

文章编号: 1000-0550(2002)03-0435-07

洞穴石笋纹(壳)层层组类型研究^①

张美良 林玉石 覃嘉铭

(中国地质科学院岩溶地质研究所, 岩溶动力学开放研究实验室 广西桂林 541004)

摘要 石笋是洞穴碳酸钙沉积的典型滴石类型,也是岩溶记录中最全面、最系统的古气候环境信息载体,随着高分辨率测年技术和测试方法的提高,它在重建古气候环境方面具有重要的意义。石笋沉积纹层的组合、厚度、粒度和层面构造等,是恢复成笋滴水动态及相关古水文条件的物质基础,其中不少古气候环境信息,具强烈直观感,聚集物证、形象地记录于石笋剖面中,易观测研究。通过大量石笋纵剖面观测和系统的同位素组成、(微痕)量元素、特征性纹层的分析研究,证实石笋沉积纹(壳)层具韵律性组合和沉积旋回性及其古气候环境显示。首次提出石笋具叠锥型、叠柱型、叠锥叠柱复(组)合型纹(壳)层组和连续性、旋回性、间断(歇)性叠复纹(壳)层层组类型的沉积构造,并阐述各自的特征、滴流水动态和气候环境演变特征。

关键词 洞穴石笋 沉积纹(壳)层 层层组类型 古气候环境

第一作者简介 张美良 男 1956年出生 高级工程师 区域岩溶或古环境研究

中图分类号 P642.25 **文献标识码** A

1 石笋纹(壳)层具陆相沉积地层特征

石笋纹(壳)层的岩石单一、规模小、形成于地下洞穴环境,不同于陆表河、湖相沉积岩和海相沉积岩。但是,其岩石的沉积特征、组成、结构构造和组合构造类型复杂多变,具典型陆相沉积特征,纹层的环境意义已有初探^[1,2]。

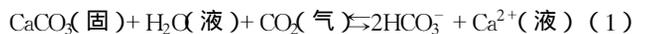
1.1 石笋纹(壳)层组分的物源

纹层是石笋沉积的最小单位,其组成几乎全是淡水化学沉积的碳酸盐,除方解石外,个别纹层,特别是风化壳层或间断沉积纹(壳)层的个别纹层含微量粘土矿物、炭质(屑)、Fe、Mn质微粒。显然,这些物质主要源于岩溶水溶滤的陆表土层及其组成的碳酸盐岩。是水溶液携带其中的钙、镁离子和盐类、蚀余物—粘土、微量氧化物(其次,来自外源水携带来的碳酸盐、粘土矿物(含量极少)等。由于滴流水从洞顶向洞底着落时,滴水在洞底着落点(处)向四周漫流,故纹(壳)层厚度一般由笋心向四周渐薄,过笋肩往下直至纹层消失。经滇、黔、桂、湘的近100个大小型石笋剖面观测,发现纹(壳)层物源的陆表环境效应很敏感,诸如第四纪末次冰期新仙女木事件之后,气候回暖阶段,石笋普遍沉积白—雪白色方解石。而且,在雪白方解石纹(壳)层组间夹有些淡红色浸染状纹(壳)层组和灰—灰黑色纹(壳)层组,如桂林盘龙洞1号石笋的主体,有些只间夹

黄红色和灰黄色纹(壳)层组,如荔浦丰鱼岩1号石笋中上段(部);另一些只间夹灰黑—暗灰色纹层和纹层组,如灌阳响水岩1号石笋中上(部)段。前两者洞道系统的上覆峰体有白垩系红色岩溶建造分布,后者山高林密,但冰期被局部草被取代了。总之,冰期和间冰期石笋都以灰白—白色方解石为主,组成纹(壳)层组。但是,当暗色纹增多、硅、杂质增加,沉积较缓慢,则基本体现寒冷期(阶段)石笋的沉积特征,若沉积快,间夹淡红、黄、兰色等纹(壳)层组,则显示暖湿期的气候特征,说明洞穴所处的地质、地理环境不同。

1.2 石笋纹(壳)层组成结构构造的沉积动力

袁道先院士提出的岩溶动力学系统理论表明:岩溶作用过程,在于较多CO₂溶于岩溶水,增大水对碳酸盐岩的溶蚀、侵蚀作用。若水量大、流速快,则加大其侵蚀力,加速溶解。反之,CO₂逸出,则产生碳酸钙沉淀(积)(图1)。其反应过程为:



石笋的沉积经历了气—水—固三相系统的运行过程,也是这个复相系统运行过程中的最终结果^[3,4]。溶蚀、侵蚀母岩的岩溶渗流水在到达洞顶下滴—渗流时,当洞穴环境干燥或滴(着)落点和流层流速快,CO₂逸出快,则次生碳酸钙沉积(淀)组成石笋和其他滴流石类,纹(壳)层组快速增厚。因此,CO₂在三相开放系统中的转相(态)是岩溶作用向溶解或沉积(淀)方

^① IGCP-448 国际对比项目、科技部攀登特别资助项目“全球岩溶生态系统对比”(编号:2000-026)和国家自然科学基金项目(批准号:40152002)资助

