中国石笋古气候研究的回顾与展望

程海*, 张海伟, 赵景耀, 李瀚瑛, 宁有丰, Gayatri KATHAYAT

西安交通大学全球环境变化研究院, 西安 710054

* E-mail: cheng021@xjtu.edu.cn

收稿日期: 2019-05-28; 收修改稿日期: 2019-07-03; 接受日期: 2019-08-21; 网络版发表日期: 2019-09-20

国家自然科学基金项目(批准号: 41888101、41731174)资助

摘要 石笋是洞穴次生碳酸盐的一种, 是由含 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的洞穴滴水滴到洞穴地面后, 水中碳酸钙在一定条件下过饱和析出, 经年复一年沉积形成. 石笋是古气候研究的重要地质材料之一, 其优势在于空间分布广、适合U-Th和U-Pb精确定年、气候代用指标丰富、记录较连续、时间跨度较大、相互对比性强和采样成本低等. 以上有利因素使得洞穴石笋在全球气候变化研究领域有着不可替代的重要作用. 石笋古气候研究于20世纪60~70年代在欧美等西方国家起步, 中国的相关研究是在改革开放后80~90年代中期逐步发展起来的. 这一时期虽然总体研究水平与国际水平有较大差距, 但打下了良好的研究基础、培养了多个人才队伍. 进入21世纪, 以2001年发表南京葫芦洞石笋记录为起点, 中国石笋古气候研究在开放合作的基础上, 迎来了蓬勃发展和真正意义上的飞跃, 产生了重大国际影响, 在多个相关技术和研究领域迈向了国际前沿. 标志性成果包括建立了目前世界最长的东亚季风(64万年)石笋记录, 以及印度季风(28万年)、南美季风(25万年)、北美西风区(33万年)、中亚西风带(13.5万年)和中国西部西风带(50万年)最长的石笋记录, 奠定了这些气候系统石笋古气候研究的里程碑; 揭示了轨道-亚轨道尺度上亚洲季风与太阳辐射、南-北极地气候变化的关联, 以及与南美季风的反相位关系, 为发展轨道-亚轨道气候变化理论提供了新的内涵和证据; 阐述了亚洲季风与西风带气候模态之间的耦合和分异关系; 精细刻画了全新世亚洲季风变化历史、提供了中国和印度文明-文化演化的水文气候变化背景; 建立了大量的2000年以来的高分辨率石笋记录, 对理解短尺度气候变率、幅度、事件、周期及预测未来气候变化具有重要意义; 改进或发展了包括U-Th测年技术在内的多项重要技术和新的水文气候学指标; 为精准重建大气 ^{14}C 做出了重要贡献. 展望未来, 中国石笋界将继续发展关键技术、进一步厘清石笋指标的水文气候学意义、注重与相关学科的融合交叉、聚焦全球气候变化的前沿科学问题和重大社会需求, 做出新的更大的科学贡献.

关键词 洞穴石笋, 氧同位素, 亚洲季风, 西风带, 全球气候变化

1 引言

从1950年开启人类世(Anthropocene, Waters等, 2016)以来, 全球气候变化问题(包括大气中 CO_2 含量增

多、全球平均温度升高、海平面上升、气候灾害幅度和频率上升等)逐渐从一个科学界关注的问题, 发展成为公众普遍关心和有一定危机感的热门话题. 如今, 人们比以往任何时候都更为迫切地希望通过科学研究来

中文引用格式: 程海, 张海伟, 赵景耀, 李瀚瑛, 宁有丰, Kathayat G. 2019. 中国石笋古气候研究的回顾与展望. 中国科学: 地球科学, 49: 1565–1589, doi: 10.1360/SSTe-2019-0111

英文引用格式: Cheng H, Zhang H, Zhao J, Li H, Ning Y, Kathayat G. 2019. Chinese stalagmite paleoclimate researches: A review and perspective. Science China Earth Sciences, 62: 1489–1513, <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9478-3>

理解过去全球气候是如何变化、未来趋势又是怎样?从科学角度来讲,要深入理解全球气候变化,一个不可或缺的重要方面,就是获得过去气候变化的事实和规律,包括获得从季节-年到千年-万年、甚至更长时间尺度的气候变化记录,并通过研究这些记录来进一步揭示其相关的动力学机制,并为气候模拟提供制约条件。但是,器测资料和历史记载大多只有几百或上千年的时间跨度,要获取更长时间的古气候变化的信息则有赖于地质、生物等记录。为此,人们对冰芯、黄土、海洋和湖泊沉积物、珊瑚、树轮、石笋等地质、生物载体所蕴含的古气候信息,展开了越来越广泛和深入的科学研究,在此基础上逐步建立了全球不同气候系统下多时间尺度的古气候记录及其与全球气候变化的关系,对全面深入地理解全球气候变化历史及其未来发展趋势具有重要作用。

洞穴次生碳酸盐(speleothem, Moore, 1952)包括石笋(stalagmite)、石钟乳(stalactite)、流石(flowstone)等自然碳酸钙沉积物,其形成是大气降水、洞穴上覆植被和土壤、岩溶渗流水等多种表生系统过程共同作用的产物,与大气水循环、地表生物地球化学过程、岩溶水文过程和碳酸盐矿物生长机制等密切相关。石笋是由来自洞顶含 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的洞穴滴水在滴到洞穴地面后,由于洞穴 CO_2 分压减小导致 CO_2 逸出或水份蒸发,滴水中碳酸钙过饱和析出,而在滴水点的地面上缓慢沉积形成,其形状很像竹笋,所以在中国被形象地称之为石笋。那么石笋在全球古气候研究中有何特点和优势呢?(1) 石笋分布广泛。全球陆地岩溶面积约为15%,中国约为30%(出露面积约10%)。而在岩溶发育的地方基本都有洞穴石笋沉积。(2) 石笋主要由碳酸钙(方解石或文石)组成,适合U-Th和U-Pb绝对定年,可获得高精度的绝对年龄时标。(3) 石笋记录连续性好、时间跨度较大、保存较好。石笋从现代到晚古生代都有发现。单个石笋本身就可连续跨越很长时段,而多个石笋的拼接可获得数十万年长的比较连续的记录。石笋一般处于相对封闭的溶洞体系中,形成后受次生变化影响较小。(4) 水文气候学代用指标丰富。例如,碳、氧同位素($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$)、微量元素、生长速率、磁性性质、生物指标、微层厚度、微层荧光强度、灰度、沉积学特征等。(5) 对比性强。同时代石笋记录之间的对比,可以检验石笋记录的可靠性。同一气候系统下不同地区乃至全球范围内的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录可进行相

互对比,并能够与其他地质记录和模拟结果进行精确对比,在研究全球气候变化方面有着十分重要的意义。(6) 采样成本相对较低。中国是岩溶大国,岩溶洞穴遍布,虽然中国石笋研究开展较晚,但上述有利的因素和特点使其在全球气候变化领域取得了与其他地质记录同样重要的成果。以下就中国石笋古气候研究发展的总体脉络,从改革开放后的逐步发展,到21世纪以来的突出成就进行梳理,并对未来发展提出展望。

2 新中国成立以来发展的总体概况

2.1 20世纪60~70年代: 欧美洞穴石笋古气候科学研究起步

真正科学意义上的洞穴石笋及其古气候研究始于20世纪60年代初。1960年,Wallace S. Broecker利用早期的 ^{14}C 方法对美国加利福尼亚州的两个洞穴次生碳酸盐(流石)样品进行了年代测定,确定了其中的纹层为年层,由季节性沉积环境变化形成(Broecker等, 1960)。随后,在洞穴碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化、控制因素及其作为古温度计的可能性方面开始了初期探索(如Galimov和Grinenko, 1965; Labeyrie等, 1967; Fornaca-Rinaldi等, 1968; Hendy和Wilson, 1968)。以 α -计数为基础的早期U-Th测年方法在洞穴碳酸盐定年上的应用也始于20世纪60年代(如Rosholt和Antal, 1962; Cherdyntsev等, 1965; Fornaca-Rinaldi, 1968)。

进入20世纪70年代, Duplessy等(1970)、Thompson等(1976)、Harmon等(1977, 1978a, 1978b, 1979a, 1979b)先后利用石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 、流体包裹体重建了古温度变化,并和海表温度、海平面和北半球夏季太阳辐射的记录进行了对比。Fantidis和Ehhalt(1970)探讨了石笋碳、氧同位素的非平衡分馏的问题。Hendy(1971)提出判断洞穴石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 能否用于古气候研究(或是否在同位素平衡分馏条件下形成)的两个条件,即著名的“Hendy 准则”。虽然80年代之前所发表的论文数量有限,但取得了一些重要的基本认识,包括洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 一般反映当地大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化;洞穴石笋的生长通常处于碳酸盐-洞穴滴水同位素平衡分馏状态;石笋中的流体包裹体含有石笋形成时的滴水的氢、氧同位素组成;石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化可能不完全反映当地地表温度的变化(如Talma等, 1974; Thompson等, 1974, 1976;

Schwarcz等, 1976; Gascoyne, 1983).

2.2 20世纪80~90年代: 改革开放后中国洞穴石笋古气候研究的起步和探索

20世纪60~70年代的洞穴石笋研究主要在欧洲、北美和新西兰展开. 在中国, 对洞穴碳酸盐的研究虽可上溯到17世纪大旅行家、地理学家和喀斯特学家徐霞客的相关描述(徐宏祖, 1980), 然而现代科学研究则始于改革开放之后的20世纪80年代. 严正(1980)分析了贵州桐梓钟乳石的微量包裹体水和方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$, 并对其形成温度作了初步估算. 张英俊等(1985)和朱学稳(1988)进行了较全面的洞穴碳酸盐方面的研究. 赵树森、张寿越、汪训一等, 统计了数百个洞穴滴石类和流石类测年结果, 提出洞穴次生碳酸盐暖期发育、冷期缺失的看法, 并对桂林茅茅头大岩的两根石笋进行了定年和 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 分析, 论证了39万年以来的冷暖变化(张寿越等, 1985; 汪训一, 1985; 赵树森等, 1989). 陈跃等(1986)对北京周口店石笋样品 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的分析, 估算了距今8~5万年北京地区的古温度变化.

20世纪90年代, 在全球气候变化研究迅速发展和国际上洞穴石笋古气候研究许多重要成果的影响下, 中国石笋古气候研究也进入了一个新的发展阶段. 结合 ^{14}C 、U-Th等定年方法, 多位学者利用石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 重建了古温度变化(刘育燕和何锦发, 1990; 黄俊华, 1992; 朱洪山和张巽, 1992; 李彬, 1994; 黄仁海, 1994; Tan和Liu, 1995; 洪阿实等, 1995). 袁道先(1995)首次明确提出岩溶记录可以提供高分辨率的环境变化信息, 并对中国南方的岩溶记录(包括石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、微量元素、测年方法等)做出了许多科学论述, 揭示了桂林地区20多万年以来气候演变规律(袁道先, 1995; 覃嘉铭, 1996; 林玉石等, 1996; 李彬等, 1998; 袁道先等, 1999; 张美良等, 1999). 与此同时, 在刘东生先生的推动下, 中国科学院地质与地球物理研究所谭明等人广泛开展了石笋古气候研究(谭明和刘东生, 1996; 刘东生等, 1997; 谭明等, 1997, 1999; 秦小光等, 1998), 分析研究了中国北方一些全新世石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 变化和纹层特征. 李平等(1996)利用福建天鹅洞石笋研究了古温度变化. 王兆荣等(1996, 1998)、汪永进等(1997)和李红春等(1997, 1998)分别研究了浙江、南京和北京等地区的石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 及其古气候意义. 这一期间石笋古气候研究主要使用U-Th(α -谱仪)、 ^{14}C

加速器质谱和 ^{210}Pb 方法进行测年, 年代的不确定性较大.

整体上, 中国石笋古气候的科学研究始于20世纪80年代, 晚于欧美整整20年. 80~90年代主要处于资料积累和探索阶段, 与当时的世界前沿水平的差距明显. 这一期间虽然发表了较多石笋古气候方面的论文, 但缺少国际期刊论文, 国际关注度不高.

3 21世纪以来的突出研究成果

进入21世纪, 中国石笋古气候研究在经历了20年的积累后, 在开放合作的基础上, 迎来了蓬勃发展, 实现了真正意义上的质的飞跃: 从之前发表中文论文的阶段, 跨跃到不断在《Nature》《Science》和《Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America》(《PNAS》)等有重要国际影响的刊物上发表重要石笋古气候科学研究成果、并在该领域科学前沿产生重大影响. 近20年来发表的相关成果已有数百篇, 以下仅就部分重要研究成果给予简介.

3.1 过去两个冰期-间冰期亚洲季风演变及千年气候事件

21世纪初始, Wang等(2001)在《Science》上首次发表了我国南京葫芦洞末次冰期75~11ka BP时段有精确年代控制的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 这是中国学者首次在国际著名的科学期刊上发表石笋古气候研究论文. 该 $\delta^{18}\text{O}$ 序列记录的东亚夏季风强度变化与北半球夏季太阳辐射变化一致, 表明东亚夏季风变化受北半球夏季太阳辐射驱动; 历次千年尺度的东亚季风突变事件与格陵兰冰芯记录中的气候事件(如Dansgaard-Oeschger事件)一一对应, 证实了末次冰期千年尺度气候突变事件是全球性的气候事件. 该记录精确的 ^{230}Th 年代标尺在误差范围内支持格陵兰冰芯的年代, 精确标定了末次冰期6次Heinrich事件(H事件)、新仙女木事件(YD事件)和格陵兰冰阶-间冰阶的发生时间, 为全球气候突变事件对比研究提供了可靠的年代学基础. 该论文是中国乃至全球石笋古气候研究领域的最重要里程碑之一, 截至目前已被引用2600余次(Google scholar), 并于2018年被美国科学促进会评为“近十年《Science》期刊最具影响力的31篇论文之一”.

