

高滨升,胡超涌.石笋生长直径的测定及其在古气候重建中的应用[J].中国岩溶,2019,38(3):353-360.  
DOI:10.11932/karst2019y16

# 石笋生长直径的测定及其在古气候重建中的应用

高滨升,胡超涌

(中国地质大学(武汉)地球科学学院,武汉 430074)

**摘 要:**石笋是第四纪陆地气候重建的良好信息载体,对了解过去气候和环境的演变十分重要。中国石笋具有生长相对连续,年代准确,信息丰富等特点,为全球季风及其长期演化提供了不可多得的视窗。基于石笋而开发了一系列气候替代指标,如  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、微量元素及其同位素组成、有机化合物及其同位素组成、生长速率等,在石笋古气候重建中得到广泛的应用。但是,作为石笋形貌学的基本特征,对石笋的生长直径及其对气候变化的指示意义却鲜有报道。本研究中,作者首先提出一种测定石笋生长直径的方法,然后利用该方法测定了湖北清江和尚洞 HS4 石笋顶部 35 cm 的石笋生长直径,并与研究区的气温和洪涝频率记录进行比较,探讨石笋生长直径对气候变化的响应。研究表明,通过纹层的识别和不同深度上纹层宽度的测定而建立的指数回归法较好地表征了石笋的生长直径,适合于一些具有明显纹层的石笋直径测定。HS4 石笋的实际生长直径比理论计算值偏小,可能与洞穴结构有关;高的落差增加了岩溶滴水的冲力,水滴飞溅而导致有效水量的损失,即滴水的有效体积减少,石笋直径偏小。与温度相比,降水对石笋直径的影响更加显著,因而石笋直径是一个有效降水的替代指标,有望在石笋古气候的研究中得到应用。

**关键词:**石笋;直径;滴水速率;洪涝频率;长江中游

**中图分类号:**P532 **文献标识码:**A

**文章编号:**1001-4810(2019)03-0353-08

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## 0 引 言

洞穴石笋具有时间序列长、年代精确、高频和低频信息共存、分布广泛等优点,在陆地古气候和古环境重建中发挥越来越重要的作用,是湖泊、黄土、冰芯等之后发掘的重要古气候研究载体。石笋的一些地球化学组成,如碳氧同位素<sup>[1-5]</sup>、微量元素及其同位素<sup>[6-9]</sup>、有机物组成(包括分子标志物、荧光等)<sup>[10-12]</sup>作为古气候的替代指标,已被用于指示过去气候的演变。例如,中国石笋氧同位素组成,为了解 64 万年以来的亚洲季风演变提供了翔实的资料<sup>[5]</sup>。

除了地球化学指标外,石笋的物理特性和形貌学特征,如石笋密度(比重)<sup>[13]</sup>、灰度<sup>[14-15]</sup>、磁化率<sup>[16]</sup>、

生长速率<sup>[17]</sup>和生长直径<sup>[18-19]</sup>等指标,因其与气候变化存在密切的关系,也被认为是气候变化的灵敏指示器。鉴于石笋的生长依赖于温度和降水及其它们引起的水动力和水化学组成,生长速率作为古温度和古降水的替代指标受到广泛的重视。Raisback 等<sup>[20]</sup>调查了 Botswana 洞穴的一支文石和方解石互层石笋,发现方解石层厚度与降水相关,而文石层厚度与温度相关。Polyak & Asmerom<sup>[21]</sup>对美国西南部石笋的微层厚度进行了分析,认为可以较好地反映当地降水变化。Frisia 等<sup>[22]</sup>在对意大利石笋年层厚度的研究中发现,气温对石笋年层厚度响应优于降水。Tan<sup>[17]</sup>基于现代气象观测记录的校验,重建了北京地区 2650 年以来夏季温度变化。Proctor 等<sup>[23]</sup>认为苏格

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41731177)