向进行的主要驱动力。由于滴水或流水中 CO_2 的逸出,驱动石笋纹(壳)层形成。 CO_2 溶于水或逸出,取决于其所在相的温度、压力、湿度和氧化、还原等物理化学环境状态。若滴—流水动态和洞穴环境较稳定, CO_2 逸出快,主要取决于滴水点(处)的 CO_2 的逸出量;其次是着落点(处)流水的速度。当滴水处 CO_2 逸出增加了碳酸钙的浓度,加之滴—流过程 CO_2 的逸出,将产生碳酸钙沉积,逸出量大,沉积(淀)方解石组成纹(壳)层快,若滴水处(点) CO_2 过量逸出,滴水点过饱和,则形成钟乳石。反之,当滴水着落后转为流水,在流动中逸出 CO_2 才饱和,流水随过饱和不断沉积次生碳酸钙,使方解石呈纹(壳)层状分布。然而, CO_2 逸出量及速度,又受滴—流水流量及滴—流速度制约。因此,岩溶水在滴—流水系统中中和着落处的滴流态,特别是流速和流(滴)量,成为和 CO_2 共同驱动次生碳酸钙沉积、晶形、粒级、组合、构造和纹(壳)层厚度及层面构造的形成,而滴流前 CO_2 只驱动岩溶水的饱和度。

(壳)层的组合构造协调。石笋的纹(壳)层的沉积旋回多数由若干纹(壳)层组构成,沉积旋回及彼此间纹(壳)层组合构造表现为协调或基本协调状态。受区域、局部、洞穴环境诸多因素影响。同一洞穴的不同地段、同地段(区)的不同洞穴和同时段的石笋纹(壳)层组、旋回有差异,甚至有的无沉积或有相应的沉积纹(壳)层组、或旋回,但厚度特别大,呈现区域环境特征。如桂林地区冰后期全新世的石笋纹(壳)层组、旋回都由雪白方解石组成。因滴水量大、落速快,晶粒大、晶间孔多、纹(壳)层(组)厚度大,甚至达米级。冰期的石笋,方解石呈雪白、细粒、纹(壳)层组或旋回厚度小,通常呈厘米级。

1.3.2 沉积纹(壳)层组、旋回具有韵律性

沉积纹(壳)层在时间上的韵律变化具长、短阶段差异,在空间上呈连续性、间断(歇)性组合。石笋的纹(壳)层常以单层或多纹层,彼此间夹和互层呈韵律性组成纹(壳)层组或旋回,或以若干单纹层和多纹层,彼此互层和互为夹层,呈韵律性组成纹(壳)层组或旋回。这种组合韵律的石笋都有其组合、频率不同,但同一纹(壳)层组或旋回的彼此组合构造协调或基本协调。若沉积旋回间的纹层组成呈连续沉积,为整合接触,而沉积旋回间的纹层组成有间断沉积者,有些彼此的组合构造不协调、斜交或局部不整合,为平衡不整合接触。若呈间断(歇)沉积者,为不整合接触。间断(歇)时间越长,不整合层越明显。纹壳层组连续或间断(歇)沉积的每个组的纹(壳)层或旋回,均代表该时段的沉积变化过程,呈现气候变化韵律性。受气候和空间环境影响,韵律频率、变幅不同,纹(壳)层组或旋回间呈渐变(连续)或突变(间断)接触。

2 石笋纹(壳)层层组类型的古气候变化意义

2.1 纹(壳)层组类型的滴水动态

由若干纹(壳)层由下而上叠复成沉积纹(壳)层组,是石笋构成的基本单位。纹(壳)层组自成沉积旋回,组成石笋(笋段),或构成一个沉积旋回的一个或若干组成单位,再由一个或若干旋回构成石笋(笋段)。根据纹(壳)层叠复组合的形态和构造特征,分为柱状(图2C、2B)、锥状(图2A)和锥(柱)、柱(锥)锥(柱)复(组)合型纹(壳)层组(图2D)。柱状纹(壳)层组,表示滴水点较固定,但着落点分散或滴水点呈筛状,着落点较集中,形成固定面状水层向四周漫流至柱肩很快跌落。在该沉积时段,洞顶滴流量稳定,水中钙浓度适量或偏大,洞穴环境干燥,利于在面状水体中沉积(淀)

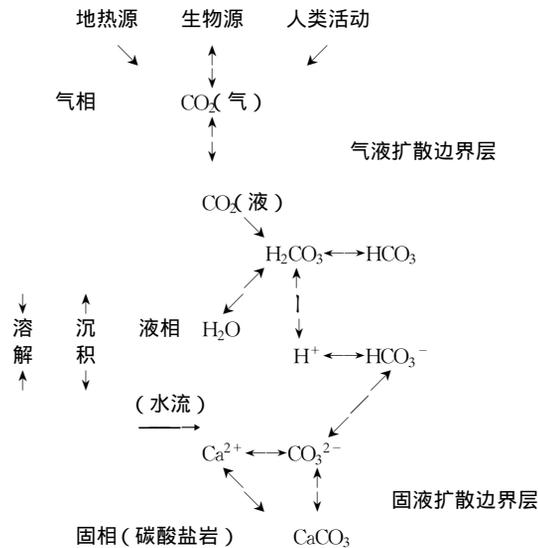


图1 岩溶作用气、液、固三相系统相关图(据袁道先院士)

