

本溪水洞石笋微层年代学初步研究*

侯居峙^① 谭 明^① 程 海^② R. L. Edwards^② 郑 伟^③
沈凇梅^④ 张 军^③

(^①中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; ^②Department of Geology & Geophysics, University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455, USA; ^③辽宁省本溪水洞风景区管理处, 本溪 171100; ^④辽宁省本溪市建委, 本溪 171000)

摘要 对本溪水洞全新世石笋 TW9801 不同级次微层分别计数, 结合该石笋的 TIMS-²³⁰Th 年龄, 指出石笋 TW9801 某一级次的微层是年层. 结合其他全新世北方型石笋微层研究结果, 总结出中国北方型石笋年层的镜下影像特征, 并由此提出石笋微层计数年代学的研究思路.

关键词 年轻石笋 TIMS-²³⁰Th 定年 计数年代学

自从一英格兰石笋发光微层被证明是年层以来^[1], 石笋微层作为高分辨率古气候研究的代用指标已有较多的研究^[2~5]. 石笋微层是否像树轮那样具有亚年层、多年层等现象, 这是在我们将石笋年层作为一个新的断代工具、并希望将微层作为气候变化指标之前需要解决的问题. 我们已经知道石笋微层具有不同级次的特征^[2]. 但是如何确定不同级次微层中的年层、石笋年层具有什么样的影像特征至今仍没有明确的解释, 本文通过对年轻石笋不同级次的微层计数, 与 TIMS-²³⁰Th 定年结果比较, 并结合其他北方型石笋微层的研究总结出石笋年层的影像特征, 希望为石笋微层年代学的发展打下基础.

TIMS-²³⁰Th 定年是 20 世纪 80 年代后期发展起来的高精度定年手段, 测年范围可从现代到过去 55 万年^[6], Chen 和 Edwards 等人利用 TIMS-²³⁰Th 确定了末次间冰期的时代^[7,8]; Bard, Eisenhauer 等人成功地利用 TIMS-²³⁰Th 定年方法建立了晚更新世和全新世精确的海平面变化^[9,10], Bard 等人通过测定采自 Barbados 和 Mururoa 的珊瑚样品的 ¹⁴C 和 U-Th 年龄, 校正了 3 万年来的 ¹⁴C 年表^[11]; 1989 年 Li 等人首先将 TIMS 应用于洞穴碳酸盐岩定年, 并取得较好的结果^[12]. 现在我们将它应用于年轻石笋定年, 并希望有助于中国石笋年层的确定.

1 洞穴和石笋样品

本溪水洞位于辽宁省本溪市太子河左岸, 地理坐标大致为北纬 41° 17'~41° 18', 东经 124° 04'~ 124° 07'; 地形以低山丘陵为主. 气候区划位于中温带和暖温带交界的季风湿润区, 属暖温带季风落叶阔叶林气候, 冬季寒冷, 夏季湿热, 年均温为 6℃(1951~1980 年平均为 6.1℃); 全年结冰期为 5 个月左右, 土壤冻结深度 1.2 m, 无霜期 110 ~ 130 d, 年降水量 926 mm(1951~1980 年统计), 蒸发量 1000 mm 左右, 潮湿系数近于 1, 降水期集中在 7~9 三个月, 其降水量占全年的 70% ~ 80%. 水洞发育在奥陶系灰岩与页岩的断层接触带, 洞口直径 3 ~ 4 m,

2000-07-13 收稿, 2000-09-24 收修改稿

* 中国科学院重大项目(KZ951-A1-402), 中国科学院重点项目(KZ952-J1-014), 国家自然科学基金(批准号: 40072098)资助项目

洞内常年流水, 流量可达 $3.1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{天}$, 水源主要为地表河水.

