

文章编号:1001-4810(2010)03-0258-09

中国近2000年来气候变化石笋记录研究进展

殷建军^{1,2}, 覃嘉铭², 林玉石², 杨琰¹, 唐伟^{1,2}

(1. 西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室、西南大学地理科学学院, 重庆 400715;

2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:哥本哈根气候大会的召开,使得近2000年来的气候变化研究倍受关注。本文对气候变化石笋记录,尤其是我国近2000年来气候变化石笋记录取得的主要成果进行了总结。已有研究的进展主要在于:发现在中国季风区石笋记录中存在近2000年来的一系列气候事件,并对其进行了高分辨率重建;对地区热月温度进行了年分辨率的重建,以及通过集成研究发现了“环流效应”等等。但以往的研究仍存在石笋古环境代用指标机理、年代学以及区域代表性石笋记录研究不够等问题。为此,文中提出了加强年际分辨率氧同位素古环境机理,特别是大气降水到石笋的一整套迁移变化过程的研究,以及与其他古环境代用指标的响应机理进行综合研究,加强近2000年来石笋年代学研究和加强区域性代表性石笋记录研究等建议。

关键词:石笋记录;碳氧同位素;气候变化;研究进展

中图分类号:P532 **文献标识码:**A

0 引言

2009年12月7—18日哥本哈根世界气候大会的召开,全球变暖问题被各国政治家们推向了国际舞台,为使本世纪内全球升温控制在2℃内而对各国进行碳减排的分配问题成为会议的焦点。但会议最后没有达成实质性的一致,其原因除了对碳减排分配的分歧外,各国科学家对近2000年来的气候变化过程的认识仍存在分歧,导致了“面条”与“曲棍球”之争。对于近2000年来的气候变化,研究资料包括冰芯、黄土、深海沉积、珊瑚、树轮、泥炭、湖泊沉积、孢粉、历史文献以及洞穴化学沉积物等记录体,研究成果也颇为丰富^[1~3]。但也有分歧,主要原因是由于地区的差异性,导致各记录代用指标对环境的指示意义存在差异等。所以加强区域性记录的研究,将丰富我们对近2000年来气候变化的认识。

对于中国近2000年来的气候变化,其最大的特色就是季风区季风强弱变化,冰芯^[4,5]、黄土^[6]、珊瑚^[7]、湖泊沉积^[8~10]、树轮^[11,12]、泥炭^[13,14]、孢粉^[15]、

历史文献^[16,17]、洞穴化学沉积物^[18~20]等都记录了亚洲季风的演变过程,特别是对近2000年来气候事件,如中世纪暖期^[2,14,18,19,21]、小冰期^[4,10,12,22],近100年来的气候变暖^[12],以及近200年来季风演变^[23,24],不仅丰富了中国的气候变化记录,也使得对中国近2000年来气候变化过程的认识更加清晰。中国有着面积广大的岩溶区,洞穴化学沉积物(主要是石笋记录)分布广泛,特别是对洞穴沉积物之外的记录相对稀少的地区,洞穴化学沉积物的研究填补了区域气候研究的空白,尤其是一些高精度、有影响力的记录的发布^[18,25~28],使得中国的气候变化研究走在了世界的前列,为世界气候变化研究做出了重要贡献。为更好的认识近2000年来中国气候变化石笋记录的研究历史和发展历程,本文对其研究进展进行归纳和总结,并提出自己的一些看法。

1 气候变化石笋记录的研究进展

洞穴化学沉积物的概念最早由Moore^[29]于1952

基金项目:国土资源部地调项目“岩溶动力系统与碳循环”项目(编号:1212010911062)

第一作者简介:殷建军(1985—),男,硕士研究生,主要从事岩溶学与环境变化研究。E-mail:david1985-2005@163.com.

收稿日期:2009-03-16

年提出。但对于其研究因为测年方法的不成熟,一直没有取得进展,多停留在对测年方法、洞穴化学沉积物物理特性以及 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CaCO}_3$ 系统稳定同位素的环境指示意义的探索上。直到1969年,O'Neil^[30]通过无机实验发现了碳酸盐中氧同位素与温度的关系式,以及1971年,Hendy^[31]建立了判断洞穴化学沉积物形成过程中同位素是否达到平衡分馏的Hendy准则,为利用洞穴化学沉积物恢复古环境提供理论基础,石笋才被广泛应用于对古环境的重建。特别是随着测年技术的发展^[32,33],石笋测年样品需求量的减少,测年精度的提高,高分辨率的气候变化石笋记录才蓬勃发展起来。

1988年,Winograd等^[34]利用TIMS-U系法测年技术,研究了美国Devils洞穴中的一段方解石脉的氧同位素变化,并与深海氧同位素和极地冰芯进行对比后发现:末次间冰期在方解石脉记录中开始于 $147\pm 3\text{ka B.P.}$,比海洋记录至少提前了17 000年,比南极冰芯提前了7 000年,据此提出海洋氧同位素年代学需要修正、天文轨道驱动并非更新世冰期产生的主要原因的意见与观点。2001年,Wang Yongjin^[25]通过对南京葫芦洞石笋进行精确的 ^{230}Th 定年和同位素分析,对格陵兰冰芯年龄的准确性提出了质疑,并指出东亚季风的变化都是完整的千年尺度的海/气循环模式的转变,都受到轨道因素引起的太阳辐射变化的影响。2003年,Dominik Fleitmann^[35]等通过对阿曼南部的石笋进行高精度U-Th测年和碳、氧同位素研究,并与格陵兰冰芯记录进行对比后发现:早全新世季风强度很大程度上受到冰川边界条件控制,距今8ka以后,季风降水随着北半球夏季太阳辐射变化而逐渐减少,而且在十年和千年尺度上季风降水的变化与太阳活动有关。2009年,Cheng Hai^[36]通过对湖北神农架石笋进行高精度 ^{230}Th 定年和氧同位素测试,对亚洲季风记录的四次突变事件与极地冰芯和深海氧同位素进行对比后指出:北半球夏季太阳辐射强度的变化开启了北半球冰盖的衰退,冰川融水和冰山进入北大西洋改变了海气循环以及导致全球热通量和碳通量的改变,导致大气 CO_2 的增加和南极温度的升高,进而造成南半球冰期的结束, CO_2 的增加以及夏季太阳辐射的增强导致北半球冰盖的衰退,并可能通过海平面和 CO_2 产生正反馈作用。