Yuan等(2004)在《Science》上发表了利用贵州董

哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录重建的末次间冰期(160ka BP)以来大部分时段的东亚夏季风变化。虽然贵州董哥洞和南京葫芦洞直线距离超过1000km, 两者的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在共同时段(如末次冰消期、YD事件)均能够很好地吻合, 验证了两个记录的可靠性, 并说明大尺度上东亚季风变化的时空一致性。董哥洞 $\delta^{18}\text{O}$ 记录揭示了东亚季风倒数第二个冰期-间冰期转变的突变特征和精确时间(129.3 $\pm$ 0.9)ka BP。通过对比过去两次冰期终止期(Termination I 和 II), 发现过去两次冰期终止期都以石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的百年尺度快速偏轻为特点, 变化幅度相当, 均发生于北半球夏季太阳辐射明显增加之后且达到峰值之前, 表明太阳辐射升高可能触发了冰期终止并导致间冰期季风最终达到全盛期。但两次冰消期的过程也存在一些区别, 特别是Termination I 发生了YD事件, 而Termination II 没有类YD事件发生。

Cheng等(2006)通过南京葫芦洞倒数第二个冰期石笋记录, 结合上个冰期的数据, 展示了过去两个冰期-间冰期旋回中的千年尺度气候突变事件, 根据该记录的精准年代标尺, 刻画了这两个冰期中千年尺度的东亚季风强-弱事件, 并将其定义为中国间冰阶-冰阶(Chinese Interstadials-Stadials), 作为全球气候突变事件的重要对比基准。首次明确提出亚洲季风-北大西洋-冰芯气候事件之间的关键对比关系: 弱亚洲季风对应于北大西洋冰漂屑事件; 亚洲季风的突变对应于冰芯记录中甲烷(CH_4)的突变。在此基础上, 阐述了第二个冰期结束过程中的主要气候事件关系。牛津大学Gideon M. Henderson以此为契机, 针对中国石笋古气候研究方面的成果, 在《Science》上撰文强调: “对于古气候学研究来说, 过去20年冰芯年龄是全球气候记录的对比基石, 未来20年石笋年龄可能是对比基石”(Henderson, 2006)。

2008年, Wang等在《Nature》上发表论文, 利用湖北神农架三宝洞高测年精度和高 $\delta^{18}\text{O}$ 分辨率的石笋记录, 深入研究了过去两个冰期-间冰期(224ka BP以来)东亚夏季风在轨道-千年尺度上的变化规律。结果表明东亚季风变化具有显著的23ka周期, 其相位与7月21日65°N太阳辐射变化同步, 这一结果支持“轨道尺度上季风气候直接且主要受控于北半球夏季太阳辐射变化”的观点(Kutzbach, 1981); 发现末次和倒数第二次冰期的千年尺度气候突变事件在持续时间、发生频率上的可比性, 表明冰期变化具有相似的内在控制因素。著

名古气候学家 Overpeck和Cole发表了同期评论文章“The rhythm of the rains”, 称该研究结果对理解亚洲季风具有不可估量的价值(Overpeck和Cole, 2008)。

过去十年中, 中国科学家对过去两个冰期-间冰期旋回中的千年事件的精细刻画及机制进行了深入研究, 在前沿科学问题上提出了新的理论认知, 发表了一系列重要论文。例如, Wang等(2001, 2008)、Cheng等(2006, 2016a)、Cai等(2006, 2015)、Li等(2007, 2014)、Liu D等(2008, 2013, 2018)、Zhou等(2008, 2011)、吴江滢等(2009)、Yang等(2010)、Zhao等(2010)、Ma等(2012)、Duan等(2014)、Duan等(2016a)、Jiang等(2016)、Kathayat等(2016)、Chen等(2016)、Han等(2016)、Zhang等(2017)、Wang Q等(2018)、崔梦月等(2018)、Du等(2019)、张海伟等(2019), 揭示了千年尺度的季风气候变化规律, 产生了十分广泛的国际影响。最近, Du等(2019)提出了新的基于气候动力学的亚洲季风强度和格陵兰温度对比方案, 以此替代过去简单的“中值点”对比方案, 这对全球气候事件精确对比具有重要意义。

3.2 石笋记录的过去64万年亚洲季风演变规律及其影响机制

2009年, Cheng等在《Science》上发表论文(Cheng等, 2009a), 通过对湖北神农架三宝洞和林竹洞石笋进行高精度 ^{230}Th 定年和高分辨率的稳定同位素分析, 将东亚季风石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录延伸至380ka BP。该记录与葫芦洞、董哥洞记录在重复时段相同, 验证了轨道-千年尺度上东亚季风变化的一致性。该研究再次表明东亚季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录具有显著的岁差周期, 明显不同于海洋和黄土记录的10万年为主的周期旋回。利用高精度、高分辨率的东亚石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录和先前建立的对标关系(Cheng等, 2006), 建立了过去4次冰期终止期主要事件的发生时间和次序; 通过与冰芯、海洋沉积记录进行对比分析, 深入研究了过去4次冰期终止期的发生过程; 揭示过去4次冰期终止均与北半球夏季太阳辐射上升的一致关系, 以及大量冰川融水和冰山进入北大西洋、海平面上升、全球冰量减少、海气循环及与之相关的热量和碳循环改变、大气 CO_2 和南极温度升高、大气 CO_2 和夏季太阳辐射上升驱动北高纬冰量撤退等现象的内在关联。

2016年, Cheng等在《Nature》上发表论文(Cheng

等, 2016a), 利用湖北神农架三宝洞石笋和改进的U-Th测年方法, 将东亚季风石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录拓展至640ka BP以来(图1), 到达了U-Th测年方法的年龄上限. 该研究建立了目前全球最长时间尺度的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 连续记录. 清晰刻画了过去7个“经典”冰期-间冰期的气候变化以及千年气候事件的内在联系和共性(图1); 以精确的绝对定年结果为基础, 直接验证了10万年的冰期循环实际上是4~5个岁差周期的平均(Raymo, 1997). 《Nature》同期专题评论(Meckler, 2016)认为: 如此长尺度高精度的亚洲季风石笋记录不但为其他古气候记录提供了高精度的绝对年代控制, 而且加强了对于气候系统相互作用、强迫因子及其响应机制的理解; 该研究还发现去除轨道信号的亚洲季风亚轨道变化仍具有显著的岁差和倾角周期, 即亚轨道(主要为千年尺度)的变化也受到地球轨道因素的控制. 这一新发现为研究亚轨道气候事件的发生机制以及冰期-间冰期旋回提供了新的重要线索.

20世纪40年代, 南斯拉夫数学家Milankovitch (1941)提出气候变化的轨道假说, 强调北半球高纬度冰盖对65°N夏季太阳辐射变化的响应和反馈是驱动全球气候变化的关键; 随后60~80年代海洋沉积的底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 揭示了全球冰量/温度变化的确以地球轨道周期: 偏心率、地轴倾角和岁差的10、4.1、2.3万年周期为主(Emiliani, 1955; Broecker和van Donk, 1970; Hays等, 1976), 从而确立了Milankovitch理论. 但这些研究也表明地球最近几十万年以来最为显著的变化是冰期-间冰期旋回, 其周期大致为10万年, 接近轨道偏心率周期. 但在另一方面, 轨道偏心率对太阳辐射变化的贡献远不及岁差和地轴倾角, 这样就产生了一个著名的悖论, 即经典的“10万年周期困惑”(100ka Problem)(Hays等, 1976). Cheng等(2016a)总结了幅度较小的千年事件与冰期终止事件的内在相似性: 其实质也就是所谓的“小幅度冰期终止事件”(Low-amplitude versions of terminations, Wolff等, 2009), 或“不成功的冰期终止事件”(Failed terminations, Barker等, 2011), 或“未完成的冰期终止事件”(Unfinished terminations, Schaefer等, 2015). 通过去除64万年亚洲季风石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中的北半球夏季太阳辐射信号, 获得了亚洲季风的千年(亚轨道)尺度变化($\Delta\delta^{18}\text{O}$ 记录); 同时, 将南极冰芯温度记录(δD)去除长期变化趋势后, 得到一个去趋势的南极冰芯记录

($\Delta\delta\text{D}$). 这两个记录清晰刻画了全球亚轨道(千年)气候变化的时间序列, 而且 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 和 $\Delta\delta\text{D}$ 具有显著反相关关系(图1c)、均具有显著的岁差周期(分别与6月21日的太阳辐射变化呈现反相位和同相位关系)、且岁差及倾角周期相对偏心率更为显著(图1e). 这些结果不仅揭示了太阳辐射对千年事件(包括冰期终止事件)的影响, 也在解决“10万年周期困惑”这一悬而未决的经典科学问题方面取得了重要进展. 此外, 在未对亚洲季风和南极温度记录进行数据处理和对比之前, 很难想象南极温度-中国石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 如此遥远且不同的两个气候记录之间竟会有如此密切的内在联系: $\delta^{18}\text{O}_{\text{China-cave}} - \text{Insolation}_{\text{July 21@65°N}} \cong \Delta\delta\text{D}_{\text{Antarctica}} \cong \delta\text{D}_{\text{Antarctica}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{benthic}}$. 这表明南半球高纬度地区与北半球中低纬度季风区气候变化之间存在一种“简洁”的关系, 也就是说“自然界喜欢‘简洁’(simplicity)” (牛顿的著名论断), 即自然界中许多复杂现象的本质通常可以用一种简单关系进行表述. 美国资深编辑R. Mark Wilson针对本论文在《Physics Today》上发表评论, 认为这一发现“可供气候模拟学界进行长期深入研究”(Wilson, 2016).

2015年, Cai等在《PNAS》上发表论文, 通过位于印度夏季风影响区的云南小白龙洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 重建了250ka BP以来的印度季风降水变化. 发现石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的印度季风降水变化除了存在主导的岁差周期外, 可能还具有显著的冰期-间冰期旋回, 即印度季风对冰量变化可能有显著响应, 值得进一步确认. 该研究结合降水氧同位素的气候数值模拟研究, 认为东亚季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 在冰期-间冰期尺度上变化不够显著, 可能是因为冰期时西太平洋大陆架大范围的出露对中国东部降水水汽源及其同位素组成的影响. 这一结果对于理解东亚季风区在冰期-间冰期尺度上的变化具有重要意义, 为“东亚季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的轨道变化存在一定的阈值”的假说(Cheng等, 2012b)提供了新的机制, 即阈值的产生与水汽的传输距离在间冰期更近有关. 如果真是如此, 全球冰量变化对东亚季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响可能被这一机制抵消了, 导致去除夏季太阳辐射后的石笋 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 记录(不再需要再去除冰量影响)与去除冰量(即长趋势)后的南极冰芯温度 $\Delta\delta\text{D}$ 记录具有良好的吻合. 这一方面还有待不同学科的进一步综合研究, 其中在典型印度季风地区获取新的长尺度连续石笋记录将具有关键的参照意义.

图1 亚洲季风的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录和其他记录对比及其谱分析结果

(a) 亚洲季风石笋 $\delta^{18}\text{O}$ (绿色曲线, Cheng等, 2016a)和7月21日65°N太阳辐射(粉红曲线, Laskar等, 2004). (b) 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录去除太阳辐射信号后的记录($\Delta\delta^{18}\text{O}$)(蓝色曲线, Cheng等, 2016a)和6月21日65°N太阳辐射(粉红曲线, Laskar等, 2004). (c) 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(蓝色曲线, Cheng等, 2016a)和南极冰芯 $\Delta\delta\text{D}$ (温度信号, Jouzel等, 2007)去除长期变化趋势后的记录($\Delta\delta\text{D}$, 橄榄绿曲线). (d) 南极冰芯 $\Delta\delta\text{D}$ 长期变化趋势(浅蓝色)和海洋底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(灰色, 全球冰量信号, Lisiecki和Raymo, 2005). (e) 谱分析结果: (e-1) 65°N7月21日太阳辐射(粉色)和亚洲季风 $\delta^{18}\text{O}$ (绿色)的功率谱分析结果及其谱相关性(黑色), 灰色为海洋底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的谱分析结果. (e-2) 65°N6月21日太阳辐射(粉色)和亚洲季风 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ (蓝色)的功率谱分析结果及其谱相关性(黑色). (e-3) 亚洲季风 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ (蓝色)和南极冰芯 $\Delta\delta\text{D}$ (橄榄绿色)的功率谱分析及其谱相关性(黑色). 谱相关性为80%置信水平. 括号内的数字表示岁差(~23和19kyr)和倾角(~41kyr)两个谱段相位差异程度. 四组数据均具有显著的~23kyr岁差周期. 此外, 亚洲季风 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 和南极 $\Delta\delta\text{D}$ 记录还具有显著的倾角周期, 两个记录的岁差及倾角周期均比偏心率周期更加显著. 交叉谱分析显示亚洲季风 $\delta^{18}\text{O}$ 和7月21日太阳辐射、南极 $\Delta\delta\text{D}$ 和6月21日太阳辐射具有一致相位的岁差周期. 亚洲季风 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 与南极 $\Delta\delta\text{D}$ 和6月21日太阳辐射在岁差尺度上具有反相位关系

3.3 轨道理论的新内涵

Cheng等(2019)建立了北美目前最长的(33万年)西弗吉尼亚Buckeye Creek洞的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 该研究证实了在岁差旋回上北美气候变化滞后于夏季太阳辐射约5000年(Imbrie等, 1984), 因此与全球冰量(或海平面)变化的相位一致(图2). 这一发现证实了‘狭义’的Milankovitch理论, 即北半球高纬冰盖对夏季太阳辐射的响应和反馈驱动全球气候变化, 在物理学上冰盖对于太阳辐射的响应在岁差旋回上约有5000年的滞后(late response, Ruddiman, 2006). 但这与亚洲季风-西风带(Cheng等, 2012a, 2016a, 2016b)和南美洲季风区(Cruz等, 2005, Cheng等, 2013a)的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录不同, 后者属于所谓早期响应(early response, Ruddiman, 2006)的气候系统. 事实上早在Milankovitch提出轨道假说约半个世纪之前, Croll(1875)就已经提出了轨道假说: 南北半球受太阳辐射的岁差变化影响, 呈现不对称的冰量变化. 这一假说之所以最终被Milankovitch理论所替代, 主要原因是海洋记录所揭示的10万年周期为主的全球冰量变化支持Milankovitch假说, 而与南北半球岁差变化为主的冰量变化假说不符. 但从太阳辐射影响全球气候变化这一根本出发点来看, 岁差(尤其在低纬度地区)相对其他轨道参数具有更为重要的影响. Croll的假说强调岁差的重要影响. 无论在理论上还是从新的南北半球的石笋记录来看, 都应该在轨道理论中有所体现. 这可能也是Fleming(2006)称Croll为哥白尼、Milankovitch为牛顿的原因之一. 纵观轨道理论发展历程, Milankovitch理论只是众多版本之一, 轨道理论通常包含四个方面: 轨道要素、太阳辐射、气候模拟和地质观测数据(Berger, 1988), 目前, 前两个或前三个方面与Milankovitch(1941)理论框架相比没有实质的变化, 而重要的是中国石笋研究提供了不同于早期海洋沉积(或全球冰量)记录的新观测证据: 中、低纬度地区的南-北半球在岁差旋回上反相位的全球季风变化, 为轨道理论的发展提供了新的内涵.

从季节变化来看, 南北半球的降水量和降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值均呈现反相位的季节变化: 当北半球夏季时, 低纬度地区强大的夏季风, 伴随着热带辐合带(ITCZ)和季风槽的北移, 将大量的水汽输送到北半球的亚洲、北美洲和北非季风区, 北半球季风区的降水和石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值变轻(Zhao等, 2018)(图2), 而南半球的降水减少、

降水和石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值变重(图2), 反之亦然. 在百年(Cheng等, 2009b, 2012c)、千年(图2c)和轨道(图2d)时间尺度上, 南北半球的季风强度或总体降水变化可能也呈现反相位的变化. 从轨道尺度上来讲, 这一发现支持早期的Croll假说的核心观点, 即太阳辐射的岁差变化为主导的南北半球呈现不对称的气候变化, 只是这一气候变化的“核心”是季风降水(或降水 $\delta^{18}\text{O}$), 而不是南北半球的冰量变化. Milankovitch轨道理论及其初期的不完整证据经历了半个多世纪, 在这期间, 新的地质记录层出不穷, 使得新的轨道理论呼之欲出, 而中国石笋的研究结果也将注定会成为新的轨道理论的基石之一.

3.4 全新世亚洲季风的变化历史

全新世是指过去~11700年这一时段, 全新世的气候变化与人类社会发展有着密切联系, 人类的文明-文化起源、发展与进步主要发生在这一时期, 其气候变化的背景也备受关注. 2005年, 国土资源部岩溶地质研究所与美国明尼苏达大学合作在《Earth and Planetary Science Letters》(Dykoski等, 2005)、Wang等人在《Science》(Wang等, 2005)上分别发表了两个董哥洞的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 重建了高精度、高分辨率的东亚夏季风全新世演变历史, 受到十分广泛关注(目前为止分别被引用1230和1900余次, Google Scholar). 这两个记录显示全新世东亚夏季风强度在YD弱季风事件结束后快速反弹, 在早-中全新世达到高峰后逐渐减弱, 与夏季太阳辐射逐渐减弱的趋势相一致. 全新世期间发生了约10次持续100~500年的弱季风事件, 这些事件多数与北大西洋Bond事件(Bond等, 2001)有关, 其中一次与8.2ka BP事件密切联系, 另外一次发生在4.2ka BP左右, 可能导致了新石器文化的衰落.

