

刘子琦,熊康宁,吕小溪,等.喀斯特洞穴滴水信息对地表环境响应研究进展[J].中国岩溶,2015,34(1):43—51.
DOI:10.11932/karst20150106

喀斯特洞穴滴水信息对地表环境响应研究进展

刘子琦^{1,2},熊康宁^{2,3},吕小溪^{2,3},张乾柱^{2,3},付超凡^{2,3}

(1. 西南大学地理科学学院,重庆 400715;2. 贵州师范大学中国南方喀斯特研究院,贵州 贵阳 550001;

3. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心,贵州 贵阳 550001)

摘要:通过系统回顾国内外喀斯特洞穴滴水信息对地表环境响应的研究进展,结合全球气候变化、喀斯特环境演变与滴水理化指标的研究发展背景,把该领域的研究发展历程划分为萌芽期、缓慢发展期和高速增长期3个阶段。对滴水常规监测指标、稳定同位素及常/微量元素等指标的研究成果与认识进行了系统归纳,并对滴水响应外界大气、地表植被、洞穴上覆土壤以及洞顶基岩等4方面的研究进展进行总结。认为应当探究滴水的物质来源及其水文地球化学过程,加强对滴水信息环境指示的敏感性研究,深入认识滴水信息的环境响应机制,对洞穴系统综合环境要素开展监测等,同时指出运用滴水指标进行石漠化的相关研究比较薄弱,是未来研究的重点所在。

关键词:洞穴滴水;石漠化;环境;响应;进展

中图分类号:P641.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001—4810(2015)01—0043—09

喀斯特地区是如黄土、沙漠边缘等生态环境一样脆弱的地区^[1],喀斯特地表环境的研究对当地经济和社会的发展有指导作用。喀斯特地区环境变化作为全球环境变化条件下区域环境演变的一种特殊形式,需要深入了解其发展、演化过程。然而,现阶段对喀斯特地区地表环境的研究手段主要集中于地表监测(植被、土壤等),对于具有独特二元地质结构的喀斯特地区,从地下进行探究能否实现对地表环境变化的监测成为难题。自 O'Neil 等人^[2-3]首次提出用洞穴碳酸盐及其氧同位素重建古气候的方法后,近年来全球环境变化领域对古气候古环境载体的研究工作启发了相关学者利用洞穴系统来解译喀斯特地区地表环境信息。洞穴沉积物记录了地表气候与环境的演变过程,国内外学者在这方面取得很多研究成果^[4-13]。洞穴滴水研究是利用洞穴次生沉积物进行古气候古环境反演的前提^[14-18],且洞穴次生沉积物的直接物质来源是洞穴滴水,其中蕴藏的丰富的环境信息为上述问题的解决提供了可能。然而滴水记录

地表信息的机制如何?其敏感性怎样?另外,如果滴水能准确响应地表环境变化,那么地表石漠化治理后的环境变化如何表现在洞穴滴水中?这些问题都有待研究。本文对国内外滴水信息响应地表环境的研究现状与标志性成果进行了系统总结,探讨了滴水相关指标对地表环境的响应机制,提出了该领域在国内外研究中亟待解决的关键问题,并对其未来的研究发展作出了展望,以期有效利用滴水信息解译洞穴次生沉积物的古气候古环境演变,从而为喀斯特地区地表环境的监测尤其是石漠化环境监测提供科学依据。

1 文献获取与年度分布

以中国知网全文数据库、CALIS 文献检索系统、外刊资源服务系统、Spinger Link 及 EBSCO 学术资源检索平台为基础,首先在中国知网全文数据库中以检索项“篇名或关键词”和检索词“洞穴滴水”进行初次检索,在此结果中再分别以“环境”、“指标”等检索

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划重大课题“喀斯特高原峡谷石漠化综合治理技术与示范”(2011BAC 09B01);西南大学基本科研业务费专项资金项目“洞穴滴水元素时空变化特征及其石漠化效应”(XDJK2013C091)

第一作者简介:刘子琦(1979—),女,讲师,博士,主要研究方向是喀斯特地貌演化、石漠化治理及古环境重建。E-mail: michelle-lily@163.com。

通讯作者:熊康宁(1958—),男,贵州威宁人,教授,博士生导师,研究方向为喀斯特与洞穴、资源与环境、石漠化生态治理。E-mail: xiongkn@163.com。

收稿日期:2014—07—14

词进行二次检索,检索截止时间为 2014 年 11 月 11 日 21:30,检索时间范围为中国知网检索的最大时间范围,文献范围为全部期刊、硕士毕业论文、博士毕业论文、会议论文和摘要等 5 项。其次,在 4 个外文检索网站中分别以“cave”、“drips”和“drip water”为检索词进行检索。最后对检索到的上述中英文文献按照“滴水信息对地表环境响应”的研究目的分别加以人工甄别和筛选。共获取文献 313 篇,其中,中文期刊文献 87 篇、会议摘要 7 篇、外文文献 189 篇,硕士与博士毕业论文分别为 20、10 篇。

从文献时间分布看,喀斯特洞穴滴水信息环境响

应的研究可以上溯到 20 世纪 90 年代初,至今仅有 20 余年的研究历程,笔者依据这期间全球气候变化、喀斯特环境演变与洞穴滴水理化指标的研究发展背景,把洞穴滴水环境响应的研究划分为 3 个阶段(图 1、表 1):其中,20 世纪 90 年代初为萌芽期,1995 年以前文献数量不多,每年仅有 1 或 0 篇;20 世纪 90 年代中后期至 21 世纪初为缓慢发展期,每一年都有至少 1 篇文献发表,但最多不超过 7 篇;2004 年至今为高速增长期,每一年均有若干文献发表(其中有 10 年文献显示在 15 篇以上)。