1998 年 2 月在水洞内东部白熊山背部采取一块正在生长的石笋样品, 编号 TW9801, 石笋呈柱状, 高 7 cm 左右, 直径约 11 cm, 在抛光纵剖面观察, 发现样品纯净、半透明、生长层清晰, 无沉积间断(剖面见图 1(a)). 沿生长轴将其切磨成薄片, 于荧光-偏光显微镜 OLYMPUS-BX60 下, 分别在透光和荧光条件下观察, 发现其具有中国北方型石笋的典型特征, 即石笋微层韵律由很薄的不透光层面和较厚的方解石层构成. 透光条件下, 方解石层透光性较好, 而层面较暗, 两者相间排列. 在紫外线照射下, 虽然方解石总体发光, 但微层面和方解石带相比, 差别较大, 层面亮度较强, 方解石带相对较暗. 石笋微层具有双重光性, 即透光微层和发光微层同时存在, 并且一一对应(如图 1(b)所示), 没有发现两者不匹配的现象, 这表明石笋 TW9801 在生长过程中沉积比较稳定, 这样的石笋微层不仅可以用来作高分辨率古气候研究, 而且可以用来作石笋微层计数年代学的标准^[13].

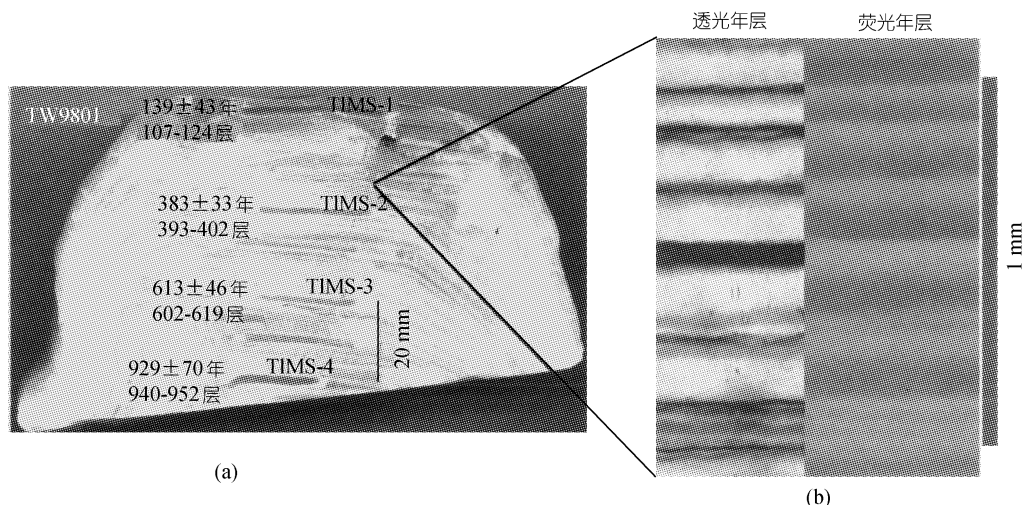


图 1 本溪水洞石笋 TW9801 高精度 TIMS- ^{230}Th 定年及其双重光性年层

(a) 石笋样品纵剖面, (b) 石笋微层双重光性

2 测试方法和结果

2.1 TIMS-U-Th 定年

在石笋 TW9801 纵剖面上, 平行于生长层理用牙钻钻取粉末样品约 0.6 g, 样槽宽约 1.5 ~ 2 mm, 自上而下共取 4 个定年样品, 样槽间距 20 mm, 取样位置如图 1(a)样品剖面所示. 样品在超净化学实验室处理, 加入 ^{229}Th - ^{233}U 混合稀释剂, 用 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 共沉淀方法析出 U 和 Th, 然后在阴离子交换树脂中分离 U, Th, 将其溶解于 HNO_3 并装载于 Re 带上(Th 需覆盖石墨), 然后装入质谱仪测量. 所测得年龄及同位素数据列于表 1. 年轻石笋定年结果的误差主要和石笋的初始 ^{238}U 和 ^{232}Th 含量有关, 一般情况下, 初始 ^{238}U 含量越高, ^{232}Th 含量越低, 定年精度越高, 而误差越小. 定年点 TW9801-1 误差较大(达 30%)就是由于 ^{238}U 含量较低而 ^{232}Th 含量高的缘故.

