summer precipitation was also in the fluctuating period. To sum up, the comprehensive comparison of paleoclimate changes based on accurate chronology and high-resolution records has good research potential in the Xueyu cave group.

Key words modern process, cave air CO_2 , stalagmites, paleoclimate, Xueyu cave group

(编辑 张玲 杨杨)