

# 石笋氧碳同位素古气候代用指标研究进展

孔兴功

(南京师范大学 地理科学学院, 南京 210046)

**摘要:** 洞穴石笋以其独立的绝对年龄和稳定的古气候代用指标而成为很好的陆地古气候研究材料。应用U系定年,可以获得独立精确的日历年时间序列,结合年纹层统计,可以获得年际甚至是季节性变化古气候记录。作为古气候代用指标,石笋氧同位素具有全球可对比性,现已建立了氧同位素的全球气候变化曲线,显示了比深海氧同位素及极地冰芯氧同位素记录更多的优势。石笋  $\delta^{18}\text{O}$  的影响因素很多,在东亚季风控制区和其它季风控制区,石笋的  $\delta^{18}\text{O}$  反映了夏季风的强度或者是季风降雨的变化。这些全球可对比的具有高精度绝对定年的石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录,突破了早期的单一温度控制机理,不仅为古气候学家提供了坚实的古气候变化时间序列,而且使古气候研究能从机理上探讨其变化规律。 $\delta^{13}\text{C}$  不如  $\delta^{18}\text{O}$  具有全球可对比性,在同位素平衡的开放体系,石笋  $\delta^{13}\text{C}$  主要反映了洞穴上覆土壤  $\text{CO}_2$  的同位素特征。因此,一般认为石笋  $\delta^{13}\text{C}$  可直接反映当地植被的特征,包括植被类型  $\text{C}_3/\text{C}_4$  比率的变化及植被的茂盛与衰退,在一些地区也可作为大气降水和温度变化的指标。石笋  $\delta^{13}\text{C}$  很易受到蒸发作用、滴水的快速去气、动力分馏、碳酸盐的先期沉积等影响而使得其数值偏正,应该予以重视。通过介绍石笋氧碳同位素的研究现状,使得读者对石笋的稳定同位素指标有一个初步认识。同时,对今后的研究方向给与一定的探讨。

**关键词:** 石笋; 氧碳同位素; 古气候

中图分类号: P532

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2009) -02-0165-06

## Advance in Study of Oxygen and Carbon Isotope Variations in Cave Stalagmites as Palaeo-Climate Proxies

KONG Xing-gong

(College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** Stalagmites are now regarded as valuable archives in study of climatic conditions on the continents. They are ideal materials for precise U-series dating, yielding ages in calendar years, coupled with annual layer counting, the chronology of stable oxygen-isotope then be made with the resolution higher than year. These absolute precise dating and high resolution records offer a number of advantages relative to other continental climate proxy recorders such as lake sediments and peat cores. In many cases, stalagmite records may provide climate conditions that rival those obtained from marine sediments and ice cores. The controls on stalagmite  $\delta^{18}\text{O}$  are numerous, under equilibrium condition, the  $\delta^{18}\text{O}$  values of stalagmites are related to intensity of summer monsoon or amount of the monsoon precipitation at the typical monsoon area. This emphasis on global climate teleconnections has replaced attempts to constrain absolute palaeotemperature, allowing the scientific community to place global climate changes on a firm chronological and climate dynamical footing. Unlike the global comparison of  $\delta^{18}\text{O}$ , under equilibrium open system conditions, the  $\delta^{13}\text{C}$  of the dissolved species reflects the isotopic composition of the soil  $\text{CO}_2$ , with no detectable isotopic imprint from the carbonate host-rock. Thus the stalagmite  $\delta^{13}\text{C}$  is mainly controlled by the vegetation covering the cave, normally by the  $\text{C}_3/\text{C}_4$  ratio of the local vegetation. The  $\delta^{13}\text{C}$  can still be related to the change of precipitation and temperature at special region. We should pay special attention to these processes including evaporation, rapid degassing of cave dripwaters, kinetic fractionation,

收稿日期: 2008-02-18; 修回日期: 2008-04-16

基金项目: 由国家自然科学基金 (40771009); 教育部重点项 (207039) 共同资助

作者简介: 孔兴功, 男, 博士, 副教授, 主要从事石笋同位素古气候研究; E-mail: kongxing gong@njnu.edu.cn

CO<sub>2</sub> degassing of dripwaters and consequent calcite precipitation in the vadose zone above a cave that could affect the carbon isotope to a relatively heavier signature. The literature is reviewed briefly to provide for the readers a sense of the current research work of the stable isotope of stalagmite and provide some ideas for future research directions.