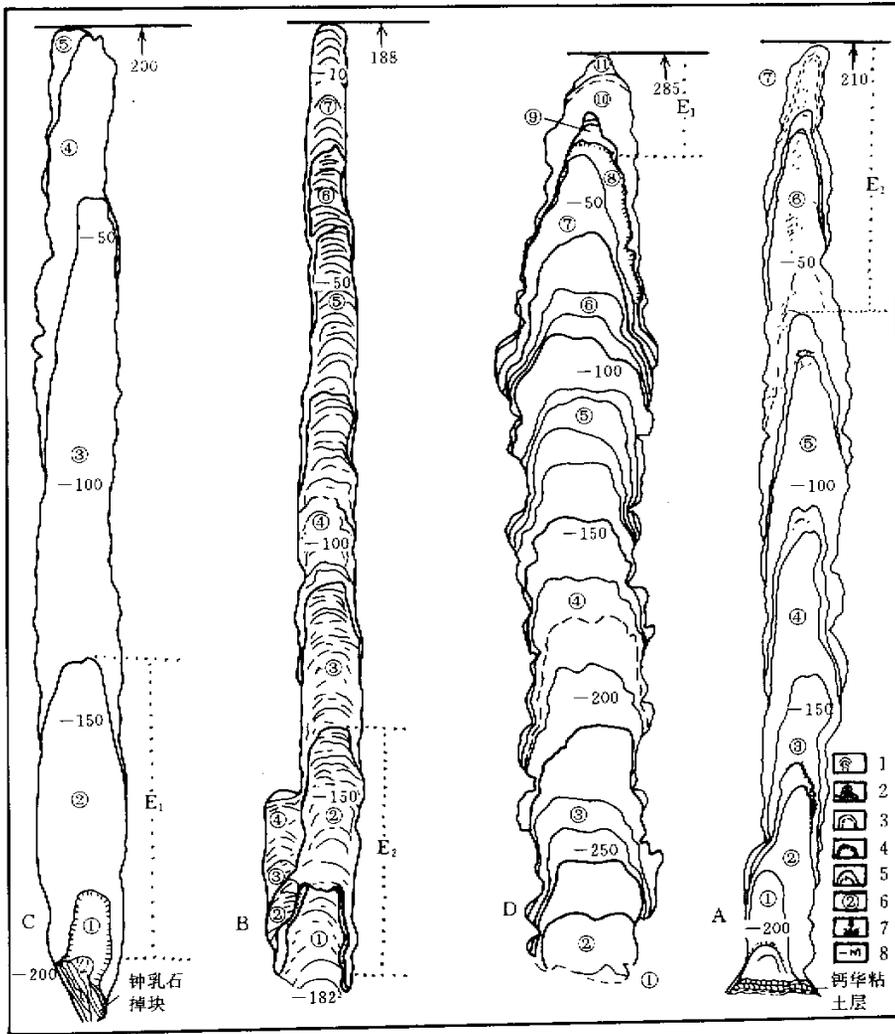
Fig. 1 Correlation among gas, liquid and solid phases in karst processes

1.3 组合类型具时空对比意义

研究石笋的沉积速率、沉积间断类型、结构构造组合类型,发现石笋的沉积构造比陆相地层对气候、环境反应更敏感,其沉积纹(壳)层(组)的组成、结构、组合都有韵律性和普遍性,有时空对比意义。

1.3.1 沉积纹(壳)层组、旋回均有普遍性

组成石笋的纹(壳)层组,在空间上,有区域性、地带性、洞穴环境等差异。在时间上,可有沉积或无沉积,可厚或薄。同一纹(壳)层层厚有变化、结构较均一、构造类型相同。而纹(壳)层间彼此不尽相同,由若干(微细)层组成一个纹(壳)层组,或自成旋回,但其纹



A. 叠锥型纹(壳)层组类型、旋回性叠复纹(壳)层组类型(董哥洞 3 号石笋) B. 叠柱型纹(壳)层组类型、旋回性叠复纹(壳)层组类型(七星洞 5 号石笋) C. 叠柱型纹(壳)层组类型、连续性叠复纹(壳)层组类型(龙泉洞 2 号石笋) D. 叠柱(锥)叠锥(柱)叠复组合型纹(壳)层组类型、旋回性叠复纹(壳)层组类型(盘龙洞 2 号石笋) E. 间断性叠复纹(壳)层组类型(E₁ 气候型, E₂ 地质灾害型) 1. 纹(壳)层 2. 风化壳层间具间断沉积纹(壳)层组 3. 暗化、泥粒化风化壳纹(壳)层 4. 黑色(含炭)风化壳纹(壳)层 5. 沉积旋回间纹(壳)层组间沉积间断 6. 沉积旋回 7. 石笋高度(cm) 8. 至笋顶高度(cm)