依托高精度的测年技术,具有高分辨率同位素记录的石笋成为气候变化研究的重要地质记录体,特别是对50万年来冰期与间冰期的研究、气候突变事件的研究、气候驱动机制的研究,已经成为气候变化研

究的不可或缺的记录载体。

石笋对气候事件响应的解释,必须借助一定的代用指标,而代用指标的机理研究则是利用石笋记录解释气候事件的关键,但由于区域差异性的存在,代用指标对环境的响应机理又有所不同,所以找到适合中国区域环境的代用指标就尤为重要。1985年,汪训一^[37]用U-Th法测试了桂林茅茅头大岩两根石笋的年龄,并绘制国内第一张碳氧同位素图谱,但他只对图中距今27~28ka左右碳氧同位素同时“出现一个明显的低槽谷”进行讨论,认为是“一个气温相对较高的气候期”,没有涉及代用指标的响应机理问题。由于没有对石笋记录气候环境代用指标机理的研究,20世纪80年代末90年代初,我国石笋研究多侧重于对古气温的恢复、年代学的探索,以及代用指标的探讨。1993年,覃嘉铭^[38]通过对桂林地区气温、年降水量、夏季风降水量、降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的监测和分析,发现了大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温呈负相关,并在2000年将其成果总结为:①全球变暖→夏季风增强→夏季风降水与年降水比值增大→年降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏轻→石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏轻;②全球变冷→夏季风减弱→夏季风降水与年降水比值减小→年降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏重→石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏重^[39]。1998年,李红春^[40]通过对北京石花洞S312石笋氧同位素与京津地区降雨量、气温进行对比后,指出石笋中 $\delta^{18}\text{O}$ 主要指示了夏季风强弱的变化,长时间尺度的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的变化趋势主要是反映了气温的变化,而更精细的短时间尺度的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录则主要代表降雨量的变化,即“雨量效应”。2009年,谭明^[41]对中国季风区多个石笋记录进行了同区和异区对比后指出:石笋中氧同位素的轻重变化是由于印度洋海水和太平洋海水温度变化,导致西太平洋副热带高压位置变化,进而导致中国季风区降水的水汽来源发生变化。

适用于中国季风气候的石笋氧同位素的解译,为研究中国石笋记录提供了理论依据,也为近2 000年来高分辨率石笋记录气候变化研究提供了理论保障。对年际分辨率的石笋氧同位素记录目前在解释季风降水、季风强弱方面比较一致,对温度的解释存在较大争议。虽然前人解译石笋氧同位素都是基于现有的仪器观测记录,但基于暖季多降水,冷季少降水的气候模式的认知,有学者指出石笋氧同位素与温度反相关;而另有学者则是通过观测数据——降雨量高时对应年平均气温低,降雨量低时年平均气温较高的事实,认为石笋氧同位素与温度是正相关关系。为什么会两种截然不同的认识?其原因可能是多种的:首先是区域气候环境的差异,季风区内不同区域降水

是不均衡的;其次是雨带推进时间的差异;石笋保存的环境信息差异等,特别是分辨率达到年际后,这种区域因素影响更为突出,使解译变得更加复杂。

2 2 000年气候变化高分辨率石笋记录研究的主要成果与存在问题

对于2 000年来的气候变化,连续的长时间尺度的石笋记录多有涉及,但由于测年精度,分辨率、沉积间断等问题,对近2 000年的气候变化多是粗略的描述。

2001年,蔡演军^[42]用TIMS-U系测年和氧同位素重建了贵州地区7.7 ka B. P.以来的季风气候变化,发现3.8~0.15ka B. P.石笋氧同位素总体为高 $\delta^{18}\text{O}$ 值,夏季风较弱,季风降水总体相对偏少,东亚季风降水贡献相对增加,但波动频繁,变化较大。2001年,林玉石^[43]用沉积学方法和碳氧同位素重建了云南宁蒗泸沽湖地区全新世以来的气候环境演变过程,发现4 184a B. P.至今,泸沽湖地区气候温暖湿润伴随有冷干事件,近期趋向荒漠化,而且局部极为严重。2002年,马志邦^[44]用Mg/Sr恢复了京东地区距今3ka来的温度变化。发现中世纪暖期为热干气候,小冰期变冷。2003年,张美良^[45]用TIMS-U系测年和碳氧同位素分析建立了中全新世6.00ka B. P.以来桂林地区高分辨率的古气候变化时间序列,发现2.14~1.31ka B. P.为相对波动的冷暖期;1.31~0.73ka B. P.为相对冷湿期;0.73~0.61ka B. P.为相对温暖期;0.61~0.37ka B. P.为相对寒冷期。2004年,Yuan Daoxian^[28]通过对贵州董哥洞D4石笋进行Th-230测年和氧同位素分析,恢复了过去16 000年来低纬度地区的季风演化历史,但由于存在沉积间断,对近2 000年来的气候变化研究不够深入。2005年,Wang Yongjin^[26]用贵州董哥洞DA石笋恢复了过去9 000年亚洲季风的历史,发现全新世以来石笋氧同位素有变重的趋势,很好地对应了夏季太阳辐射的变化。2008年,Hu Chaoyong^[46]利用湖北清江和尚洞HS-4石笋,对全新世亚洲季风降水进行了定量计算,发现在中世纪暖期(1 000~1 250a A. D.)降水偏多,小冰期(1 250~1 750a A. D.)降水偏少(图1)。2008年,Cosford^[47]对湖南莲花洞A1石笋用Th-230和氧同位素分析,结合多光谱分析技术和小波分析评价了全新世的亚洲季风的特点和周期性特征。