**Key words:** stalagmite; oxygen and carbon isotope; palaeoclimate proxy

洞穴石笋由于沉积连续（可连续沉积10万元以上），分辨率高（其氧碳同位素分辨率可达到年际甚至季节），具有绝对定年准确（<sup>230</sup>Th测试误差可达0.1%）和后期蚀变小（指标稳定）等优势，成为古气候研究的良好材料。在铀系测年范围内，石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 已初步建立了近50万年来千年尺度气候变化的时间序列，逐步成为与冰芯具有同等重要地位的古气候研究材料。Henderson（2006）在学术期刊《Science》上发表文章指出，在古气候研究领域，之前的20年是冰芯时代，未来的20年，将是石笋时代。石笋的研究成果，将为全球古气候变化重建、气候变化模型的建立提供可靠的基础资料。

系统的石笋稳定同位素研究工作开始于40年前（Hendy, 1968; Thompson et al, 1974）。然而由于 $\alpha$ -谱仪测年法对样品量的要求太大（10 g），因此，研究工作进展缓慢。直到TIMS技术的发展（Edwards et al, 1987; Li et al, 1989），该项工作才开始得以重焕青春。近年来，随着ICP-MS技术的应用（Shen et al, 2002），尤其是MC-ICP-MS的应用，石笋测年样品用量大幅度减少（50 mg），同时测年精度更高（可达0.1%）。使得石笋高分辨率古气候研究更是如火如荼。采用牙钻取样方法，一般可以取到0.5 mm/样，根据石笋的生长速率（0.01~1 mm/a）（Baker et al, 1998; Genty et al, 2001b），石笋的氧碳同位素分辨率可达几年至几十年。因此很难捕捉到如8.2 ka事件等持续时间较短的气候事件（Mcdermott et al, 2001）。利用激光熔蚀法（Mcdermott et al, 2001），微区取样（Frappier et al, 2002）以及离子探针（Kolodny et al, 2003）等方法，可以使取样密度达到小于20  $\mu\text{m}$ ，但由于同位素分馏等因素的影响，氧碳同位素的测试误差比传统方法要大，还需进一步完善。尽管石笋古气候研究取得了骄人的成果，但有关石笋的生长机理，各种代用指标的古气候意义还需进一步的研究探讨。

## 1 石笋的古气候代用指标

洞穴石笋代用指标非常丰富，除石笋纹层灰度（Qing et al, 1998; 2000），有机质荧光（Baker, 1993; McGarry and Baker, 2000），微量元素变化（Treble et al, 2003; Borsato et al, 2007; Fairchild et al, 2009）、分子化石标志物（Xie et al, 2003），包裹体成分（Kluge et al, 2008），硫及硫同位素（Frisia et al, 2005; Wynn et al, 2008）等外，石笋的纹层厚度、氧碳同位素最为重要。Tan and Liu（2003）根据对北京石花洞的石笋样品进行精确的年纹层统计，结合现代器测资料，将石笋的年纹层厚度量化为北京地区的夏季温度指标，从而重建了近3 000年来北京地区夏季温度的变化历史。在石笋的指标研究中，首次给出了较长序列的气候变化量化指标。

## 2 石笋碳同位素的气候意义

石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化较为复杂，Hendy（1971）较早系统地研究了洞顶植被、洞穴系统、同位素分馏机理等对石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响，指出在同位素平衡条件下，不同的植被类型对石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响最大。同时，在大气降水到洞穴滴水过程中，岩溶系统在开放体系和封闭体系不同的环境下，石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化受植被和母岩影响的程度相差甚大。在开放体系下，石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 主要反映了洞穴上覆土壤CO<sub>2</sub>的同位素特征。在C<sub>3</sub>植被覆盖区域，土壤气体 $\delta^{13}\text{C}$ 一般为-26‰~-20‰，而C<sub>4</sub>植被覆盖区土壤气体 $\delta^{13}\text{C}$ 一般为-16‰~-10‰，母岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 一般为1‰，在同位素平衡条件下，二次沉积碳酸盐——洞穴石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 在C<sub>3</sub>和C<sub>4</sub>植被覆盖区分别为-14‰~-6‰和-6‰~2‰。在封闭体系下，石灰岩母岩对石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的贡献可达50%。不过，在自然界中的岩溶系统多为开放体系，因此石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 常被视作不同光合作用途径植被类型C<sub>3</sub>和C<sub>4</sub>比率的变化（Doral et al, 1992）。