图 2 洞穴石笋纹(壳)层层组类型、纹(壳)层层组类型剖面图

Fig. 2 Vertical profiles of laminae or lamella groups and types of stalagmite in caves

碳酸钙并快速成晶。锥状纹(壳)层组,显示洞顶滴水点和洞底着落点均固定,或两者之一向某方缓慢位移,但在该沉积时段,洞顶的滴流量由大渐小,水中钙浓度偏大。锥(柱)柱(锥)复(组)合纹(壳)层组,是上述两类组(复)合或间(互)夹,分别兼储各自的滴(着)落特点、沉积特征和洞穴环境,即滴流水动态反复转化^[5,6,7]。如盘龙洞 2 号石笋①~⑤旋回是柱状纹

(壳)层组,自⑥旋回中上部至⑧旋回,渐变为不对称的平顶锥状纹(壳)层组,至笋顶⑨旋回为锥状纹(壳)层组,构成柱状复(组)合纹(壳)层的石笋。通常大型石笋各笋段纹(壳)层组不同,多数由复合纹(壳)层组成。纹(壳)层轴(笋)心连线都有垂直、倾斜、“S”形等三类纹(壳)层组。凡轴(笋)心垂直者,均表示滴(着)落点在该沉积时段均固(稳定)轴(笋)心倾斜者,表示

滴(着)落点在该沉积时段,向倾斜方向缓慢位移,而轴(笋)心呈“S”形者,则显示滴水点在该沉积时段,沿某方向反复摆动位移。纹(壳)层组成厚度均由轴部(笋心)向周围渐薄,至笋肩往下,一般快速变化直至消失。石笋笋心或轴部的各类纹(壳)层组均有上拱、水平、下凹之分,即显示滴流水的钙饱和度变化趋势,又有滴水动态反映。当滴水的钙浓度小,在滴(着)落点(处)冲蚀尚未固结的碳酸钙,形成凹处而积水,直至 CO_2 逸出超过饱和时,在水中沉积碳酸钙呈微粒状。而晶牙(片)状方解石则粘结于穴(凹)内外壁,并沿纹层面沉积。若沉积呈波纹、脑纹状纹(壳)层面,前者层流水水量大、流速快,后者,水量小,流速慢。

2.2 纹(壳)层层面构造及其成因

石笋纹(壳)层层面呈上凹、水平、下凹及其波纹状或脑纹状纹饰是普遍的常态构造,固然有其滴流水性质和流动(动)态及洞穴环境因素的影响,然而有足量的岩溶水形成洞顶滴流水却是关键。因此,降水量及区域环境和地下洞道(穴)系统等环境因素,是形成层面构造的主导因素。纹(壳)层面(特别是纹(壳)层组间、旋回间的一些具时空意义的纹(壳)层面)由于有沉积间断,有风化作用的参与,可能造成间断层(面)上、下及其纹(壳)层面构造和组合类型都不相同或局部不同。为此,探求判别上、下纹(壳)层组的层面构造协调或不协调及其界面构造特征是关键,即从常态层面构造中,分出间断纹(壳)层面、不协调或局部不协调纹层面和协调或基本协调的纹(壳)层面。这三种纹层面均具有不同的特征意义,通常①间断纹(壳)层面,具明显的风化壳层或强暗化(含炭质)和粒化层,甚至其间局部有间断纹(壳)层组。而且,其上、下纹(壳)层组差异极大。②不协调或局部不协调的纹(壳)层,风化壳层面不太明显,或暗化层和泥粒化层弱。但是,其上、下纹(壳)层组的结构构造,组合构造的差异明显,甚至截然交切。沉积间断时间能从上、下纹(壳)层测年差得知,或据上、下纹(壳)层组测年值推算。此类纹(壳)层(组)取决于气候旋回性和阶段性变化及其制约的地质环境因素。③协调或基本协调的纹(壳)层面,风化壳层隐约呈现,暗化和泥粒化层均较弱,其上、下纹(壳)层组结构、构造组合有差异,或明显不同,但不易按上、下纹(壳)层组测年作判断或推算,这类纹(壳)层(组)反映洞顶滴流水基本保持稳定、物源供给充足和稳定的气候环境。

纹(壳)层间的沉积间断时间的长短,可根据其上下纹层测年异常值进行判断或推算。间断纹(壳)层面的成因有二:其一是气候的影响,当气候寒冷、干旱时,导致洞顶滴流水停滴,造成石笋有长期沉积间断,反映

了气候旋回性和阶段性环境变化的影响;其二是地质灾害事件,这是因地震或洞顶坍塌石块而碰断生长的石笋,而造成某时段缺失。

2.3 纹(壳)层层组类型的气候环境过程

根据石笋纹(壳)层的组成结构、构造类型和成笋的滴流水动态过程,将石笋纹(壳)层层组类型分为连续性、旋回性和间断(歇)性叠复层层组类型(表1、图2),各类均细分为间夹或互夹亚类。