2.2 微层计数

(1) 在本溪水洞石笋 TW9801 微层的观察过程中, 我们见到几种不同形态的微层, 形态不

表 1 石笋 TW9801 的 ^{230}Th 定年数据和年层计数结果对比^{a)}

样品号	年层数 (自顶部开始计数)	^{238}U (ppb)	^{232}Th (ppt)	$\delta^{234}\text{U}$ (测量值)	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ (活度比)	^{230}Th 年龄/a (未校正)	^{230}Th 年龄/a (校正值)	$\delta^{234}\text{U}_{\text{initial}}$ (校正值)
TW9801-1	107~124 (2~4 mm)	121.6±0.2	978±8	1930±6	0.00586 ±0.00040	219±15	139±43	1930±6
TW9801-2	393~402 (24~26 mm)	154.9±0.2	606.7±9.0	1909.8±5.2	0.01124 ±0.00069	422±26	383±33	1912.1±5.2
TW9801-3	602~619 (44~46 mm)	131.7±0.4	540.3±12.6	1879.9±13.9	0.01723 ±0.00107	655±41	613±46	1883.4±13.9
TW9801-4	940~952 (62~64 mm)	107.8±1.0	1379±11	1914±10	0.02802 ±0.00073	1056±28	929±70	1913±10

a) 表内括号中为样槽距顶部距离; $\delta^{234}\text{U} = ([^{234}\text{U}/^{238}\text{U}]_{\text{activity}} - 1) \times 1000$; $\delta^{234}\text{U}_{\text{initial}}$ 是以 ^{230}Th (以 T 表示) 年龄为基础计算的 $\delta^{234}\text{U}$ 初始值, 即 $\delta^{234}\text{U}_{\text{initial}} = \delta^{234}\text{U}_{\text{measured}} \times e^{234 \times T}$. ^{230}Th 校正年龄是假设初始 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 原子比值为 $4.4 \pm 2.2 \times 10^{-6}$, 此值是长期在地壳中平衡的某种矿物的值, 这种矿物具有地壳的 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 比值 3.8

同的微层计数方法也不同, 应遵循不同的计数原则。

界面平直的微层是最常见的一种微层, 观察和计数均较容易, 每一个暗带和一个亮带即为一个微层, 如图 2(a), 层和层之间界线很明显, 箭头所指之处是层和层的界面。

界面弯曲但连续的层面在石笋中也较常见, 呈锯齿状或弧形。层面虽然弯曲, 但其并不影响微层的计数, 计数方法和界面平直的微层相同。

界面弯曲不连续, 界面如锯齿状或弧形如同并排的多个褶皱, 每个背形之间又不连续, 这种情况, 我们就尽量计数多个“褶皱”中的微层数进行对比, 一般它们是吻合的, 图 2(b)中照片顶部和底部的箭头所指的层面是一一对应的, 这样我们认为在箭头所指的地方共有 8 层。