此后, 中国学者发表了大量的从中国东北到西南的全新世石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录. 其中, Hu等(2008)发表了湖北和尚洞的全新世记录. 通过与董哥洞记录的对比, 重建了该地区全新世降水变化的历史, 发现降水变化与石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录本身的差异. Cai Y J等(2010)建立了高分辨率的陕西九仙洞全新世石笋记录, 探索了全新世石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的空间差异及其影响机制. 最近, Yang等(2019)发表了重庆地区的全新世石笋记录, 总结了已发表的东亚季风区的中国石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 认为东亚季风区全新世石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的主要模式基本相似, 并以

图2 冬、夏降水及其 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布、亚洲季风的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录及其与其他记录在轨道-千年尺度上的对比

(a) 冬季(12-2月)降水-夏季(6-8月)降水分布(数据来源: Global Precipitation Climatology Project, 1901~2016, <https://precip.gsfc.nasa.gov/>). (b) 冬季(12-2月)降水-夏季(6-8月)降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 分布(数据来源: IsoGSM(Isotope-incorporate Global Spectral Model, 1979~2009, Yoshimura等, 2008)). (c) 自上而下: 格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(NGRIP, GICC05 x1.0063年代模式, WAIS Divide Project Members, 2015); 亚洲季风的葫芦洞 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(Cheng等, 2018); 南美季风石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(深蓝, Wang等, 2017). 数字指示格陵兰/中国间冰阶(Cheng等, 2006). 方块指示记录中间冰阶-冰阶转变的中值点. 虚线指示将冰芯记录通过相应的中值点调谐到葫芦洞记录的对应关系(WAIS Divide Project Members, 2015; Buizert等, 2015). (d) 自上而下: 北美石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(深黄, Lachniet等, 2014; 青色, Cheng等, 2019)和海平面(棕红色, Spratt和Lisiecki, 2016); 亚洲季风石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(绿色, Cheng等, 2016a)和7月21日65°N太阳辐射(棕红色, Laskar等, 2004); 南美季风石笋记录(深蓝, Cruz等, 2005)和1月21日30°S太阳辐射(红色, Laskar等, 2004)

16个石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录为基础构建了一个反映东亚季风变化的全新世石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 集成记录, 这一集成记录显示早-中全新世东亚夏季季风较强, 但早全新世弱季风事件较多、不稳定, 而中全新世相对稳定(图3b).

值得关注的是, 全新世中国东部东亚季风的变化有非常多的各种地质记录, 石笋记录只是其中之一, 而且其 $\delta^{18}\text{O}$ 的水文气候学意义的解读依然有较大的分

歧. 从石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的主要模态来看, 从中国东北到西南具有很大的相似性, 这常常被认为石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录不能够代表季风降水的证据(例如, Maher, 2008; 陈建徽等, 2016), 因为在空间上石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的一致性与降水的差异性有明显矛盾. 但换个角度来看, 这个矛盾是表面上的、而不是实质性的. 从现代观测数据出发, 程海等(2005)和Cheng等(2006)认为, 夏季风爆发前的

图3 中国东部季风区降水月平均 $\delta^{18}\text{O}$ 记录和集成的全新世石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录

(a) 中国东部季风区降水氧同位素月平均记录(根据Cheng等, 2006修改, 数据来自International Atomic Energy Agency/World Meteorological Organization, IAEA/WMO). 箭头指示东亚夏季风爆发时间从东南沿海5月份到中国北方7月份, 期间降水 $\delta^{18}\text{O}$ 快速变轻。(b) 黑色曲线为集成的东亚季风区全新世石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(Yang等, 2019). 红色曲线为由中国新疆科桑洞(Cheng等, 2012a; Cai等, 2017)、Baluk洞(Liu等, 2019)和乌兹别克斯坦Tonnel'naya洞(Cheng等, 2016b)集成的西风带全新世石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录. 灰色阴影指示不确定性. 绿色竖条指示8.2ka BP事件和YD事件

陆-海温度梯度较小、中国东部水汽来源较近、水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 就较重; 夏季风爆发后陆-海温度梯度增加、大气环流规模显著增大、水汽来源较远、水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 就较轻. 中国东部(图3a)及全球季风(图2)的现代降水 $\delta^{18}\text{O}$ 观测数据很好地记录了这一现象. 值得注意的是, 这一季节尺度的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化规律具有很大规模的空间一致性, 明显不同于降水显著的空间不均一性. 但这一现象并非一个悖论, 其恰恰是石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的“魅力”所在. 这种空间的一致性所揭示的季风强弱变化代表了季风的“风”的本质, 或大气环流的空间规模及伴随的水汽来源的远近变化的一致性, 这也就是降水氧同位素($\delta^{18}\text{O}$)变化的本质, 其不一定在所有情况下都代表具体洞穴地点的降水量. 另一方面, 单纯从降水出发, 由于季风降水的空间差异很大, 理论和实际上都可能在同一季风体系不同地点重建的季节-年际, 或全新世的季风变化中, 出现多个不同的模态, 引起概念混淆. 而同一地点的降水在复杂的现代季风降水空间模态中的“位置”, 或对于季风强度的指示意义, 能否外推到早、中全新世? 目前还没有明确答案. 可是既然现代东亚夏季风的北界的年代际变化可达~10个纬度(汤绪等, 2006; 胡豪然和钱维宏, 2007), 从季风的动力学特点来看, 很难设定某一个地方的早、中全新世与现代季风的时空模态固定不变(Kong等, 2017; Yang等, 2019). 相比之下全新世石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的季风强度变化并不特别依赖这一假设, 其广泛一致的主模态从氧同位素原理上来看, 最可能代表了夏季风的总体强度, 或东

亚季风的本质. 而复杂的降水时-空变化则有赖于各地的地质记录(包括石笋的其他指标)和数值模拟进行重建.

在全新世气候突变事件研究方面, Cheng等(2009b)利用全球不同地区数个高分辨率和精确定年的石笋记录, 刻画了8.2ka BP气候事件的精确时间、双谷结构及其南-北半球的反相位关系. 其中, 巴西Padre洞8.2ka BP事件的记录, 最近被选为划分早-中全新世的全球界线层型剖面及点位(Global Boundary Stratotype Section and Point, GSSP)的辅助“剖面”(Global Auxiliary Stratotype, GAS)(Walker等, 2019). 湖北和尚洞石笋记录的研究(Liu等, 2013)表明8.2ka BP气候事件时长江中游地区出现的干旱和格陵兰冰芯记录的降温有同时性, 支持全新世暖期时亚洲季风系统和北大西洋地区气候存在快速的大气远程联系机制. 谭亮成等进一步发现5.0ka BP和2.8ka BP气候事件时中国东部季风区从南到北均表现为显著干旱气候; 与之相反的是, 在4.2ka BP事件和小冰期期间, 北方地区显著干旱, 而中部和南方地区相对湿润, 提出季风和西风的强度及其相互作用是导致这种季风降雨分异模式的主要原因(Tan等, 2018a, 2018b). Zhang等(2018a)在江西神农宫溶洞的研究也发现4.2ka BP事件期间东南湿润的证据, 认为是由于北大西洋温盐环流减弱引起的亚洲夏季风强度减弱、雨带南移造成的. 基于甘肃乌鸦洞石笋记录, Tan等(2014a, 2018c)首次提出黄土高原在4.2ka BP事件整体干旱状态下存在两次年代际尺度

的极端高降雨事件, 分别发生于~4200a BP和~4000a BP(± 50 a), 和中国传说中夏朝的建立年代(公元前1900~2200年, 也即3940~4150a BP)一致, 可能造成了黄河中下游的大洪水. 这是否与大禹治水的传说有关值得进一步研究. 在印度季风区, Li H等(2018)和Kathayat等(2018)分别在印度夏季风起源地的Rodrigues岛和印度夏季风降水最多的印度东北乞拉朋齐(Cherrapunji)地区建立了高分辨率的石笋记录, 精细刻画了4.2ka BP事件的性质和时间以及背后的动力学机制.

3.5 过去2000年东亚季风的变化及其机制

过去2000年的气候变化的研究对理解人类活动影响、自然变化背景、各种地质记录和数值模拟预测十分重要. 2016年, Cheng等在《Nature》上发表论文, 指出最近2000年亚洲夏季风增强趋势与北半球夏季太阳辐射逐渐减弱的变化趋势并不相符, 提出该季风异常及其全球气候变化背景类似于过去64万年中频繁发生的千年尺度气候事件, 并将其命名为“2000年漂移”(2-kyr shift), 认为其触发机制与北大西洋经向翻转流变化有关. 这为2000年以来的气候变化研究和模拟工作提供了背景和新的研究思路.

2008年, Zhang等在《Science》上发表论文, 利用甘肃万象洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录揭示了过去1810年以来东亚夏季风变化历史(Zhang等, 2008). 认为太阳活动对东亚季风降水变化起着重要作用, 太阳活动增强, 东亚夏季风强盛、夏季风边缘地区降水增多. 同时发现, 中世纪气候异常期东亚夏季风增强、中国北方降水增多, 而小冰期期间东亚夏季风减弱、北方降水减少; 弱(强)夏季风时期, 阿尔卑斯山冰川大幅度前进(撤退), 进一步证实了东亚夏季风与高纬气候之间的密切联系. 万象洞 $\delta^{18}\text{O}$ 记录表明中国唐、元、明等多个朝代的衰亡都有着相似的气候干旱的自然背景. 2017年, Kathayat等首次在印度北方建立了高分辨率和精确定年的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 揭示了过去5700年印度夏季风降水变化历史, 发现大尺度的印度夏季风的强弱变化“韵律”与古印度河流域文明、吠陀文化、十六国、孔雀王朝等兴衰在时间上高度一致, 表明气候变化在印度次大陆人类文明演化历史中扮演了相当重要的角色(Kathayat等, 2017). 研究还提供了重要证据支持“气候变化导致了西藏古格王朝的快速衰败”的假说(Cheng

等, 2010). Tan等(2015)发现汉中大鱼洞中有近百处墨书题词, 清楚记载了过去500年中当地百姓或官员多次因干旱进洞取水或求雨的场景和时间, 其分别对应于该洞石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 和Sr/Ca记录中的多次干旱事件(Tan等, 2015). 这是首次在同一个洞穴中发现对比良好的历史-石笋记录, 验证了石笋记录、干旱事件和社会动荡之间的密切联系. 综上所述, 人类社会的发展演化受到许多社会和自然因素的深刻影响, 其中气候环境作为关键的自然因素之一, 也有过重要影响.

最近, Tan等(2019)在《PNAS》上发表论文, 通过泰国南部三支可重复的石笋记录, 重建了ITCZ核心区中印-太北部过去2700年的降雨变化, 发现中印-太地区20世纪的显著干旱和历史暖期相似, 对应于太平洋的类El Niño状态. 进而重建了过去2000年ITCZ的移动指数, 发现20世纪暖期和中世纪暖期前期时ITCZ都偏南. 据此提出人类活动对热带地区降雨的影响还难以从自然气候变化中区分出来. 中国学者在石笋古气候定量重建及未来气候变化趋势预估上也进行了尝试. 2003年, 基于地表土壤和洞穴环境监测, 谭明等提出北京石花洞石笋微层厚度(或体积)与暖季节(5~8月)的温度密切相关, 进而定量重建了过去2650年北京地区暖季温度的变化特征、历史及与北半球温度变化的联系(Tan等, 2003). 随后, Tan等(2006)系统阐述了利用石笋年纹层来定量重建气候变化的科学方法, 在国际上首次提出石笋微层气候学的概念. Tan等(2013)进一步发展了石笋微层气候学, 将树轮气候学里面严格的统计-校正-检验方法引入到秦岭石笋微层-温度的定量重建中. Zhang等(2018b)通过对江南春雨区($24^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$)的现代降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和峨嵋洞年纹层控制的过去200年季节分辨率的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录进行研究, 认为在年际-年代际尺度上中国东南地区(特别是江南春雨区)的降水或石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 可能主要受到降水的季节变化影响, 并与ENSO、太平洋年代际涛动(PDO)和西太平洋副热带高压有密切联系. Zhao等(2018)利用秦岭地区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 对西太平洋副热带高压变化的敏感性, 重建了过去200年西太平洋副热带高压的变化, 揭示了其与太阳活动和ENSO的关系. 在气候变化趋势预估方面, 杜雅娟等(2013)和Tan等(2015)做了探索性研究, 其中汉中大鱼洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的预测结果得到该区1982~2018年气象水文数据的验证(Tan等, 2015). Li等(2017)利用北京石花洞石笋记录, 结合中国东部其他高分辨率记

录, 探讨了1880年以来中国东部石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变重趋势与季风减弱趋势的关系和机制, 基于石笋记录的显著30年周期, 做出了北京地区未来可能变干的预测。

从目前石笋研究的众多成果来看, 在短时间尺度上石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、微量元素、纹层厚度等指标, 结合器测记录、历史文献和数值模拟等, 可以反映一些特定区域的水文气候变化(Tan等, 2009, 2011, 2015, 2017). 寻找地质记录中的人类活动印记是目前国际研究的新热点. 中国学者在石笋记录中也检测到历史时期人类活动对环境的影响. 例如, Tan等(2014b)发现秦岭地区的一根石笋中的Pb含量从1985年以来有非常异常的显著增加趋势, 与当地铅矿的开采历史吻合, 指示过去30年采矿活动对当地环境的污染. 贵州织金洞(Kuo等, 2011)和江西神农宫石笋(Zhang等, 2015)的 $\delta^{13}\text{C}$ 都记录到了历史时期大规模人类活动对森林植被的严重破坏。

3.6 亚洲季风与西风带气候模态之间的耦合和分异

从中国的西北到东地中海地区是亚洲的西风带气候区, 西风气候与亚洲季风的关系是什么? 这一直是个科学问题. 近年来, 中国学者分别在东地中海黎巴嫩(Cheng等, 2015)、中亚乌兹别克斯坦(Cheng等, 2016b)和中国西北新疆(Cheng等, 2012b; Cai等, 2017; Liu等, 2019)建立了重要的石笋记录. 其中, Cheng等(2012b)利用新疆科桑洞石笋, 建立了西风带目前最长的(50万年)石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 首次提出青藏高原北部著名的古里雅(Guliya)冰芯目前的年代框架可能偏老的看法. 该研究还提出了将冰芯记录调谐到有精确年代的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录上的方法, 为解决该地区冰芯记录的年代问题提供了新思路. 随后, Cheng等(2016b)发表了中亚西风带核心地区乌兹别克斯坦13.5万年以来的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 不仅证实了科桑洞记录的轨道变化规律, 也确定了北半球重要的千年冷事件(包括YD事件和105ka BP事件)发生时, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著偏重的现象, 后者与传统的西风带降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与当地气温成正比的认知有一定的矛盾。

另一方面, 上述西风带的石笋记录揭示了亚洲季风与西风气候之间的耦合与分异关系(Cheng等, 2016b), 发现中亚乌兹别克斯坦地区(冬季降水为主)和中国新疆西部地区(春夏季降水为主)的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化

在轨道尺度上都与亚洲季风记录表现出同样的岁差变化韵律、以及叠加的一系列相似的千年气候事件, 揭示了亚洲季风与西风气候之间在大区域尺度上具有耦合关系(图3), 从气候记录上印证了气候模拟的重要结果: 西风急流的强度和相对于青藏高原的位置变化与大范围的亚洲季风-西风气候变化具有紧密的耦合关联(如Chiang等, 2015). 与石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录所代表的大区域尺度上的气候变化不同, 中亚和中国西部石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 和微量元素记录指示两个地区的有效湿度变化, 其不但与大区域尺度上的变化具有不同模态(甚或相反, 包括全新世时期), 而且两个地区彼此之间也不尽相同, 显示出显著的区域差异(Cheng等, 2016b). 也就是说西风气候可能存在两个不同性质的水文气候模态: 一是石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的大区域的气候变化(如大气环流)模态, 与亚洲季风具有耦合关系; 另一个是石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 和微量元素所指示的较小区域的有效湿度变化模态, 其可能有多个、相对复杂、并与亚洲季风主要模态不同. 这一认识有利于解释“西风带-亚洲季风密切联系的气候模拟结果与地质记录所揭示的西风带-亚洲季风全新世气候(有效湿度)模态不同”这一先前的悖论. 在百年-年代际尺度上, 西风带的石笋记录研究还揭示了太阳活动的影响、水文气候变化的事件、幅度、变率、周期以及对人类社会的影响等, 并探讨了其动力学机制(Cheng等, 2012b, 2015, 2016b; Cai等, 2017; Liu等, 2019).