第一作者简介:高滨升(1997-),男,本科在读,专业方向:地理科学。E-mail:binshenggao@cug.edu.cn。

通信作者:胡超涌(1964-),教授,研究方向为过去全球变化。E-mail:chyhu@cug.edu.cn。

收稿日期:2019-01-20

兰石笋最近 1000 年的年层厚度指示了北大西洋气候变化,而 Brook 等<sup>[24]</sup>展示了石笋生长速率在降水和 ENSO 事件研究的潜力。

相比于生长速率,石笋形貌学的另一个特征——生长直径,却很少受到重视。Franke<sup>[25]</sup>认为石笋生长的直径与滴水速率成正相关,后者又与当地的降水量有关,意味着石笋直径可以指示降水的多寡。Kaufmann<sup>[18]</sup>通过石笋生长的物理化学过程的解析,开发了一个石笋生长的数学模式。Kaufmann & Dreybrodt<sup>[19]</sup>进一步发展了模式,并且理论上重建了冰期—间冰期石笋生长的平衡直径。他们的理论研究表明,石笋直径主要依赖于滴水时间间隔,间隔越长,直径越小,但最小直径应该不低于 4 cm,与 Curl<sup>[26]</sup>预测的结果基本相同。这些研究均表明,滴水速率(降水)是控制石笋直径大小的主导因素,因而石笋直径是重建降水的潜在指标。然而,大多数石笋的直径测量较为困难<sup>[19]</sup>,限制了其在石笋古气候研究中的应用。例如, Muñoz—García 等<sup>[27]</sup>提出一种测定石笋直径的方法,即利用同一生长层上的顶面和左右两边的破发点(break points),限定了碳酸盐晶体的生长区域,从而确定了生长直径。但是,对于大多数自然生长的石笋而言,顶面并非一个标准的平面,其左右 2 个破发点也缺乏统一的界定标准,无法定量测量石笋直径。

本研究中,我们首先提出一种测定石笋直径的新方法,用于纹层石笋生长直径的测定;其次,使用该方法测量了湖北清江和尚洞一支年层石笋(HS4 石笋)的生长直径,依据 U—Th 定年和石笋的年层计数所建立的年代框架,构筑了公元 1288—1872 年的石笋生长直径序列;最后,将该序列与研究区的温度和洪涝频率记录进行对比,探讨石笋直径与气候变化的联系。

## 1 研究区地理和气候概况

本研究地点位于湖北省长阳县鱼峡口镇清江南岸的和尚洞,行政上隶属于宜昌市。和尚洞位于宜昌市以西约 100 km,具体地理位置为 30°26′49″ N, 110°25′12″ E<sup>[28]</sup>。洞穴所处的地层为寒武系中统上峰尖组( $\epsilon_2$ )及上统三游洞群( $\epsilon_3$ )白云岩地层<sup>[29]</sup>。洞穴入口距清江江面约 30 m,洞顶覆盖约 600 m 的白云岩。

宜昌地区气候受到东亚季风区的影响,气温和降水的季节特征明显。在夏季(5—8月),受东亚季风的影响,来自印度洋和中国南海的暖湿气流路过,导致“梅雨”爆发,气候暖湿;在冬季(12月—次年2月),季东风从高纬陆地吹向海洋(偏北风),将来自高纬陆地的冷干气流携带至此,导致气候冷干。来自宜昌气象站的气象数据显示,近 60 年(1950—2008 年)的年降雨量约为 1 140 mm,且主要集中在 5—8 月,约占年总雨量的 60%;年均气温为 17.0 °C,年最高温度出现在 7—8 月份,年最低温度出现在 1—2 月份。

对和尚洞的洞内监测表明,洞外温度和降水的变化信息,通过空气对流和岩溶水动力学传递到洞穴内<sup>[28,30]</sup>。据多年在 HS4 石笋生长位置的现代过程观测显示,空气温度为 15.5~21.5 °C,平均 18.5 °C,季节差异约 6 °C;该滴点的滴水速率在 13~38 滴/分钟之间波动,夏季高,冬季低。观测还发现,在某些降水丰沛年份的雨季,如 2018 和 2010 年的夏季,滴水并非来自单一滴点,而是 2 个滴点。石笋生长点的岩溶水化学特征表明,Ca、Mg 和  $\text{HCO}_3^-$  浓度分别为  $67.0 \pm 3.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $33.8 \pm 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $425.0 \pm 27.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,pH 为 8.20~8.30,饱和指数(SI)大于 0.5;玻璃板上的石笋生长模拟实验表明,碳酸盐晶体常年生长,夏季生长快,冬季相对较慢,无溶蚀现象发生,可能与超饱和的岩溶水供给有关。在月时间尺度上,玻璃板面上碳酸盐晶体分布均匀,未见冲蚀现象。

## 2 材料与方法

本次研究的 HS4 石笋样品采样地点距洞口大约 150 m。采集于 2001 年 4 月,采集时其顶部均在滴水,并伴有沉积,为正在生长的石笋,由此判定其最顶部年龄为 2001 年。石笋总长近 241 cm。将石笋用石材切割机沿石笋生长中轴剖开,并进行抛光处理后,可见明暗交替的清晰微层,并被证明 HS4 石笋微层为年层<sup>[31]</sup>。石笋生长过程中无明显偏移,是一支正心石笋。剖面宽度随深度变化,上部相对较窄,中部较宽,底部中等。

本研究只聚焦于 HS4 石笋上部 35 cm(图 1a)。首先依照石笋图片,在每一厘米处依据石笋纹层走向,画出纹层分界线,共 35 条线(图 1b);其次,利用 CorelDRAW 软件中的丈量工具,分别测量某一特定纹层线下端不同位置(1~7 cm)的生长中心线左右