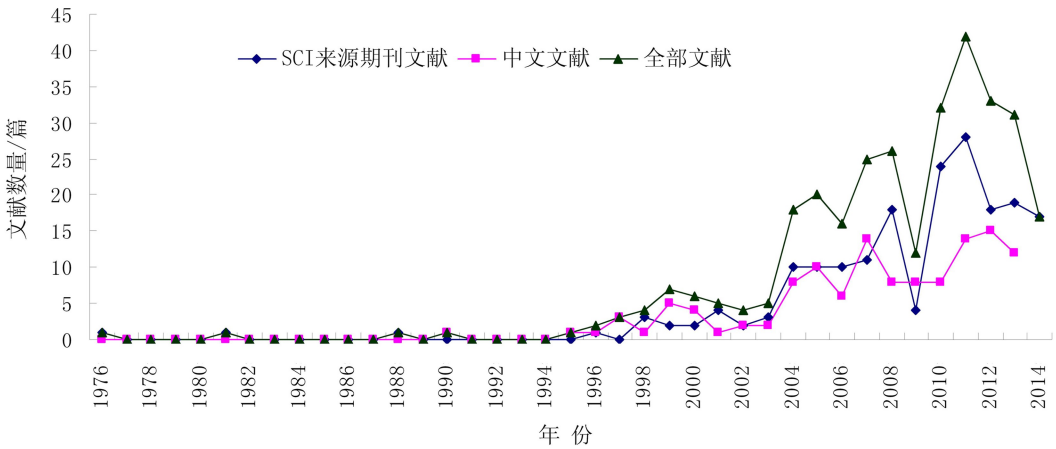


图 1 国内外研究文献时间分布

Fig. 1 Time distribution for domestic and overseas literature

表 1 滴水信息环境响应研究阶段划分

Table 1 Research stages of the response of information of karst cave drip water to ground conditions

研究阶段	主要特征	发展背景
萌芽期 (20 世纪 90 年代)	相关研究文献极少,仅有若干篇文献在论述滴水作用对洞穴沉积物影响的同时简单提到了滴水信息可以反映地表环境状况,之后有较长时间的间断	该阶段研究重点偏于喀斯特洞穴环境成因及演化机理,而利用洞穴沉积物(主要是石笋)来探讨古气候变化处于起步阶段
缓慢发展期 (20 世纪 90 年代中后期—21 世纪初)	每年都有少量文献发表,但均不超过 7 篇;文献研究内容以利用洞穴石笋稳定同位素探究古气候变化为重点,同时涉及到部分滴水理化指标来反映外界大气变化,20 世纪末该方法延伸到喀斯特地表环境演变研究领域,并有若干文献专门论述滴水对地表环境的响应特征	利用洞穴沉积物稳定同位素指标来反映古气候变化成为喀斯特洞穴系统与全球变化的研究重点,中国南方喀斯特地区成为其重点研究区域;滴水指标开始作为洞穴沉积物气候指示研究的辅助手段,滴水信息对地表环境的指示作用在一定程度上已受到喀斯特地理环境和全球变化相关学者的关注
高速增长期 (2004 年至今)	2004 至 2014 年的 11 年间每年均有多篇文献发表,并且有 10 年显示文献数量大于或等于 15 篇,大部分文献类型属于“案例研究”或“案例+理论”,纯理论研究极少;滴水传感技术开始得到研究并应用到滴水监测实践中;滴水监测指标体系初步建立,除了稳定同位素外,还扩展到常、微量元素及其比值、溶解有机碳三维荧光光谱和脂肪酸等指标;利用洞穴沉积物和滴水信息探讨地表石漠化的研究开始出现,并将逐步成为最新热点	滴水对地表环境的响应研究成为地理学、地质学、环境学等领域的研究热点,并涉及到生物学、信息技术等领域;洞穴滴水指标在对喀斯特地表环境演变的研究过程中得到迅速发掘和探究,对地表石漠化环境发生演变研究成为这一阶段的亮点

2 主要研究进展与标志性成果

2.1 滴水基础理论

2.1.1 滴水形成过程及分类

滴水主要源于大气降水(部分来源于土壤水)^[19],大气降水落至地表后在土壤中以包气带水的形式渗入岩层中,然后以分散渗流的形式沿岩层中的毛细孔隙及岩层裂隙渗入洞穴体系在洞顶岩板上形成渗流滴水。滴水在其形成过程中分别经历了大气—植被—土壤—基岩四种不同环境,在每个过程中均携带了一定的环境信息^[20-21]。经过CO₂逸出和物质沉积等过程成为洞穴沉积物的主要物质来源。受大气环境尤其是降雨、上覆植被、土壤等因素的控制,渗流路径与补给水量的影响,不同滴水的持续时间有所差异,滴水常表现出常年型、季节型和暴雨型三种类型^[22-23]。常年型滴水通常受降雨的影响小,对常年型滴水的监测可以揭示半年、年际的地表生态类型演变;季节性滴水对外界降雨能产生较快响应,滴水速率变化大,在旱季滴水停止,而降雨后滴速很快或出现连续滴水;暴雨滴水基本能保持雨水的原有特性,主要由暴雨通过岩石裂隙直接流入洞穴体系中,产生快速渗流水或较大的渗流滴水,其滴水的电导率、pH值等指标特征与外界降水和坡面流水的物化特征基本一致。滴水监测可以揭示出大气降雨强度、物化特征、侵蚀强度等^[22],其对喀斯特地区表层带的

调蓄能力及地表环境演化尤其是石漠化的研究有显著意义。

2.1.2 滴水对地表环境的响应

洞穴沉积物是滴水携带外界物质经历降雨—溶解—沉积3个阶段后形成的(图2)^[24],滴水继承了喀斯特水所带来的地表气候与植被土壤环境等信息,地表植被是气候与环境信息在滴水直至洞穴化学沉积物中记录的主要输入端,在一定程度上滴水中碳同位素的变化能直接响应地表植被类型(C₃、C₄植物等)^[21]。但洞穴岩板厚度、基岩空隙及裂隙发育程度、流水通道连通性、水滞留时间和基岩岩性的差异对外界气候与环境信息会有一定程度的掩盖^[25]。喀斯特石漠化是在喀斯特脆弱生态环境下,人类不合理的社会经济活动,造成人地矛盾突出,植被破坏,水土流失,岩石逐渐裸露,土地生产力衰退丧失,地表在视觉上呈现类似于荒漠景观的演变过程^[26],石漠化发育情况受降雨、温度、大气成分、土壤状况与植被条件等控制,其地表植被、土被情况与其他地区有很大差异,表现在植被覆盖度、生物量、土壤理化性质、土壤微生物活性等多个方面。地表环境变化必然会影响到洞穴水系统的改变,石漠化属于地表环境变化的一部分,滴水同样会记录石漠化地区环境的演变信息。石漠化地区洞穴滴水各指标的监测研究是了解地表石漠化的重要手段,其对石漠化等级评价及石漠化治理效益评价均具有重大现实意义。