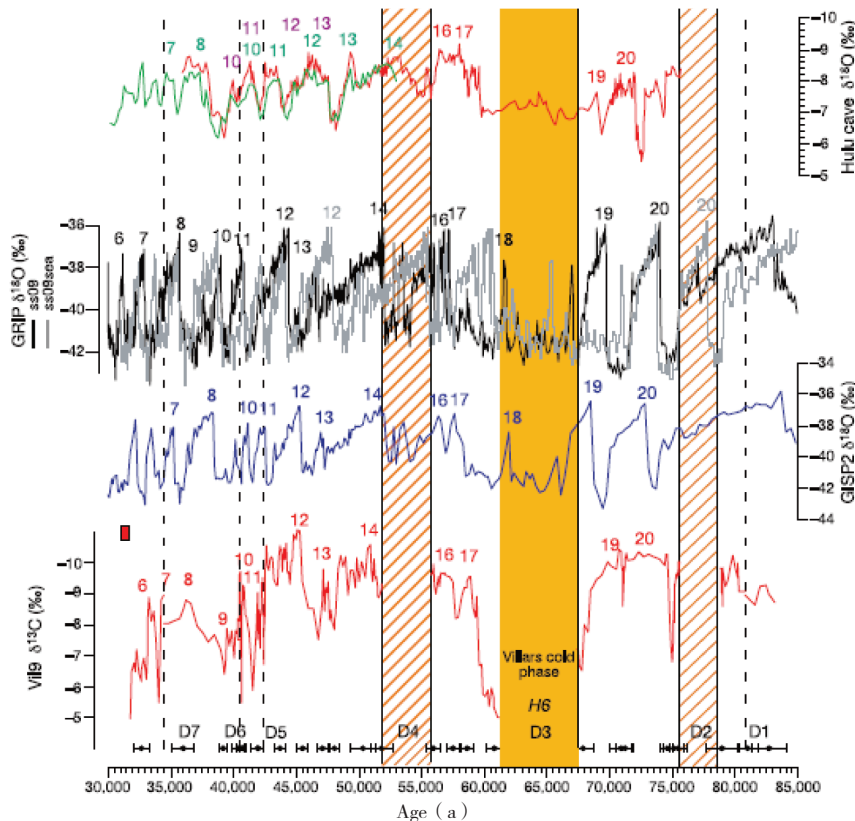
然而, 值得注意的是, 石笋  $\delta^{13}\text{C}$  相比  $\delta^{18}\text{O}$  更易受到蒸发作用、滴水的快速去气、动力分馏、碳酸盐的先期沉积等影响而使得其数值偏正。因此, 在利用碳同位素重建古气候变化历史时, 应该检验其是否受到扰动。还有一些岩溶过程可以引起石笋  $\delta^{13}\text{C}$  偏离其平衡值。例如由于高降水导致渗滤水快速流过土壤带, 使得土壤粒间  $\text{CO}_2$  未被平衡溶解 (Baker et al, 1997), 从而导致石笋  $\delta^{13}\text{C}$  值从  $-12\text{‰}$  升至  $-2\text{‰}$  (Bar-Marthew et al, 1999, 2000); 来自基岩和地表土壤带老碳、死碳的加入 (Genty et al, 2001) 等。

在一些理想环境下, 石笋  $\delta^{13}\text{C}$  也能象  $\delta^{18}\text{O}$  一样反映大气降水或温度的变化。Genty 等通过对法国洞穴石笋  $\delta^{13}\text{C}$  及地表植被的研究, 发现在地表植被类型不变条件下, 土壤植被根系的  $\text{CO}_2$  气体产率变化也可引起石笋  $\delta^{13}\text{C}$  值从  $-4\text{‰}$  变化至  $-12\text{‰}$  (Genty et al, 2003), 而这种变化更加精确的反映了千年尺度气候变化, 并且具有全球可对比性,