两侧纹层线的直线距离(图 2a)。例如,对于 10 cm 的纹层线,我们在 11~17 cm 处测量了生长中心线左右两侧纹层线的直线距离,获得 7 个生长宽度的数据;最后,将这 7 个数据进行对数回归,获得  $y=a \ln(x)+b$ 。当  $x=1$  时,  $y=b$ ,表示该纹层下面 1

cm 处石笋的宽度,笔者将其定义为生长直径(图 2b)。需要说明的是,由于 0~7 cm 与 7~35 cm 脱离,且 0~7 cm 段纹层缺少测定纹层下端 1~7 cm 处生长宽度的条件,因而测量的数据仅限于 7~31 cm (表 1)。

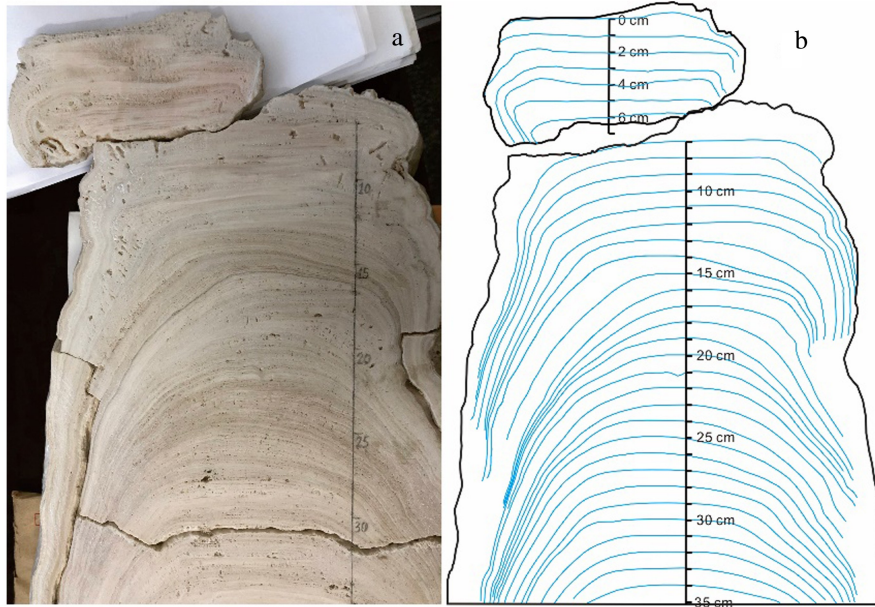


图 1 湖北清江和尚洞 HS4 石笋顶部 35 cm 图像(a)和纹层标识(b)(其中纹层标识的间隔为 1 cm)

Fig. 1 Image of the top 35cm section of stalagmite HS4 from Heshang cave, Qingjiang valley, Hubei Province (a) and the identification of the stalagmite bands (b) (Bands located on every centimeter are marked only)

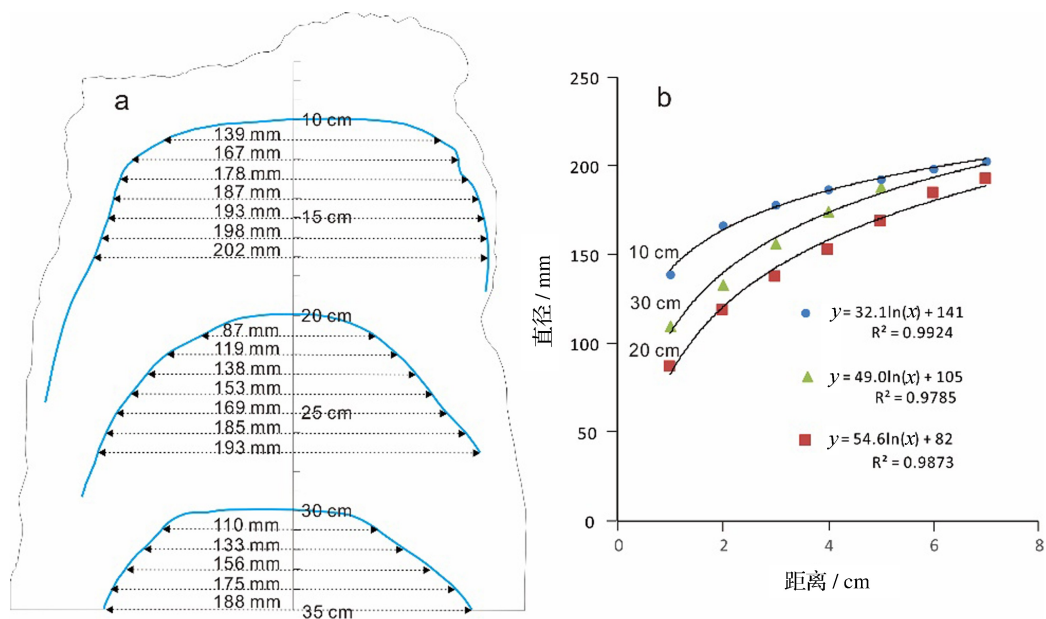


图 2 HS4 石笋横向生长特征及其生长宽度的测量

Fig. 2 Horizontal characteristics of stalagmites and the diagram for the measurement of diameter