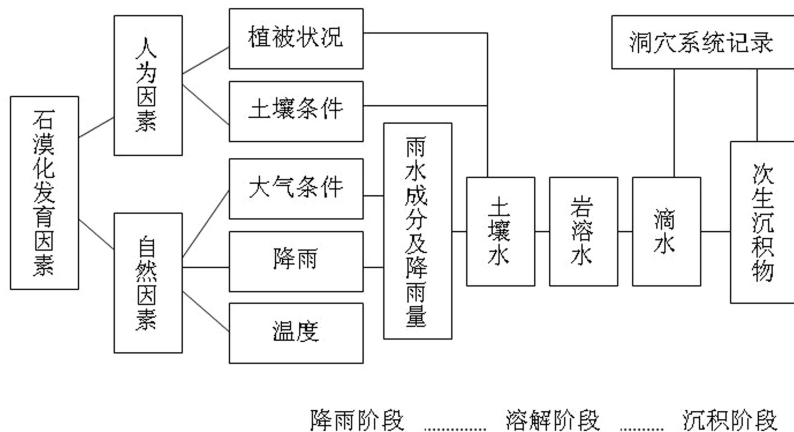


图2 石漠化成因与洞穴记录耦合机制

Fig. 2 Coupling mechanism between the genesis of karst rocky desertification and cave records

2.2 滴水环境替代指标

滴水携带的环境信息主要体现为滴水中各种物质对地表环境演变的响应特征,这些物质由于具备环境指示作用而被称作环境指标,包括常规监测指标、稳定同位素指标、常/微量元素等(表2)。其中,常规监测指标可以体现洞穴滴水基本的物理与化学性质,滴水的不稳定性决定了采样过程中必须首先监测常

规指标;稳定同位素指标在反映洞穴外界大气环境和地表植被情况的研究中占据重要地位,在利用石笋等洞穴沉积物反演古气候方面应用很广泛,现代滴水同位素为探讨石笋沉积过程中的同位素分馏情况提供了帮助;常/微量元素等指标是在滴水研究进入缓慢发展阶段后逐步受到研究人员重视的指标类型,主要集中在对Mg²⁺、Sr²⁺、Ca²⁺、HCO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、

Mg/Sr、Mg/Ca 等的分析,这些元素来源于上覆土壤、洞穴基岩与喀斯特水的相互作用;近些年来,有学者利用示踪剂(NaCl 、 SO_4^{2-})来探究洞穴滴水对大气降雨的响应速度与程度,同时也出现了诸如滴水中溶解有机碳、脂肪酸及滴水荧光效应等新指标,进一步丰富了滴水环境指标的种类。

表 2 滴水环境指标

Table 2 Environmental indicators of drip water

类 型	指 标
常规监测指标	滴率、滴量、电导率(EC)、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 等
稳定同位素	$\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 δD 等
常/微量元素	Mg、Sr、Ca、Ba、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、Mg/Sr、Mg/Ca 等
其他指标	溶解有机碳、脂肪酸等

2.2.1 常规监测指标

滴水常规监测指标包括滴率、滴量、电导率(EC)、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 等。前人通过洞穴监测和实验分析发现洞穴滴水的滴率、电导率、pH 等指标与地表环境有较好的相关性。张美良等在监测桂林盘龙洞的滴水点时发现滴水的电导率与 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 的变化趋势一致,滴量和滴率等的不稳定性主要受降温和生物活动的影响,而 pH 与电导率等的变化趋势则相反^[23]。周运超在对滴水电导率测定后发现其与大气降雨变化保持一致,体现出洞穴次生沉积物的元素含量可以记录喀斯特环境过去的变化^[27],另外,其在考察贵州犀牛洞滴水元素含量与滴率间关系时发现滴率较小的滴水点元素含量较高,表明水运移过程中水—土、水—岩作用差异能影响滴水化学组成^[28],得出与盘龙洞滴水指标一致的结论。值得注意的是,滴量小而稳定的滴水所形成的石笋沉积物能较好地反映过去长时间尺度的气候变化信息,滴量较大的滴水往往是季节性滴水,其运移路径以及滴水点的高度变化都可能会造成沉积间断而使部分年份信息缺失^[29]。张乾柱等通过分析贵州石将军洞滴水 pH 值空间和时间变化规律初步探索了其石漠化效应,发现强度石漠化地区地表植被破坏严重、土层稀薄,水分在洞穴上覆顶板中的赋存主要通过基岩来完成,基岩越厚,滴水滴率、pH 值和温度变化率越小,从而体现出靠洞口越近受外界影响越强烈、变幅越大的特征;同时,由于石漠化地区土壤中可利用的 CO_2 少,滴水 pH 值则呈现出雨季值较高而旱季值却低的反常特征^[30],其规律与无石漠化地区的盘龙洞和犀牛洞滴水指标相反,表明石漠化地区滴水可能存在有与其他地区不

一致的指标现象,需要在这方面加强监测和研究。

2.2.2 稳定同位素

滴水稳定同位素指标的研究源于用石笋反演古气候的探索中对氧同位素的研究,对滴水氧同位素的探究有助于了解石笋在沉积过程中同位素的分馏情况。影响洞内滴水氧同位素组成的主要因素有年平均气温、年降水量以及降水气团来源的变化^[31-33]。滴水在没有“老水”影响下其氧同位素能灵敏反映地表水同位素的变化^[34],然而由于“暴雨效应”的干扰存在,滴水中 δD 及 $\delta^{18}\text{O}$ 值会与多年降水平均值有大幅度偏差,因此这种滴水形成的石笋记录能示踪过去洪水灾害的发生及其强度^[35]。李彬等对广西盘龙洞滴水氧碳同位素的研究发现滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 与同期降雨的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相关性很好^[36],张平中对甘肃万象洞滴水的研究也表明滴水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 与当地的降水有密切的成因联系,它反映了当地降水的同位素组成^[37],然而并非所有滴水点的同位素都可以反映降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的加权平均值,如季节型滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 值就有很大幅度的季节变化,其水样并不能获得地表水的年平均值^[38]。

滴水稳定同位素中另外一种研究较多的是碳同位素。滴水稳定碳同位素主要来自植物根部呼吸以及土壤有机质分解产生的 CO_2 ,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值基本上是对植物体 $\delta^{13}\text{C}$ 的继承。理论上滴水碳同位素通过长期监测可以反映地表植被状况,对于石漠化地区人为破坏所导致的植被更替,也可以在短时间内反映出来, $\delta^{13}\text{C}$ 在一定条件下可以作为环境替代指标^[36]。洞穴沉积物中 $\delta^{13}\text{C}$ 主要来源于土壤,植被及大气对其也有很大贡献^[39],李廷勇对重庆芙蓉洞洞穴系统中的 $\delta^{13}\text{C}$ 研究发现, $\delta^{13}\text{C}$ 在植物—土壤—滴水不同过程的运移中存在大致 11% 的逐级富集效应^[40],另外,地貌类型不同,滴水 $\delta^{13}\text{C}$ 值也有所差异^[41]。