3.7 石笋新指标或多指标记录研究

石笋古气候研究发展到今天, 除 $\delta^{18}\text{O}$ 指标外, 其他指标也不断出现, 石笋古气候的多指标研究已经逐步成为该领域的主流. 中国学者在这方面做出了重要贡献. 2017年, Zhu等在《PNAS》发表了利用湖北和尚洞石笋进行环境磁学研究的论文, 率先开展了石笋磁学与全球气候变化研究, 发现该石笋中来自于洞顶土壤的软磁组分通量($\text{IRM}_{\text{soft_flux}}$)能够反映降雨量变化, 以此重建了长江中游地区过去9000年以来降雨量变化, 揭示了该区中全新世以来的古水文变化历史, 以及古洪水事件、周期和与ENSO和太阳活动的关系(Zhu等, 2017).

2018年Chou等发表了《PNAS》论文, 利用贵州三星洞含有磁铁矿的石笋样品, 重建了107~91ka BP部分时段高分辨率的地磁变化记录. 发现这一期间的

地球磁场的的不稳定性, 表现出不断重复发生的地磁极南-北漂移。地磁极漂移的过程一般为几百年到上千年, 其中一次仅为一百至两百年。文章认为如果未来发生这种快速漂移事件, 将会影响卫星正常工作和人类社会活动(Chou等, 2018)。

2018年, Zhang等发表了《Science》论文, 利用湖北西部豪猪子洞石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 和微量元素多指标记录, 对末次冰消期长江中游地区的季风降水变化进行了研究。结果表明YD时期豪猪子洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 偏重指示东亚夏季风强度减弱, 而微量元素比值(Mg/Ca、Sr/Ca和Ba/Ca)减小和校正后偏轻的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化则指示当地夏季风降水增加。这一结果得到了大九湖泥炭藓通量指示的泥炭地水位上升记录和气候模拟结果的支持。结合气候数值模拟研究, 认为北半球变冷引起半球间温度梯度减小、西风带北移时间偏晚、东亚夏季风减弱, 导致梅雨带在长江中游地区停留时间长、降水增多。该研究支持西风带-北大西洋-亚洲季风气候变化之间的耦合关系、以及中国石笋界对石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 指标的主流认识。

除上述 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、微量元素、纹层和磁学等多指标外, 中国学者还在尝试碳酸盐假性热释光(廖金等 2014)、钙同位素($\delta^{44/42}\text{Ca}$, Li X L等, 2018)、3-羟基脂肪酸(3-hydroxy fatty acid, Wang C F等, 2018)、色度(胡尊语等, 2018)等气候环境指标方面取得了许多重要进展。此外, 水文气候学指标的建立离不开对现代洞穴物理化学的监测工作所获取的各种相关信息。中国学者在这一领域也做出了许多出色的工作。例如, 对广西多个洞穴(李彬等, 2000; 张美良等, 2007, 2015)、湖北和尚洞(Johnson等, 2006; Ruan和Hu, 2010)、贵州七星洞等多个洞穴(王世杰等, 2009; 周运超等, 2004; 罗维均和王世杰, 2008)、北京石花洞(王新中等, 2005; 班凤梅等, 2009, Cai等, 2011)、南京葫芦洞(汪永进等, 2009)、重庆芙蓉洞(Li等, 2012; Li等, 2013)和羊口洞(Chen和Li, 2018)、云南仙人洞(Duan等, 2012)、河南鸡冠洞(赵景耀等, 2014; Sun等, 2018), 以及中国季风区8个洞穴(Duan等, 2016b)等许多洞穴及降水的系统监测研究。这些工作从不同角度研究了洞穴滴水同位素、物理化学、洞穴温度、洞穴 CO_2 和降水等因素, 及其与石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、微量元素和纹层的关系。谭明(2009, 2014, 2016)分析了中国季风区现代降水、洞穴监测结果和多个近现代、过去

1000年的高分辨率石笋记录, 认为年代际至百年尺度季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 指示印度洋与太平洋海区的环流变化。当西太平洋副热带高压偏南西伸增强时, 近源水汽(西太平洋水汽)比例增大, 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 系统偏重, 并以此为基础提出了中国石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的“环流效应”, 及其与ENSO模态的联系。这一工作深化了石笋界对石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的认识, 非常值得关注。

3.8 中国葫芦洞石笋对大气 ^{14}C 校正的贡献

运用 ^{14}C 方法测年需要知道被测样品形成时大气或海洋的 ^{14}C 浓度, 以此将 ^{14}C 年龄校正到日历年龄。目前, 以树轮工作为主建立了~14ka BP以来的高精度和高分辨率的 ^{14}C 年代校正曲线。海相沉积、珊瑚、湖泊沉积和石笋记录将大气 ^{14}C 记录有效延伸至5万年。然而, 较老时段的 ^{14}C 年代校正仍存在较大不确定性, 亟待改进。2018年, Cheng等在《Science》上发表论文, 利用葫芦洞石笋首次将石笋 $\Delta^{14}\text{C}$ 记录拓展至过去5.4万年, 涵盖了 ^{14}C 测年方法的较老的年龄范围, 建立了过去5.4~1.1万年以来高精度的 ^{230}Th 年龄(日历年龄)控制的大气 ^{14}C 变化的记录, 是该领域具有里程碑意义的新进展。该研究在 ^{14}C 年龄校正到绝对日历年龄方面, 以及全球气候变化、考古、大气-海洋碳循环等研究领域具有重要意义; 同时还大大提高了葫芦洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的分辨率和 ^{230}Th 年代的精准度, 为全球气候变化研究提供了精准的过去5.4~1.1万年以来的年代学标尺。该记录位于IntCal13所采用的基本数据变化范围的中间值附近, 具有很高的可信度, 成为即将发表的IntCal19的关键数据之一。该研究还进一步证实了 $\Delta^{14}\text{C}$ 的千年尺度变化主要受地磁场控制, 例如两次著名的古地磁变弱事件(Mono Lake Excursion和Laschamp Event)均造成了异常高的 ^{14}C 值。除此之外, 该研究还发现千年尺度气候变化所引起的碳循环变化, 也会影响大气 ^{14}C 变化, 认为25~11ka BP期间 ^{14}C 值长期减小的变化趋势很可能与海洋通风逐渐增强有关。

3.9 从中国到全球的气候和环境变化研究

中国的全球气候变化研究, 特别是石笋古气候研究, 在很长一段时期内主要研究内容实际上只是中国地区对全球气候变化的响应和反馈。中国地区虽然在全球气候变化的研究中占据着十分重要的地位, 但毕竟有其地域的局限性。近10年来, 中国石笋古气候研

究已经实质性地参与了全球气候变化的研究,并在全球不同气候系统中取得了令人瞩目的重要进展.例如,Cheng等(2009b)重建了高分辨率的中国、阿曼、巴西的8.2ka BP事件的石笋记录,并进行了相关的全球精确对比工作. Cai B G等(2010)重建了过去约100年的泰国西北部的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录,并探索了其显著的年代际变化及其与西太平洋暖池海表温度的关联; Wang等(2004)在《Nature》上发表南美研究成果,发现巴西东北部洞穴石笋、流石和洞外泉华间歇性的生长时段(即湿润期),分别对应于格陵兰冰芯记录的冷事件和东亚石笋记录的弱季风事件时期,由此提出北半球冷事件发生时,ITCZ南移导致巴西东北部湿润多雨,该研究提供了南北半球千年尺度上反相位季风变化的直接证据; Cheng等(2013a)利用亚马逊西部的石笋重建了南美季风区最长的(25万年以来)水文气候变化记录,发现南美热带和亚热带地区的降水变化在千年尺度上的一致关系,揭示了亚马逊流域东部和西部地区在岁差尺度上的降水变化为准偶极子模式(Cheng等, 2013a),为随后的气候模拟工作所证实(Battisti等, 2014). 该研究不仅对于南美气候变化研究具有重要贡献,还对该地区的生物多样性提出了全新认识,其成果广受关注; Wang等(2017)发表了《Nature》文章,通过对比研究亚马逊流域东部和西部的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录,发现末次冰期亚马逊流域东-中部普遍干旱,局地水循环和植被蒸腾作用减弱,该研究对于认识和理解冰期时段亚马逊流域的水文气候条件具有重要意义; Kathayat等(2016)利用印度北部Bittoo洞的石笋重建了印度次大陆迄今为止最长的印度季风石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(过去28万年),揭示了典型印度季风与东亚季风在轨道和千年尺度上的相似性,以及与太阳辐射的关系; 随后, Kathayat等(2017, 2018)利用印度北部Sahiya洞和东北部Mawmluh洞石笋分别建立了高分辨率石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录,揭示了印度季风-晚全新世的变化、气候事件以及印度文明-文化历史演化的紧密关系; Cheng等(2015)重建了过去2万年的高分辨率的黎巴嫩Jeita洞石笋记录,对理解东地中海地区的气候变化、及其与人类文明的关系有重要意义; Cheng等(2016b)利用乌兹别克斯坦Tonnel'naya洞的石笋,在典型的中亚西风区首次建立了13.5万年以来的石笋记录,发现在轨道和千年尺度上西风气候与亚洲季风气候的紧密耦合关系(图3b),以及地区性的水文模态多样性及其

与季风区水文模态的分异关系; Tan等(2016)在吉尔吉斯斯坦获得了涵盖过去50万年大部分时段的石笋记录,相关指标分析工作正在开展; Li H等(2018)和李瀚瑛等(2019)在南印度洋的Rodrigues岛建立了高分辨率的石笋记录,精细刻画了南印度洋的4.2ka BP和YD事件及其与全球其他地区记录的关联; Cheng等(2019)利用美国西维吉尼亚Buckeye Creek洞的石笋,建立了北美迄今为止最长的过去33万年石笋记录,揭示了其轨道-千年尺度的气候变化与全球冰量和北极海冰变化的紧密关系,对理解轨道理论有重要意义.

综上所述,中国学者在近十年中积极参与了全球不同气候系统的石笋古气候研究工作,特别是在印度、南美、北美、中亚和南印度洋分别建立了各自气候系统中迄今为止最长的石笋记录,成为这些地区的石笋研究的里程碑. 这不仅对于研究全球气候变化非常重要,也反映了中国石笋古气候研究在国际上已经具有重要的地位. 目前中国石笋界参与了全球几乎所有气候系统中的石笋古气候的研究工作,并不断取得积极的进展,在不久的将来,有可能全面达到国际先进水平.

3.10 技术发展

科学进展常常有赖于技术发展,石笋古气候研究发展的历程也是如此. 例如,中国石笋在21世纪以来的几乎所有重要进展都是与U-Th测年的技术进步密切相关的. Wang等(2001)的标志性成果很大程度上有赖于热电离质谱(TIMs)U-Th测年技术(Cheng等, 2000)所提供的比以往更加精确的年代标尺; Yuan等(2004)石笋记录的精确定年则是由早期的U-Th电感耦合等离子体质谱(ICPMS)方法(Shen等, 2002)所完成; 而Cheng等(2009a, 2016a, 2018, 2019)的精确定年则是由目前的U-Th多接受电感耦合等离子体质谱(MC-ICPMS)方法(Cheng等, 2013b)所完成. 这代表性地反映了U-Th测年技术进步历程以及对石笋古气候研究的重要推动作用. 直到2013年之前,中国所有的石笋精确测年工作都基本上依靠国外实验室的帮助,特别是美国明尼苏达大学同位素实验室的帮助. Cheng等(2013b)在西安交通大学建立了国际先进水平的U-Th测年实验室,并在U-Th方法改进、标准以及 ^{230}Th 和 ^{234}U 半衰期测定方面取得了重要进展,这不仅对此后的中国石笋的年代学工作起到了重要的支撑作用,

反过来也为世界各地的石笋研究工作提供了大量的年代数据。石笋研究的关键技术无疑是U-Th精确测年, 中国经历了从无到国际先进水平的跨跃式发展, 突破了“瓶颈”, 其影响深远。最近, 国际冰芯界将其年代标尺通过突变事件中值点乘以1.0063调谐到中国石笋记录上: 将格陵兰NGRIP的GICC05时间标尺和南极冰芯的WDC AICC2时间标尺分别乘以1.0063后, 调谐到中国葫芦洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的时间标尺上(WAIS Divide Project Members, 2015)(图2d), 便是最好的注解。

除U-Th精确测年的关键技术和常规的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 测量技术外, 中国石笋界在许多相关技术方面也取得了一些值得关注的进展。例如, 石笋流体包裹体中的惰性气体的测量及在重建古温度方面的应用(方念乔和胡超涌, 2008); 石笋碳酸盐热释光古温度计技术的探讨与应用(廖金等, 2014); 离子探针高分辨率 $\delta^{18}\text{O}$ 测量技术及应用(刘浴辉等, 2015); 激光扫描共聚焦显微镜技术及其在古气候纹层学方面的应用(赵景耀和程海, 2017); 激光诱导击穿光谱微量元素分析技术(LIBS, 李瀚瑛等, 2018); 以及X射线荧光光谱扫描技术(XRF, 李东等, 2019)在建立石笋微量元素记录方面的应用等。另外, 在水和碳酸盐三氧同位素精确测量、流体包裹体稳定同位素测量等关键技术方面也正在取得实质进展。

4 石笋古气候研究领域的未来展望

尽管中国石笋古气候研究取得了长足进展, 但是仍有许多重要科学问题和关键技术亟待解决, 以下是对未来石笋古气候研究领域的一些展望。

4.1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 指标的水文气候学意义

目前石笋最为重要的指标依然是 $\delta^{18}\text{O}$, 其水文气候意义尚存在许多争议, 尤其在东亚季风区(如Maher, 2008; 陈建徽等, 2016), 需要进一步研究。理论上, 在氧同位素平衡分馏情况下, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 主要受控于洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 和洞穴温度, 由于温度控制的水-碳酸盐氧同位素分馏系数较小($\sim -0.23\text{‰}/^\circ\text{C}$, Kim和O'Neil, 1997), 且洞穴温度稳定(通常为当地年均温度), 较大幅度的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化主要受控于洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}$, 而后者受控于大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 。目前争议的关键在于大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的水文气候学意义, 主要来自其他地质记录(黄土、湖