(a. 距顶部 10、20 和 30 cm 处石笋层面界限及其以下不同深度处石笋宽度,单位: mm;  
b. 不同深度处石笋生长宽度的对数回归及其石笋生长直径)

石笋的年代学框架由 U—Th 年龄和年层计数联合构建,具体见文献<sup>[31]</sup>。生长速率则依据石笋高度—年龄关系计算。例如,10~11 cm 之间,我们总共辨别出 19 个年层,因而生长速率为  $1 \text{ cm} \cdot 19\text{a}^{-1} = 0.526 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,以此类推。

### 3 结 果

HS4 石笋顶部 7~31 cm 的位置、年龄、生长速率和对应的生长直径见表 1。研究表明,石笋的生长

时段为 1288—1872 年,总共 584 年。

尽管石笋生长速率数据仅来自石笋生长中心线的单次测量,与 HS4 石笋的生长状况可能存在一定的偏差(图 1 中,中心生长线并不是穿过每一层的最高点),但是石笋生长速率仍呈现双峰加双谷的变化特征(图 3),7~12 cm 和 17~23 cm 为相对生长快速阶段,而 12~17 cm 和 23~31 cm 为生长缓慢阶段;生长速率最大值为  $0.667 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,最小值为  $0.270 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,平均值为  $0.438 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

表 1 HS4 石笋顶部 7~31 cm 的生长速率和直径

Table 1 Growth rate and diameter of the stalagmite  
(Data from the depth between 7 and 31 centimeters in stalagmite HS4)

纹层位置 /cm	年代	生长速率 /mm · a <sup>-1</sup>	石笋宽度/mm							直径/mm
			1	2	3	4	5	6	7	
7	1872	0.400	1 42	1 64	1 76	1 88	1 98	2 01	1 41	
8	1857	0.667	1 37	1 65	1 79	1 90	1 98	2 01	2 07	1 38
9	1838	0.526	1 43	1 68	1 80	1 90	1 96	2 00	2 05	1 44
10	1817	0.476	1 39	1 67	1 78	1 87	1 93	1 98	2 02	1 41
11	1798	0.526	1 34	1 51	1 70	1 77	1 83	1 88	1 93	1 33
12	1774	0.417	1 31	1 59	1 68	1 77	1 83	1 89	1 92	1 34
13	1747	0.370	1 14	1 41	1 58	1 70	1 78	1 84	1 88	1 14
14	1722	0.400	97	1 35	1 49	1 63	1 72	1 78	1 86	1 00
15	1685	0.270	96	1 24	1 42	1 53	1 61	1 67	1 77	95
16	1655	0.333	97	1 17	1 34	1 44	1 54	1 64	1 76	93
17	1632	0.435	89	1 17	1 28	1 43	1 56	1 68	1 81	82
18	1614	0.556	81	1 08	1 30	1 46	1 58	1 72	1 85	75
19	1593	0.476	81	1 09	1 33	1 48	1 63	1 78	1 92	73
20	1577	0.625	87	1 19	1 38	1 53	1 69	1 85	1 93	82
21	1560	0.588	95	1 25	1 43	1 60	1 76	1 90	2 00	88
22	1540	0.500	96	1 33	1 41	1 61	1 76	1 89	2 01	93
23	1523	0.588	95	1 24	1 46	1 65	1 77	1 85	1 94	92
24	1489	0.294	94	1 25	1 48	1 64	1 75	1 84	1 97	92
25	1460	0.345	99	1 31	1 51	1 63	1 74	1 86	1 98	97
26	1436	0.42	98	1 33	1 51	1 64	1 77	1 90	2 04	1 01
27	1413	0.43	1 07	1 34	1 50	1 64	1 79	1 94	2 06	1 01
28	1378	0.29	1 10	1 30	1 46	1 64	1 81	1 95	2 05	1 01
29	1345	0.30	1 08	1 29	1 50	1 68	1 85	1 95		1 05
30	1320	0.40	1 10	1 33	1 56	1 75	1 88			1 05
31	1288	0.31	1 06	1 35	1 47	1 66				1 01