近些年来,对滴水锶同位素的研究开始崭露头角,有学者发现滴水中锶元素有不同来源,土壤层的锶元素可以反映地表生态环境状况,而土壤下覆岩层中的锶元素则反映成岩过程。基于锶同位素的稳定性特征(放射性成因的 ^{87}Sr 与非放射性成因的 ^{86}Sr 在自然物质中一般不因外界过程而发生分馏),通过 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素技术可较好地区分不同物质来源^[42]。另外,朱小龙等对贵州七星洞洞穴系统中锶同位素也进行了系统研究,指出滴水及其对应沉积物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化与土壤及基岩物质相对贡献的变化密切相关^[43],证明滴水锶同位素受到多种地表环境因素的影响,如果可以适当排除一些限制性因素确实可以用来指示一定的环境信息。

2.2.3 常/微量元素

洞穴沉积物的元素主要来源于喀斯特水下渗过程中引起的上覆土壤及基岩的淋溶过程,不同成分元

素的特征取决于土壤及基岩中的元素特征,同时受元素迁移过程的控制,谭明通过土壤淋溶模拟实验指出,干湿交替明显的气候条件下,土壤中的碳酸盐结合态 Mg 含量较高,雨季初期会形成 Mg^{2+} 的“再生峰”,而随着降雨减少,不同滴水点 Mg^{2+} 信号则会表现出不同的持续时间^[44]。滴水 Mg^{2+} 源于雨水对土壤和基岩的溶解和淋滤,其 Mg^{2+} 含量除了取决于土壤与基岩的组成和性质外,还与水运移过程、溶解基岩能力、水-岩反应时间等因素有关^[45]。滴水 Ca^{2+} 主要来自上覆碳酸盐岩层溶解,溶解生成的 Ca^{2+} 含量取决于降雨携带的土壤 CO_2 ,土壤生物来源 CO_2 含量的季节性变化也会影响滴水 Ca^{2+} 含量^[46-50]。滴水 SO_4^{2-} 多源于土壤石膏的溶解,其淋溶通常伴随着 Ca^{2+} 浓度的增加^[51-52],其浓度可以指示滴水点对大气降雨的响应,一般滴水点滴水 SO_4^{2-} 浓度在长期监测期间有明显增加趋势,而对降雨无响应的滴水点,其 SO_4^{2-} 浓度低且雨季变化不明显^[53]。张美良等通过对桂林盘龙洞 2 个水文年的洞穴滴水动态监测分析发现,滴水 pCO_2 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 含量等具有基本相同的峰、谷变化趋势,其季节性变化特征明显,说明大气降水、土壤 CO_2 及渗流水的水运移过程、溶解基岩能力以及水-岩反应的滞留时间等是影响滴水指标的主要因素^[23]。周运超等人针对洞穴滴水在形成过程中由于水-土、水-岩作用所带来的阴阳离子浓度变化做了系统性研究,揭示了滴水的物质来源及水文地球化学过程^[54-55],认为对滴水的物质来源及其水文地球化学过程的探究,是研究滴水环境指示意义的基础和前提。

每个水文年雨季初期的滴水通常含有通过较短裂隙通道输出的保留了本季节雨水性质和岩层中“活塞效应”形成的“老水”,这是影响古气候环境研究过程中对次生沉积物高分辨率解译的一个重要因素^[56-58]。在研究滴水碳氧同位素指标的基础上配以其常/微量元素能更好反映地表生态环境。Fairchild 等对滴水中微量元素研究时发现滴水中 Mg/Ca 比值变化主要受水岩接触时间长短的影响,水分滞留时间长的干旱季节由于 CaCO_3 在水流到达洞穴前提前沉积导致滴水中 Mg/Ca 比值升高^[59]。王新中发现石花洞滴水中 Mg/Ca 比值存在明显的季节变化^[60],与大气降雨相比,受土壤和基岩淋溶作用,滴水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子有大幅度升高^[45]。滴水 Mg^{2+} 和 Mg/Ca 还可以反映温度的变化与较大的降雨事件^[32,61]。在一定条件限制下,常/微量元素比值可以反映气候极端事件的发生^[62]。除了常见的 Ca、Mg、Sr 外,一些学者开始把目光转向洞穴喀斯特生态系统中的 Ba 元素和 P 元素^[63-64],洞穴滴水的环境替代

指标需要不断去发掘,这样有利于滴水指标体系在不断发展中完善。

2.2.4 其他

滴水环境响应研究进行到高速发展时期后,除上述指标外,滴水环境指标体系又得到了进一步丰富。滴水有机质的荧光物质在 Baker 等人^[65]证明荧光物质的主要来源是土壤后,又有人分别对滴水有机质荧光强度和季节的关系做了系统研究^[66-69];NaCl 示踪的方法开始运用到分析滴水对大气降雨响应程度层面^[27-28];近些年有人基于对滴水对大气降雨的响应机制研究发现 SO_4^{2-} 可以作为洞穴现代滴水环境监测的示踪剂^[70];源于石笋微层成因机制研究的水溶性有机碳(DOC)也越来越多地运用到滴水的环境指示中^[35,71];除此之外,对滴水中脂肪酸^[72]和孢粉^[42]的研究也有所涉及,然而由于各自条件限制,这些指标只能作为辅助性指标来应用。

2.3 滴水信息的环境响应

2.3.1 对外界大气的响应

气候的变化对大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的影响表现为,降水量越大, $\delta^{18}\text{O}$ 值越小;在中高纬度地区,年均气温越低, $\delta^{18}\text{O}$ 值越小。在不受“老水”影响的条件下,滴水的氧同位素可以反映大气降水及气温的变化^[35]。在大气环境响应领域,除了对 $\delta^{18}\text{O}$ 值的研究,已有学者开始尝试通过对 Mg/Ca 指标进行了监测,研究发现大气降雨、土壤水和滴水中的 Mg/Ca 依次变大,并综合考察洞穴基岩和大气降水等因素,得出大气降雨并不能作为所有洞穴系统的主要物质来源^[73]。前已述及,多数学者认为滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 可以代表大气降水的年平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值,然而在某些滴水点,滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 则只能反映出降雨同位素的季节平均值^[38],在探讨滴水对外界大气环境响应特征时有必要对洞穴系统进行全方位考虑。