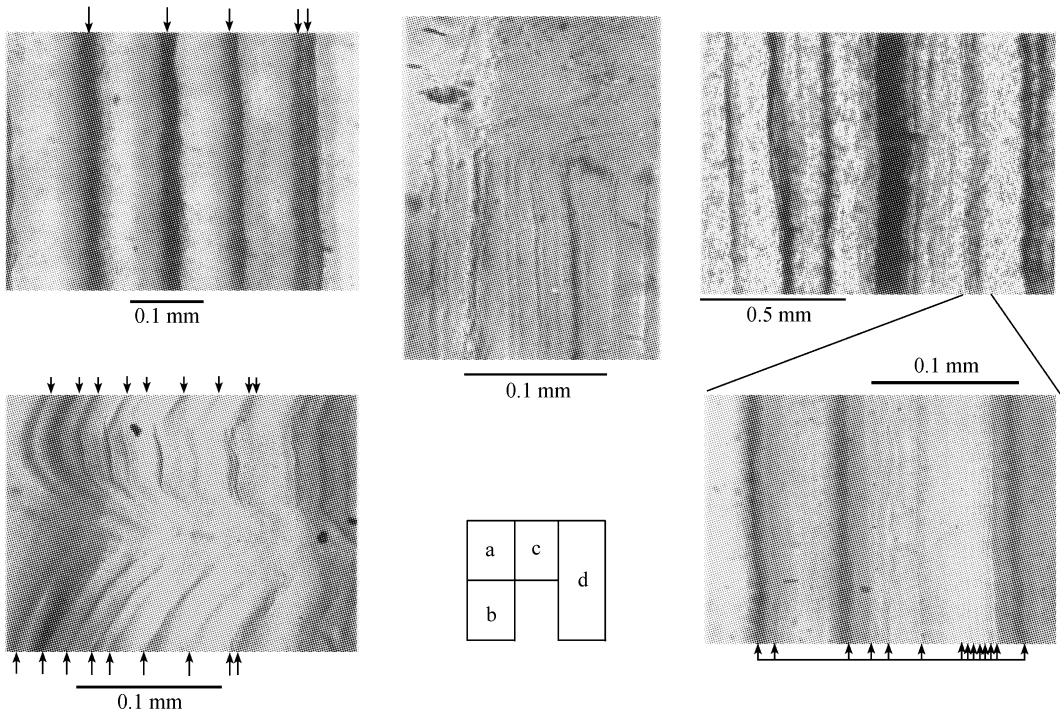


图 2 不同形态和不同级次的微层

平面与曲面并存,如图 2(c),层面好像局部受力变形,一部分是平直的,而另一部分是弯曲甚至杂乱无章的,这种情况要在平直处计数,方法和界面平直的微层相同.

层面的形状可能和其所在的生长基底、滴水动力有关,具体影响因素和过程有待进一步探讨.

(2) 石笋的微层计数的结果主要与两方面有关,一是石笋微层自身,石笋中有一些变异微层和假象层存在,在计数时有可能因为没有分辨清楚而造成计数有误;二是计数者,微层计数带有一定的主观性,不同的观察条件影响着观察者的判断,显微镜的不同条件如放大倍数、光线方向、亮度等在很大程度上影响着我们所观察到的影像特征.如在石笋 TW9801 的顶部有一些很薄的层(厚度在 $5\text{ }\mu\text{m}$ 左右),在低倍显微镜或光线太强时观察,不容易见到,而在高倍显微镜下光强适宜时观察就非常清晰.而且在同样的光照条件下,不同的观察者所观察计数的情况可能也是不同的.

同其他多数北方型石笋相似,石笋 TW9801 的微层也具有不同级次,因此,在计数石笋 TW9801 微层数之前,我们在其第二个定年点 TIMS-2 和第三个定年点 TIMS-3 之间进行如下试验.在这两个定年点样槽的中点之间计数肉眼所能观察到的各种不同级次的层,第一次计数所有能观察到的层,只要是层状面,不论清晰与否,均计入内,结果为 389 层;第二次计数在 $4\times$ 物镜下所能观察到是具有最清晰层面的层,不计入其内的层明显和它们不属于同一级次,层数为 131;第三次计数的微层级次具有如下特征:在镜下层面清晰可见,具有象刀刻痕的特征,在其一侧存在一条亮线,而且在微调焦距时,层面会略微左右移动,这样的层为 220 层.三种级次的层见图 2(d).结合 TIMS- ^{238}U - ^{234}U - ^{230}Th 定年可以知道,从 TIMS-2 到 TIMS-3 的年龄约为 230 a,与第三次计数结果最为符合,在计数微层时,只有按照第三次的标准计数的微层才是年层.因此,在计数石笋微层时,首先要详细研究微层的影像特征,区分微层的级次,同时要尽量用多次统计的方法来计数微层,这样得到的结果才比较可信.