2.1 主要成果

随着人们对近2 000年来气候变化的重视,以及测年技术、采样技术的提高,石笋记录对中国近2 000

年来的气候变化研究取得了一系列成果。

2.1.1 中世纪暖期、小冰期、现代暖期气候事件在石笋中的发现和对亚洲季风演变的高精度重建

1998年,李红春^[40]在对北京石花洞S312石笋的氧同位素记录进行分析时,发现京津地区在公元1620—1900年的气温低于500a来的平均气温, $\delta^{18}\text{O}$ 低于500a来的平均值,恰好对应于小冰期事件,这是中国石笋首次精确记录到小冰期事件。而且作者发现1 880年以来, $\delta^{18}\text{O}$ 逐渐变重,认为是对气温升高的响应(图2)。2000年,李红春^[48]发现陕西佛爷洞SF石笋在公元1250—1510年石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 普遍重于平均值,显示当时的气温较高,对应于欧洲的中世纪暖期;而且通过结合 $\delta^{13}\text{C}$ 详细讨论了当地的气候演变过程:公元1280年左右为湿润期,公元1300—1430年为干热期,公元1440—1510年为暖湿期。同时作者指出:公元1520—1820年对应于小冰期冷期;公元1820年以来气温升高。2003年,Paulsen^[19]也对佛爷洞SF石笋进行了深入分析,得到的结果相似。随后的学者们逐步发现中国各地石笋记录对中世纪暖期和小冰期的区域差异反映。2007年,杨勋林^[24]在对四川黄龙洞近50a来氧同位素变化趋势研究时发现:多个石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 都表现出变重的趋势,并得出东亚季风和西南季风在近半个世纪内存在同步减弱的趋势。2008年,覃嘉铭^[49]通过将龙泉洞L1、L2石笋氧同位素记录与格陵兰冰芯和中国中东部地区冬半年平均温度记录进行对比发现:中世纪暖期(995~1 340a A. D.)与小冰期(1 340~1 880a A. D.)石笋氧同位素记录差异并不显著, $\delta^{18}\text{O}$ 变化幅度不大,推断中世纪暖期和小冰期云贵高原的气候属于暖干、冷湿气候(参见图1)。这个与张美良^[50~52]及何尧启^[53](参见图1)研究结果类似。2008年,Zhang Pingzhong^[18]在《science》上发表万象洞WX42B石笋记录,详细阐述了季风演变与中国历史演变、朝代更迭的关系。他指出在过去的20世纪,人类的力量超过了自然的力量导致了全球变暖。2008年,Tan Liangcheng^[20]通过对汉中地区大鱼洞石笋研究,发现小冰期汉中地区氧同位素相对于万象洞呈现出反相位,氧同位素值相对偏轻(图2),对应于多雨潮湿气候,并在《中国近五百年旱涝分布图集》中找到相关记录:“在公元1500—1850年间汉中地区发生了多次洪水和整整30年里都发生的持续性强降雨,86年的时间是相当潮湿的,而只有11年是干旱,48年是中度干旱,其余176年的气候正常”。2009年,张美良^[52]指出“中世纪温暖期和小冰期在中国表现为不稳定的气候特征,在温暖期中存在有冷事件,在小冰期中也存在有温暖事件。”