2.3.2 对地表植被的响应

气候变化引起生态环境变化,气候温暖多雨,森林、灌木林等 C3 植被发育,C3 植被分解和生物化学降解形成的碳酸盐具有很轻的 $\delta^{13}\text{C}$ 值;气候寒冷干旱,在林灌及草本植被难以生长的情况下形成的碳酸盐由于 CO_2 主要来自大气,其生成的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较重。因此,滴水 $\delta^{13}\text{C}$ 值越轻,气温高而潮湿,反映植被发育良好;相反, $\delta^{13}\text{C}$ 值越重,则气温低而干旱,反映植被情况较差^[17,74]。有学者在研究处于不同等级石漠化区的洞穴时指出,地表植被覆盖率高的洞穴其电导率和 Ca^{2+} 浓度也高^[75],由此可见,滴水 $\delta^{13}\text{C}$ 及水化学特征的变化可作为评价石漠化等级的一个参考指标。

2.3.3 对洞穴上覆土壤的响应

洞穴上覆土壤影响滴水水化学,土壤自身组分的

季节淋溶也直接影响滴水化学组成^[60]。通过滴水对大气降雨的响应时间可以大致判断滴水中物质的来源,一般滴水点响应较快,其物质来源主要是土壤,土壤物理、土壤化学等过程均会对滴水的物质组成产生影响^[73]。土壤环境中的 Ca、Mg 和 Sr 元素在土壤剖面中会表现出明显的淋溶和淀积作用,其元素含量高低直接影响滴水的元素含量,另外,大气降水通过较薄的土壤时,溶解土壤物质量少,使土壤渗透水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 含量偏小,可见上覆土层的厚度影响滴水中部分离子的含量^[76]。洞穴上覆土壤及有机质主要来源于动、植物残体和微生物^[48],探讨滴水中溶解有机碳与上覆土壤溶解有机碳之间的关系,需要对有机质的结构特征和喀斯特水动力过程作进一步分析^[71]。

2.3.4 对洞顶基岩的响应

喀斯特水在运移过程中,其中 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 和 Ca^{2+} 含量可能更多来源于对上覆基岩的溶解^[76],洞顶基岩状况对洞穴滴水的地球化学特征影响深远,在探讨滴水信息对洞顶基岩的响应时必须首先对水—岩相互作用有一定的认识^[42]。王世杰等在对贵州七星洞系统水文地球化学特征的研究过程中发现个别滴水点 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 偏重,原因亦是滴水点上覆基岩溶解,并得出“若不考虑基岩溶解作用,将会极大地影响洞穴化学沉积物碳同位素记录的准确解释”的结论^[77]。王明达在对湖北清江和尚洞滴水水化学进行研究时发现滴水的 $n(\text{Mg})/n(\text{Ca})$ 、 $n(\text{Ba})/n(\text{Ca})$ 、 $n(\text{Sr})/n(\text{Ca})$ 及 $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ 介于土壤和围岩之间,表明滴水物质组成来自土壤和围岩的混合;滴水的 $n(\text{S})/n(\text{Ca})$ 大于土壤和围岩,说明有第三端元的混入,可能是大气硫沉降的结果^[78]。

3 拟解决的关键科学问题与研究展望

喀斯特洞穴滴水受到不同来源水、洞顶植被与土壤条件、洞穴顶板空隙、裂隙水等复杂因素的综合影响,导致滴水的水文地球化学指标对不同地表环境的响应存在多解性,除了稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 大小可以反映洞穴外界大气和地表植被环境,其他如常量、微量元素等指标均要针对洞穴所处土壤—基岩环境及滴水在其中的水文地球化学过程进行具体分析,今后关于洞穴滴水信息对地表环境的响应研究尤其需要注意以下问题:

(1) 滴水物质来源问题。洞穴滴水的物质来源是滴水各化学指标形成的基础,滴水在形成过程中经历了“降雨—植被—土壤—基岩”多元介质的复杂过程,不同洞穴由于所处气候环境与地质环境的不同,

滴水在反映地表环境机制方面具有很大差异,有的主要来源于大气降雨^[23],而有的却直接受控于洞穴上部覆被的土壤层^[28],通过研究洞穴滴水的物质来源可以发现滴水在形成过程中究竟受制于哪些因素,进而为滴水指标反映洞穴上覆环境提供基础性依据,探讨滴水的物质来源是研究滴水信息与洞穴外部环境关系的前提。

(2) 滴水水文地球化学过程问题。滴水在形成过程中除了携带洞穴上覆环境中的物质,同时还与这些环境发生一系列化学反应,最终形成富含多种矿物质和多种元素的滴水,滴水的这种水文地球化学过程对于滴水指标反映地表环境的准确度产生了极大影响,因此在讨论滴水环境替代指标反演地表环境之前必须研究滴水的水文地球化学过程。目前已经有学者开始专门关注该问题^[28,73],洞穴系统中的水化学组成及特征可以用来分析发生在滴水运移路径上的水文地球化学过程的特点^[43],然而必须结合洞穴体系本身的特点来选择具体的水化学成分。

(3) 滴水信息环境指示敏感性问题。在运用洞穴次生沉积物反演古气候古环境的过程中,随着短时间尺度和高分辨率等精度的要求提出,次生沉积物对环境变化指示的问题逐渐表现出来,如广西桂林地区喀斯特洞穴石笋的碳氧稳定同位素在进行环境指示时效果不佳^[36,79],英国某洞穴系统的碳稳定同位素并不能指示过去的植被环境变化^[80],另外,在美国南达科他州洞穴中采取的两根同时代的石笋,其稳定同位素的测定结果并不一致^[81],等等。解决这些问题需要滴水中的信息作为佐证,因此滴水信息环境指示的敏感度成为首要问题,滴水指标能否敏感、准确地响应外界环境变化并准确记录在洞穴次生沉积物中,对次生沉积记录的解译有重要作用,其受制于多样的洞穴环境要素及复杂的水文地质过程,应加强对该问题的深入研究。了解滴水信息指标有助于次生沉积物古环境解译的清晰化,进而可以为喀斯特石漠化环境的地下监测提供科学依据。