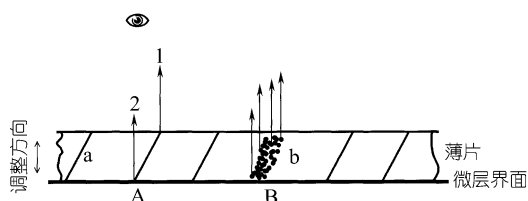


图 3 透光条件下观察石笋微层示意图

图中 a 为微层界面, b 为杂质

将石笋沿生长轴方向切磨成薄片,微层界面垂直于石笋生长方向,在薄片中的微层界面一般很少和载玻片垂直,总是与其成一定角度,如图 3 所示.微层界面与石笋被切开的两个面相交成上、下两条线,微层界面上的这两条线及其中间部分分别聚焦在各自的焦平面上,这样在薄片上下移动即微调焦距时,我们可以看到界面由 1 线向 2 线先后清晰(薄片向上移动时),

这样所观察到的微层界线在略微自右向左连续移动,但总能在恰当的位置上可以看到很清晰的界线(如图 3 中 A 处所示).如果是由于基岩碎屑或其他杂质进入石笋而表现的层状面,在显微镜下观察时不清晰,在微调焦距时也很难见到清晰的界线(如图 3 中 B 处所示).前者是我们在第三次计数时所计数的层的层面,而我们在第一次计数时既包括前者又包括后者.因此我们认为只有具有前者光性特征的微层界线才是年层界线,而后者则不能计入年层之中.

按上述标准计数的石笋 TW9801 年层数同时列于表 1.

根据表 1,我们可以作出石笋 TIMS- ^{230}Th 年龄和年层计数结果的对比曲线,如图 4 所示.由表 1 和图 4 可以看出,石笋 TW9801 的年层计数结果和 TIMS- ^{230}Th 定年结果非常吻合(^{230}Th

年龄和年层计数的相关系数大于 0.9)。

3 结论

由以上论述表明, 本溪水洞石笋 TW9801 的某一级次的微层属于年层。结合北京等地北方型石笋微层研究^[14], 我们认为在上节(1)中第三次计数时所依据的微层面特征即为北方型石笋年层层面的特征, 即微层界面呈面状, 较薄, 由暗色不透明物质组成, 垂直于石笋生长方向, 荧光条件下发光较强; 在镜下微调焦距, 总能在石笋薄片上见到清晰的界面线。

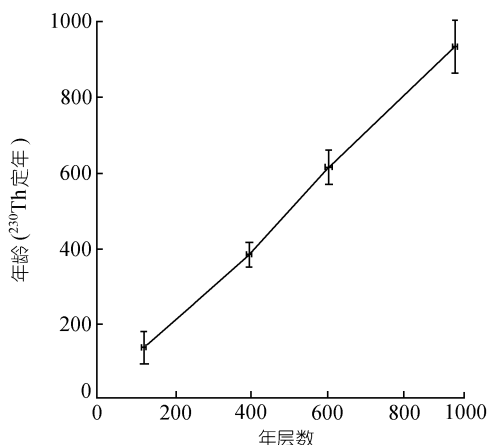
在我们清楚地了解石笋年层的影像特征后, 图 4 TW9801 微层计数和 TIMS-²³⁰Th 定年结果我们可以利用石笋微层的自计时特性, 按照石笋年层影像特征来计数未定年的连续沉积的石笋中的年层, 以确定其年龄。2000 年 6 月, 我们在本溪水洞采取了石笋 TW01, TW02, 根据上述原则, 我们计数石笋 TW01 的年层并测量其层厚, 我们发现在已计数的前 500 层中, 石笋 TW01 和石笋 TW9801 的层厚曲线具有一致的变化趋势。这表明, 一方面我们可以利用年层计数来确定石笋 TW01 的年龄, 另一方面说明石笋微层中可能确实包含有气候变化的信息, 而更进一步的工作设想是对两个或两个以上的石笋作交叉定年。这就是石笋微层计数年代学的基本思路。