泊和海洋等)和模拟领域。其中相当一部分争议源自对“季风强度”(‘monsoon intensity’)的理解或定义上的差异(Zhao等, 2018; Du等, 2019), 比如Pausata等(2011)认为在H事件中, 东亚季风区的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正是由印度季风区(上游)的降水减少所致, 而不是东亚地区(下游)降水减少的结果。实际上, 这与印度和中国东部石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录所指示的弱亚洲夏季风事件是一致的, 并无矛盾。因为石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的是从水汽源到洞穴的全程水汽变化的累计(integrated)结果, 理论上并不指示降水主要发生在水汽路径的哪一段(Cheng等, 2016a), 这点在上文关于全新世的章节中(2.4部分)也作了一些讨论。从另一角度来看, 中国石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与南极(图1c)、格陵兰(图2c)、南半球(图2c、2d)、西风带(图3b)等全球主要气候系统变化有着紧密的相关关系, 既然如此, 其与亚洲季风的紧密关系应该可以理解, 除非亚洲季风作为一个巨大的气候系统与全球气候变化脱离了紧密关系, 但这很难想象。从更广阔的时空视野来看, 至今还难以找出一个全球季风系统(包括东亚季风)的指标来很好地表达其强弱变化(包括降水)(Wang等, 2017)。季风的根本在于其季节大气环流变化, 而季风降水(石笋) $\delta^{18}\text{O}$ 指标则很好地表达了全球季风的季节变化(图2a、2b, 图3a), 很有可能在千年(图2c)和轨道(图2d)尺度上也是如此。

对于中国石笋界而言, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 解译上的争议反映了科学界对石笋古气候研究的关注、关心和帮助, 科学的发展常常得益于争议, 而石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的争议客观上也促进了石笋古气候研究的发展; 类似的争议未来还会存在, 并将继续推动石笋古气候研究的进一步发展。而解决争议的最重要的途径之一, 将是与争议来源的相关领域的交叉融合研究。

4.2 继续改进石笋测年方法

如上所述, 石笋古气候研究最为重要的优势是U-Th测年技术提供的精确年代标尺。中国石笋研究被赋予很大期待: 替代格陵兰冰芯记录, 建立晚第四纪全球气候变化的对比关系和绝对时间标尺(Henderson, 2006)。目前高精度的U-Th年代的测量有赖于法拉第杯(Faraday cup)测量(Cheng等, 2013b), 这样才能够不受二次电子倍增器(secondary electron multiplier)由于测量死时间(deadtime)等因素造成的测量精准度限制($\sim 1\%$, Cheng等, 2000)。但通常 $10^{11}\Omega$ 高阻放大器的法

拉第杯测量要求样品U含量高或样品量大, 因此许多石笋样品难以满足条件. 目前新的 $10^{13}\Omega$ 高阻的法拉第杯技术有可能解决这一问题, 因此亟待发展这一测量方法, 保持中国石笋界在U-Th测年技术上的国际先进水平, 并提供最为精确的晚第四纪气候变化的年代标尺.

值得一提的是, 最近早-中-晚全新世的划分也很大程度上应用了石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(印度东北部Mawmluh洞和巴西Padre洞记录)作为GSSP和GAS(Walker等, 2018, 2019), 这很好地体现了石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的年代学优势. 中国石笋界深入参与了这项工作, 而且最近西安交通大学Kathayat等(2018)建立了新的更为可靠的印度东北部Mawmluh洞的石笋4.2ka BP事件的记录, 成为将来最有潜力的中-晚全新世的GAS.

Cheng等(2016a)所建立的64万年的湖北三宝洞石笋记录已经达到了U-Th测年的上限(Cheng等, 2016a), 而利用碳酸盐U-Pb测年技术则可以将石笋的年代扩展到古生代或更老(Woodhead等, 2010). 要解决中国石笋研究的“深时”问题, 不应该重复长期依赖国外测年技术的老路, 而是应当努力并尽快赶上国际先进水平. 目前西安交通大学同位素实验室正在积极开展相关工作, 期待将中国石笋记录尽快拓展向“深时”, 并对古岩溶、环境与生命演化等相关学科的研究做出贡献.

4.3 开发探索新指标/技术应用于石笋古气候研究

石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录能够指示不同气候系统的水文气候变化的一些方面, 如季风强度, 但难以量化反映温度和降水量等重要气候参数, 所以开展多指标综合研究非常必要. 实际上, 石笋界长期以来都在努力寻求新的水文气候代用指标, 如 $\delta^{13}\text{C}$ 、微量元素、Ca同位素、生物指标、石笋物理指标等, 并进行了相应的测量技术和现代过程校准研究. 今后这一研究方向依然十分重要. 例如, 在中国更好地开展精确的石笋流体包裹体测温技术(惰性气体、H-O同位素)和碳酸盐 $\Delta 47$ (clumped isotope)测温技术, 对于今后石笋古气候研究的发展至关重要. 另外值得一提的是, 近来碳酸盐三氧同位素(^{16}O - ^{17}O - ^{18}O)测试分析技术的发展(Barkan等, 2015, 2019; Mahata等, 2013, 2016), 使得精确测量自然界微小的 $^{17}\text{O}_{\text{excess}}$ 变化成为可能. 这将是不同于 $\delta^{18}\text{O}$ 的又一个氧同位素水文气候学指标, 其有可能指示水汽源相对湿度的变化. 目前西安交通大学同位素

实验室率先开展了相关技术发展, 在世界上首次获得了不同气候系统中石笋的 $^{17}\text{O}_{\text{excess}}$ 测试结果(审稿中), 有可能成为石笋研究的又一个重要科学前沿.

4.4 多学科融合

石笋古气候研究已经经历了半个多世纪的发展. 时至今日, 不同学科的交叉融合对石笋古气候领域新的科学前沿的出现显得越来越重要, 包括与地球化学、环境科学、大气、海洋、地理、地质等学科的深度交叉融合. 其中, 与其他地质记录和数值模拟研究紧密结合尤为重要. 石笋的水文气候学指标再多也有其局限性, 与其他地质记录, 如黄土、海洋、湖泊、冰芯、树轮, 开展深度融合的合作研究才更有可能形成新的学科前沿. 近年来气候数值模拟领域发展十分迅速, 其中不同时间尺度的瞬变气候模拟结果与石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列的对比研究、以及不同空间-时间尺度的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的模拟结果与相应的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的对比研究将有着十分重要的意义, 特别是对深入理解石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的水文气候学意义、变化及其背后的动力学机制至关重要. 此外, 过去全球变化研究组织(PAGES)专门成立了石笋同位素综合分析工作组(Speleothem Isotopes Synthesis & Analysis, SISAL), 整理全球范围内已发表的石笋同位素数据, 并建立数据库. Zhang等(2019)整理了中国地区已发表的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录并讨论了石笋记录的多尺度亚洲季风变化. SISAL工作组定于2019年10月在中国西安举办工作会议, 将促进全球各个气候系统包括中国石笋数据(Zhang等, 2019)与气候模拟的综合研究.

4.5 聚焦前沿科学问题

许多全球气候变化的前沿关键问题需要面向全球来解决. 例如, 高-低纬气候变化的精细关系究竟如何? 是高纬还是低纬驱动? 十多年前, 汪品先先生非常深刻地指出: “低纬过程(如ENSO)在全球气候系统中的重要性日益明朗. 既然现代的热带过程可以带动全球各个气候系统发生变化, 但为什么到了古气候就一切来自北大西洋, 只有北半球高纬度地区方才重要?”(汪品先, 2006). 要解决高低纬度的气候驱动机制, 仅仅靠中国石笋研究是不够的, 需要找准关键地区获得关键数据. 如直接将北大西洋地区的石笋记录与中-低纬度地区的石笋记录进行高分辨率指标分析和精准定年,

来直接检验究竟是高纬还是低纬驱动。目前正是时机, 因为相关技术和样品准备已渐趋成熟。另外, 南半球(包括南太平洋、非洲南部地区)目前记录较少, 获取这些地区的石笋记录对于深入认识和理解南半球气候变化、及其对全球气候变化的影响具有重要意义。中国石笋古气候研究在季风和西风气候区取得了许多进展, 但在全球赤道附近的研究尚有待加强, 这可能是非常复杂而又充满挑战和机遇的研究工作, 对理解轨道-千年尺度变化、低纬变化与全球气候变化的关系至关重要。此外, 东亚季风虽然有许多特有的动力学机制和规律, 但毕竟是整个亚洲季风的一部分: 从南半球的马斯克林高压-澳洲北部、穿过赤道、经印度洋-孟加拉湾-南海、到整个中国东部。一个地点的研究应该以整个季风系统为背景, 才能够避免“盲人摸象”的片面性。近来, 中国石笋学界正在印度、马斯克林高压区、东南亚和澳大利亚等地区展开研究工作, 这既是面向全球气候变化研究的一个重要方面, 也是全面理解亚洲季风的需要。最近, 南印度洋马斯克林高压区石笋记录的最新进展显示, 全新世千年-百年尺度上的变化(或事件)幅度显著大于末次冰期, 与格陵兰冰芯记录相反(Weber等, 2014; Bakker等, 2017; Li H等, 2018; 李瀚瑛等, 2019)。一种可能的假说便是冰期中的千年事件由北半球高纬地区触发(Broecker, 1998), 而间冰期的事件则由南半球(Bakker等, 2017)或低纬地区(汪品先, 2006)触发。如果真是如此, 要理解全新世亚洲季风的气候变化及事件则需要去南半球或低纬地区寻求至少部分的答案了。

国际上古气候研究领域还存在许多“经典”的科学问题, 如“10万年周期困惑”(Hays等, 1976)、“深海氧同位素11阶段难题”(Marine Oxygen Isotope Stage (MIS) 11 problem)(Imbrie等, 1993)等等。中国石笋界在这些科学前沿已经有所作为, 也应该继续有新的突破。同样, 中国地区也存在许多未解之谜。例如, 东亚季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录由岁差周期(~ 2.3 万年)主导, 缺少冰期-间冰期的10万年周期; 而海洋和黄土、湖泊等记录却表明, 包括印度季风和东亚季风在内的亚洲季风气候变化不仅具有显著的岁差周期, 而且具有主导的10万年周期。是什么因素导致了这种差异呢? 这是“中国的10万年周期困惑”(Chinese 100ka Problem)。另外, 国际上有个“中布容气候转型(Mid-Brunhes Climate Shift, Berger和Wefer, 2003)”, 即中布容事件(Mid-Brunhes

Event, 简称MBE)发生(425ka BP左右)之后, 冰期-间冰期旋回的幅度发生了显著增加(Jansen等, 1986); 中国黄土记录中则有个类似的“深海氧同位素13阶段气候转型”(MIS 13 Climate Shift): 500ka BP之后, 黄土的磁化率(及其指示的夏季风降水)显著增加(如Sun等, 2006)。但在另一方面, 黄土高原周边的洞穴(宁夏南山洞和青海仙女洞)石笋研究发现, 50万年之前广泛生长的石笋在此气候转型后基本停止了生长, 这提出了一个新的“50万年难题”(500ka BP Problem)。总之, 无论国际国内都有许多重要的科学问题有待中国石笋古气候界去努力探索和研究。

4.6 面向社会重大需求

石笋古气候科学研究的最为重要的“出口”之一应该是社会重大需求。如何面向社会重大需求? 石笋古气候界应该努力思考并有所作为。例如, 查明当前温暖期在自然演变过程中的阶段和位置、通过高分辨率的石笋记录研究其可能的历史相似型(如MIS 11, Zhao等, 2019), 以及过去温暖期的气候变化的主要规律和机制, 来理解目前的气候变化、未来趋势和场景。现代器测记录时段内气候受到自然因素和人类活动的共同作用、两者难以区分。十年前, Zhang等(2008)在其《Science》论文的结语中, 针对20世纪晚期开始的亚洲季风减弱和温度上升的这一现象, 就有过深刻的表述: “该地区20世纪晚期以来的降水和温度变化有可能很大程度上是由人类 CO_2 和气溶胶排放引起的, 但做出这一结论的关键证据并不是我们的20世纪晚期以来石笋记录中的趋势(因为器测记录也有同样的趋势), 而是石笋和其他地质记录在更早时段中所确立的自然气候变化的相互关系, 正是这种关系使得我们能够辨识20世纪晚期以来的趋势是不同于自然变化的异常”。

随着技术不断的发展, 石笋古气候研究已经从过去的气候尺度发展到目前的可以研究天气尺度变化的阶段(如Tan等, 2013; Li等, 2017; Zhang等, 2018b; Zhao等, 2018)。现代器测记录时间较短, 难以研究外强迫和地球系统内振荡要素在不同条件下对亚洲季风等气候系统变化的影响。石笋研究有其优势, 例如通过不同典型气候时段(冰盛期、YD事件、早-中全新世、小冰期、中世纪气候异常期和近代增温期)的亚洲季风高分辨率记录的研究, 揭示天气-气候变化的幅度、变率、周期和趋势, 特别是年代际周期(Li等, 2017), 将

有可能查明目前亚洲季风的年代际周期的特征、相位、特别是未来年代际的趋势。这方面研究的社会经济意义不言而喻。

5 结语

从全球范围来看, 真正科学意义上的洞穴石笋及其古气候研究始于20世纪60年代初, 整个60~70年代是石笋古气候研究在欧、美等西方国家的起步阶段, 奠定了该领域的一些重要基础。改革开放后, 中国石笋古气候研究在80~90年代中期逐步开展起来, 这一时期虽然总体研究水平与国际水平有较大的差距, 但为中国石笋古气候研究打下了良好的研究基础, 培养了人才队伍。进入21世纪, 在经历了20年的淀积后, 中国石笋古气候研究在开放合作的基础上, 迎来了蓬勃发展和真正意义上的飞跃, 产生了许多有重大国际影响的成果; 在相关技术和研究水平上已经迈向国际前沿。2011年, 时任中国第四纪科学研究会理事长的丁仲礼先生, 对中国石笋界提出了十分殷切的希望: “以前我们讲全球变化的三大支柱: 冰芯、黄土、海洋记录。石笋记录是第四大支柱, 并且可能是最重要的支柱。”回顾历史、展望未来, 中国石笋界一定能够将这一重要全球变化的“支柱”树立起来, 并站上国际前沿。这是一个任重道远的使命, 需要中国石笋界的共同奋斗。

致谢 感谢谭明、汪永进、胡超涌、蔡演军和谭亮成的帮助和对初稿提出的许多建设性修改意见。

参考文献

- 班凤梅, 潘根兴, 蔡炳贵, 朱健, 谭明. 2009. 北京石花洞洞滴水硫酸根浓度的时空变化及其意义. 中国岩溶, 28: 243–248
- 陈建徽, 饶志国, 刘建宝, 黄伟, Feng S, 董广辉, 胡玉, 许清海, 陈发虎. 2016. 全新世东亚夏季风最强盛期出现在何时?——兼论中国南方石笋氧同位素的古气候意义. 中国科学: 地球科学, 46: 1494–1504
- 陈跃, 黄培华, 朱洪山. 1986. 北京周口店地区洞穴内第四纪石笋的同位素古温度研究. 科学通报, 20: 1576–1578
- 程海, 艾思本, 王先锋, 汪永进, 孔兴功, 袁道先, 张美良, 林玉石, 覃嘉铭, 冉景丞. 2005. 中国南方石笋氧同位素记录的重要意义. 第四纪研究, 25: 157–163