2.3.1 连续性叠复层层组类型

由巨晶方解石组成晶柱(锥)状石笋,具沉积纹(壳)层残余,放射状构造较明显,有时这些构造时隐时显。其纹(壳)层组、旋回均呈隐现,有暗色层或含泥质层痕迹,沉积旋回间的暗色或泥粒化纹(壳)层明显,但沉积间断不明显。根据观测,这类石笋沉积在洞穴长年积水体(溶潭、池水)旁,石笋周围湿度100%。成笋洞段处在断裂裂隙带上或成笋洞厅(段)较封闭,洞顶滴流水量大,形成淋漓水层。上、下纹(壳)层协调叠复,纹(壳)层组厚度大、旋回多,是古气候演化期长、多冷暖阶段和显示富滴流水、高湿度的洞穴环境。而滴流淋漓水层、方解石巨晶,则是成晶环境的反映。贵州荔波龙泉洞2号石笋(图2C),高200 cm,沉积于68 446.5年至220.8年间,由5个沉积旋回组成(其中,①旋回为6.8~6.0万年;②旋回为2 385.1~1 917.4年;③旋回1 741.1~629.4年;④旋回547.3~302.1年;⑤旋回244.5~220.8年),其间有四次沉积间断。底部①旋回,形成于6.8万年前,为腊黄色方解石巨晶,微细纹层残余,脑纹状层面构造,属晚大理冰期严寒气候的产物,植被好。但①与②旋回间为第1间断层(面),有3~4 mm厚黑色炭质风化(壳)层,据上、下纹(壳)层年龄判定,属万年级间断时限,其间断时间达4.76万年,当是晚大理冰期盛冰期(阶),植被部分被草被取代。②~⑤旋回为雪白色方解石巨晶,其中有纹(壳)层残余,各旋回上段至顶部纹层较细、含泥质夹层多,略显沉积间断,其3次沉积间断延续时间分别为176年、82年、57年,属于冰后期暖湿阶段的产物,植被好。其纹层的结构构造,显示为3个温暖、冷湿转变亚阶段。

2.3.2 旋回性叠复层层组类型

锥(柱)状、柱(锥)状石笋(笋段)由粒—针状微细晶方解石纹(壳)层叠复构成。其叠复层的纹层、纹(壳)层组、旋回结构和放射构造都很明显,均具韵律性组合,旋回性、暗化、泥粒化间(夹)层明显。特别是纹(壳)层组间和旋回间的暗化、泥粒化纹(壳)层更明显,显示较长期沉积间断特征。有些可借用上、下纹(壳)层测定年龄异常或推算,能判定间断时间。观测测试

表 1 石笋沉积纹(壳)层层组类型表

Table.1 Sedimentary laminae or lamella groups and types of stalagmite

纹(壳)层层组		滴水动态	组成结构	构造类型 (组合)	主控因素	石笋剖面
类型	亚类					
连续性叠复纹(壳)层层组	间夹 互夹	洞顶滴水、洞底滴(着)落点固定,滴流水量大,具淋漓水层,无停滴	由巨晶粒状方解石组成,纹层残余结构呈间夹状,纹层残余呈互夹状	若干纹(壳)层组、旋回、连续、协调叠复构成柱状、锥(柱)状复合笋体。放射状构造隐现	气候与洞穴成晶环境	贵州衙门洞 1 号、龙泉洞 1 号、2 号石笋。桂林盘龙洞 6 号石笋
旋回性叠复纹(壳)层层组	间夹 互夹	滴(着)落点较固定,有时略位移或着落分散或筛状位移,有旋回或间断性短期停滴	粒—柱—针状,纹层呈间夹状或互夹状,纹层组合	若干纹(壳)层组、旋回,呈旋回性协调或局部不协调叠复,构成锥(柱)状复合笋体。放射状构造明显	气候与环境联(综)合	贵州董哥洞 3 号、4 号石笋,七星洞 1 号、6 号石笋,桂林盘龙洞 5 号、水南洞 1 号石笋
间断(歇)性叠复纹(壳)层层组	夹层 缺层	滴(着)落点较固定,有长期或时段性短期停滴	粒—针状方解石、微量粘土矿物、炭质组成。有间断纹(壳)层组。无间断纹(壳)层组,但有暗化、泥粒化层	若干纹(壳)层组、旋回,呈间夹协调或不协调叠复,构成锥(柱)状、柱(锥)状复合笋体。放射状构造,局部隐现	突(跃)变气候(期、阶段)或地质灾害	盘龙洞 1 号、2 号石笋。贵州七星洞 2 号、龙泉洞 2 号、6 号和衙门洞 1 号石笋。桂林丰鱼岩 6 号石笋

