

文章编号: 1001- 4810(1999)03- 0197- 09

石笋与环境

—— 石笋纹层形成的环境机理初探^{*}

谭 明^①, 潘根兴^②, 王先锋^①, 秦小光^①, 滕永忠^②, 宋林华^③, 林玉石^④

① 中科院地质与地球物理研究所洞穴沉积古气候实验室, 北京 100029; ② 南京农业大学, 南京 210095;

③ 中科院地理所, 北京 100101; ④ 国土资源部岩溶动力学开放实验室, 桂林 541004

摘 要: 石笋沉积的生长条带从剖面图式可分为两大类: 一类没有明确的沉积旋回界面, 难以按层计数, 称为“生长纹理”; 另一类具有确定的沉积旋回界面, 可以按层计数, 称为“生长层理”。石笋生长层理可以发展成为一类重要的断代工具。中国北方型微层的形成可能主要与干湿季变化明显的气候条件, 以及富含有机质和碱性交换态离子的土壤类型密切相关。而南方型微层的形成可能主要与较长时间的降水和有机质淋滤以及盛夏高温少降水的配置有关。如果沉积物中某种要素对物源或水流通过路径的环境变化能够灵敏反应, 并按一定的时间单元将这些变化记录下来, 就能成为高分辨的气候—环境变化信息库。

关键词: 石笋; 环境; 气候—土壤动力

中图分类号: P543. 63 **文献标识码:** A

0 引 言

对今后十到百年全球气候—环境变化的预测是全球变化研究中极富挑战性的任务。为了达到这个目标, 我们必须获取最近数千年有精确年代控制的连续的高分辨率自然记录(分辨率达到年)^[1]。由于目前放射性年代测定方法不能满足时标控制精确到年的要求, 所以我们只能采用具有年、季旋回界面因而能够自我记年的自然材料以达到上述目的。迄今所知这种材料有珊瑚礁年层、树木年轮、冰岩芯年层、湖泊纹泥和石笋年层。与其它自然物相比, 洞穴石笋从沿海到内陆, 从热带到寒带都能找到, 而其时间跨度可从现代追溯到数千、数万年前, 因此是很重要的一类高分辨率自然材料。

研究表明, 岩溶过程受到岩溶系统中土壤化学场的制约^[2]。从物源和过程分析, 石笋形成经历了大气降水渗入土壤获取大量生物成因二氧化碳, 增强溶蚀力后溶解下伏于土壤的碳酸盐岩, 溶液到达洞穴释放二氧化碳后于洞底沉积碳酸钙。因此, 不同的气候、土壤、岩石和水文

^{*} 此项工作得到中国科学院资源与生态环境重点项目(KZ952-J1-014)、国家自然科学基金重大基金(49874170)和面上基金(49272141)的资助。

第一作者简介: 谭明, 男, 1954年生, 理学博士。

收稿日期: 1999-06-07

条件决定了不同的石笋沉积类型和剖面图式。如果物源或水流通过路径的环境发生变化,而沉积物中又有对这些变化能够灵敏反应的要素,则石笋会以某种方式将这些变化记录下来。当石笋同时能以沉积韵律自我计年,就成为高分辨的气候—环境变化信息库。

通常,将石笋平行于生长轴切开,大都可以凭肉眼见到从下向上平行展布的生长条带,而垂直于生长轴切开,则能见到从内向外呈同心圆展布的生长条带。但在显微镜下以薄片观察,却能发现各种生长条带的显微图像具有极大的差异。从气候—环境记录的应用角度可将其分为两大类:一类没有明确的沉积旋回界面,明暗条带难以计数,称为“生长纹理”(图 1-a)。“纹”即指颜色不同或明暗不同的条带,不对应一个单元时间。另一类具有明确的沉积旋回界面,可以计数,称为“生长层理”(图 1-b)。“层”即指两层界面所夹的物质部分,代表一个单元时间^[2]。这一类是发展高分辨年代学或计数年代学的好材料。