(4) 滴水时空响应机制问题。洞穴滴水的确能对地表大气、植被、上覆土壤与基岩等环境作出响应,但目前其时间与空间的响应机制并不清晰:同一洞穴的滴水特征在同一时间尺度内会有不同的响应特征^[19,28,36,54];不同地表环境下的洞穴滴水可能会出现同样的响应特征^[27,75];不同环境特征如石漠化环境下其响应特征是否无石漠化环境一致^[30];如果滴水能准确响应地表环境变化,那地表石漠化治理后的环境变化又如何表现在滴水指标中;地貌形态与基岩岩性是否对滴水及次生沉积物准确反映地表石漠化产生影响,即不同地貌形态及岩性下的滴水是否都能准确反映地表石漠化^[41],等等。探究滴水信息的时

空响应机制有助于对洞穴次生沉积物的精确解译,进而可以了解石漠化环境的状况变迁,对石漠化环境监测及石漠化治理的效益评价也能提供有效的地下监测与评价手段。

(5) 洞穴环境系统要素问题。由于洞穴滴水受到来自外界大气降雨和洞穴系统(洞顶上覆植被、土壤及基岩)的综合影响,在探讨滴水指标对洞穴外部环境的响应变化时必须对洞穴系统有全面的了解。目前国内很多地区的滴水监测研究方法还不规范,由于地区或设备等条件限制,大多数滴水环境意义研究未能做到对相关环境要素进行全面分析^[82-84],加强环境各要素之间的系统观测有助于更直接地了解洞穴系统情况和各种环境因素对元素迁移变化的影响,进而准确掌握滴水各指标对环境要素的反映,这也要求我们进一步丰富和完善滴水指标体系,尽可能全方位地去探索指标变化情况^[85-86]。

(6) 喀斯特石漠化环境的地下监测问题。对洞穴滴水水化学特征等进行监测,对石漠化治理工作有一定的借鉴意义,在石漠化的治理工作中,可以利用滴水水文地球化学特征的变化来检验石漠化治理的成效,为石漠化治理效益监测评价工作提供理论支持^[75],对石漠化地区社会、经济、生态的协调发展,进而从根本上治理石漠化有重大现实意义。石漠化地区作为与风蚀沙漠化地区、黄土高原农牧交错带同样脆弱的环境,关于滴水指标对石漠化环境响应的研究却相对较少,今后需要加强对石漠化地区洞穴滴水的监测和研究,以便结合喀斯特石漠化地区的地表监测对石漠化治理效果进行全面监测和评价。

参考文献

- [1] 袁道先. 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J]. 草业科学, 2008, 25(9): 19-25.
- [2] O'Neil J R, Clayton R N, Mayeda T K. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates [J]. J. Chem. Phys., 1969, 51(12): 5547-5558.
- [3] Handy C H. The isotopic geochemistry of speleothems—I. The calculation of the effects of different modes of formation on the isotopic composition of speleothems and their application as palaeo-climatic indicators[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1971, 35(8): 801-824.
- [4] Gascoyne M. Paleoclimate determination from cave calcite deposits[J]. Quaternary Science Reviews, 1992, 11(6): 609-632.
- [5] Li B, Yuan D, Qin J, et al. A high resolution record of climate change in a stalagmite from Panlong cave of Guilin since 36000 years B P [J]. In: Karst Waters Institute Special Publication 2. Climate Change: The Karst Record. Charles Town: Karst Waters Institute, Inc. 1996, 93-96.
- [6] Bar-Matthews M, Ayalon A, Kaufman A. A Late Quaternary paleoclimate in the Eastern Mediterranean Region from stable isotope analysis of speleothems at Soreg Cave, Israel[J]. Quaternary Research, 1997, 47(2): 155-168.
- [7] 谭明, 刘东生, 钟华, 等. 季风条件下全新世洞穴碳酸钙稳定同位素气候信息初步研究[J]. 科学通报, 1997, 42(12): 1302-1306.
- [8] Baker A, Smart P L, Edwards R L, et al. Annual growth banding in a cave stalagmite[J]. Nature, 1993, 364: 518-520.
- [9] Coplen T B, Winograd I J, Landwehr J M, et al. 50000-year stable carbon isotopic record from Devils Hole, Nevada[J]. Science, 1994, 263: 361-365.
- [10] Holmgren K, Karlen W. Paleoclimate significance of the stable isotopic composition and petrology of a late Pleistocene stalagmite from Botswana[J]. Quaternary Research, 1995, 43(3): 320-325.
- [11] Szabo B J, Bush C A. Uranium-series dating of carbonate (tufa) deposits associated with Quaternary fluctuations of Pyramid lake, Nevada[J]. Quaternary Research, 1996, 45(3): 271-281.
- [12] Talma A S, Vogel J C. Late Quaternary paleo-temperature derived from a speleothem from Congo caves, Cape province, South Africa[J]. Quaternary Research, 1992, 37: 203-213.
- [13] Winograd I J, Coplen T B, Landwehr J M, et al. Continuous 50000-year climate record from vein calcite in Devils Hole [J]. Nevada. Science, 1992, 258: 255-260.
- [14] 谭明. 石笋微层气候学的几个重要问题. 第四纪研究, 2005, 25(2): 164-169.
- [15] 秦小光, 刘东生, 谭明, 等. 北京石花洞石笋微层灰度变化特征及其古气候意义—1. 微层显微特征[J]. 中国科学 D 辑, 1998, 28(1): 91-96.
- [16] 覃嘉铭, 林玉石, 张美良, 等. 桂林全新世石笋高分辨率 $\delta^{13}\text{C}$ 记录及其古生态意义[J]. 第四纪研究, 2000, 20(4): 351-358.
- [17] 覃嘉铭, 袁道先, 林玉石, 等. 桂林 44ka B. P. 石笋同位素记录及其环境解译[J]. 地球学报, 2000, 21(4): 407-416.
- [18] 张美良, 林玉石, 覃嘉铭, 等. 黔南洞穴石笋古气候变化记录及终止点 II 的确定[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32(11): 942-950.
- [19] 张美良, 朱晓燕, 林玉石, 等. 桂林洞穴滴水及现代碳酸钙 (CaCO_3) 沉积的碳同位素记录及其环境意义[J]. 地球学报, 2009, 30(5): 634-642.
- [20] 张美良, 林玉石, 覃嘉铭. 洞穴石笋沉积纹层的形态组合及其滴水的水动力条件[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2001, 26(4): 466-470.
- [21] 刘启明, 王世杰, 黎廷宇. 贵州凉风洞综合体系的现代生态环境记录[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2007, 12(3): 261-263.
- [22] 张美良, 朱晓燕, 林玉石, 等. 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.
- [23] 张美良, 朱晓燕, 林玉石, 等. 桂林盘龙洞滴水的物理化学指标变化研究及其意义[J]. 地球与环境, 2009(1): 1-10.
- [24] 刘子琦, 张乾柱, 熊康宁. 洞穴环境替代指标研究现状及其石漠化记录研究问题探究[J]. 水土保持研究, 2013(4): 293-300.
- [25] 韩军, 杨霄. 桂林洞穴滴水对应 CaCO_3 沉积物的稳定同位素特征与环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008(4): 117-124.