表明,纹(壳)层组及其旋回性,特别是其中的暗化、泥粒化纹(壳)层,尤其其间一些具标志性暗化、泥粒化纹(壳)层,是该沉积时段的气候环境的转换标志。纹(壳)层组、沉积旋回,特别是两者的组合,不仅显示沉积时间更长,还是古气候环境综合演变过程的反映。例如董歌洞 3 号石笋(图 2A),高 210 cm,石笋沉积(生长)于 163 300 年至 109 年间,由 6 个完整沉积旋回和刚开始沉积的 7 旋回组成。其间有 12 次沉积间断,6 次是主要的,⑥旋回(为 9.088 万年)与⑦旋回(为 109 年)间的第 6 次间断时间最长,达 9.06 万年。而其他间断时间较短,不影响气候环境分析。在 16.3~13 万年间的 3.3 万年时段,仅沉积 25 cm,构成笋底①旋回,沉积率 0.75mm/100 年。该石笋(段)纹(壳)层组,暗色和含泥质纹层夹(间)层特多,层厚为 0.1~0.2 mm,由细—微粒状针状方解石组成,应是大理冰期早中冰阶严寒气候的产物,在稀疏的喀斯特林地中,间夹较多灌丛草被。在 12.48 万年至 9.088 万年的 3.392 万年间,沉积了②~⑥旋回(其中,②旋回为 12.48~12.37 万年;③旋回为 12.02~12.08 万年;④旋回为 11.96~11.09 万年;⑤旋回为 10.51~98.3 万年;⑥旋回为 9.78~9.088 万年),生长 183 cm,平均沉积速率为 5.4mm/100 年。每个旋回段都有 2~3 个沉积间断,并以主间断作旋回分界。其沉积速率从②至⑥旋回逐渐减少,由②、③旋回的 9.43mm/100 年到④旋回的 7.76mm/100 年,减至⑤旋回的 4.88mm/100 年和⑥旋回的 2.02mm/100 年。6 个沉积旋回均由灰—雪白粒状间夹细微粒—针状方解石组成纹(壳)层组,旋回顶部间夹较多泥质灰黄色纹(壳)层。这些沉积特征是大理间冰阶,温湿—凉湿气候阶段的产物,反映当时洞顶峰体具有较好的森林植被条件。其间有四个间干

冷气候亚阶段,泥质纹(壳)层显示干冷气候,森林植被退化。9 万至 1 万年间是大理冰期盛冰期,极严寒,无滴水,以草被为主。末期显示,⑥与⑦旋回之间呈第 6 次间断,只形成风化壳层。在近 2000 年来,气候温暖,森林植被好,但仅沉积 4 cm 雪白色粒晶锥壳,即⑦旋回的开始(为 109 年至今)。而龙泉洞则快速沉积近 2 m 的雪白方解石巨晶柱笋。

2.3.3 间断(歇)性叠复层层组类型

间断(歇)性叠复层兼具连续性、旋回性叠复层层组类型的特征,但沉积间断稍长,时限均百年级以上。如盘龙洞 2 号石笋的第 1 间断面为黑色纹(壳)层,厚 2~3 mm,间断时间达万年,七星洞 6 号石笋间有凝结水石花纹(壳)层夹层,厚达 3~4 mm,间断时间为百年。有些夹间断纹(壳)层组,显示其间具间歇性沉积特征,如盘龙洞 1 号石笋 1 间断层(面)和 2 号石笋 9、10 间断层(面)间均有间歇沉积纹(壳)层组,其间断时间分别为百年、千年级,显示周期、亚周期的气候变化特征。

3 纹(壳)层组的年代学研究

国内外学者都重视洞穴沉(堆)积物的生物 1949 年后地层年代学研究^[8]。我国的研究始于北京猿人洞,解放后随着洞穴文化、考古的发展^[9,10],相继对广西巨猿洞、桂林甑皮岩、柳州柳江人洞和莲花洞、广东曲江马坝狮子山、安徽和县龙坛洞、鄂西建始高坪龙骨洞、贵州硝洞、犀牛洞等洞穴,做过深入的研究。均以生物化石作为年代依据,北京猿人洞和桂林罗胡子洞、太平岩还进行磁性地层学研究^[11],多数洞穴沉积物中的钙华板或石笋均有少量同位素测年。赵树森等首先引进石笋的测年方法^[12],开创北京猿人洞、北京石花

洞和各地洞穴石笋测年,多次总结南、北方石笋年代与气候的关系。汪训一等以桂林茅茅头大岩洞群石笋气候信息为例,进行了很有价值的探索^[13]。沈冠军等致力于洞穴考古的测年研究^[14]。为克服前人测年不足,选用当前高精测年方法。袁道先院士首先与北大技术物理系、考古系合作,利用加速器质谱(AMS-¹⁴C)¹⁴C方法,系统测定盘龙洞1号石笋(1.22m高)的年龄^[15,16]。他们发现105cm处存在新仙女木事件,认定是晚更新世与全新世的分界,以11080年为分界点。相继又与美国明尼苏达大学地质与地球物理系同位素室合作,利用热电离质谱TIMS-U系法,对贵州荔波董歌洞200~300cm高的3号、4号石笋以及都匀七星洞1号、2号、5号、6号石笋等,进行了系统测定。既证实了新仙女木、Heinrich等事件的存在,又确定13万年是中、晚更新世的分界。