- 崔梦月, 洪晖, 孙晓双, 姜修洋, 蔡炳贵. 2018. 福建仙云洞石笋记录的新仙女木突变事件结束时的缓变特征. 第四纪研究, 38: 711–719
- 杜雅娟, 冯添, 康志海. 2013. 北方季风边缘区洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列预测初步研究. 科学通报, 58: 254–259
- 方念乔, 胡超涌. 2008. 石笋流体包裹体中的惰性气体及其在重建长江中游古温度变化中的作用. 地学前缘, 15: 132–137
- 洪阿实, 彭子成, 李平. 1995. 洞穴石笋占温度的同位素地球化学方法. 地球科学进展, 10: 348–352
- 胡豪然, 钱维宏. 2007. 东亚夏季风北边缘的确认. 自然科学进展, 17: 57–65
- 胡尊语, 覃荣蓓, 樊仁为, 王孟禹, 胡超涌. 2018. 湖北清江和尚洞石笋色度对温度的响应. 第四纪研究, 38: 1487–1493
- 黄俊华. 1992. 湖北崇阳狮泉洞第四纪石笋的碳氧同位素特征及古气候研究. 中国岩溶, 11: 245–249
- 黄仁海. 1994. 贵州多缤洞沉积物的沉积环境特征. 见: 宋林华, 丁怀元, 编. 喀斯特与洞穴风景旅游资源研究. 北京: 地震出版社. 99–103
- 李彬. 1994. 洞穴化学沉积物中 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 对环境变迁的示踪意义. 中国岩溶, 13: 17–24
- 李彬, 袁道先, Stein-Erik L, 覃嘉明, 林玉石. 1998. 桂林盘龙洞石笋中新仙女木事件及全新世气候变化记录. 地质学报, 72: 94
- 李彬, 袁道先, 林玉石, 覃嘉铭, 张美良. 2000. 桂林地区降水、洞穴滴水及现代洞穴碳酸盐碳氧同位素研究及其环境意义. 中国科学: 地球科学, 30: 81–87
- 李东, 谭亮成, 郭飞, 蔡演军, 孙有斌, 薛刚, 成星, 晏宏, 程海, 高永利. 2019. Avaatech XRF岩芯扫描分析方法在石笋Sr/Ca测试中的应用. 中国科学: 地球科学, 49: 1014–1023
- 李瀚瑛, Sinha A, 程海, Spötl C, 宁有丰. 2019. 西南印度洋罗德里格斯岛石笋记录的新仙女木事件. 第四纪研究, 39: 1006–1017
- 李瀚瑛, 程海, 王健, 田野, 宁有丰. 2018. 激光诱导击穿光谱仪在古气候研究中的应用: 建立石笋微量元素记录. 第四纪研究, 38: 1549–1551
- 李红春, 顾德隆, 陈文寄, 李铁英. 1997. 利用洞穴群的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 重建3000a以来北京地区古气候和古环境——石花洞研究系列之三. 地震地质, 19: 77–85
- 李红春, 顾德隆, 陈文寄, 袁道先, 李铁英. 1998. 高分辨率洞穴石笋中稳定同位素应用——北京元大都建立后对森林资源的破坏—— $\delta^{13}\text{C}$ 记录. 地质论评, 44: 456–462
- 李俊云, 李廷勇, 王建力, 向晓晶, 陈昀暄, 李玄. 2013. 重庆芙蓉洞土壤带Mg和Sr元素特征及其环境意义. 中国科学: 地球科学, 43: 1667–1676
- 李平, 彭子成, 文启彬, 李玉成, 杨辉, 洪阿实, 许志峰, 王明亮, 业渝光, 和杰, 刁少波. 1996. 福建宁化天鹅洞石笋年代和古温度. 沉积学报, 14: 149–154
- 廖鑫, 胡超涌, 李成展, 张格格, 高金荣, 黄俊华. 2014. 石笋碳酸盐假

- 性热释光: 古环境的新指标. 地球科学——中国地质大学学报, 39: 443–450
- 林玉石, 张美良, 覃嘉铭. 1996. 桂林盘龙洞石笋地质时代的划分. 中国岩溶, 15: 167–173
- 刘东生, 谭明, 秦小光, 赵树森, 李铁英, 吕金波. 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. 第四纪研究, 17: 41–51
- 刘育燕, 何锦发. 1990. 桂林胡子材生化学沉积物(石笋)的古温度研究. 地球科学, 6: 689–696
- 刘浴辉, 唐国强, 凌潇潇, 胡超涌, 李献华. 2015. 二次离子质谱技术在季节分辨石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 分析中的应用. 中国科学: 地球科学, 45: 1316–1323
- 罗维均, 王世杰. 2008. 贵州凉风洞大气降水-土壤水-滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 信号传递及其意义. 科学通报, 53: 2071–2076
- 秦小光, 刘东生, 谭明, 李铁英, 吕金波, 丁仲礼, 刘嘉麒, 聂高众. 1998. 北京石花洞石笋微层尺度变化特征及气候意义——1. 微层显微特征. 中国科学: 地球科学, 28: 91–96
- 覃嘉铭. 1996. 古气候变化的石笋同位素记录研究——以桂林盘龙洞为例. 地球学报, 8: 255–260
- 谭明. 2009. 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. 第四纪研究, 29: 851–862
- 谭明. 2016. 近千年气候格局的环流背景: ENSO态的不确定性分析与再重建. 中国科学: 地球科学, 46: 657–673
- 谭明, 刘东生, 秦小光, 钟华, 李铁英, 赵树森, 李红春, 吕金波, 鲁向阳. 1997. 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. 中国岩溶, 16: 1–10
- 谭明, 刘东生. 1996. 洞穴碳酸钙沉积的古气候记录研究. 地球科学进展, 11: 388–395
- 谭明, 秦小光, 沈凇梅, 王先锋, 汪永进, 李铁英, 宋林华, 王来洪, 刘东生. 1999. 中国洞穴碳酸盐双重光性显微旋回及其意义. 科学通报, 44: 646–648
- 汤绪, 钱维宏, 梁萍. 2006. 东亚夏季风边缘带的气候特征. 高原气象, 25: 375–381
- 汪品先. 2006. 低纬过程的轨道驱动. 第四纪研究, 26: 694–701
- 汪训一. 1985. 桂林茅茅头大岩洞沉积物的放射性年龄及氧、碳同位素特征. 科学通报, 30: 528–531
- 汪永进, 陈琪, 刘泽纯, 陈晔, 周春林, 陆从伦. 1997. 南京汤山溶洞石笋连续200ka古气候记录. 科学通报, 42: 2093–2097
- 汪永进, 吴江莹, 许汉奎, 穆西南. 2000. 南京汤山洞穴石笋稳定同位素指示的气候与环境意义. 地质学报, 74: 333–338
- 王世杰, 罗维均, 刘秀明, 谢兴能, 周运超, 黎廷宇等. 2009. 贵州七星洞系统中水文地球化学特征对滴水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响及其意义. 地学前缘, 16: 66–76
- 王新中, 班凤梅, 潘根兴. 2005. 洞穴滴水地球化学的空间和时间变化及其控制因素——以北京石花洞为例. 第四纪研究, 25: 258–264
- 王兆荣, 彭子成, 孙卫东, 倪守斌. 1998. 晚更新世浙江临安石笋古气候和海平面变化研究. 地质地球化学, 1: 37–40
- 王兆荣, 支霞臣, 张汉昌, 项亮. 1996. 华北古气候与海面变化的初步研究. 科技通报, 12: 343–346
- 吴江莹, 汪永进, 程海, Edwards R L. 2009. 葫芦洞石笋记录的19.9–17.1 ka BP东亚夏季风增强事件. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 61–69
- 徐宏祖. 1980. 褚绍唐, 吴应寿, 整理. 徐霞客游记. 上海: 上海古籍出版社. 182
- 严正. 1980. 贵州桐梓某第四纪洞穴钟乳石的氧、碳稳定同位素比值及其古温度的初步测定. 地震地质, 2: 68
- 袁道先. 1995. 岩溶作用对环境变化的敏感性及其记录. 科学通报, 73: 1210–1213
- 袁道先, 覃嘉铭, 林玉石. 1999. 桂林20万年石笋高分辨率古环境重建. 桂林: 广西师范大学出版社. 32–56
- 张海伟, 程海, 蔡演军, Kathayat G, 宁有丰, Edwards R L, 孟秉霖. 2019. 赣北石笋记录的新仙女木事件. 第四纪研究, 39: 994–1005
- 张美良, 林玉石, 覃嘉铭. 1999. 桂林水南洞石笋的沉积学特征. 沉积学报, 17: 233–239
- 张美良, 朱晓燕, 林玉石, 田明中, 王华. 2007. 洞穴滴(流)水的沉积及溶-侵蚀作用——以桂林盘龙洞为例. 中国岩溶, 26: 326–333
- 张美良, 朱晓燕, 吴夏, 潘谋成, 阳和平. 2015. 洞穴次生化学碳酸盐沉积物——石笋的气候替代指标的意义与不确定性因素. 地球与环境, 43: 138–151
- 张寿越, 赵树森, 何宇彬. 1985. 中国大陆东部洞穴沉积物的Th/U年代及古环境研究. 地球科学, 10: 65–72
- 张英俊, 缪钟灵, 毛健全, 典章. 1985. 应用岩溶学及洞穴学. 贵阳: 贵州人民出版社. 244
- 赵景耀, 程海. 2017. 激光扫描共聚焦显微镜在古气候纹层学的应用. 第四纪研究, 37: 1472–1474
- 赵景耀, 杨琰, 彭涛, 郭延伟, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 刘肖, 李建仓, 凌新有, 张志钦. 2014. 河南鸡冠洞降水、滴水 and 现生碳酸钙的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其环流意义. 第四纪研究, 34: 1106–1116
- 赵树森, 刘明林, 乔广生. 1989. 中国东部喀斯特洞穴沉积物铀系年代. 中国岩溶, 8: 53–61
- 周运超, 王世杰, 谢兴能, 罗维均, 黎廷宇. 2004. 贵州4个洞穴滴水对大气降雨响应的动力学及其意义. 科学通报, 49: 2220–2227
- 朱洪山, 张巽. 1992. 44万年以来北京地区石笋古温度记录. 科学通报, 20: 1880–1884
- 朱学稳. 1988. 桂林岩溶地貌与洞穴研究. 北京: 地质出版社. 96–131
- Bakker P, Clark P U, Gollledge N R, Schmittner A, Weber M E. 2017. Centennial-scale Holocene climate variations amplified by Antarctic ice sheet discharge. *Nature*, 541: 72–76
- Barkan E, Affek H P, Luz B, Bergel S J, Voarintsoa N R G, Musan I. 2019. Calibration of $\delta^{17}\text{O}$ and $^{17}\text{O}_{\text{excess}}$ values of three international

- standards: IAEA-603, NBS19 and NBS18. *Rapid Commun Mass Spectrom*, 33: 737–740
- Barkan E, Musan I, Luz B. 2015. High-precision measurements of $\delta^{17}\text{O}$ and $^{17}\text{O}_{\text{excess}}$ of NBS19 and NBS18. *Rapid Commun Mass Spectrom*, 29: 2219–2224
- Barker S, Knorr G, Edwards R L, Parrenin F, Putnam A E, Skinner L C, Wolff E, Ziegler M. 2011. 800000 years of abrupt climate variability. *Science*, 334: 347–351
- Battisti D S, Ding Q, Roe G H. 2014. Coherent Pan-Asian climatic and isotopic response to orbital forcing of tropical insolation. *J Geophys Res-Atmos*, 119: 11997–12020
- Berger A. 1988. Milankovitch theory and climate. *Rev Geophys*, 26: 624–657
- Berger W H, Wefer G. 2003. On the dynamics of the ice ages: Stage-11 paradox, mid-Brunhes climate shift, and 100-ky cycle. *Geophys Monogr-Am Geophys Union*, 137: 41–60
- Bond G, Kromer B, Beer J, Muscheler R, Evans M N, Showers W, Hoffmann S, Lotti-Bond R, Hajdas I, Bonani G. 2001. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 294: 2130–2136
- Broecker W S. 1998. Paleocirculation during the Last Deglaciation: A bipolar seesaw? *Paleoceanography*, 13: 119–121
- Broecker W S, van Donk J. 1970. Insolation changes, ice volumes, and the O^{18} record in deep-sea cores. *Rev Geophys*, 8: 169–197
- Broecker W S, Olson E A, Orr P C. 1960. Radiocarbon measurements and annual rings in cave formations. *Nature*, 185: 93–94
- Buizert C, Cuffey K M, Severinghaus J P, Baggenstos D, Fudge T J, Steig E J, Markle B R, Winstrup M, Rhodes R H, Brook E J, Sowers T A, Clow G D, Cheng H, Edwards R L, Sigl M, McConnell J R, Taylor K C. 2015. The WAIS Divide deep ice core WD2014 chronology—Part 1: Methane synchronization (68–31 ka BP) and the gas age-ice age difference. *Clim Past*, 11: 153–173
- Cai B G, Pumijumnong N, Tan M, Muangsong C, Kong X G, Jiang X Y, Nan S L. 2010. Effects of intraseasonal variation of summer monsoon rainfall on stable isotope and growth rate of a stalagmite from northwestern Thailand. *J Geophys Res*, 115: D21104
- Cai B, Zhu J, Ban F, Tan M. 2011. Intra-annual variation of the calcite deposition rate of drip water in Shihua Cave, Beijing, China and its implications for palaeoclimatic reconstructions. *Boreas*, 40: 525–535
- Cai Y J, An Z S, Cheng H, Edwards R L, Kelly M J, Liu W G, Wang X F, Shen C C. 2006. High-resolution absolute-dated Indian Monsoon record between 53 and 36 ka from Xiaobailong Cave, southwestern China. *Geology*, 34: 621–624
- Cai Y J, Fung I Y, Edwards R L, An Z S, Cheng H, Lee J E, Tan L C, Shen C C, Wang X F, Day J A, Zhou W J, Kelly M J, Chiang J C H. 2015. Variability of stalagmite-inferred Indian monsoon precipitation over the past 252000 y. *Proc Natl Acad Sci USA*, 112: 2954–2959
- Cai Y J, Tan L C, Cheng H, An Z, Edwards R L, Kelly M J, Kong X, Wang X. 2010. The variation of summer monsoon precipitation in central China since the last deglaciation. *Earth Planet Sci Lett*, 291: 21–31
- Cai Y, Chiang J C H, Breitenbach S F M, Tan L, Cheng H, Edwards R L, An Z. 2017. Holocene moisture changes in western China, Central Asia, inferred from stalagmites. *Quat Sci Rev*, 158: 15–28
- Chen C J, Li T Y. 2018. Geochemical characteristics of cave drip water respond to ENSO based on a 6-year monitoring work in Yangkou Cave, Southwest China. *J Hydrol*, 561: 896–907
- Chen S, Wang Y, Cheng H, Edwards R L, Wang X, Kong X, Liu D. 2016. Strong coupling of Asian Monsoon and Antarctic climates on sub-orbital timescales. *Sci Rep*, 6: 32995
- Cheng H, Edwards R L, Hoff J, Gallup C D, Richards D A, Asmerom Y. 2000. The half-lives of uranium-234 and thorium-230. *Chem Geol*, 169: 17–33
- Cheng H, Edwards R L, Broecker W S, Denton G H, Kong X G, Wang Y J, Zhang R, Wang X F. 2009a. Ice age terminations. *Science*, 326: 248–252
- Cheng H, Edwards R L, Haug G H. 2010. Comment on “On linking climate to Chinese dynastic change: Spatial and temporal variations of monsoonal rain”. *Chin Sci Bull*, 55: 3734–3737
- Cheng H, Lawrence Edwards R, Shen C C, Polyak V J, Asmerom Y, Woodhead J, Hellstrom J, Wang Y, Kong X, Spötl C, Wang X, Calvin Alexander Jr E. 2013a. Improvements in ^{230}Th dating, ^{230}Th and ^{234}U half-life values, and U-Th isotopic measurements by multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Earth Planet Sci Lett*, 371–372: 82–91
- Cheng H, Edwards R L, Sinha A, Spötl C, Yi L, Chen S, Kelly M, Kathayat G, Wang X, Li X, Kong X, Wang Y, Ning Y, Zhang H. 2016a. The Asian monsoon over the past 640000 years and ice age terminations. *Nature*, 534: 640–646
- Cheng H, Edwards R L, Southon J, Matsumoto K, Feinberg J M, Sinha A, Zhou W, Li H, Li X, Xu Y, Chen S, Tan M, Wang Q, Wang Y J, Ning Y F. 2018. Atmospheric $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ changes during the last glacial period from Hulu Cave. *Science*, 362: 1293–1297
- Cheng H, Edwards R L, Wang Y, Kong X, Ming Y, Kelly M J, Wang X, Gallup C D, Liu W. 2006. A penultimate glacial monsoon record from Hulu Cave and two-phase glacial terminations. *Geology*, 34: 217–220
- Cheng H, Fleitmann D, Edwards R L, Wang X, Cruz F W, Auler A S, Mangini A, Wang Y, Kong X, Burns S J, Matter A. 2009b. Timing and structure of the 8.2 kyr B.P. event inferred from $\delta^{18}\text{O}$ records of