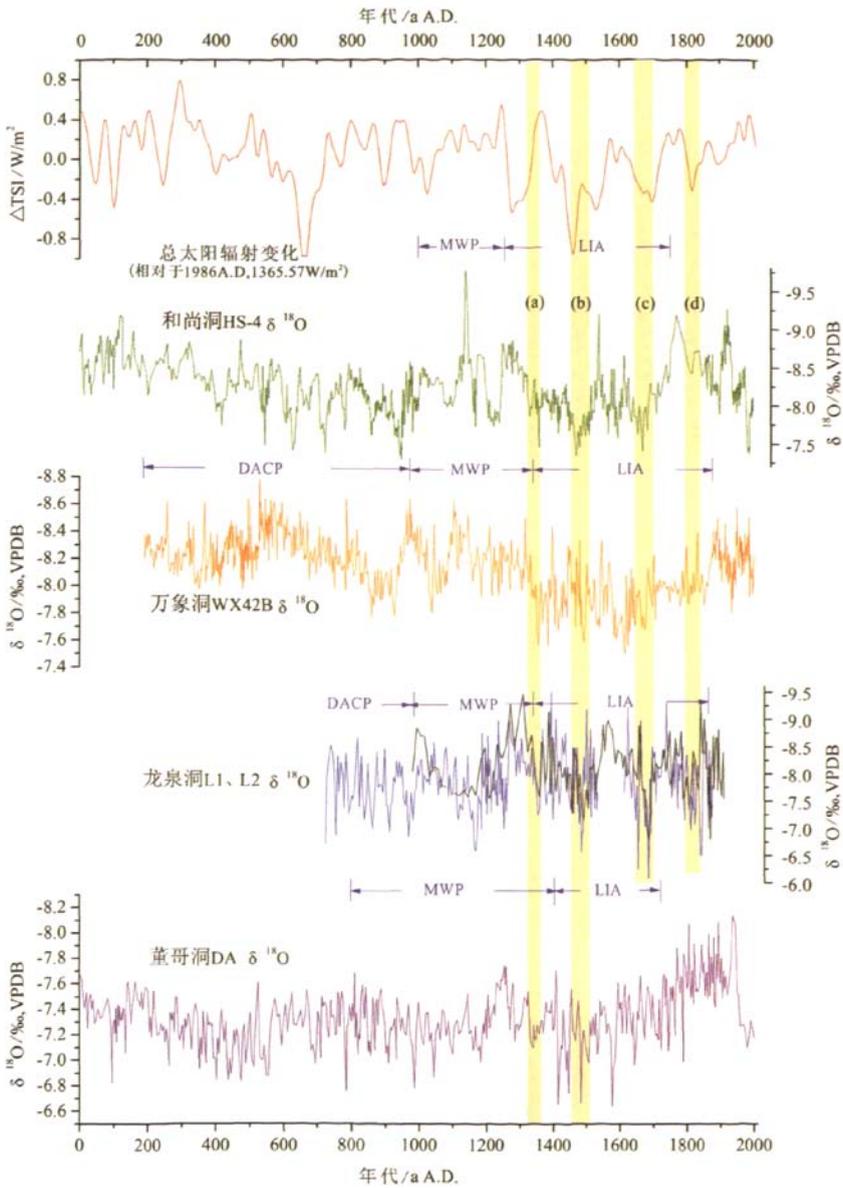


图1 近2000年来和尚洞、万象洞、龙泉洞、董哥洞石笋氧同位素曲线与总太阳辐射曲线^[54]及对应关系

(数据来源: <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/speleothem.html>)

(a. 沃尔夫极小值, b. 斯波瑞尔极小值, c. 蒙德极小值, d. 达尔顿极小值)

Fig.1 Stable oxygen isotope curves of the Heshang cave (green line), the Wanxiang cave (orange line), the Longquan cave (blue and black line), and the Dongge cave (purple line) and total solar radiation curve (red line) in the last 2 000 years and their relationship (Data source: <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/speleothem.html>) (a. Wolf minimum, b. Spörer minimum, c. Maunder minimum, d. Dalton minimum)

近2000年来气候事件在石笋记录中的发现,丰富了我国对气候事件的研究,但是由于各学者对石笋古环境代用指标的理解不同,对同位素变化的解释存在差异,特别是由于各地区自然环境的差异,导致洞穴环境也存在差异,从而造成不同地区的石笋记录存

在一定的差异,也存在不同的解释。但在承认各地区石笋记录在对气候事件的反应存在区域差异性的同时,也不排除因测年误差、同位素测试误差而带来的噪音影响。

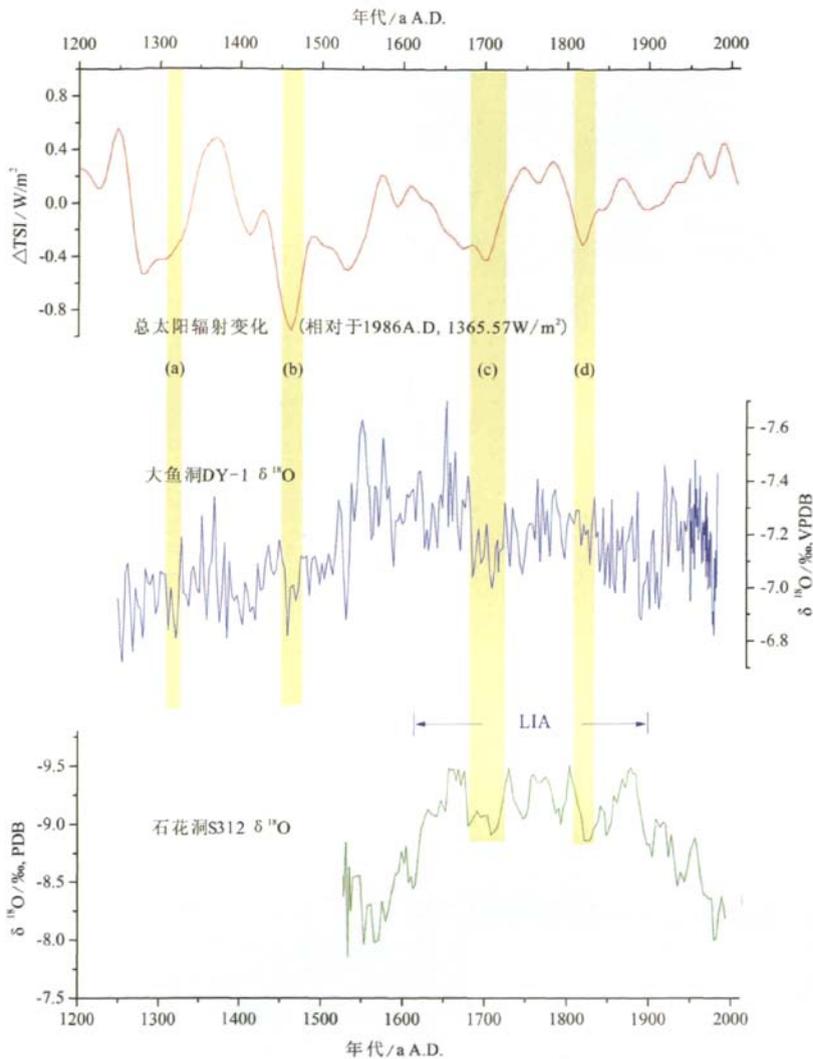


图2 近2000年来大鱼洞、石花洞氧同位素曲线与总太阳辐射曲线及对应关系

(a. 沃尔夫极小值, b. 斯波瑞尔极小值, c. 蒙德极小值, d. 达尔顿极小值)

Fig. 2 Stable oxygen isotope curves of the Dayu cave (blue line) and the Shihua cave (green line) in the last 2000 years and total solar radiation curve (red line) and their relationship (a. Wolf minimum, b. Spörer minimum, c. Maunder minimum, d. Dalton minimum)

同时通过区域差异性的研究对比,可以发现在中国季风区中世纪暖期总体表现为暖干的气候模式、小冰期总体表现为冷湿的气候模式,与现在的雨热同期(即暖湿的气候模式)存在一定的差异,但在将今论古的指导思想上,现在对氧同位素的解译是基于现在的气候环境,若近2000年来出现暖干、暖湿、冷干、冷湿之外的气候模式,现在的同位素解释是否适合,仍有待研究。