石笋同位素年代学研究,随着测年技术和测试方法的提高,石笋测年分辨率已从千年级提高到百年,甚至十年级。尽管如此,但在测年精度方面,某些测试方法仍然存在有其局限性、样品的采集缺乏系统性以及采集样品的准确性等问题。如是否沿石笋纵剖面纹(壳)层轴(笋)心和代表纹壳层组顶和底层选取等等。此外,在进行同位素年代学研究时,必须以石笋沉积学的对比研究为基础,筛选典型的时空代表性纵剖面,对石笋纹(壳)层的氧、碳同位素进行系统测试和微量元素分析或发光性系统研究,特别是暗化色、泥粒化等特征性纹(壳)层的对比研究。为确保测试(年)数据的准确性和代表性,必须排除因成笋后受水体浸泡改造或遭地质灾害影响的样品,以避免测年数据出现不准确性或颠倒。

4 结论

(1) 洞穴石笋的最小沉积单位是纹(壳)层组成的基本单位是纹(壳)层组或旋回。若干纹层构成一个纹(壳)层组或自成沉积旋回,若干纹(壳)层组构成一个沉积旋回。旋回间往往有沉积间断,特别是旋回结束前会有多次间断。有些纹(壳)层组间或组内亦有沉积间断,当时间短时,沉积间断显示不明显,而沉积间断时间长者,则形成明显暗化间断层(面),甚至形成具间歇性沉积特征的间断纹(壳)层组。

(2) 洞穴石笋纹(壳)层以规模小、横向厚度变化快、纵向组合呈韵律性规律变化等特征,具陆相沉积特征。纹层叠复组成的纹(壳)层组具有区域性气候或沉积环境意义,其间夹的暗化、泥粒化纹(壳)层等,是气候变化的明显标志,具有特殊的环境意义。纹(壳)层沉积旋回性明显,其组合显示气候环境变化过程具旋

回性。其间的沉积间断,是气候旋回的跃(突)变点。沉积旋回(阶段)结束前的多次跃变,或长期沉积间断次数或时限,可以通过间断面上、下纹(壳)层的测定年龄异常或推算得知。

(3) 石笋纹(壳)层层组类型分为连续性、旋回性、间断(歇)性叠复纹(壳)层层组类型。连续性叠复纹(壳)层层组,显示气候变化和淋漓水层的成晶环境。旋回性叠复纹(壳)层层组,明显受气候旋回或阶段性制约,导致地表和地下洞穴环境呈周期性变化,引起洞顶滴流水的周期性动态变化,从而影响石笋的组分、组成、结构等的沉积纹层组合。间断(歇)性叠复纹(壳)层层组,则是气候跃(突)变强度和时限的反映,有些却是灾害事件的表现,反映了气候环境的突变而导致灾害事件的发生。

(4) 石笋年代学研究,随着测年技术、测试方法的提高以及采样方法的改进和样品用量的减少,石笋的分辨率已从千年级提高到百年,甚至十年级或年级。石笋纹(壳)层层组类型将成为年代气候学或年代环境学研究的重要物质组成之一。

致谢:研究工作始终在袁道先院士精心指导、帮助下进行,在研究期间得到李彬、曹建华、何师意、蒋忠诚、刘再华、王福星、汪训一、冉景丞、陈会明、余登利、王兆荣、彭子成等人的支持和帮助,特表谢忱。

参考文献(References)

- 张美良,林玉石,覃嘉铭等.桂林水南洞石笋的沉积学特征[J].沉积学报,1999,17(2):233~239 [Zhang Meiliang, Lin Yushi, Qin Jiaming, Sedimentological characteristics of a stalagmite from Shuinan cave, Guilin] [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(2):233~239]
- 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,1999,18(3):197~206 [Tan Ming, Pan Genxing, Wang Xianfeng et al, Stalagmites and Environment—Preliminary study on the formation of laminated stalagmites] [J]. Carsologica Sinica, 1999, 18(3):197~206]
- 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 karst process to environmental change and its record] [J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(13):1210~1213]
- 杨明德,谭明,梁虹.喀斯特流域水文地貌系统[M].北京:地质出版社,1998.24~34 [Yang Mingde, Tan Ming, Liang Hong. Hydrogeomorphological system of karst drainage basin] [M]. Beijing: Geological publishing house, 1998. 24~34]
- 覃嘉铭.古气候变化的石笋同位素记录—以桂林盘龙洞为例[J].地球学报,1997,18(3):225~260 [Qin Jiaming. Study on stalagmite isotope records of paleoclimatic changes] [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1997, 18(3):225~260]
- 谭明,秦小光,刘东升.石笋记录的年际、十年、百年尺度气候变化[J].中国科学,1998,28(3):272~277 [Tan Ming, Qin Xiaoguang,