尤其是与高分辨率的冰心记录和具有绝对精确定年的南京葫芦洞石笋氧同位素记录具有很好的对比关系 (图1)。说明石笋  $\delta^{13}\text{C}$  也可作为良好的气候代用指标。

### 3 石笋氧同位素的气候意义

石笋稳定同位素  $\delta^{18}\text{O}$  具有良好的区域可对比性, 从典型的东亚季风区记录到东亚季风与西南季风的共同作用区 (Yuan et al, 2004), 以及典型的印度洋季风作用区 (Fleitmann et al, 2003), 甚至于南半球巴西的石笋记录也显示了与北半球东亚季风良好的镜像对应关系 (Wang et al, 2004)。由此证实了石笋  $\delta^{18}\text{O}$  具有全球可对比性。根据现代观测结果, 洞顶滴水与洞外大气降水的  $\delta^{18}\text{O}$  具有很好的相关性, 也说明石笋的  $\delta^{18}\text{O}$  代表了沉积时的古大气降水的  $\delta^{18}\text{O}$  变化 (Ayalon et al, 1998; Li et al, 2000)。因此, 石笋  $\delta^{18}\text{O}$  气候代用指标的定量化研究, 将是以后石笋古气候研究



图中数字6~20表示的 Dansgaard-Oeschger (DO) 暖事件表现出石笋  $\delta^{13}\text{C}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  具有非常好的对应关系  
Note that Dansgaard-Oeschger (DO) events (the number 6-20) show the same pattern compared with that from ice core and Hulu cave stalagmite.

图1 法国石笋  $\delta^{13}\text{C}$  记录与冰心及中国等石笋  $\delta^{18}\text{O}$  对比 (Genty, 2003)

Fig. 1 Comparison of the stalagmite carbon isotope profile with the Greenland ice core records and other stalagmite records

的热点问题。

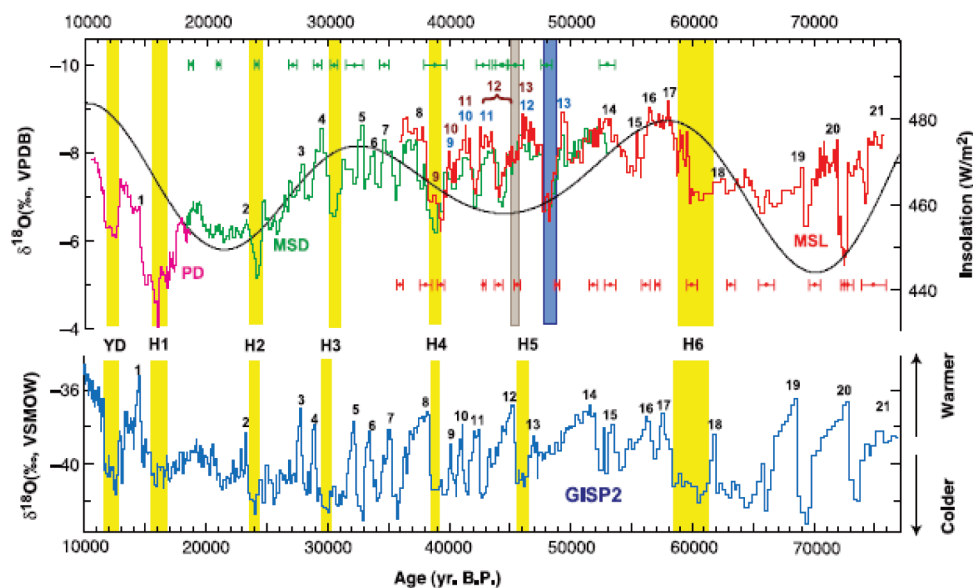
石笋  $\delta^{18}\text{O}$  对气候的指示可根据直接测试和间接估算。直接测试是指通过测试石笋沉积过程中形成的流体包裹体中水的  $\delta^{18}\text{O}$  和石笋  $\delta^{18}\text{O}$ ，根据 O'Neil 方程，计算石笋形成时的温度 (Schwarcz et al, 1976)，但无论是热爆裂法 (McGarry et al, 2004) 还是冷冻技术 (Dennis et al, 2001; Fleitmann et al, 2003) 都很难采集到足够的量，因此，包裹体直接测试法因为包裹体水收集的技术及采集量的问题很难进行高分辨率的温度变化时间序列的研究 (McDermott et al, 2006)。再加上包裹体中的原始洞穴滴水在漫长的历史时期，有可能与母岩 (石笋) 发生同位素交换，该方法目前还存在很大的不确定性 (Fairchild et al, 2006)。因此，目前应用广泛的还是间接估算的方法。