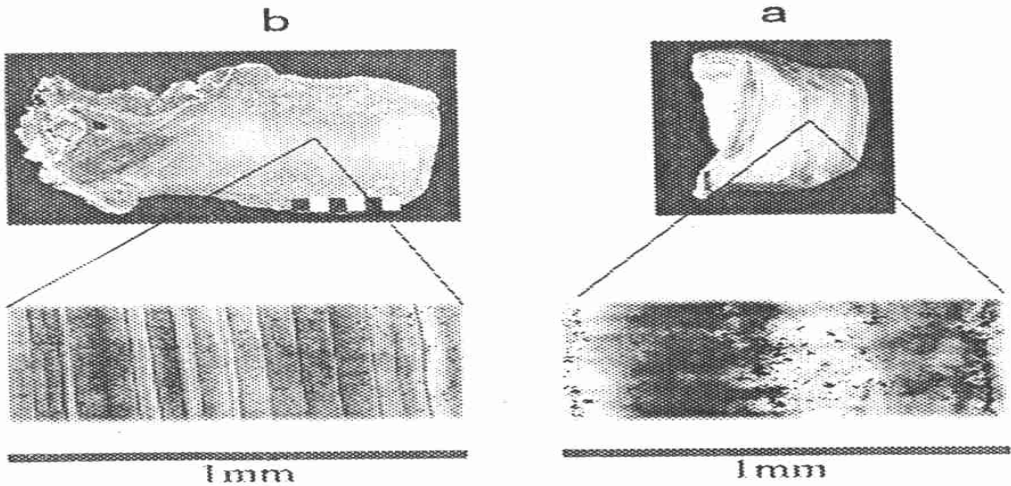


图 1 石笋生长纹理 (a)和生长层理 (b)的比较

(a,样品采自河南鸡冠洞; b,样品采自北京石花洞)

Fig. 1 Comparison between the growth laminae (a) and the growth layer (b) of stalagmites

1 石笋沉积模式与气候—土壤动力过程

石笋沉积剖面为什么会有如此大的差异(图 1所示)?当我们希望将石笋作为气候—环境变化信息库时,这是一个需要回答的问题。但还不仅如此,通过大量的取样观察,我们已经知道即使在同—个地区甚至同—个洞穴,石笋也会有不同的沉积模式。在此情况下,这种差异显然不能归因于气候条件或岩石条件,因为对于同—个地区或同—个洞穴来说它们是相同的。石笋沉积图式中丰富的色调或纹理变化通过成分分析以及荧光显微镜观察,了解到主要是粘土元素和有机质含量的变化,即土壤系统所供给物质的变化,因此可以认为,作为环境变化记录器的石笋最直接记录的是土壤动力过程。所以,对应于上述两类石笋沉积模式,我们可以假设土壤动力过程也可以分为两类:一类是非周期性的物质淋滤过程,另一类是严格周期性的物质淋滤过程。

我们通过统计还发现,虽然同—个地区或同—个洞穴的石笋沉积模式可能不尽相同,但其中多数仍能找出共同特征。这也说明,一定的气候条件及其所决定的主要土壤动力过程对石笋

沉积模式形成的作用仍是主要的。一些特殊的也是局部的近地面过程仅形成了少数的非主流的石笋沉积模式。为了了解具体的过程机制,我们将近年来所做的石笋原位分析和土壤淋滤试验结果进行了比较。

通过实体显微镜、荧光显微镜、矿物显微镜和扫描电镜的综合观察,了解到图 1-b 中的石笋微层层面是一特殊的物质界面,界面物质是外源性的,主要来源于洞穴上覆土壤;而微层界面所夹的透明方解石主要来源于基岩碳酸钙。所以,可以利用高分辨、高精度和高灵敏的原位分析仪器了解其地球化学标志及其变化。石笋微层的原位分析采用美国 PHI-Evans 公司生产的 TOF-2000 二次离子质谱 (SIMS),空间分辨率可达到 $1\mu\text{m}$ 。在微层地球化学标志中采用 Mg 作为输入变化的示踪元素,经分析,发现微层界面上出现高低不等的 Mg 峰(图 2)。这个结果表明 Mg 元素具有与微层韵律同步的脉冲沉积过程,与国外的石笋微层 SIMS 结果也一致^[3]。由于石笋最直接记录的是土壤的物质输送模式,所以可以假设这种脉冲沉积实际上映射了土壤物质的脉冲输送。问题是,这种土壤物质的脉冲输送机制如何?它应与上覆土壤的元素地球化学迁移特性有关。我们希望通过土壤的淋滤实验予以证实。