- stalagmites from China, Oman, and Brazil. *Geology*, 37: 1007–1010
- Cheng H, Sinha A, Colman S M. 2012c. Will summer rain increase or decrease in monsoon regions? *PAGES News*, 20: 27
- Cheng H, Sinha A, Cruz F W, Wang X, Edwards R L, d'Horta F M, Ribas C C, Vuille M, Stott L D, Auler A S. 2013b. Climate change patterns in Amazonia and biodiversity. *Nat Commun*, 4: 1411
- Cheng H, Sinha A, Verheyden S, Nader F H, Li X L, Zhang P Z, Yin J J, Yi L, Peng Y B, Rao Z G, Ning Y F, Edwards R L. 2015. The climate variability in northern Levant over the past 20000 years. *Geophys Res Lett*, 42: 8641–8650
- Cheng H, Sinha A, Wang X, Cruz F W, Edwards R L. 2012a. The Global Paleomonsoon as seen through speleothem records from Asia and the Americas. *Clim Dyn*, 39: 1045–1062
- Cheng H, Spötl C, Breitenbach S F M, Sinha A, Wassenburg J A, Jochum K P, Scholz D, Li X, Yi L, Peng Y, Lv Y, Zhang P, Votintseva A, Loginov V, Ning Y, Kathayat G, Edwards R L. 2016b. Climate variations of Central Asia on orbital to millennial timescales. *Sci Rep*, 6: 36975
- Cheng H, Springer G S, Sinha A, Hardt B F, Yi L, Li H Y, Tian Y, Li X L, Rowe H D, Kathayat G, Ning Y F, Edwards R L. 2019. Eastern North American climate in phase with fall insolation throughout the last three glacial-interglacial cycles. *Earth Planet Sci Lett*, 522: 125–134
- Cheng H, Zhang P Z, Spötl C, Edwards R L, Cai Y J, Zhang D Z, Sang W C, Tan M, An Z S. 2012b. The climatic cyclicity in semiarid-arid central Asia over the past 500000 years. *Geophys Res Lett*, 39: L01705
- Cherdintsev V V, Kazachevskiy I V, Kuz'mina Y A. 1965. Age of Pleistocene carbonate determined from the isotopes of thorium and uranium. *Geochem Int*, 2: 749
- Chiang J C H, Fung I Y, Wu C H, Cai Y, Edman J P, Liu Y, Day J A, Bhattacharya T, Mondal Y, Labrousse C A. 2015. Role of seasonal transitions and westerly jets in East Asian paleoclimate. *Quat Sci Rev*, 108: 111–129
- Chou Y M, Jiang X, Liu Q, Hu H M, Wu C C, Liu J, Jiang Z X, Lee T Q, Wang C C, Song Y F, Chiang C C, Tan L, Lone M A, Pan Y, Zhu R, He Y, Chou Y C, Tan A H, Roberts A P, Zhao X, Shen C C. 2018. Multidecadally resolved polarity oscillations during a geomagnetic excursion. *Proc Natl Acad Sci USA*, 115: 8913–8918
- Croll J. 1875. *Climate and Time in Their Geological relations: A Theory of Secular Changes of the Earth's Climate*. New York: Cambridge University Press
- Cruz F W, Burns S J, Karmann I, Sharp W D, Vuille M, Cardoso A O, Ferrari J A, Silva Dias P L, Viana O. 2005. Insolation-driven changes in atmospheric circulation over the past 116000 years in subtropical Brazil. *Nature*, 434: 63–66
- Du W J, Cheng H, Xu Y, Yang X L, Zhang P Z, Sha L J, Li H Y, Zhu X Y, Zhang M L, Strikis N M, Cruz F W, Edwards R L, Zhang H, Ning Y. 2019. Timing and structure of the weak Asian Monsoon event about 73000 years ago. *Quat Geochronol*, 53: 101003
- Duan F, Liu D, Cheng H, Wang X, Wang Y, Kong X, Chen S. 2014. A high-resolution monsoon record of millennial-scale oscillations during Late MIS 3 from Wulu Cave, south-west China. *J Quat Sci*, 29: 83–90
- Duan W, Cai B, Tan M, Liu H, Zhang Y. 2012. The growth mechanism of the aragonitic stalagmite laminae from Yunnan Xianren Cave, SW China revealed by cave monitoring. *Boreas*, 41: 113–123
- Duan W, Cheng H, Tan M, Edwards R L. 2016a. Onset and duration of transitions into greenland Interstadials 15.2 and 14 in northern china constrained by an annually laminated stalagmite. *Sci Rep*, 6: 20844
- Duan W, Ruan J, Luo W, Li T, Tian L, Zeng G, Zhang D, Bai Y, Li J, Tao T, Zhang P, Baker A, Tan M. 2016b. The transfer of seasonal isotopic variability between precipitation and drip water at eight caves in the monsoon regions of China. *Geochim Cosmochim Acta*, 183: 250–266
- Duplessy J C, Labeyrie J, Lalou C, Nguyen H V. 1970. Continental climatic variations between 130000 and 90000 years BP. *Nature*, 226: 631–633
- Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H, Yuan D X, Cai Y J, Zhang M L, Lin Y S, Qing J M, An Z S, Revenaugh J. 2005. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. *Earth Planet Sci Lett*, 233: 71–86
- Emiliani C. 1955. Pleistocene temperatures. *J Geol*, 63: 538–578
- Fantidis J, Ehrlert D H. 1970. Variations of the carbon and oxygen isotopic composition in stalagmites and stalactites: Evidence of non-equilibrium isotopic fractionation. *Earth Planet Sci Lett*, 10: 136–144
- Fleming J R. 2006. James Croll in Context: The Encounter between climate dynamics and geology in the second half of the Nineteenth Century. *Hist Meteorol*, 3: 43–54
- Fornaca-Rinaldi G, Panichi C, Tongiorgi E. 1968. Some causes of the variation of the isotopic composition of carbon and oxygen in cave concretions. *Earth Planet Sci Lett*, 4: 321–324
- Fornaca-Rinaldi G. 1968. $^{230}\text{Th}/^{234}\text{Th}$ dating of cave concretions. *Earth Planet Sci Lett*, 5: 120–122
- Galimov E M, Grinenko V A. 1965. The effect of leaching under surface conditions on the isotopic composition of carbon in secondary calcite. *Geochem Int*, 1: 79–82
- Gascoyne M. 1983. Trace-element partition coefficients in the calcite-water system and their paleoclimatic significance in cave studies. *J Hydrol*, 61: 213–222
- Han L Y, Li T Y, Cheng H, Edwards R L, Shen C C, Li H C, Huang C

- X, Li J Y, Yuan N, Wang H B, Zhang T T, Zhao X. 2016. Potential influence of temperature changes in the southern hemisphere on the evolution of the Asian summer monsoon during the last glacial period. *Quat Int*, 392: 239–250
- Harmon R S, Ford D C, Schwarcz H P. 1977. Interglacial chronology of the Rocky and Mackenzie Mountains based upon ^{230}Th - ^{234}U dating of calcite speleothems. *Can J Earth Sci*, 14: 2543–2552
- Harmon R S, Schwarcz H P, Ford D C, Koch D L. 1979a. An isotopic paleotemperature record for Late Wisconsinan time in northeast Iowa. *Geology*, 7: 430–433
- Harmon R S, Thompson P, Schwarcz H P, Ford D C. 1978a. Late Pleistocene paleoclimates of North America as inferred from stable isotope studies of speleothems. *Quat Res*, 9: 54–70
- Harmon R S, Schwarcz H P, Ford D C. 1978b. Stable isotope geochemistry of speleothems and cave waters from the Flint Ridge-Mammoth Cave System: Implications for terrestrial climate change during the period 230000 to 100000 years B.P. *J Geol*, 86: 373–384
- Harmon R S, Schwarcz H P, O'Neil J R. 1979b. D/h ratios in speleothem fluid inclusions: A guide to variations in the isotopic composition of meteoric precipitation? *Earth Planet Sci Lett*, 42: 254–266
- Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. 1976. Variations in the Earth's orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science*, 194: 1121–1132
- Henderson G M. 2006. Climate: Caving in to new chronologies. *Science*, 313: 620–622
- Hendy C H. 1971. The isotopic geochemistry of speleothems—I. The calculation of the effects of different modes of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as palaeoclimatic indicators. *Geochim Cosmochim Acta*, 35: 801–824
- Hendy C H, Wilson A T. 1968. Palaeoclimatic data from speleothems. *Nature*, 219: 48–51
- Hu C, Henderson G M, Huang J, Xie S, Sun Y, Johnson K R. 2008. Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records. *Earth Planet Sci Lett*, 266: 221–232
- Imbrie J, Berger A, Boyle EA. 1993. On the structure and origin of major glaciation cycles. Part 2: The 100000-year cycle. *Paleoceanography*, 8: 699–735
- Imbrie J, Hays J D, Martinson D G, McIntyre A, Mix A C, Morley J J, Pisias N G, Prell W L, Shackleton N J. 1984. The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record. In: Berger A L, ed. *Milankovitch and Climate*, Part I. Dordrecht: D. Reidel Publ. 269–305
- Jansen J H F, Kuijpers A, Troelstra S R. 1986. A mid-brunhes climatic event: Long-term changes in global atmosphere and ocean circulation. *Science*, 232: 619–622
- Jiang X, Wang X, He Y, Hu H M, Li Z, Spötl C, Shen C C. 2016. Precisely dated multidecadally resolved asian summer monsoon dynamics 113.5–86.6 thousand years ago. *Quat Sci Rev*, 143: 1–12
- Johnson K R, Hu C, Belshaw N S, Henderson G M. 2006. Seasonal trace-element and stable-isotope variations in a Chinese speleothem: The potential for high-resolution paleomonsoon reconstruction. *Earth Planet Sci Lett*, 244: 394–407
- Jouzel J, Masson-Delmotte V, Cattani O, Dreyfus G, Falourd S, Hoffmann G, Minster B, Nouet J, Barnola J M, Chappellaz J, Fischer H, Gallet J C, Johnsen S, Leuenberger M, Loulergue L, Luethi D, Oerter H, Parrenin F, Raisbeck G, Raynaud D, Schilt A, Schwander J, Selmo E, Souchez R, Spahni R, Stauffer B, Steffensen J P, Stenni B, Stocker T F, Tison J L, Werner M, Wolff E W. 2007. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800000 years. *Science*, 317: 793–796
- Kathayat G, Cheng H, Sinha A, Berkelhammer M, Zhang H, Duan P, Li H, Li X, Ning Y, Edwards R L. 2018. Evaluating the timing and structure of the 4.2 ka event in the Indian summer monsoon domain from an annually resolved speleothem record from Northeast India. *Clim Past*, 14: 1869–1879
- Kathayat G, Cheng H, Sinha A, Spötl C, Edwards R L, Zhang H, Li X, Yi L, Ning Y, Cai Y, Lui W L, Breitenbach S F M. 2016. Indian monsoon variability on millennial-orbital timescales. *Sci Rep*, 6: 24374
- Kathayat G, Cheng H, Sinha A, Yi L, Li X, Zhang H, Li H, Ning Y, Edwards R L. 2017. The Indian monsoon variability and civilization changes in the Indian subcontinent. *Sci Adv*, 3: e1701296
- Kim S T, O'Neil J R. 1997. Equilibrium and nonequilibrium oxygen isotope effects in synthetic carbonates. *Geochim Cosmochim Acta*, 61: 3461–3475
- Kong W, Swenson L M, Chiang J C H. 2017. Seasonal transitions and the westerly jet in the Holocene East Asian summer monsoon. *J Clim*, 30: 3343–3365
- Kuo T S, Liu Z Q, Li H C, Wan N J, Shen C C, Ku T L. 2011. Climate and environmental changes during the past millennium in central western Guizhou, China as recorded by Stalagmite ZJD-21. *J Asian Earth Sci*, 40: 1111–1120
- Kutzbach J E. 1981. Monsoon climate of the early Holocene: Climate experiment with the earth's orbital parameters for 9000 years ago. *Science*, 214: 59–61
- Labeyrie J, Duplessy J C, Delibrais G, Letolle R. 1967. Etude des temperatures des climats anciens par la mesure de l'oxygène-18 du carbone-13 et du carbone-14 dans les concrétions des cavernes. In: *Symposium on Radioactive Dating and Methods of Low Level Counting*. Vienna: Proceedings of the International Atomic Energy Agency. IAEA-SM87/5. 153–160
- Lachniet M S, Denniston R F, Asmerom Y, Polyak V J. 2014. Orbital