生长直径的变化模式与石笋生长速率变化趋势明显不同(图 3)。7~12 cm 区间,生长直径最大(平均值为 144mm),其后逐渐减小,并在 19 cm 处达到

最小值(73 mm);随后,石笋直径逐渐变大,直至底部 31 cm,但小于上部。

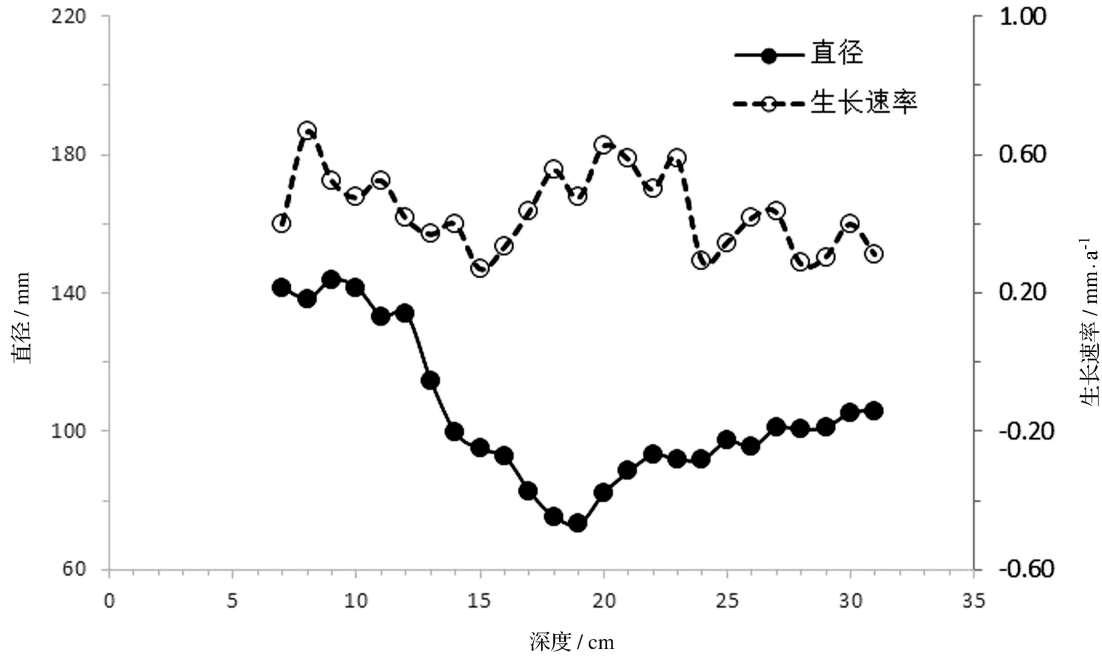


图 3 HS4 石笋 7~31 cm 处的生长速率和直径

Fig. 3 Growth rate and diameter of the stalagmite

(Data from the depth between 7 and 31 centimeters in stalagmite HS4)

## 4 讨论

### 4.1 和尚洞石笋生长直径的理论计算

根据 Kaufmann 开发的石笋生长数学模式<sup>[18]</sup>,石笋生长直径( $R_0$ )取决于滴水体积( $V$ )、水膜厚度( $\delta$ )、滴水间隔时间( $\Delta d$ )和生长速率常数( $\alpha$ ),它们之间的关系式为:

$$R_0 = \sqrt{\frac{V}{\pi\delta[1 - \exp(-\frac{\alpha}{\delta}\Delta d)]}}$$

式中:滴水体积指的是一滴滴水的体积,单位为  $\text{cm}^3$ ;滴水间隔时间指的是相邻两滴滴水之间的时间间隔,单位为 s,它与滴水速率成负相关关系,即滴水速率大,间隔时间短;而滴水在石笋表面形成水膜的厚度( $\delta$ ),通常为 0.005~0.015 cm,一般设定为 0.01 cm;生长速率常数与水膜厚度和洞穴温度有关<sup>[32]</sup>。

湖北清江和尚洞的现代洞穴过程观测结果表明<sup>[28]</sup>,在 HS4 石笋生长的位置,滴水体积为 0.14  $\text{cm}^3$ /滴;年平均滴水速率大约为 20 滴/分钟,即滴水间隔 3 s;年平均洞穴温度为 18.1  $^{\circ}\text{C}$ 。根据水膜厚度

(0.01 cm)和洞穴温度(18.1  $^{\circ}\text{C}$ ),获得生长速率常数( $\alpha$ )为  $2.45 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[32]</sup>。分别将这些参数代入方程式(1),可以计算出和尚洞 HS4 滴点的石笋生长的理论半径( $R_0$ )为 23.1 cm(直径为 46.2 cm),明显大于实际测量的石笋生长直径。

石笋生长的理论直径和实际观测数值的差异可能源自和尚洞的洞穴地质构造。和尚洞为隧道形洞穴,洞穴宽大,直径约为 25 m。也就是说,从洞穴顶板到生长石笋的洞穴底板,相距大约 25 m。岩溶水进入洞穴后,沿顶板上的石钟乳下端开始滴落,做自由落体运动。在重力加速度的作用下,加速下落,冲击力也逐渐加强。当滴水到达石笋表面,由于强烈的碰撞,水滴飞溅,导致发挥作用的水量(水滴有用体积)大幅减少,故石笋实际生长直径比理论的生长直径小。由此可见,洞穴石笋的直径除了与岩溶滴水的物理化学性质有关,水动力的强弱也起到了决定性的作用。