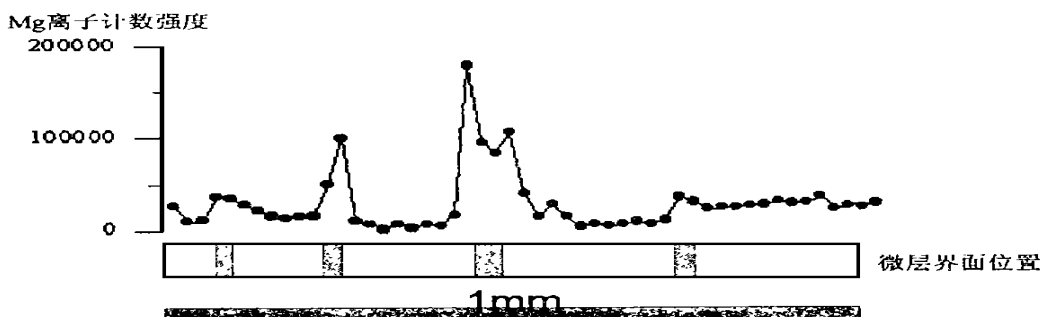


图 2 石笋微层的二次离子质谱 Mg 原位分析
(分析长度为 1mm,图中阴影部分是层面所在位置)

Fig. 2 In situ analysis of stalagmite growth layer with secondary ionization mass spectrometry (SIMS)
(The whole analyzed length is 1mm; the shaded parts indicate where the beddings are)

土壤淋滤实验采用 10cm 直径塑料管,高 50cm,土柱装高 30cm;采集岩溶地区不同地貌部位的土壤作实验对比(表 1)。

表 1 淋滤对比实验的不同土壤特性指标

Tab. 1 Results of the leaching correlation experiment of different types of soils

编号	土壤来源	有机碳 (g/kg)	交换态 Mg (mg/kg)	碳酸盐结合态 Mg (mg/kg)	紧结有机态 Mg (mg/kg)
a	坡地 B 层	4.23	7.69	0.69	3.17
b	洼地亚表层	59.15	87.18	1.83	0.00

采土进行实验开始于 10 月,淋滤分析过程持续半年。每次采用纯水 1095ml 淋滤。淋滤的时间间隔前 8 次每两次间隔为 6 天;第 8 次到第 11 次每两次间隔为 10 天;第 11 次到第 12 次间隔为 38 天。对每次渗过土壤的淋滤液测定其 Mg^{2+} 浓度的变化。结果表明(图 3),不同的土壤类型,由于有机质含量、交换态、碳酸盐结合态和紧结有机态的 Mg 含量不同,导致 Mg^{2+} 的

变化过程对停水的不同响应。图 3中,对应于较长时间的停水(相当于自然状态下长时间的间雨期或旱季),a型土壤由于有机质、交换态和碳酸盐结合态 Mg 含量较低,而紧结有机态 Mg 含量较高,没有能够形成 Mg 离子的“再生峰”(图 3-a),也可以说没有离子峰干旱效应;b型土壤由于有机质、交换态 Mg 和碳酸盐结合态 Mg 含量较高,而紧结有机态 Mg 几乎没有,长期停水后形成了 Mg 离子的“再生峰”(图 3-b),即存在离子峰干旱效应。这个结果可能揭示了生成石笋沉积纹层的两个重要机制:其一,如果气候干湿季不明显,可淋滤的土壤物质没有环境涨落,这种情况下难于形成旋回性的石笋生长层理。因此,要形成生长层理必须具备形成层理的气候驱动力。其二,如果气候干湿季明显,也只有在有机质、交换态离子含量较高的土壤条件下,由于其具有可淋滤物质的干旱响应,旱季后可淋滤物质的再生峰可造成石笋年生长层理,即必须具备形成层理的土壤驱动力——层面物质的输入能够在旱季后雨季的前期以脉冲方式快速完成。并且我们还可以得到一个推论:年内层(sublayer)^[4]很可能就是由于两场雨之间间隔较长造成的。