- Liu Dongsheng, *et al.*. Interannual, decadal and century scale climatic changes revealed by stalagmite record[J]. *Science in China, Series D*, 1998, 41(4): 416~421]
- 7 李红春, 顾德隆, 陈文寄. 利用洞穴石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 重建 3000 年以来北京地区气候和古环境—石花洞研究系列之三[J]. *地震地质*, 1997, 19(1): 71~85 [Li Hongchun, Ku The-lung, Chen Wenji, *et al.*. Isotope studies of Shihua cave-III Reconstruction of paleoclimate and paleoenvironment of Beijing during the Last 3000 years from $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records in stalagmite[J]. *Seismology And Geology*, 1997, 19(1): 77~86]
- 8 杨子康, 牟昀智等. 北京猿人遗址综合研究[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 1~85 [Yang Zigeng, Mou Yunzhi. *Synthetic study of Beijing-Man cave site* [M]. Beijing: Scientific & Technical publishers, 1985. 1~85]
- 9 王丽娟. 桂林甑皮岩洞穴遗址第四纪孢粉分析[J]. *人类学报*, 1989, 8(1): 69~76 [Wang Lijuan. A Quaternary Sporo-pollen Analysis of Zengpiyan cave site, Guilin [J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 1989, 8(1): 69~76]
- 10 黄万波. 中国第四纪洞穴堆积[J]. *中国岩溶*, 1995, 14(增刊): 122~128 [Huang Wanbo. Quaternary cave accumulation in China [J]. *Carsologica Sinica*, 1995, 14(Supp.): 122~128]
- 11 刘育燕. 桂林甲宅太平岩洞穴石柱的古地磁年龄[J]. *中国岩溶*, 1995, 14(3): 247~250 [Liu Yuyan. Paleogeomagnetic age of column from Taiping cave, Guilin [J]. *Carsologica Sinica*, 1995, 14(3): 247~250]
- 12 赵树森, 刘明林, 乔广生. 中国东部喀斯特洞穴沉积物铀系年代 [J]. *中国岩溶*, 1989, 8(1): 53~61 [Zhao Shusen, Liu Minglin, Qiao Guangsheng. The U-series ages of speleothem of karst caves in east China [J]. *Carsologica Sinica*, 1989, 8(1): 53~61]
- 13 汪训一. 桂林茅头大岩洞穴沉积物的放射性年龄及氧、碳同位素特征[J]. *科学通报*, 1985, 30(2): 528~531 [Wang Xunyi. Ages and characteristics of carbon and oxygen isotope of cave sediments from Maomaotoudayan cave in Guilin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1985, 30(2): 528~531]
- 14 沈冠军. 热电离质谱法测定贵州郑洞石笋的铀系年代及其古气候意义[J]. *中国岩溶*, 1997, 16(1): 11~18 [Shen Guanjun, Bassem Gahleb, Jin Linhong. TIMS-U series dating of a stalagmite from Zhengjiadong cave in Guizhou and its paleoclimatic implications [J]. *Carsologica Sinica*, 1997, 16(1): 11~18]
- 15 覃嘉铭, 袁道先, 林玉石等. 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 [Qin jiaming, Yuan Daoxian, Lin Yushi, *et al.* High resolution records of $\delta^{13}\text{C}$ and its paleoecology significance from stalagmite formed in Holocene in Guilin [J]. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(4): 351~358]
- 16 林玉石, 张美良, 覃嘉铭. 桂林盘龙洞石笋地质时代与环境[A]. *岩溶与人类生存、环境、资源和灾害* [C]. 广西桂林: 广西师范大学出版社, 1996. 71~81 [Lin Yushi, Zhang Meiliang, Qin jiaming. Geological age and Paleo-environmental Records of a stslagmite from the Panlongdong cave, Guilin [A]. *Karst and Human Survival, Environment, Resources, and Hazard* [C]. Guilin, Guangxi: Teachers University Press, 1996. 71~81]

Study on Laminae or Lamella Groups and Types of Stalagmite in Caves

ZHANG Mei-liang LIN Yu-shi QIN Jia-ming
(Institute of Karst Geology CAGS, Guilin Guangxi 541004)

Abstract Stalagmite is a typical dripstone shape of CaCO_3 in caves and the most comprehensive and systematical paleoclimate environment information carrier too. With advances of dating techniques and analytic methods with high resolution it is of great significance in the paleoclimate environment reconstruction. The combination, thickness, grain size and bedding plane structure of depositional laminae in stalagmite are the material base to resume dropping water trends of forming stalagmite and the related paleo-hydrological conditions. On the basis of the analysis and study of many stalagmite vertical profiles and systematic isotopic compositions, trace elements and specific laminae, it has been demonstrated that stalagmite sedimentary laminae have obvious rhythmic combination, sedimentary cycles and indication of paleoclimatic environments. It is firstly put forward that stalagmite is of lamina groups of cone in cone, cone and pillar, cone in cone and pillar combined types and with the sedimentary structures, such as continuity, cycle, disconnected and compound lamina types. The paper discusses their individual characteristics, trends of dropping and flow water and evolutionary characteristics of climatic environments.

Key words cave stalagmite, sediment laminae, lamina types, paleoclimatic environment