### 4.2 石笋直径大小与气候变化的联系

石笋生长直径与滴水体积、水膜厚度、滴水间隔

时间和生长速率常数有关<sup>[18]</sup>。石笋生长点的滴水体积和水膜厚度保持相对稳定,可以认为是常数(分别为 0.14 cm<sup>3</sup>和 0.01 cm),因而可认为石笋直径主要与滴水间隔时间和生长速率常数有关。滴水间隔时间与滴水速率成反比,后者又与降水量成正比,所以滴水时间间隔与降水量负相关,即降水量越多,滴水间隔时间越短,反而亦然;生长速率常数与水膜厚度和洞穴温度有关<sup>[32]</sup>,水膜厚度一定时,生长速率的决定因子是温度。因而,理论上讲,温度和降水都会影响石笋的生长直径。

为了考察石笋直径与气候的关联,我们将 HS4 石笋直径序列与利用文献资料重建的长江中游气温和洪涝频率<sup>[33]</sup>进行了对比,结果如图 4。对比结果发现,HS4 石笋直径与长江中游的温度变化缺少关联,两者的变化模式并不一致;然而,石笋直径与研究区的洪涝频率显示出相似的变化特征,具有较高的可比

性。16 世纪以后,直径逐渐变小,对应于洪涝事件的较少;17 世纪早期,石笋直径最小,洪涝事件频率最低,气候干旱;17 世纪中后期,气候转湿,洪涝事件逐渐频繁,对应于石笋直径逐渐增大。18 世纪后期至 19 世纪后期,研究区洪涝事件频发,石笋的直径也处于研究时间段的最大值。因而,就温度和降水两个表征气候变化的参数而言,降水对石笋直径变化的影响明显大于温度。说明降水主控石笋生长直径,这一认识与石笋生长理论基本相符合<sup>[19]</sup>。

基于以上观察,我们认为 HS4 石笋直径具有响应长江中游洪涝事件的潜力。其可能的物理机制是:长江中游降水增加,尤其暴雨频率增加时,含水层的水头压力增大,滴速升高,滴水的时间间隔变短,有利于石笋直径的增加。与此同时,暴雨频率增加,现代观测到的两个滴点同时哺育 HS4 的机会也增加,促进了石笋直径的增长。

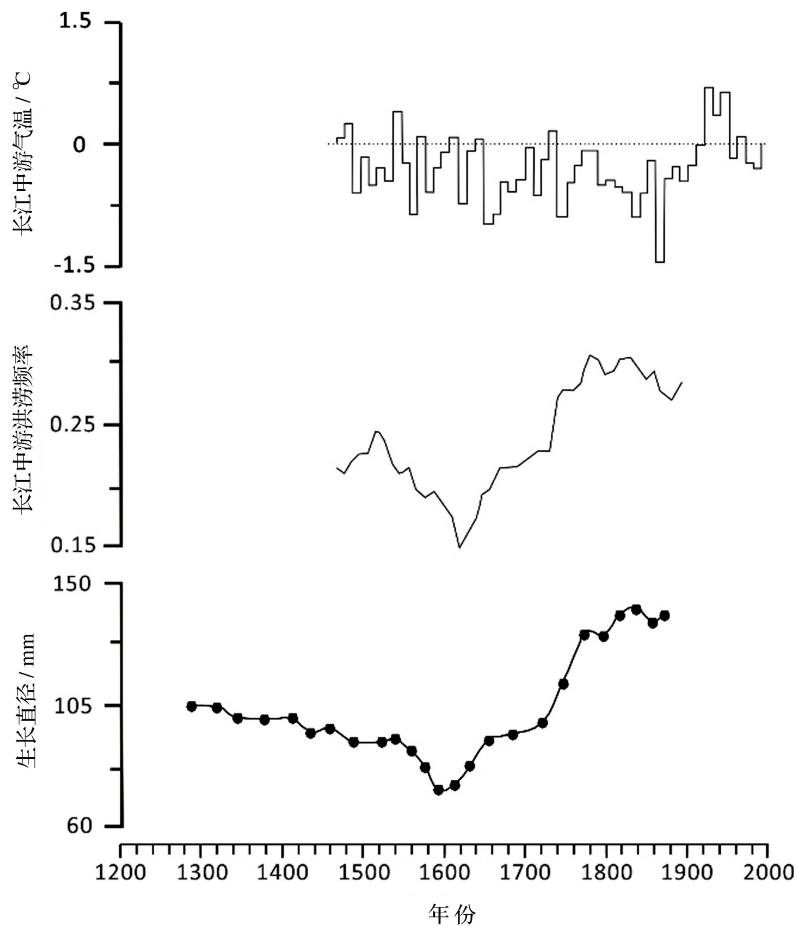


图 4 HS4 石笋直径与长江中游温度和洪涝频率的对比(长江中游温度和洪涝频率来自历史文献重建<sup>[33]</sup>)