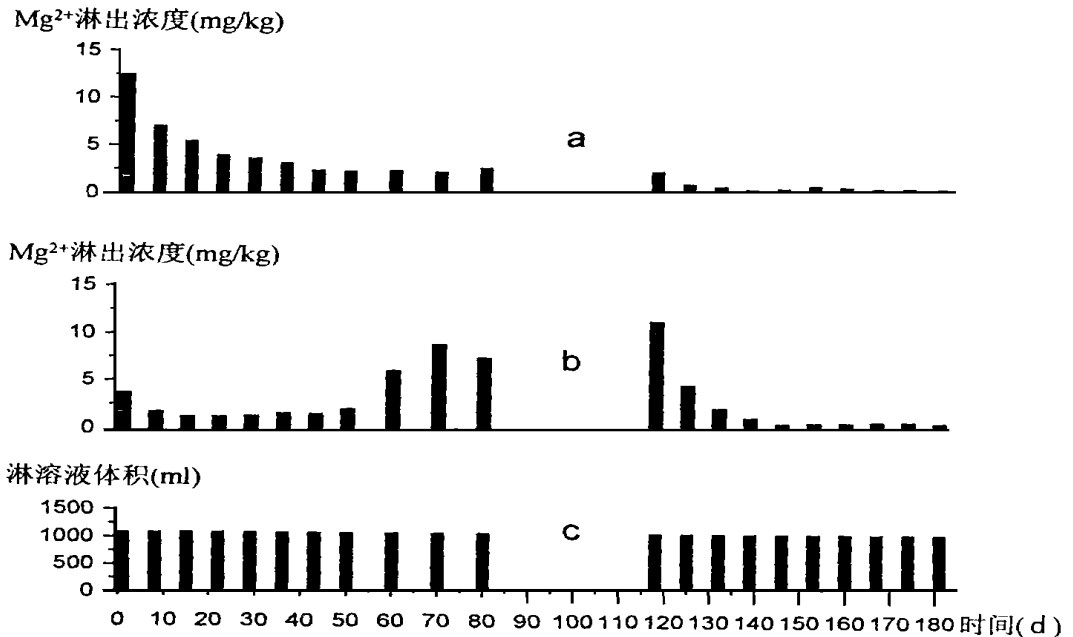


图 3 在不同土壤中 Mg 离子的淋滤对比实验结果

(a 为坡地 B 层土壤结果; b 为洼地亚表层土壤结果; c 说明不同时间的等量淋滤)

Fig. 3 Experiment of soil leaching in different types of soils (slope soil (a), depression soil (b) and the leaching with 1095 ml at different time (c))

所以,纹理和层理不但是不同的气候而且也是不同土壤的产物。这样,我们就不难理解为什么在同一个洞穴会有不同的石笋沉积模式:石灰岩山区的土被条件差别很大,有的地方非常瘠薄,甚至基岩裸露,而在裂隙发育处土壤较为深厚,发育层次较为齐全。因此在相同的气候、岩石条件下由于土壤条件或物质供给系统的差异造成了同一洞穴石笋沉积模式的差异。

2 石笋沉积模式与气候—水文动力过程

过去我们对洞穴化学沉积速率的认识主要依靠放射性年代测定,这种方法永远只能计算样品某一时段的平均沉积速率。随着近年来国内外对石笋沉积旋回与气候旋回关系研究工作的深入开展,现在我们已经能够通过建立石笋日历年表,查找任一年份的沉积速率,同时我们发现石笋不但在不同年代沉积速率可以有很大的差别,而且沉积速率经常出现快速变化,可能反映了短尺度的气候突变事件^[5]。

在此要特别提出讨论的是,我们发现在年分辨率上,同一个洞穴的石笋存在着很大的沉积速率差异,这显然也不能归结为气候原因,如图 4 所示,取自北京石花洞的两个石笋的层厚就差别很大。但由于这里的石笋层厚变化主要反映降水变化^[6],所以图中 A B 两段都记录了年降水从少逐渐变多再逐渐变少这样一个完整的反映趋势突变^[7]的气候振动。