2.1.2 石笋纹层的发现和重建中国热月温度的重建

1997年,刘东生^[55]首先在中国发现石笋纹层主

要是年层。认为石笋纹层厚度主要指示降水量的变化。1997年,李彬^[56]通过对桂林盘龙洞一石笋的发光特性的研究,发现温度高、降水量大条件下,石笋发光性增强;气候干冷条件下,石笋发光性减弱。1998年,谭明^[57]指出北方石笋纹层的形成源于季节性降水对有机质的“脉冲式淋滤”。2000年,秦小光^[58]通过对石花洞TS9501石笋的纹层灰度分析,指出石笋灰度主要受到地表气温(尤其是夏季气温)的影响,并作为气温的替代性指标,北京地区石笋的灰度同时还反映了印度季风的变化。2001年,侯居峙^[59]在分析本溪水洞

TW9801 石笋时,指出石笋存在亚年层、多年层,石笋纹层计数者存在一定的主观性,提出用多次统计的方法来计数年层。2003年,谭明^[60]用石笋纹层厚度重建

了北京地区过去2650年以来的热月气温变化,重建的热月气温曲线很好的对应了中世纪暖期、小冰期等气候事件(图3)。

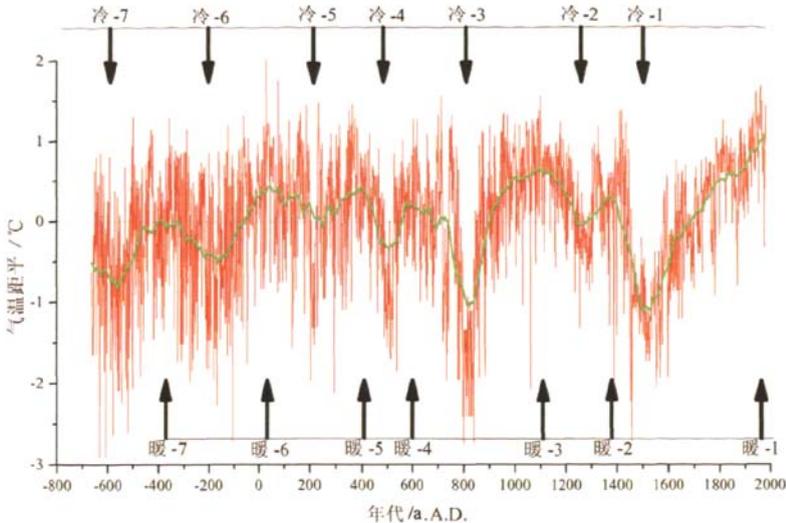


图3 北京地区过去2650年热月温度重建曲线

(引自 Tan Ming, 2003)

Fig. 3 Curve of the temperature in hot month in Beijing area during the last 2650 years (after Tan Ming)

石笋纹层的研究将石笋记录的分辨率精确到年,特别是石笋纹层厚度对年均温的重建,使得石笋记录成为定量记录温度变化的重要记录体,但由于找到有着清晰、连续纹层记录的石笋相对困难,而且长时间尺度的记录多存在沉积间断,对于长时间尺度的石笋记录此种方法尚难推广。

2.1.3 石笋记录的集成研究与气候驱动机制研究

2006年,谭明^[61]将北京2650年石笋温度记录与祁连山1000年的树轮温度记录进行集成研究,建立了年分辨率的跨区域的千年尺度的温度序列,并且发现气温变化与太阳活动关系密切。2009年,谭明^[41]通过各地石笋的同区与异区对比指出:中国季风区石笋在历史时期短时间尺度上具高度的一致性;石笋氧同位素的轻重变化取决于印度洋和太平洋海水温度变化,来自印度洋的水汽绝对含量始终较高,而弱季风年来自太平洋的水汽比例有所增加,即“环流效应”,同时也指出:由于各石笋记录来源差异,取样、实验分析的差异,可能导致数据的偏差。

石笋的集成研究,不仅使得石笋记录中氧同位素变化在大区域的一致性和内在机理更加明晰,而且区域差异性也更加明显。但由于各石笋记录分布区域气候、洞穴环境的差异,仍存在许多不确定性。

2005年,何尧启^[53]将董哥洞 DA 石笋氧同位素记录与太阳辐射序列进行比较,发现与太阳活动4个

极小期(沃尔夫极小值,斯波瑞尔极小值,蒙德极小值,达尔顿极小值)有着良好的对应关系,特别是近280年来太阳辐射的显著增强,石笋氧同位素也有很好的对应关系(参见图1),证明了百年尺度的西南季风降水变化响应于太阳活动。随后的研究也不断得出相似的结论^[49,61];能谱分析也发现石笋记录中有明显的太阳活动周期^[18~20];在石笋氧同位素的能谱分析中发现太阳活动周期,还发现存在厄尔尼诺—南方涛动周期(ENSO)^[20]。同时,张美良^[52]指出小冰期气候变冷时期也是火山活动和火山喷发的频繁时期,暗示着火山的集中喷发可能导致了区域性或全球的降温。

石笋记录气候驱动机制的研究,验证了现有的一些气候驱动理论,但气候变化存在很大的不确定性,驱动因素或许更加复杂。

2.2 存在问题

2.2.1 近2000年来年际分辨率的石笋记录氧同位素对古环境响应机理仍不甚清楚

现在对氧同位素的研究仍主要是通过与当地器测的气候资料(主要是气温和降水量)、降水中的氧同位素进行相关性研究,找出石笋中氧同位素与降水量/气温的相关性,得出氧同位素主要代表哪种环境信息,进而恢复过去的的环境演化情况。但是由于石笋所处洞穴环境的差异(洞穴上覆土壤厚度、植被;基岩性