- [26] 熊康宁, 黎平, 周忠发, 等. 喀斯特石漠化的遥感—GIS 典型研究[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 18.
- [27] 周运超, 王世杰, 谢兴能, 等. 贵州 4 个洞穴滴水对大气降雨响应的动力学及其意义[J]. 科学通报, 2004, 49(21): 2220—2227.
- [28] 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(2): 23—30.
- [29] Baldini J U I, McDermott F, Fairchild I J. Spatial variability in cave drip water hydrochemistry: Implications for stalagmite paleoclimate records[J]. *Chemical Geology*, 2006, 235(3): 390—404.
- [30] 张乾柱, 熊康宁, 刘子琦, 等. 洞穴滴水水文化学特征及石漠化效应: 以贵州石将军洞为例[J]. 热带地理, 2013(3): 256—263.
- [31] Cobb K M, Adkins J F, Partin J W, et al. Regional-scale climate influences on temporal variations of rainwater and cave drip water oxygen isotopes in northern Borneo[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 263(3): 207—220.
- [32] Matthey D, Lowry D, Duffet J, et al. A 53 year seasonally resolved oxygen and carbon isotope record from a modern Gibraltar speleothem: Reconstructed drip water and relationship to local precipitation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 269: 80—95.
- [33] Lambert W J, Aharon P. Oxygen and hydrogen isotopes of rainfall and drip water at DeSoto Caverns (Alabama, USA): Key to understanding past variability of moisture transport from the Gulf of Mexico[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74: 846—861.
- [34] 李红春, 顾德隆, 赵树森, 等. 北京石花洞地区水系氢氧同位素及氟含量研究: 石花洞研究系列之一[J]. 地震地质, 1996(4): 325—328.
- [35] 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, 1997(3): 32—37.
- [36] 李彬, 袁道先, 林玉石, 等. 桂林地区降水、洞穴滴水及现代洞穴碳酸盐氧碳同位素研究及其环境意义[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2000(1): 81—87.
- [37] 张平中, 陈一萌, Johnson K P, 等. 甘肃武都万象洞滴水与现代石笋同位素的环境意义[J]. 科学通报, 2004, (15): 1529—1531.
- [38] 刘子琦, 李红春, 熊康宁, 等. 洞穴水系氢氧同位素监测对重建古气候样品选择的指示意义[J]. 中国岩溶, 2008(2): 139—144.
- [39] 韩军. 桂林洞穴滴水及其化学沉积物的地球化学特征研究摘要[D]. 中国地质科学院, 2006.
- [40] 李廷勇, 李红春, 向晓晶, 等. 碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 在重庆岩溶地区植被—土壤—基岩—洞穴系统运移特征研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2012(4): 526—535.
- [41] 吕现福, 刘子琦, 赵瑞一, 等. 地貌变化对洞穴滴水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值的影响研究[J]. 人民长江, 2013(9): 32—36.
- [42] 刘启明, 王世杰. 洞穴体系对外界气候与生态环境的响应[J]. 生态学杂志, 2005(10): 1172—1176.
- [43] 朱小龙, 王世杰, 罗维均. 贵州七星洞洞穴系统中锶同位素特征及其意义[J]. 科学通报, 2011(3): 254—260.
- [44] 谭明, 潘根兴, 王先锋, 等. 石笋与环境: 石笋纹层形成的环境机理初探[J]. 中国岩溶, 1999(3): 3—11.
- [45] 王昕亚, 李廷勇, 胡蓉, 等. 重庆芙蓉洞洞穴滴水地球化学初探[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2007(2): 122—126.
- [46] 刘东生, 谭明, 秦小光, 等. 洞穴碳酸钙微层理在中国的首次发现及其对全球变化研究的意义[J]. 第四纪研究, 1997(1): 41—51.
- [47] 唐灿, 周平根. 北京典型溶洞区土壤中的 CO_2 及其对岩溶作用的驱动[J]. 中国岩溶, 1999, 18(3): 213—217.
- [48] 潘根兴, 曹建华, 何师意, 等. 岩溶土壤系统对土壤空气 CO_2 的吸收及其对陆地碳循环的意义: 以桂林丫吉村岩溶试验场的野外观测和模拟实验为例[J]. 地学前沿, 2000, 7(4): 580—587.
- [49] 何师意, 潘根兴, 曹建华, 等. 表层岩溶生态系统碳循环特征研究[J]. 第四纪研究, 2000, 20(4): 383—390.
- [50] 姜光辉, 郭芳, 曹建华, 等. 峰丛洼地表层岩溶动力系统季节变化规律[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2003, 28(3): 341—345.
- [51] 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.
- [52] Chicano M L, Bouamama M, Vallejos A, et al. Factors which determine the hydrogeochemical behaviour of karstic springs. A case study from the Betic Cordilleras, Spain[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16(9—10): 1179—1192.
- [53] 班凤梅, 潘根兴, 蔡炳贵, 等. 北京石花洞洞穴滴水中硫酸根浓度的时空变化及其意义[J]. 中国岩溶, 2009(3): 243—248.
- [54] 周运超, 王世杰. 贵州凉风洞洞穴滴水水文水文化学过程分析[J]. 第四纪研究, 2005, 25(2): 208—215.
- [55] 周运超, 王世杰. 贵州七星洞滴水的水文水文化学特征及其意义[J]. 水文地质工程地质, 2006(1): 52—57.
- [56] Ford D C, Williams P W. *Karst Geomorphology and Hydrology*[M]. London: Unwin Hyman Ltd, 1989: 601—605.
- [57] Tan Ming, Liu Dongsheng, Qin Xiaoguang, et al. Preliminary study on the data from microbanding and stable isotopes of stalagmites of Beijing Shihua Cave[J]. *Carsologica Sinica*, 1997, 16(1): 1—10.
- [58] Wang Xianfeng, Liu Tungsheng, Liang Handong, et al. Preliminary analyses by SIMS on trace components of stalagmite microlayers and their climate significance[J]. *Quaternary Sciences*, 1999(1): 59—66.
- [59] Fairchild I J, Borsato A A, Tooth 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.
- [60] 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(2): 258—264.
- [61] Wong C I, Banner J L, Musgrove M L. Seasonal drip water Mg/Ca and Sr/Ca variations driven by cave ventilation: Implications for and modeling of speleothem paleo-climate records[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(12): 3514—3529.
- [62] 衣成城. 洞穴水离子浓度和元素比值变化特征及其环境意义[D]. 西南大学, 2010.
- [63] 向晓晶, 王建力, 李俊云. 重庆芙蓉洞岩溶系统中钡元素地球化学特征[J]. 湖北农业科学, 2011(17): 3510—3513, 3525.
- [64] 段凤君, 胡超涌, 阮骄阳, 等. 岩溶滴水中痕量磷的测定及其古环境意义[J]. 中国岩溶, 2012(2): 115—120.
- [65] Baker A, Barnes W L, Smart P L. Speleothem luminescence in tensity and spectral characteristics—Signal calibration and a