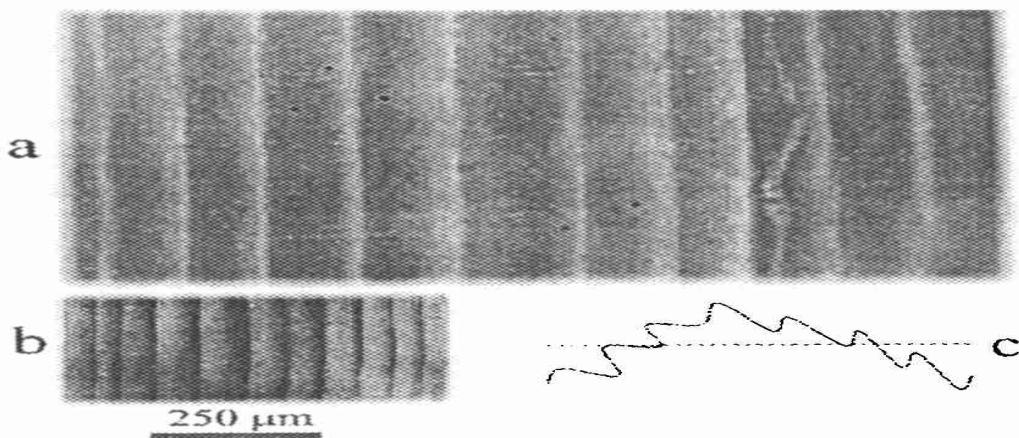


图 4 北京石花洞石笋 TS9701(a)和 TS9501(b)的沉积速率(即年沉积量)比较及相同的趋势变化曲线(c)

Fig. 4 The comparison of sedimentary rates between stalagmite TS9701 (a) and T S9501 (b) from Shihua Cave, Beijing, and the curve (c) showing a same change trend

同一个洞穴的石笋存在如此大的沉积速率差异说明不同渗水管道在水文地质、水文物理和水化学等方面的差别。已有研究表明不同的滴率^[8]、不同的滴水钙离子浓度^[9]等均能导致沉积速率的差异。因此,当我们将石笋微层的某些指标选作气候记录时一定要小心翼翼地把气候信息与非气候信息区分开来。

3 中国东部石笋微生长层的主要类型

对我国东部一些重要洞穴(辽宁本溪水洞、北京石花洞和银狐洞、河北临城白云洞、河南栾川鸡冠洞、南京汤山葫芦洞、浙江桐庐瑶琳洞、广西荔蒲丰鱼岩及桂林盘龙洞、贵州龙泉洞和金狮洞)取样观察,初步了解到中国东部石笋微生长层类型可大致分为北方型和南方型(图 5)。北方型包括本溪水洞石笋(图 5-a)、北京银狐洞石笋(图 5-b)、北京石花洞石笋(图 5-c)等,而

南京汤山葫芦洞石笋也像北方型(图 5-d)。其共同特征是:石笋微层韵律由很薄的不透光层与较厚的透光方解石层构成。组成石笋的矿物主要为“放射状纤维晶方解石”。方解石晶束垂直于微层层面生长,在电镜下纤维晶面可见而微层层面不可见。微层界面在普通透射光下呈不透光暗面,在紫外光照射下呈蓝色发光面,具有双重光性^[10]。经二次离子质谱^[11]和透射电镜分析,微层界面上富含有机质,经化学分析,已知石笋中发光的有机质主要为胡敏酸和富里酸,同时富含 Al S Fe等粘土矿物元素,应为“外源物质界面”类型。这一类微层经过近年来国内外的的工作分析^[6,12],表明主要按年旋回。微层中时见亚微层(如图 5-b),按前述土壤淋滤实验分析应为年层中的雨层。