石笋稳定同位素  $\delta^{18}\text{O}$  作为古气候指标研究开始于 20 世纪 60 年代以后 (Broeker et al, 1960; Hendy and Wilson, 1968; Duplessy et al, 1970; Emiliani et al, 1971; Hendy, 1971)。在同位素平衡分馏情况下 (Hendy, 1971)，石笋  $\delta^{18}\text{O}$  主要受控于洞穴滴水  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  和洞穴温度的变化。在石笋沉积成岩过程中，洞穴温度控制的水岩反应同位素分馏系数使得  $\delta^{18}\text{O}$  有约  $-0.24\text{‰}/^\circ\text{C}$  的温度梯

度 (O'Neil et al, 1969)。而洞穴滴水  $\delta^{18}\text{O}$  较为复杂，在同位素平衡条件下，滴水  $\delta^{18}\text{O}$  反映了大气降水的年均值 (Yonge et al, 1985)。大气降水的  $\delta^{18}\text{O}$  变化又同时受水汽源、水汽运移路径，水汽凝结温度和降雨量等因素控制 (Gascoyne et al, 1992)。因此，洞穴石笋  $\delta^{18}\text{O}$  主要反映了石笋形成时期的洞穴温度和大气降水信息。

在温带地区，影响大气降水氧同位素的主要因素是冰期-间冰期尺度的水汽源的纬向运移，石笋  $\delta^{18}\text{O}$  表现出与大气温度变化良好的相关性，常被作为温度指标 (Lauritzen et al, 1995; Dorale et al, 1992; Johnson et al, 2004)，Mangini et al (2005)。通过研究奥地利高海拔洞穴石笋  $\delta^{18}\text{O}$ ，指出其与温度有良好的相关性，温度梯度为  $-0.22\text{‰}/^\circ\text{C}$ 。然而，在热带地区或典型的季风控制区，根据对现代降雨量效应及其与石笋  $\delta^{18}\text{O}$  的相关性研究，大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  主要受降雨量控制，石笋  $\delta^{18}\text{O}$  主要反映了季风降雨量的变化 (Ayalon et al, 1998; Bar-Matthews et al, 1998; Fleitmann et al, 2003; 2004)，因此石笋  $\delta^{18}\text{O}$  也被作为降雨量指标。

在东亚季风区，刘东生等 (1997) 对石笋纹层的研究翻开了中国石笋高分辨率古气候研究的历史。而 Wang 等对南京葫芦洞石笋的研究成果 (图 2) 可



图中数字 1-21 表示 21 个 DO 暖事件，YD, H1-H6 表示新仙女木事件和 6 个 Heinrich 冷事件，在高精度绝对定年的控制下，南京石笋  $\delta^{18}\text{O}$  与高分辨率冰心记录的亚轨道尺度事件表现出良好的一致性。

Numbers indicate DO events and correlated events at Hulu cave. The YD and Heinrich events are depicted with vertical bars. The  $\delta^{18}\text{O}$  from the Hulu cave stalagmites shows the same pattern as the Greenland ice core by the millennium time scale.

图 2 南京石笋  $\delta^{18}\text{O}$  与格陵兰冰心  $\delta^{18}\text{O}$  对比 (Wang et al, 2001)

Fig. 2  $\delta^{18}\text{O}$  of the Hulu cave stalagmites and the Greenland Ice