质、厚度;水迁移路径等存在差异),洞穴所在地区的降水氧同位素又受到海陆位置、地形地貌、风暴路径等因素的影响,所以氧同位素的影响因素是相当复杂的。特别是达到年际分辨率后,对于近2 000年的气候变化,现在的气候组合模式不一定与过去的气候组合模式一样,这就要求对典型地区石笋中古环境代用指标的变化进行更长时间、更加全面的监测和研究。

2.2.2 近2 000年来的石笋年代学研究仍需要加强

年代学研究是古气候记录研究的基础,也是关键。年代学做不好,对代用指标的研究就根本没有意义。特别是在气候事件对比过程中,不同石笋古环境代用指标,石笋记录与冰芯、深海记录、树轮记录、湖泊沉积记录、珊瑚记录、黄土记录、历史文献记录等进行对比的过程中,石笋记录与太阳辐射记录、太阳活动记录、火山活动记录等进行对比过程中,如果年代学做不好,就可能造成对记录的错误解释,影响记录的价值。现行U-Th测年技术已经相当成熟,特别是对50万年以来的石笋,测年精度很高,但对于2 000年以来特别是几百年以来的,U含量相对低的石笋测年,现在仍很难达到很高的精度。石笋年代学采样过程中,由于石笋年龄测试样品量相对年际分析来说,仍然还比较大。采样过程中利用钻机取样(虽国外采用了离子微探针技术,空间分辨率能达到25 μm ,但分析精度相对较差),沿纹层刻样,难免存在跃层现象;由于测年样品数量的关系,利用沉积速率进行计算也难免存在误差。只有改进测年技术、提高采样技术,才能使石笋记录达到更加高的分辨率。

2.2.3 区域代表性石笋记录成果相对较少

近2 000年来气候变化石笋记录虽已经有不少成果发表,但多集中在西南地区、秦岭地区、京津地区、青藏高原东部边缘区,受台风影响严重的东南地区、非季风区的新疆地区现在仍没有记录发表,受季风影响严重、但位置偏北的东北地区也只有本溪水洞有成果发表,这对我们研究整个东部季风区季风演变、季风演变的区域差异造成很大的障碍,既面不全也无季风区与非季风区的对比。

3 结论和今后研究方向

中国近2 000年来气候变化石笋记录研究取得了很大的进展,石笋中存在的气候事件:中世纪暖期暖事件、小冰期冷事件,以及20世纪以来的气候变暖的发现,为中国近2 000年来气候变化研究作了重要补充,特别是对近2 000年来气候变化季风演变、热月温度变化的精确重建,为季风演变研究、气候变暖研究,以及相关研究(如碳循环),提供了理论支撑和技

术支持。通过石笋记录的集成研究,发现中国石笋记录氧同位素的轻重变化主要是由于印度洋海水和西太平洋海水温度变化导致的水汽源的不同引起。但仍存在年代学测试精度不高、古环境代用指标古环境机理不清、区域性代表性石笋记录相对较少的问题。对此作者提出今后研究的方向主要有:

3.1 加强近2 000年来年际分辨率的石笋氧同位素对古环境响应机理研究以及其他代用指标的综合研究

石笋氧同位素直接来源于大气降水,是重要的气候变化代用指标。其变化过程,即大气降水 \rightarrow 土壤水 \rightarrow 基岩裂隙水 \rightarrow 洞穴滴水 \rightarrow 现代次生沉积物 \rightarrow 石笋的整个变化过程,需要我们进行更长时间、更加全面的监测和研究,特别是与之相关的洞穴环境、区域环境条件的调查,以及其他古环境代用指标,如碳同位素、微量元素等对古环境响应机理综合研究仍需加强。

3.2 加强近2 000年来石笋年代学研究

铀-钍法仍是目前石笋年代研究最可靠的方法,但近2 000年来的石笋由于铀含量低,很难准确测定,这就要求寻找一种铀含量相对较高的石笋进行年代学研究。由于近2 000年来的气候变化重建要求分辨率达到年际,若仍只是象征性的测几个年龄,再用平均沉积速率去计算采样点的年龄,将可能造成较大的年龄误差,所以应加大年龄样品测试的密度,减小对年龄计算的误差,尽量按纹层采样,减少跃层的发生,提高测年精度。

3.3 加强区域性代表性石笋记录的研究

近2 000年来的气候变化虽表现出对全球变化响应的一致性,但更多地受到区域因素的影响,如风暴路径的影响。然而遗憾的是受台风影响强烈的东南地区近2 000年来的气候变化记录至今仍未见有发表。若我们能在该区开展相关工作,将对研究台风对石笋记录的影响、台风对气候变化的影响提供很大的支持;东北地区是既受到季风影响而位置又相对偏北的地区,但现在对之研究相对较少,若开展东北地区石笋记录研究,并配合其他地区的石笋记录进行综合分析,对认识季风演变、季风降水的区域差异将有很大的帮助。非季风区的新疆地区由于没有受到季风的影响,若对其进行研究将可以与季风区进行对比,以更好地认识石笋代用指标古环境机理、季风演变规律。所以,加强区域代表性石笋记录研究意义重大。