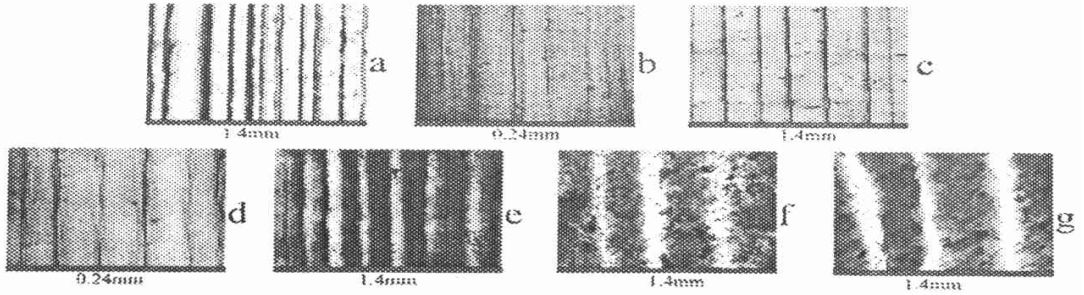


图 5 中国东部主要石笋微层类型

Fig. 5 Main micro-layer types of stalagmites from east China

石笋微生长层的南方型以浙江瑶琳洞石笋(图 5-e)、广西桂林盘龙洞石笋(图 5-f)和贵州龙泉洞石笋(图 5-g)为代表。其共同特征是在透射光下明暗条带有规律地相间排列(互层),边界比较清晰,通常暗带厚而亮带薄。在紫外光照射下暗带发光而亮带不发光。我们假设在一个沉积旋回中,南方有更长时间的有机质淋滤过程。如果假设成立,南方石笋应该比北方石笋的有机质含量高。为了证明南北方石笋有机质含量的差异,进行了有机质热解检测,结果如表 2

表 2 南北方石笋有机质含量对比

Tab. 2 Comparison between the contents of organic matter in the stalagmites from the North and from the South of east China

样品产地与编号	有机碳 TOC(%)	热解烃 (mg/g)	有机二氧化碳 (mg/g)	有效碳 PC(%)
北京石花洞石笋 9701	0.05	0.05	0.13	0.02
广西盘龙洞石笋 98X1	0.45	3.87	0.51	0.33
广西丰鱼岩石笋 9801	0.29	2.09	0.32	0.22

从表 2 的结果可见南方石笋中的有机碳、热解烃等均比北方石笋高一个数量级!这就证实了前面的假设。从南方石笋微层旋回的图式看,有机质似乎是在多雨条件下即时产生即时淋滤,与北方的脉冲式淋滤完全不同。

问题是在明暗互层的微层中,乏有机质的亮带何时形成?机理怎样?通过对南北不同的年内降水—气温配置形式的比较(图 6),现试给出一个初步的推测:在气温方面,除了北方冬温普遍比南方低以外,气温变化的模式是相似的(图 6中虚线)。但南北方的降水年内分布和持续

时间差别很大(图 6 中实线),这种降水的差异及其与气温的配置关系很可能是导致南北方微层模式不同的主要原因。北方如北京降水集中于 7~8 月份,同时也是全年气温最高的月份,干旱期长达半年以上(图 6-a)。如果土壤性质合适,脉冲式的淋滤过程就发育了北方“暗层薄亮层厚”的微层类型。微层韵律即为每年长旱期和短雨期交替的记录。南方如桂林年降水的时间开始较早,降水峰值出现于 5 月,持续的时间较长,还有一个秋雨峰,在 7~8 月高温期降水反而减少(图 6-b),很可能在此期间不利于土壤微生物活动,土壤有机质生产率下降,是形成亮层的时期。如果土壤性质合适,就成为发育南方“暗层厚亮层薄”微层类型的条件。相比之下,南京的降水与气温配置关系更像北方(图 6-c),这也许是南京的石笋微层更像北方类型的一个重要原因。