谓具有绝对定年的高分辨率石笋古气候研究的里程碑 (Wang et al, 2001), 指出了东亚季风千年尺度的气候突变事件具有全球可对比性, 为进一步理解气候驱动机制提供了坚实的证据。袁道先等则根据给定的间冰期、冰期和现代热带海洋的水汽饱和度, 经过传输分馏, 推断出到达洞穴的相应的水汽比率, 将贵州董哥洞石笋  $\delta^{18}\text{O}$  的波动解释为降雨量效应 (Yuan et al, 2004)。Hu 等 (2008) 通过对比贵州董哥洞与湖北和尚洞全新世石笋  $\delta^{18}\text{O}$ , 指出两地石笋  $\delta^{18}\text{O}$  的差定量的记录了降雨量变化, 是石笋  $\delta^{18}\text{O}$  指标研究的又一个突破性进展。但由于两地历史时期大气降水变化的不确定性, 该方法还需进一步验证。

由于单一洞穴的石笋样品同时受大气降水和洞穴温度的影响, 其  $\delta^{18}\text{O}$  往往是温度和降水共同作用的结果, 为分离温度和降水对石笋  $\delta^{18}\text{O}$  的贡献, 就需要同一地区不同海拔高度的多个洞穴的集成结果, 这样首先保证了水汽来源的一致性, 根据海拔效应, 就有可能定量估算温度和降水对石笋  $\delta^{18}\text{O}$  的贡献。

## 4 问题与展望

尽管石笋古气候研究已经取得了引人瞩目的成果, 但目前的研究还存在很多需要解决的问题:

1) 石笋的生长机理。到底在什么样的气候背景下有利于石笋的生长, 暖湿还是凉湿, 或者只与岩溶系统有关。不同的区域石笋生长有何特征。这些都是重建古气候变化的重要因素。2) 古气候的代用指标。目前石笋的古气候代用指标除了氧同位素具有全球可对比性外, 其它代用指标都很大程度受到局域气候或洞穴系统的影响, 不利于对比研究。即使是氧同位素, 其气候的指代意义也一直没能量化, 因此还需要进一步的对比研究予以讨论。今后的研究中, 应继续完善不同时间尺度的古气候记录, 尤其是在不同的气候区域, 建立可对比的气候变化曲线, 从而探讨气候变化的驱动机制。同时, 应该加强各指标的综合分析, 结合历史资料 and 现代观测资料, 重点解决石笋古气候代用指标的指代意义, 从而达到定量重建古气候变化历史。

## Reference:

Ayalon A, Bar-Matthews M and Sass E.1998. Rainfall-recharge

- relationships within a karstic terrain in the Eastern Mediterranean semi-arid region, Israel:  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  characteristics [J]. *Journal of Hydrology*, 207: 18–31.
- Baker A, Ito E, Smart P L, et al. 1997. Elevated  $13\text{-C}$  in speleothem and implications for palaeovegetation studies [J]. *Chem. Geol.*, 136: 263–270.
- Baker A, Genty D, Dreybrodt W, et al. 1998. Testing theoretically predicted stalagmite growth rate with recent annually laminated stalagmites: implications for past stalagmite deposition [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 393–404.
- Baker A, Smart P, Edwards R, et al.1993. Annual growth banding in a cave stalagmite [J]. *Nature*, 364: 518–520.
- Bar-Matthews M, Avner A and Kaufman A, et al. 1999. The Eastern Mediterranean paleoclimate as a reflection of regional events: Soreq cave, Israel [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 166: 85–95.
- Bar-Matthews M, Ayalon A and Kaufman A. 1998. Middle to late Holocene (6500 yr period) palaeoclimate in the Eastern Mediterranean regions form stable isotope composition of speleothems from Soreq Cave, Israel [M] // Isaar A S and Brown N. (eds.), *Water, Climate and Society in Time of Climate Change*. Kluwer, pp: 203–214.
- Bar-Matthews M, Ayalon A and Kaufman A. 2000. Timing and hydrological conditions of Sapropel events in the Eastern Mediterranean, as evident from speleothems, Soreq Cave, Israel [J]. *Chem. Geol.*, 169: 145–156.
- Borsato A, Frisia S, Fairchild I J, et al. 2007. Trace element distribution in annual stalagmite laminae mapped by micrometer-resolution X-ray fluorescence: implications for incorporation of environmentally significant species [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 1494–1512.
- Broecker W S, Olson E A and Orr P C. 1960. Radiocarbon measurements and annual rings in cave formations [J]. *Nature*, 185: 93–94.
- Dennis P F, Rowe P J and Atkinson T C. 2001. The recovery and isotopic measurement of water from fluid inclusions in speleothems [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(6): 871–884.
- Dorale J A, Gonzalez L A, Reagan M K, et al. 1992. A high-resolution record of Holocene climate change in speleothem calcite from Coldwater cave, Northeast Iowa [J]. *Science*, 258: 1626–1630.
- Duplessy J C, Labeyrie J, Lalou C, et al. 1970. Continental climatic variations between 130,000 and 90,000 years BP [J]. *Nature*, 226: 631–633.
- Edwards R L, Chen J H and Wasserburg G J. 1987.  $^{238}\text{U}$ – $^{234}\text{U}$ – $^{230}\text{Th}$ – $^{232}\text{Th}$  systematics and the precise measurement of time over the past 5,00,000 years [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 81: 175–192.
- Fairchild I J and Treble P C. 2009. Trace elements in speleothems as recorders of environmental change [J]. *Quaternary Science Reviews*, 28: 449–468.
- Fairchild I J, Smith C L, Baker A, et al. 2006. Modification and preservation of environmental signals in speleothems [J]. *Earth-Science Reviews*, 75: 105–153.
- Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. 2003. Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from Southern Oman [J]. *Science*, 300: 1737–1739.
- Fleitmann D, Burns S J, Neff U, et al. 2004. Palaeoclimatic interpretation of high-resolution oxygen isotope profiles derived from annually laminated speleothems from Southern Oman [J]. *Quaternary Science Reviews*, 23: 935–945.
- Frappier A, Sahagian D, Gonzalez L A, et al. 2002. El Nino events recorded by stalagmite carbon isotopes [J]. *Science*, 298–565.