Fig. 4 Comparison of the diameter of stalagmite HS4 to the temperature and flood frequency in the middle reaches of the Yangtze River(Both temperature and flood frequency are reconstructed from the historical documents<sup>[33]</sup>)

## 5 结 论

利用湖北清江和尚洞 HS4 石笋的明晰纹层(年层)特征,我们辨别了石笋生长的层面结构,并对生长纹层线下不同深度处的石笋宽度进行了测量,获取石笋横向生长的基本特征,提出了运用对数回归法确定石笋生长直径的方法。利用该方法,测定了湖北清江和尚洞 HS4 年层石笋 7~31 cm 段的生长直径,基于 U-Th 年龄和年层计数建立的年代框架,构筑了公元 1288—1872 年的石笋直径变化序列,调查它们与气候变化之间的联系。研究获得以下 3 个认识:

(1) 基于纹层的识别和不同深度上纹层宽度的测定而建立的对数回归法,较好地表征了石笋的生长直径,适用于一些纹层明显的石笋的直径测量。

(2) HS4 石笋生长直径比理论计算值小,主要是由于洞穴顶板位置高,水滴下落过程中受到重力加速度的作用,冲力强,滴水飞溅导致水量损失,因而滴水的有效体积大幅减少所致。由此可见,洞穴石笋的直径除了与岩溶滴水的物理化学性质有关外,水动力的强弱也起到了关键作用。

(3) HS4 石笋直径与最近 500 多年长江中游温度和洪涝频率变化的记录比较结果表明,降水对石笋直径的影响明显胜过气温的影响。因而,在气温变化相对较小的情况下,石笋直径有望成为一个有效降水的替代指标,在石笋古气候的研究中得到应用。

**致 谢:** 评审专家和期刊编辑提出了诸多有益的建议,促进了论文质量的提高,在此表示感谢!

## 参考文献

- [1] Y J Wang, H Cheng, R L Edwards, et al. A High-Resolution Absolute-Dated Late Pleistocene Monsoon Record from Hulu Cave[J]. *China, Science*, 2001, 294: 2345-2348.
- [2] Y Wang, H Cheng, R L Edwards, et al. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years[J]. *Nature*, 2008, 451: 1090-1093.
- [3] Y Cai, I Y Fung, R L Edwards, et al. Variability of stalagmite-inferred Indian monsoon precipitation over the past 252,000 y [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112: 2954-2959.
- [4] H Cheng, P Z Zhang, C Spotl, et al. The climatic cyclicity in semiarid-arid central Asia over the past 500,000 years[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L01705. (DOI:10.1029/2011GL050202)
- [5] H Cheng, R L Edwards, A Sinha, et al. The Asian monsoon over the past 640,000 years and ice age terminations[J]. *Nature*, 2016, 534: 640-646.
- [6] A A Finch, P A Shaw, K Holmgren, et al. Corroborated rainfall records from aragonitic stalagmites[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 215: 265-273.
- [7] I J Fairchild, P C Treble. Trace elements in speleothems as recorders of environmental change[J]. *Quaternary Science Review*, 2009, 28: 449-468.
- [8] K Johnson, C Hu, N Belshaw, et al. Seasonal trace-element and stable-isotope variations in a Chinese speleothem: The potential for high-resolution paleomonsoon reconstruction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 244: 394-407.
- [9] R A Owen, C C Day, C Y Hu, et al. Calcium isotopes in caves as a proxy for aridity: Modern calibration and application to the 8.2 kyr event[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 443: 129-138.
- [10] A Baker, C J Caseldine, M A Gilmour, et al. Stalagmite luminescence and peat humification records of palaeo-moisture for the last 2500 years[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 165: 157-162.
- [11] S Xie, Y Yi, J Huang, et al. Lipid distribution in a subtropical southern China stalagmite as a record of soil ecosystem response to paleoclimate change[J]. *Quaternary research*, 2003, 60: 340-347.
- [12] X Li, C Hu, J Huang, et al. A 9000-year carbon isotopic record of acid-soluble organic matter in a stalagmite from Heshang Cave, central China: Paleoclimate implications [J]. *Chemical Geology*, 2014, 388: 71-77.
- [13] 张德忠, 张平中, 桑文翠, 等. 石笋密度蕴含的过去气候变化信息: 以末次冰消期黄土高原西部武都万象洞石笋为例[J]. *科学通报*, 2010, 55(31): 3040-3047.
- [14] 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气候意义: I. 微层显微特征[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 1998, 28(1): 91-96.
- [15] 张会领, 殷建军, 林玉石. 中晚全新世湘西莲花洞石笋灰度变化特征及其古气候意义[J]. *热带地理*, 2018, 38(6): 810-818.
- [16] Z Zhu, J M Feinberg, S Xie, et al. Holocene ENSO-related cyclic storms recorded by magnetic minerals in speleothems of central China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114: 852-857.
- [17] M Tan, T Liu, J Hou, et al. Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2650-year stalagmite record of warm season temperature[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30: 1617. (DOI:10.1029/2003GL017352)
- [18] G Kaufmann. Stalagmite growth and palaeo-climate: the numerical perspective[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 214: 251-266.
- [19] G Kaufmann, W Dreybrodt. Stalagmite growth and palaeo-climate: an inverse approach[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 224: 529-545.
- [20] L B Raisback, G A Brook, J Chen, et al. Environmental control on the petrology of a late Holocene speleothem from Botswana with annual layer of aragonite and calcite[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1994, 64: 147-155.
- [21] V J Polyak, Y Asmerom. Late Holocene climate and cultural changes in the southwestern United States[J]. *Science*, 2001, 294: 148-151.