致谢:感谢袁道先院士、宋爱玲女士、王华老师对作者学习和工作的支持,感谢张美良老师对本文写作提出的一些启发性建议,感谢王翱宇对本文的修改提出的建议。

参考文献

- [1] Frank McDermott, David P. Matthey, Chris Hawkesworth. Centennial-Scale Holocene Climate Variability Revealed by a High-Resolution Speleothem $\delta^{18}\text{O}$ Record from SW Ireland. *SCIENCE*, 2001, 294: 1328—1331.
- [2] Yancheva G, Nowaczyk N R, Mingram J, et al. Influence of the intertropical convergence zone on the East-Asian monsoon[J]. *Nature*, 2007, 445: 74—77.
- [3] Dansgaard W, Johnsen S, Moeller J, et al. One thousand centuries of climate record from Camp Century on the Greenland ice sheet[J]. *Science*, 1969, 166: 377—381.
- [4] 姚檀栋, 秦大河, 田立德, 等. 青藏高原2ka来温度与降水变化——古里雅冰芯记录[J]. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(4): 348—353.
- [5] 施雅风, 姚檀栋, 杨保. 近2000a古里雅冰芯10a尺度的气候变化及其与中国东部文献记录比较[J]. *中国科学(D辑)*, 1999, 29(增刊1): 79—86.
- [6] 唐自华, 穆桂金, 陈冬梅, 等. 昆仑山北坡近5000年以来黄土堆积的环境信息[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(4): 598—606.
- [7] 王鑫, 王东晓, 高荣珍, 等. 南海珊瑚灰度记录中反映人类引起的气候变化信息[J]. *科学通报*, 2010, 55(1): 45—51.
- [8] 沈吉, 杨丽原, 羊向东, 等. 全新世以来云南洱海流域气候变化与人类活动的湖泊沉积记录[J]. *中国科学(D辑)*, 2004, 34(2): 130—138.
- [9] 张恩楼, 沈吉, 王苏民, 等. 青海湖近900年来气候环境演变的湖泊沉积记录[J]. *湖泊科学*, 2002, 14(1): 32—38.
- [10] 陈发虎, 黄小忠, 张家武, 等. 新疆博斯腾湖记录的亚洲内陆干旱区小冰期湿润气候研究[J]. *中国科学(D辑)*, 2007, 37(1): 77—85.
- [11] 康兴成, 张其花. 青海都兰过去2000年来的气候重建及其变迁[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(2): 215—221.
- [12] 刘晓宏, 秦大河, 邵雪梅, 等. 祁连山中部过去近千年温度变化的树轮记录[J]. *中国科学(D辑)*, 2004, 34(1): 89—95.
- [13] 洪冰, 刘从强, 林庆华, 等. 哈尼泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的过去14000年温度演变[J]. *中国科学(D辑)*, 2009, 39(5): 626—637.
- [14] 何报寅, 张德, 蔡述明. 近2600年神农架大九湖泥炭的气候变化记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(2): 109—115.
- [15] 崔美玲, 罗运利, 孙湘君, 吉林哈尼湖钻孔5000年以来的古植被气候变化指示[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(5): 117—122.
- [16] 竺可桢. 中国近五千年来的气候变迁的初步研究[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 475—498.
- [17] 葛全胜, 郑景云, 方修琦, 等. 过去2000a中国东部冬半年温度变化[J]. *第四纪研究*, 2002, 22(2): 166—173.
- [18] Zhang Pingzhong, Cheng Hai, Edwards R L, et al. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record[J]. *science*, 2008, 322: 940—942.
- [19] Dorte Eide Paulsen, Hong-Chun Li, Teh-Lung Ku. Climate variability in central China over the last 1270 years revealed by high-resolution stalagmite records[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22: 691—701.
- [20] Tan Liangcheng, Cai Yanjun, Cheng Hai, et al. Summer monsoon precipitation variations in central China over the past 750 years derived from a high-resolution absolute-dated stalagmite[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, 280: 432—439.
- [21] 张德二. 我国“中世纪暖期气候的初步推断[J]. *第四纪研究*, 1993, (1): 7—15.
- [22] 王绍武. 小冰期气候的研究[J]. *第四纪研究*, 1995, (3): 202—212.
- [23] 刘禹, Won-Kyu-Park, 蔡秋芳, 等. 公元1840年以来东亚夏季风降水变化——以中国和韩国的树轮记录为例[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(6): 543—549.
- [24] 杨勋林, 张平中, 陈发虎. 近50a来青藏高原东部高海拔洞穴现代石笋氧同位素组成及其含义[J]. *科学通报*, 2007, 52(6): 698—706.
- [25] Wang Y. J., Cheng H., R. L. Edwards et al. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu cave, China[J]. *science*, 2001, (294): 2345—2348.
- [26] Wang Yongjin, Cheng Hai, R. L. Edwards, et al. The Holocene Asian Monsoon; Links to Solar Changes and North Atlantic Climate[J]. *science*, 2005, (308): 854—857.
- [27] Wang Y. J., Cheng H., 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.
- [28] Yuan Daoxian, Cheng H., R. L. Edwards, et al. Timing, Duration, and Transitions of the Last Interglacial Asian Monsoon[J]. *science*, 2004, (304): 575—578.
- [29] Moore G. W. Speleothem—A new cave term[J]. *National Speleological Society News*, 1952, 10(6): 2.
- [30] O'Neil J R, Clayton R N, Mayeda T K. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1969, 51: 5547—5558.
- [31] Hendy C H. The isotopic geochemistry of speleothems— Pt. I. The calculation of the effects of different model of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as paleoclimate indicators[J]. *Geochim et Cosmochim Acta*, 1971, 35: 801—824.
- [32] Edwards R L, Chen J H, Wasserburg G J. ^{236}U - ^{234}U - ^{230}Th - ^{232}Th systematics and the precise measurement of time over the past 500,000 years. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 81: 175—192.
- [33] W. X. Li, J. Lundberg, A. P. Dickin et al. High-precision mass-spectrometric uranium-series dating of cave deposits and implications for palaeoclimate studies[J]. *Nature*, 1989, 339: 534—536.
- [34] Isaac J. Winograd, Tyler B. Coplen, Barney J. Szabo, et al. A 250,000-year climatic record from Great Basin vein calcite; Implications for Milankovitch theory. *Science*, 1988, 242(4883): 1275—1280.
- [35] Dominik Fleitmann, Stephen J. Burns, Manfred Mudelsee, et al. Holocene Forcing of the Indian Monsoon Recorded in a Stalagmite from Southern Oman[J]. *science*, 2003, 300(5626): 1737—1739.
- [36] Hai Cheng, R. Lawrence Edwards, Wallace S. Broecker, et al. Ice age terminations[J]. *science*, 2009, 326(5950): 248—252.
- [37] 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, (7): 528—531.
- [38] 覃嘉铭, 等. 大气降水氢氧同位素与主要气候因素的相关性研究——以桂林雁山气象站多年监测数据为例. 壳幔演化与成岩成矿同位素地球化学, 地震出版社, 1993: 216—217.
- [39] 覃嘉铭, 袁道先, 林玉石, 等. 桂林44ka B.P. 石笋同位素记录及其环境解释[J]. *地球学报*, 2000, 21(4): 407—416.
- [40] 李红春, 顾德隆, Lowell D. Stot, 等. 高分辨率洞穴石笋稳定同