- Gascoyne M. 1992. Palaeoclimate determination from cave calcite deposits [J]. *Quaternary Science Reviews*, 11: 609–632.
- Genty D D, Baker A, Massault M, et al. 2001a. Dead carbon in stalagmites: Carbonate bedrock paleodissolution vs. ageing of soil organic matter: Implications for  $^{13}\text{C}$  variations in speleothems [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 20: 3443–3457.
- Genty D D, Baker A and Vokal B. 2001b. Intra- and inter-annual growth rate of modern stalagmites [J]. *Chem. Geol.*, 176: 191–212.
- Genty D D, Ouahdi B R, et al. 2003. Precise dating of Dansgaard-Oeschger climate oscillations in western Europe from stalagmite data [J]. *Nature*, 421: 833–837.
- Henderson G. 2006. Caving in to New Chronologies [J]. *Science*, 313: 620–622.
- Hendy C H. 1971. The isotopic geochemistry of speleothems — I. The calculation of the effect of different modes of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as palaeoclimatic indicators [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 35: 807–824.
- Hendy C H and Wilson A T. 1986. Palaeoclimatic data from speleothem [J]. *Nature*, 216: 48–51.
- Hu C Y, Henderson G M and Huang J H. 2008. Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 266: 221–232.
- Johnson K R and Ingram B L. 2004. Spatial and temporal variability in the stable isotope systematics of modern precipitation in China: implications for paleoclimate reconstructions [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 220: 365–377.
- Kluge T, Marx T, Scholz D, et al. 2008. A new tool for palaeoclimate reconstruction: noble gas temperatures from fluid inclusions in speleothems [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 269: 407–414.
- Kolodny Y, Bar-Matthews M, Ayalon A, et al. 2003. A high spatial resolution  $\delta^{18}\text{O}$  profile of a speleothem using an ionmicroprobe [J]. *Chem. Geol.*, 197: 21–28.
- Lauritzen S E. 1995. High-resolution paleotemperature proxy record for the last interglacial based on Norwegian speleothems [J]. *Quaternary Research*, 43: 133–146.
- Li B, Yuan D X, Qin J M, et al. 2000. Oxygen and carbon isotopic characteristics of rainwater, drip water and present speleothems in a cave in Guilin area, and their environmental meanings [J]. *Chinese Science Bulletin*, 43 (3): 277–285.
- Liu Tungsheng, Tan Ming, Qin Xiaoguang, et al. 1997. Discovery of microbedding in speleothems in China and its significance in the study of global change [J]. *Quaternary Sciences*. 1: 41–51. (in Chinese with English abstract)
- Li W X, Lundberg J, Dickin A P, et al. 1989. High-precision mass-spectrometric uranium-series dating of calcite deposits and implications for palaeoclimatic studies [J]. *Nature*, 339: 534–536.
- Mangini A, Spot C and Verdes P. 2005. Reconstruction of temperature in the Central Alps during the past 2000 yr from a  $\delta^{18}\text{O}$  stalagmite record [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 235: 741–751.
- McDermott F, Matthey D P and Hawkesworth C J. 2001. Centennial scale Holocene climate variability revealed by a high-resolution speleothem  $\delta^{18}\text{O}$  record from S W Ireland [J]. *Science*, 294: 1328–1331.
- McDermott F, Schwarcz H P and Rowe P J. 2006. Isotopes in speleothems [M] // Leng M J (ed.), *Isotopes in Palaeoenvironmental Research*. The Netherlands, Dordrech, Springer, 6: 185–226.