石笋的年层计数的结果依赖于两个方面, 一是石笋自身, 石笋中有一些亚年层、多年层等存在, 在计数时有可能没有分辨清楚而造成计数有误; 二是计数者, 年层计数带有一定的主观性, 不同的观察条件影响着观察者的判断。因此, 在计数石笋年层时, 首先要详细研究年层的影像特征, 区分年层和伪年层, 同时要尽量用多次统计的方法来计数年层, 这样得到的结果才比较可信。

致谢 本项研究得到刘东生院士的支持; 在本文写作过程中与顾兆炎、秦小光、吴乃琴、旺罗进行过富有启发性的讨论, 谨表谢意。

参 考 文 献

- 1 Baker A, Smart P, Edwards R L, et al. Annual growth banding in a cave stalagmite. *Nature*, 1993, 364: 518~520
- 2 Tan M, Liu T S, Qin X G, et al. Signification chrono-climatique de spéléothèmes laminés de Chine du Nord. *Karstologia*, 1998, 32(2): 1~6
- 3 Baker A, Proctor C J, Barnes W L. Variations in stalagmite luminescence laminae structure at Poole's Cavern, England, AD 1920-1996: Calibration of a palaeoprecipitation proxy. *The Holocene*, 1999, 9(6): 683~688
- 4 Brook G A, Rafter M A, Railsback L B, et al. A high-resolution proxy record of rainfall and ENSO since AD 1550 from layering in stalagmites from Anjohibe Cave, Madagascar. *The Holocene*, 1999, 9(6): 695~705
- 5 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——II. 灰度的年际变化. *中国科学, D 辑*, 2000, 30(3): 239~248
- 6 Cheng H, Edwards R L, Murrell M T, et al. Uranium-thorium-protactinium dating systematics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(21/22): 3437~3452



- 7 Chen J H, Curran H A, White B, et al. Precise chronology of the last interglacial period ^{234}U - ^{230}Th data from fossil coral reefs in the Bahamas. *Geol Soc Amer Bull*, 1991, 103: 82~97
- 8 Edwards R L, Chen J H, Ku T-L. Precise timing of the last inter-glacial period from mass spectrometric analysis of ^{230}Th in coral. *Science*, 1987, 236: 1547~1553
- 9 Bard E, Hamelin B, Fairbanks R G. U/Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados: Sea level during last 130000 years. *Nature*, 1990(a), 346: 456~458
- 10 Eisenhauer A, Wasserburg G J, Chen J H, et al. Holocene sea-level determination relative to the Australian continent: U/Th(TIMS) and ^{14}C (AMS) dating of coral cores from the Abrolhos Islands. *Earth Planet Sci Lett*, 1993, 114: 529~547
- 11 Bard E, Hamelin B, Fairbanks R G. Calibration of the ^{14}C time-scale over the past 30 000 years using mass spectrometric U-Th ages from Barbados coral. *Nature*, 1990(b), 31: 405~409
- 12 Li W, Lundberg J, Dickin A, et al., High precision mass-spectrometric uranium-series of cave deposits and implication for palaeoclimate studies. *Nature*, 1989, 339: 334~336
- 13 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. *科学通报*, 1999, 44(6): 646~648
- 14 谭 明, 程 海, Edwards R L, 等. 甚年轻石笋的 TIMS- ^{230}Th 定年及其年层确定. *第四纪研究*, 2000, 20(4): 391