- 位素应用之一——京津地区500 a 来的气候变化—— $\delta^{18}\text{O}$ 记录[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(2): 181-186.
- [41] 谭明. 环流效应: 中国季风区石笋氧同位素短尺度变化的气候意义——古气候记录与现代气候研究的一次对话[J]. 第四纪研究, 2009, 29(5): 851-862.
- [42] 蔡演军, 彭子成, 安芷生, 等. 贵州七星洞全新世石笋的氧同位素记录及其指示的季风气候变化[J]. 科学通报, 46(16): 1398-1402.
- [43] 林玉石, 张美良, 覃嘉铭. 云南宁蒞泸沽湖地区的古环境重建[J]. 中国岩溶, 2001, 20(3): 174-182.
- [44] 马志邦, 李红春, 夏明, 等. 距今3ka 来京东地区的古气温变化: 石笋 Mg/Sr 记录[J]. 科学通报, 2002, 47(23): 1829-1834.
- [45] 张美良, 袁道先, 林玉石, 等. 桂林响水洞 6.00 ka B P 以来石笋高分辨率的气候记录[J]. 地球学报, 2003, 24(5): 439-444.
- [46] Hu Chaoyong, Gideon M. Henderson, Huang Junhua, et al. Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, (266): 221-232.
- [47] Jason Cosford, Qing Hairuo, Bruce Eglington, et al. East Asian monsoon variability since the Mid-Holocene recorded in a high-resolution, absolute-dated aragonite speleothem from eastern China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 275: 296-307.
- [48] 李红春, 顾德隆, Dorte Paulsen, 等. 陕南石笋稳定同位素记录中的古气候和古季风信息[J]. 地震地质, 2000, 22(增刊): 63-78.
- [49] 覃嘉铭, 袁道先, 林玉石, 等. 公元8世纪以来贵州荔波石笋高分辨率的气候变化记录[J]. 中国岩溶, 2008, 27(3): 266-272.
- [50] 张美良, 程海, 林玉石, 等. 贵州荔波 1.5 万年以来石笋高分辨率古气候环境记录[J]. 地球化学, 2004, 33(1): 65-74.
- [51] 张美良, 程海, 林玉石, 等. 贵州荔波地区 2 000 年来石笋高分辨率的气候记录[J]. 沉积学报, 2006, 24(3): 339-348.
- [52] 张美良, 朱晓燕, 程海, 等. 贵州荔波 1 200 年来石笋高分辨率的古气候环境记录[J]. 地球学报, 2009, 30(6): 831-840.
- [53] 何尧启, 汪水进, 孔兴功, 等. 贵州董哥洞近 1 000a 来高分辨率洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录[J]. 科学通报, 2005, 50(11): 1114-1118.
- [54] F. Steinhilber, J. Beer, C. Fröhlich. Total solar irradiance during the Holocene [J]. Geophysical research letters. 2009, 36, L19704: 1-5.
- [55] 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.
- [56] 李彬, 袁道先, 林玉石, 等. 桂林盘龙洞石笋发光性特征及其古环境记录的初步研究[J]. 地球学报, 1997, 18(4): 400-406.
- [57] 谭明, 刘东生, 秦小光, 等. 北京石花洞全新世石笋微生长层与稳定同位素气候意义初步研究[J]. 中国岩溶, 1997, 16(1): 1-10.
- [58] 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. 灰度的年际变化[J]. 中国科学(D辑), 2000, 30(3): 239-248.
- [59] 侯居峙, 谭明, 程海, 等. 本溪水洞石笋微层年代学初步研究[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(5): 387-392.
- [60] Tan Ming, Liu Tungsheng. Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2 650-year stalagmite record of warm season temperature [J]. Geophysical research letters, 2003, 30(12): 191-194.
- [61] 谭明, 邵雪梅, 刘晓宏, 等. 中国近千年石笋-树轮集成温度记录[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(3): 113-116.

Research progress on the recent 2 000 years' climate change revealed by stalagmite record in China

YIN Jian-jun^{1,2}, QIN Jia-ming², LIN Yu-shi², YANG Yan¹, TANG wei^{1,2}
 (1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir (Ministry of Education), School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Institute of Karst Geology, CAGS, Karst Dynamics Laboratory, MLR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: The UN climate conference held in Copenhagen has directed more attention to the study on the recent 2 000 years' climate change. The main achievements on study of climate change revealed by stalagmite record, especially the climate change in the recent 2 000 years in china, is summarized in the paper as follows, a series of climate events in the recent 2 000 years are recorded by the stalagmite in China monsoon area; high resolution reconstruction is made; the temperature in hot month is reconstructed with annual resolution; and "circulation effect" is discovered by integrate research, etc. But there are also many problems need to be resolved, such as oxygen isotope mechanism, chronology, regional and typical stalagmite research as well. So it is proposed that the oxygen isotope mechanism research with resolution in annual scale, especially the whole migration and changes process of oxygen isotope from precipitation to stalagmite, should be enhanced; and the integrated study of stalagmite record's respond mechanism to climate change by comparing with other proxy record should be done, and research on the recent 2 000 years' chronology and on the regional and typical stalagmite should be enhanced.

Key words: stalagmite record; carbon and oxygen isotopes; climate change; research progress