- McGarry S and Baker A. 2000. Organic acid fluorescence: applications to speleothem palaeoenvironmental reconstruction [J]. *Quaternary Science Reviews*, 19: 1087–1101.
- McGarry S F, Bar-Matthews M, Matthew A, et al. 2004. Constraints on hydrological and palaeotemperature variations in the Eastern Mediterranean region in the last 140 ka given by the D values of speleothem fluid inclusions [J]. *Quaternary Science Reviews*, 23: 919–934.
- O'Neil J R, Clayton R N and Mayeda T K. 1969. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates [J]. *J. Chem. Phys.*, 51: 5547–5558.
- Qin X G, Liu D S, Tan M, et al. 1998. Grey characteristics of microbanding of stalagmite in Shihua Cave, Beijing and its climatic signification (I) — The study of microstructure of microbanding [J]. *Chinese Science Bulletin*, 41 (2): 151–157.
- Qin X G, Liu D S, Tan M, et al. 2000. Characteristics of annual laminae gray level variations in a stalagmite from Shihua Cave, Beijing and its climatic significance (II) [J]. *Chinese Science Bulletin*, 43 (5): 521–533.
- Schwarcz H P, Harmon R S, Thompson P, et al. 1976. Stable isotope studies of fluid inclusions in speleothems and their paleoclimatic significance [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 40: 657–665.
- Shen C, Edwards R L, Cheng H, et al. 2002. Uranium and thorium isotopic and concentration measurements by magnetic sector inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Chem. Geol.*, 185: 165–178.
- Tan M and Liu T S. 2003. Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2650-year stalagmite record of warm season temperature [J]. *Geophysical Research Letters*, 30(12): 16–17.
- Thompson P, Schwarcz H P and Ford D C. 1974. Continental Pleistocene climatic variations from speleothem age and isotopic data [J]. *Science*, 184: 893–894.
- Treble P, Shelley J M G and Chappell J. 2003. Comparison of high-resolution subannual records of trace elements in a modern (1911–1992) speleothem with instrumental climate data from southwest Australia [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 216: 141–153.
- Van-Exter S. 2003. Precise dating of Dansgaard-Oeschger climatic oscillations in western Europe from stalagmite data [J]. *Nature*, 421: 833–837.
- Wang X F, Auler A S, Edwards R L, et al. 2004. Wet periods in northeastern Brazil over the past 210 kyr linked to the distant climate anomalies [J]. *Nature*, 432: 740–743.
- Wang Y J, Cheng H and Edwards R L, et al. 2001. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China [J]. *Science*, 294: 2345–2348.
- Wynn P M, Fairchild I J and Baker A, et al. 2008. Isotopic archives of sulphate in speleothems [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 2465–2477.
- Xie S C, Yi Y, Huang J H, et al. 2003. Lipid distribution in a subtropical southern China stalagmite as a record of soil ecosystem response to paleoclimate change [J]. *Quaternary Research*, 60: 340–347.
- Yonge C J, Ford D C, Gray J, et al. 1985. Stable isotope studies of cave seepage water [J]. *Chem. Geol.*, 58: 97–105.
- Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, et al. 2004. Timing, duration and transition of the last interglacial Asian monsoon [J]. *Science*, 304: 575–578.

## 参考文献:

刘东生, 谭明, 秦小光, 等. 1997. 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, 1: 41–51.