- record of palaeo-vegetation change[J]. *Chemical Geology*, 1996,130:65—76.
- [66] Goede A, Vogel J C. Trace element variation and dating of a Late Pleistocene Tasmanian speleothem[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1991,88(1):121—131.
- [67] Senesi N, Miano T M, Provenzano M R, et al. Characterization, differentiation, and classification of humic substances by fluorescence spectroscopy[J]. *Soil Science*, 1991,152(4):259—271.
- [68] Finch A A, Shaw P A, Weedon G P, et al. Trace element variation in Speleothem aragonite: Potential for palaeoenvironmental reconstruction[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001,186(2):255—267.
- [69] Baker A, Caseldine C J, Gilmour M A, et al. Stalagmite luminescence and peathumification records of palaeo moisture for the last 2500 years[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999,165(1):157—162.
- [70] 杨涛, 王世杰, 罗维均, 等. 现代环境监测研究中的一种新示踪指示剂(SO_4) [J]. *地球与环境*, 2012(1):1—8.
- [71] 班凤梅, 潘根兴, 王新中. 北京石花洞石笋微层面有机物质的形成时间及机理初探[J]. *第四纪研究*, 2005(2):265—268.
- [72] 黄咸雨, 蒲阳, 崔景伟, 等. 湖北清江和尚洞洞穴滴水脂肪酸分布特征及其古生态意义[J]. *第四纪研究*, 2007(3):401—407.
- [73] 周运超, 王世杰. 贵州将军洞上覆土层对滴水水化学特征的影响[J]. *环境科学*, 2006(10):1986—1991.
- [74] 黎廷宇. 岩溶洞穴系统稳定碳同位素演化的地球化学过程及其环境意义[D]. 中国科学院研究生院(地球化学研究所), 2004.
- [75] 赵瑞一. 不同程度石漠化下洞穴滴水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 变化特征及影响因素[D]. 西南大学, 2013.
- [76] 向晓晶, 李廷勇, 王健力, 等. 重庆芙蓉洞上覆基岩、土壤元素分布特征及其对洞穴滴水水化学影响[J]. *中国岩溶*, 2011(2):193—199.
- [77] 王世杰, 罗维均, 刘秀明, 等. 贵州七星洞系统中水文地球化学特征对滴水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响及其意义[J]. *地学前缘*, 2009(6):66—76.
- [78] 王明达, 胡超涌, 周炼, 等. 土壤和围岩地球化学组成及气候对洞穴滴水水化学的影响:以湖北清江和尚洞为例[J]. *地质科技情报*, 2010(3):97—103.
- [79] 李彬, 袁道先, 林玉石, 等. 桂林地区4万年来石笋高分辨率古生态变化记录[J]. *第四纪研究*, 2000, 20(4):395.
- [80] Baker A, Ito E, Smart P L, et al. Elevated and variable values of ^{13}C in speleothems in a British cave system[J]. *Chemical Geology*, 1997,136(3): 263—270.
- [81] Serefidin F, Schwarcz H P, Ford D C, et al. Late Pleistocene paleoclimate in the Black Hills of South Dakota from isotope records in speleothems[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004,203(1):1—17.
- [82] 周超. 旅游洞穴系统中二氧化碳浓度变化及运移机制研究[D]. 西南大学, 2011.
- [83] 郭允. 早全新世辽宁暖洞石笋纹层与气候事件研究[D]. 南京师范大学, 2011.
- [84] 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]. 西南大学, 2012.
- [85] 张伟. 相同气候条件下不同洞穴沉积差异机理研究[D]. 南京师范大学, 2012.
- [86] 刘子琦. 利用洞穴体系地球化学指标研究贵州中西部近现代石漠化成因及趋势[D]. 西南大学, 2008.

Progress of research on the response of information of karst cave drip water to ground conditions

LIU Zi-qi^{1,3}, XIONG Kang-ning^{2,3}, LÜ Xiao-xi^{2,3}, ZHANG Qian-zhu^{2,3}, FU Chao-fan^{2,3}

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

2. Institute of South China Karst, Guizhou Normal University, Guizhou Guiyang 550001, China;

3. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guizhou Guiyang 550001, China)

Abstract: By reviewing domestic and foreign research progress on the response of information of karst cave drip water to ground conditions, coupled with the research background of global climate change, karst environmental evolution and drip water's physical and chemical indicators, this paper divides the history of this research into three stages: initial stage, slow development stage and rapid growth stage. This paper also systematically summarizes the research results and understandings of drip water's regular monitoring indicators, stable isotopes, major elements, trace elements, and so on. Meanwhile, it concluded the research progress of drip water's response to atmosphere, vegetation, soil and bedrock. It is suggested that the material resource and the hydro-geochemical process of drip water should be explored, the research for drip's sensitivity to indicate environment should be enhanced, the environment response mechanism of drip's information should be deeply probed and comprehensive environment elements of cave systems should be monitored. It is also pointed out that the research on the rocky desertification by drip water's indicators remains relatively weak now, which should be the focused topic in the future.

Key words: cave drip water; rocky desertification; environment; response; research progress

(编辑 吴华英)