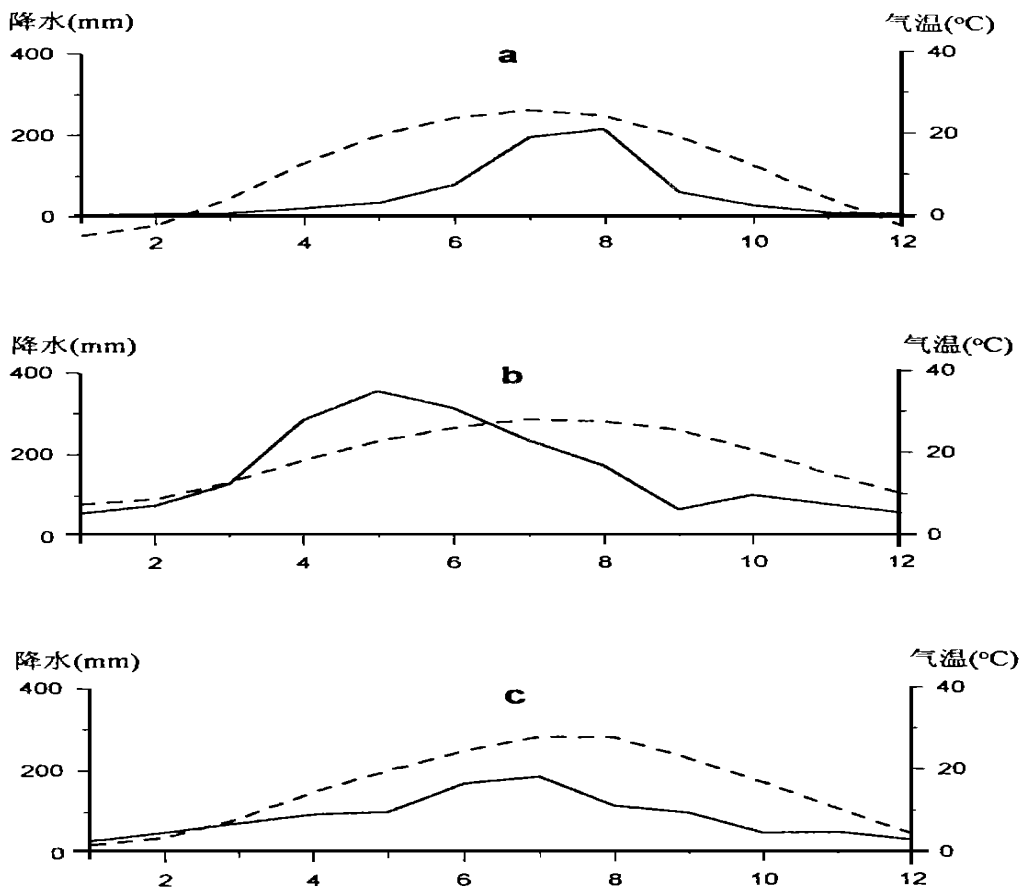


图 6 北京 (a)、桂林 (b) 和南京 (c) 30 年 (1951-1980) 平均月降水和月均温分布^①

Fig. 6 Monthly average precipitation and monthly mean temperature in Beijing (a), Guilin (b) and Nanjing (c) in 30 years (1951-1980)

实际上,在各地碳酸盐岩上发育的土壤由于受地带性生物气候的影响,已表现出诸如黑色石灰土、棕色石灰土和红色石灰土等不同性状差别^[13],因此,在不同气候条件驱动下的不同土

^① 资料来源于国家气象局。

壤动力过程导致了我国南北方石笋纹层的差异。

4 结 语

综上所述,我们得到以下初步认识:

(1)如果本文对于石笋纹层图式与气候—土壤动力过程的关系分析是正确的,那么我们就找到了一个高分辨的土壤过程记录器。即石笋不但可以高分辨记录气候变化,实际上更直接地记录了土壤动力过程,因此,我们可以在石笋中逐年追溯洞穴上覆土壤的过去环境地球化学变化和物质迁移的历史

(2)中国东部南北方石笋沉积旋回类型的差异反映了中国南北方的气候条件及其影响下的土壤地球化学过程的地带性差异

(3)石笋能够成为一种断代工具有赖于石笋年层标志的建立,也就有赖于石笋微层沉积动力学进一步发展。气候驱动力和土壤驱动力以及它们的互动作用是研究高分辨的石笋沉积旋回时均不可忽视的三个同等重要的方面

致 谢:感谢洞穴研究会、国土资源部岩溶动力学开放实验室、刘东生院士、袁道先院士、林钧枢教授对此项工作的关心和帮助;感谢各取样洞穴管理处对本项工作的支持。

参考文献:

- [1] PAGES. Paleoclimates of the Northern and Southern Hemispheres, Pages Series 95- 1, Bern, Pages Press, 1995
- [2] Pan G., Tao Y., Teng Y., Xu S., Sun Y., Han F. Influence of pedochemical field on epikarstification in subtropical humid region. Field monitoring and laboratory experiment[J]. Acta Carsologica, 1998, 27(11): 175- 186
- [3] W. 斯瓦尔扎克. 徐桂荣译, 刘绶堂, 赵鹏大校. 沉积模型和定量地层学 [M]. 北京: 地质出版社, 1984. 10- 21
- [4] Roberts M S, Smart P L, Baker A. Annual trace element variations in a Holocene speleothem[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1998, 154. 237- 246.
- [5] Tan Ming, Liu Tungsheng, Qin Xiaoguang, Wang Xianfeng, Signification chrono-climatique de spéléothèmes laminaires de Chine du Nord[J], Karstologia, 1998, No. 32- 2/1998. 1- 6.
- [6] 谭明, 秦小光, 刘东生. 石笋记录的年际、十年、百年尺度气候变化 [J]. 中国科学 (D集), 1998, 28(3): 272- 277.
- [7] 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.
- [8] 李崇银. 气候动力学引论 [M]. 北京: 气象出版社, 1995. 5- 6.
- [9] 程星. 滴水形态组合及滴率条件——以贵州洞穴为例 [J]. 中国岩溶, 1990, 9(2) 119- 129.
- [10] W. Dreybrodt, Chemical Kinetics, Speleothem Growth and Climate, [in] Climate Change The Karst Record [C], ed. by Stein-Erik Lauritzen, published by Karst Waters Institute, Inc. West Virginia, 23- 25.
- [11] 谭明, 秦小光, 沈凇梅等. 中国洞穴碳酸盐双重光性显微旋回及其意义 [J]. 科学通报, 1999, 44(6), 646- 648.
- [12] 王先锋, 刘东生, 梁汉东等. 石笋微层物质组成的二次离子质谱初步分析及其气候意义 [J]. 第四纪研究, 1999, (1): 59- 66.
- [13] Baker A., Smart P. L., Edwards R. L., and Richards D. A., Annual growth banding in a cave stalagmite[J], Nature, 1993, v. 364. 518- 520.
- [14] 中科院《中国自然地理》编辑委员会. 中国自然地理土壤地理 [M]. 北京: 科学出版社, 1981. 104.

STALAGMITES AND ENVIRONMENT

— Preliminary Study on the Formation of Laminated Stalagmites

TAN Ming^①, PAN Gen-xing^②, WANG Xian-feng^①, QIN Xiao-guang^①,
TENG Yong-zhong^②, SONG Lin-hua^③, LIN Yu-shi^④

① *Laboratory of Speleothem, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*

② *College of Resource and Environment Sciences, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China;*

③ *Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101 China;*

④ *Karst Dynamics Laboratory, the Ministry of Land and Resources, Guilin 541004, China)*

Abstract Stalagmites have been used as high-resolution climatic records since the annual lamination was discovered. Almost all stalagmites exhibit growth bands on their polishing sections. Growth bands can be divided into two classes growth laminae showed by different color strips, and growth layer of calcite defined by horizontal divisions which are special material-made interfaces. The stalagmite micro-layer is one of the best means of chronological counting. A few of authors have interpreted why some stalagmites have laminated cycles under special climatic and geologic backgrounds. But no one knows why, even if from the same cave, some stalagmites have laminated cycles and others have not. It is clear that this situation can not be due to the causes of climate and geology.

Soil, in fact, is another important dynamic factor for the formation of stalagmite lamination. It has been known, by the *in situ* analysis of second ionization mass spectrometry (SIMS), that the interface of the layer consists of organic matter and clay elements such as Al, Si and Fe which are directly from the covering soil. The soil leaching experiment shows that the soil which is abundant in organic matter, can supply a mass pulse which forms the layer interface after a rather long time of stopping washing, i. e. this kind of soil is responsible for the annual sedimentary cycle in a stalagmite due to an effect of drought, and for the sub-layer, further, due to the interval of rains.

In east China, the micro-layers of stalagmites can be classified into the northern type and the southern type. The northern type such as samples from the Water Cave in Liaoning province, Shihua Cave and Yinhu Cave in Beijing city have very thin dark beddings that consist of organic matter (mainly humic acid and fulvic acid) and elements from clast, and rather thick bright layers that consist of calcite. The samples from Hulu Cave in Nanjing city are similar to the northern type. The southern type such as samples from Yaolin Cave in Zhejiang province, Panlong Cave in Guangxi province and Longquan Cave in Guizhou province, conversely, have thick dark strips that consist of calcite rich in organic matter and thin bright strips that consist of calcite lack of organic matter. So, stalagmites may record the processes both in climate and in soil.

Key words Stalagmite; Environment; Climate-soil kinetics