- [22] S Frisia, A Borsato, N Preto, et al. Late Holocene annual growth in three Alpine stalagmites records the influence of solar activity and the North Atlantic Oscillation on winter climate [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 216: 411-424.
- [23] C J Proctor, A Baker, W L Barnes, et al. A thousand years speleothem proxy record of North Atlantic climate from Scotland [J]. *Climate Dynamic*, 2000, 16: 815-820.
- [24] G A Brook, M A Rafter, L B Railsback, et al. A high-resolution proxy record of rainfall and ENSO since AD 1550 from layering in stalagmites from Anjohibe Cave, Madagascar [J]. *The Holocene*, 1999, 9: 695-705.
- [25] H W Franke. The theory behind stalagmite shapes [J]. *Stud. Speleol*, 1965, 1: 89-95.
- [26] R L Curl. Minimum diameter stalagmites [J]. *Nat. Speleol. Soc.*, 1973, 35: 1-9.
- [27] M B Muñoz-García, J Cruz, et al. Comparison of speleothem fabrics and microstratigraphic stacking patterns in calcite stalagmites as indicators of paleoenvironmental change [J]. *Quaternary International*, 2016, 407: 74-85.
- [28] C Hu, G Henderson, J Huang, et al. Report of a three-year monitoring programme at Heshang Cave, Central China [J]. *International Journal of Speleology*, 2008, 37: 143-151.
- [29] 万军伟, 沈继方, 晁念英. 清江半峡地区岩溶洞穴发育特征及其旅游资源 [J]. *中国岩溶*, 1997, 16(3): 268-274.
- [30] 何璐瑶, 胡超涌, 曹振华, 等. 湖北清江和尚洞洞穴温度对气候变化的响应 [J]. *中国岩溶*, 2008, 27(3): 273-277.
- [31] C Hu, G M Henderson, J Huang, et al. Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 266: 221-232.
- [32] A Baker, D Genty, W Dreybrodt, et al. Testing theoretically predicted stalagmite growth rate with recent annually laminated samples: Implications for past stalagmite deposition [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 3: 393-404.
- [33] 赵文兰, 叶愈源. 近 500 年长江中游气候变化的初步研究 [J]. *水文*, 1996(5): 19-23.

## Measurement of a stalagmite diameter and its application for paleoclimate

GAO Binsheng, HU Chaoyong

(School of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** Stalagmite is a good information carrier for Quaternary terrestrial climate reconstruction, which is very important for understanding the evolution of the past climate and environment. Chinese stalagmites are characterized by relatively continuous growth, accurate dating and abundant information, which provide a rare perspective for the Asian monsoon and its long-term evolution. Based on stalagmites, a series of alternative indicators have been developed, such as  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ , trace elements and their isotopes, organic compounds and associated isotope composition, growth rate and etc, which have been widely used in the reconstruction of palaeoclimate environment. However, as a basic feature of stalagmite morphology, the growth diameter of stalagmite has rarely been studied, and its implications for climate change need to be investigated. In this study, we first proposed a method to determine the growth diameter of stalagmites. Then, we used this method to measure the growth diameter of stalagmites at the top 35 cm section of HS4 Stalagmite in Heshang cave, Qingjiang, Hubei Province. The results were compared with the temperature and flood frequency records in the study area to explore the response of the stalagmite diameter growth to climate change. The results show that the growth of the stalagmite diameters can be well characterized by the exponential regression method based on the identification of the lamina and the measurement of the broad band of the lamina at different depths, which can be used to determine the diameter of some stalagmites with obvious lamina. The actual growth diameter of HS4 stalagmite is smaller than the theoretical calculation value, which may be related to the cave structure. The high drop of the cave increases the momentum of karst dripping water, and the splash of water drip results in the loss of effective water volume, thus the effective volume of dripping water decreases greatly and the actual diameter of HS4 stalagmite is smaller. Compared with temperature, the influence of precipitation on stalagmite diameter is more significant. Therefore, stalagmite diameter is an alternative proxy of effective precipitation, which is expected to be applied in the study of stalagmite palaeoclimate.

**Key words** stalagmite, diameter, drip rate, flood frequency, middle reaches of Yangze River

(编辑 张玲)