- control of western North America atmospheric circulation and climate over two glacial cycles. *Nat Commun*, 5: 3805
- Laskar J, Robutel P, Joutel F, Gastineau M, Correia A C M, Levrard B. 2004. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astron Astr*, 428: 261–285
- Li H, Cheng H, Sinha A, Kathayat G, Spötl C, André A A, Meunier A, Biswas J, Duan P, Ning Y, Edwards R L. 2018. Hydro-climatic variability in the southwestern Indian Ocean between 6000 and 3000 years ago. *Clim Past*, 14: 1881–1891
- Li J Y, Li T Y, Wang J L, Xiang X J, Chen Y X, Li X. 2013. Characteristics and environmental significance of Ca, Mg, and Sr in the soil infiltrating water overlying the Furong Cave, Chongqing, China. *Sci China Earth Sci*, 56: 2126–2134
- Li T Y, Li H C, Xiang X J, Kuo T S, Li J Y, Zhou F L, Chen H L, Peng L L. 2012. Transportation characteristics of $\delta^{13}\text{C}$ in the plants-soil-bedrock-cave system in Chongqing karst area. *Sci China Earth Sci*, 55: 685–694
- Li T Y, Shen C C, Huang L J, Jiang X Y, Yang X L, Mii H S, Lee S Y, Lo L. 2014. Stalagmite-inferred variability of the Asian summer monsoon during the penultimate glacial-interglacial period. *Clim Past*, 10: 1211–1219
- Li T Y, Yuan D X, Li H C, Yang Y, Wang J L, Wang X Y, Li J Y, Qin J M, Zhang M L, Lin Y S. 2007. High-resolution climate variability of southwest China during 57–70 ka reflected in a stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record from Xinya Cave. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 50: 1202–1208
- Li X L, Cui X P, He D, Liao J, Hu C. 2018. Evaluation of the Heshang Cave stalagmite calcium isotope composition as a paleohydrologic proxy by comparison with the instrumental precipitation record. *Sci Rep*, 8: 2615
- Li X, Cheng H, Tan L, Ban F, Sinha A, Duan W, Li H, Zhang H, Ning Y, Kathayat G, Edwards R L. 2017. The East Asian summer monsoon variability over the last 145 years inferred from the Shihua Cave record, North China. *Sci Rep*, 7: 7078
- Lisiecki L E, Raymo M E. 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, 20: PA1003
- Liu D, Wang Y, Cheng H, Edwards R L, Kong X, Chen S, Liu S. 2018. Contrasting patterns in abrupt asian summer monsoon changes in the last glacial period and the holocene. *Paleoceanogr Paleoclimatol*, 33: 214–226
- Liu D, Wang Y, Cheng H, Edwards R L, Kong X, Wang X, Wu J, Chen S. 2008. A detailed comparison of asian monsoon intensity and greenland temperature during the allerød and Younger Dryas events. *Earth Planet Sci Lett*, 272: 691–697
- Liu D, Wang Y, Cheng H, Kong X, Chen S. 2013. Centennial-scale Asian Monsoon variability during the mid-Younger Dryas from Qingtian Cave, central China. *Quat Res*, 80: 199–206
- Liu X, Rao Z, Shen C C, Liu J, Chen J, Chen S, Wang X, Chen F. 2019. Holocene solar activity imprint on centennial to multidecadal scale hydroclimatic oscillations in arid central Asia. *J Geophys Res-Atmos*, 124: 2562–2573
- Liu Y H, Henderson G M, Hu C Y, Mason A J, Charnley N, Johnson K R, Xie S C. 2013. Links between the East Asian monsoon and North Atlantic climate during the 8200 year event. *Nat Geosci*, 6: 117–120
- Ma Z B, Cheng H, Tan M, Edwards R L, Li H C, You C F, Duan W H, Wang X, Kelly M J. 2012. Timing and structure of the younger dryas event in northern China. *Quat Sci Rev*, 41: 83–93
- Mahata S, Bhattacharya S K, Liang M C. 2016. An improved method of high-precision determination of $\Delta^{17}\text{O}$ of CO_2 by catalyzed exchange with O_2 using hot platinum. *Rapid Commun Mass Spectrom*, 30: 119–131
- Mahata S, Bhattacharya S K, Wang C H, Liang M C. 2013. Oxygen isotope exchange between O_2 and CO_2 over hot platinum: An innovative technique for measuring $\Delta^{17}\text{O}$ in CO_2 . *Anal Chem*, 85: 6894–6901
- Maher B A. 2008. Holocene variability of the East Asian summer monsoon from Chinese cave records: A re-assessment. *Holocene*, 18: 861–866
- Meckler N. 2016. an extended yardstick for climate variability. *Nature*, 534: 626–628
- Milankovitch M. 1941. Kanon der erdbestrahlung und seine anwendung auf das eiszeiten problem. Mihaila Curcica
- Moore G W. 1952. Speleothem: A new cave term. *Natural Speleol Soc News*, 10: 2
- Overpeck J, Cole J. 2008. The rhythm of the rain. *Nature*, 451: 1061–1062
- Pausata F S R, Battisti D S, Nisancioglu K H, Bitz C M. 2011. Chinese stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ controlled by changes in the Indian monsoon during a simulated Heinrich event. *Nat Geosci*, 4: 474–480
- Raymo M E. 1997. The timing of major climate terminations. *Paleoceanography*, 12: 577–585
- Rosholt J N, Antal P S. 1962. Evaluation of the $^{231}\text{Pa}/\text{U}-^{230}\text{Th}/\text{U}$ method for dating Pleistocene carbonate rocks. *US Geol Surv Prof Paper*, 450: E108–E111
- Ruan J Y, Hu C Y. 2010. Seasonal variations and environmental controls on stalagmite calcite crystal growth in Heshang Cave, Central China. *Chin Sci Bull*, 55: 3929–3935
- Ruddiman W F. 2006. Orbital changes and climate. *Quat Sci Rev*, 25: 3092–3112
- Schaefer J M, Putnam A E, Denton G H, Kaplan M R, Birkel S, Doughty A M, Kelley S, Barrell D J A, Finkel R C, Winckler G, Anderson R F, Ninneman U S, Barker S, Schwartz R, Andersen B

- G, Schluechter C. 2015. The southern glacial maximum 65000 years ago and its unfinished termination. *Quat Sci Rev*, 114: 52–60
- Schwarcz H P, Harmon R S, Thompson P, Ford D C. 1976. Stable isotope studies of fluid inclusions in speleothems and their paleoclimatic significance. *Geochim Cosmochim Acta*, 40: 657–665
- Shen C C, Edwards R L, Cheng H, Dorale A, Thomas R B, Moran S B, Weinstein S E, Edmonds H N. 2002. Uranium and thorium isotopic and concentration measurements by magnetic sector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Chem Geol*, 185: 165–178
- Spratt R M, Lisiecki L E. 2016. A Late Pleistocene sea level stack. *Clim Past*, 12: 1079–1092
- Sun Y, Chen J, Clemens S C, Liu Q, Ji J, Tada R. 2006. East Asian monsoon variability over the last seven glacial cycles recorded by a loess sequence from the northwestern Chinese Loess Plateau. *Geochem Geophys Geosyst*, 7: Q12Q02
- Sun Z, Yang Y, Zhao J, Tian N, Feng X. 2018. Potential ENSO effects on the oxygen isotope composition of modern speleothems: Observations from Jiguan Cave, central China. *J Hydrol*, 566: 164–174
- Talma A S, Vogel J C, Partridge T C. 1974. Isotopic contents of some Transvaal speleothems and their paleoclimate significance. *South African J Sci*, 70: 135–140
- Tan L C, An Z, Huh C A, Cai Y, Shen C C, Shiao L J, Yan L, Cheng H, Edwards R L. 2014a. Cyclic precipitation variation on the western Loess Plateau of China during the past four centuries. *Sci Rep*, 4: 6381
- Tan L C, Cai Y J, Cheng H, Edwards R L, Gao Y L, Xu H, Zhang H W, An Z S. 2018a. Centennial- to decadal-scale monsoon precipitation variations in the upper Hanjiang River region, China over the past 6650 years. *Earth Planet Sci Lett*, 482: 580–590
- Tan L C, Cai Y J, An Z, Cheng H, Shen C C, Breitenbach S F M, Gao Y L, Edwards R L, Zhang H, Du Y. 2015. A Chinese cave links climate change, social impacts and human adaptation over the last 500 years. *Sci Rep*, 5: 12284
- Tan L, Cai Y, An Z, Cheng H, Shen C C, Gao Y, Edwards R L. 2017. Decreasing monsoon precipitation in southwest china during the last 240 years associated with the warming of tropical ocean. *Clim Dyn*, 48: 1769–1778
- Tan L C, Cai Y J, An Z, Yi L, Zhang H, Qin S. 2011. Climate patterns in north central China during the last 1800 yr and their possible driving force. *Clim Past*, 7: 685–692
- Tan L C, Cai Y J, Cheng H, An Z, Edwards R L. 2009. Summer monsoon precipitation variations in central China over the past 750 years derived from a high-resolution absolute-dated stalagmite. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 280: 432–439
- Tan L C, Cai Y J, Cheng H, Edwards R L, Lan J H, Zhang H W, Li D, Ma L, Zhao P, Gao Y. 2018b. High resolution monsoon precipitation changes on southeastern Tibetan Plateau over the past 2300 years. *Quat Sci Rev*, 195: 122–132
- Tan L C, Shen C C, Cai Y, Cheng H, Edwards R L. 2018c. Great flood in the middle-lower Yellow River reaches at 4000 a BP inferred from accurately-dated stalagmite records. *Chin Sci Bull*, 63: 206–208
- Tan L C, Shen C C, Cai Y, Lo L, Cheng H, An Z. 2014b. Trace-element variations in an annually layered stalagmite as recorders of climatic changes and anthropogenic pollution in Central China. *Quat Res*, 81: 181–188
- Tan L C, Song Y G, Cai Y J, An Z S, Orozbaev R, Mamadjanov Y, Edwards R L, Cheng H, Li D, Li Y. 2016. Preliminary studies of speleothem in central Asia. *Acta Geol Sin*, 90: 2279–2280
- Tan L C, Yi L, Cai Y, Shen C C, Cheng H, An Z. 2013. Quantitative temperature reconstruction based on growth rate of annually-layered stalagmite: A case study from central China. *Quat Sci Rev*, 72: 137–145
- Tan L C, Shen C C, Löwemark L, Chawchai S, Edwards R L, Cai Y J, Breitenbach S F M, Cheng H, Chou Y C, Duerrast H, Partin J W, Cai W J, Chabangborn A, Gao Y L, Kwiecien O, Wu C C, Shi Z G, Hsu H H, Wohlfarth B. 2019. Rainfall variations in central Indo-Pacific over the past 2700 y. *Proc Natl Acad Sci USA*, 6: 201903167
- Tan M. 2014. Circulation effect: Response of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ to the ENSO cycle in monsoon regions of China. *Clim Dyn*, 42: 1067–1077
- Tan M, Baker A, Genty D, Smith C, Esper J, Cai B. 2006. Applications of stalagmite laminae to paleoclimate reconstructions: Comparison with dendrochronology/climatology. *Quat Sci Rev*, 25: 2103–2117
- Tan M, Liu T, Hou J, Qin X, Zhang H, Li T. 2003. Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2650-year stalagmite record of warm season temperature. *Geophys Res Lett*, 30: 1617
- Tan M, Liu T. 1995. Stable Isotope Records of a Stalagmite from Jiguan Cave in Henan Province, China. *Sci Geol Sin*, Suppl: 281–284
- Thompson P, Schwarcz H P, Ford D C. 1974. Continental Pleistocene climatic variations from speleothem age and isotopic data. *Science*, 184: 893–895
- Thompson P, Schwarcz H P, Ford D C. 1976. Stable isotope geochemistry, geothermometry, and geochronology of speleothems from West Virginia. *Geol Soc Am Bull*, 87: 1730
- WAIS Divide Project Members. 2015. Precise interpolating phasing of abrupt climate change during the last ice age. *Nature*, 520: 661–665
- Walker M, Head M H, Berkelhammer M, Björck S, Cheng H, Cwyna L, Fisher D, Gkinis V, Long A, Lowe J, Newnham R, Rasmussen S O, Weiss H. 2018. Formal ratification of the subdivision of the Holocene series/epoch (Quaternary system/period): Two new global

- boundary stratotype sections and points (GSSPs) and three new stages/subseries. *Episodes*, 41: 213–223
- Walker M, Head M J, Lowe J, Berkelhammer M, Björck S, Cheng H, Cwynar L C, Fisher D, Gkinis V, Long A, Newnham R, Rasmussen S O, Weiss H. 2019. Subdividing the Holocene Series/Epoch: Formalization of stages/ages and subseries/subepochs, and designation of GSSPs and auxiliary stratotypes. *J Quat Sci*, 34: 173–186
- Wang C F, Bendle J A, Zhang H B, Yang Y, Liu D, Huang J, Cui J, Xie S. 2018. Holocene temperature and hydrological changes reconstructed by bacterial 3-hydroxy fatty acids in a stalagmite from central China. *Quat Sci Rev*, 192: 97–105
- Wang Q, Wang Y, Shao Q, Liang Y, Zhang Z, Kong X. 2018. Millennial-scale Asian monsoon variability during the late Marine Isotope Stage 6 from Hulu Cave, China. *Quat Res*, 90: 394–405
- Wang X, Auler A S, Edwards R L, Cheng H, Cristalli P S, Smart P L, Richards D A, Shen C C. 2004. Wet periods in northeastern Brazil over the past 210 kyr linked to distant climate anomalies. *Nature*, 432: 740–743
- Wang X, Edwards R L, Auler A S, Cheng H, Kong X, Wang Y, Cruz F W, Dorale J A, Chiang H W. 2017. Hydroclimate changes across the Amazon lowlands over the past 45000 years. *Nature*, 541: 204–207
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, An Z S, Wu J Y, Shen C C, Dorale J A. 2001. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, 294: 2345–2348
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, He Y Q, Kong X G, An Z S, Wu J Y, Kelly M J, Dykoski C A, Li X D. 2005. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 308: 854–857
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, Kong X G, Shao X H, Chen S, Wu J Y, Jiang X, Wang X, An Z. 2008. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224000 years. *Nature*, 451: 1090–1093
- Waters C N, Zalasiewicz J, Summerhayes C, Barnosky A D, Poirier C, Gałuszka A, Cearreta A, Edgeworth M, Ellis E C, Ellis M, Jeandel C, Leinfelder R, McNeill J R, Richter D B, Steffen W, Syvitski J, Vidas D, Waple M, Williams M, An Z S, Grinevald J, Odada E, Oreskes N, Wolfe A P. 2016. The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science*, 351: aad2622
- Weber M E, Clark P U, Kuhn G, Timmermann A, Spreng D, Gladstone R, Zhang X, Lohmann G, Menviel L, Chikamoto M O, Friedrich T, Ohlwein C. 2014. Millennial-scale variability in Antarctic ice-sheet discharge during the last deglaciation. *Nature*, 510: 134–138
- Wilson R M. 2016. Paleoclimate record connects Asian monsoons and ice-age cycles. *Phys Today*, 69: 13–15
- Wolff E W, Fischer H, Röthlisberger R. 2009. Glacial terminations as southern warmings without northern control. *Nat Geosci*, 2: 206–209
- Woodhead J, Reisz R, Fox D, Drysdale R, Hellstrom J, Maas R, Cheng H, Edwards R L. 2010. Speleothem climate records from deep time? Exploring the potential with an example from the Permian. *Geology*, 38: 455–458
- Yang X L, Yang H, Wang B Y, Huang L J, Shen C C, Edwards R L, Cheng H. 2019. Early-Holocene monsoon instability and climatic optimum recorded by Chinese stalagmites. *Holocene*, 29: 1059–1067
- Yang Y, Yuan D X, Cheng H, Zhang M L, Qin J M, Lin Y S, Zhu X Y, Edwards R L. 2010. Precise dating of abrupt shifts in the Asian Monsoon during the last deglaciation based on stalagmite data from Yamen Cave, Guizhou Province, China. *Sci China Earth Sci*, 53: 633–641
- Yoshimura K, Kanamitsu M, Noone D, Oki T. 2008. Historical isotope simulation using reanalysis atmospheric data. *J Geophys Res*, 113: D19108
- Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, Dykoski C A, Kelly M J, Zhang M L, Qing J M, Lin Y S, Wang Y J, Wu J Y, Dorale J A, An Z S, Cai Y J. 2004. Timing, duration, and transitions of the Last Interglacial Asian Monsoon. *Science*, 304: 575–578
- Zhang H, Cai Y, Tan L, Cheng H, Qin S, An Z, Edwards R L, Ma L. 2015. Large variations of $\delta^{13}\text{C}$ values in stalagmites from southeastern China during historical times: Implications for anthropogenic deforestation. *Boreas*, 44: 511–525
- Zhang H, Cheng H, Cai Y, Spötl C, Kathayat G, Sinha A, Edwards R L, Tan L. 2018a. Hydroclimatic variations in southeastern China during the 4.2 ka event reflected by stalagmite records. *Clim Past*, 14: 1805–1817
- Zhang H, Cheng H, Spötl C, Cai Y, Sinha A, Tan L, Yi L, Yan H, Kathayat G, Ning Y, Li X, Zhang F, Zhao J, Edwards R L. 2018b. A 200-year annually laminated stalagmite record of precipitation seasonality in southeastern China and its linkages to ENSO and PDO. *Sci Rep*, 8: 12344
- Zhang H, Griffiths M L, Chiang J C H, Kong W, Wu S, Atwood A, Huang J, Cheng H, Ning Y, Xie S. 2018c. East Asian hydroclimate modulated by the position of the westerlies during Termination I. *Science*, 362: 580–583
- Zhang H W, Brahim Y A, Li H Y, Zhao J Y, Kathayat G, Tian Y, Baker J, Wang J, Zhang F, Ning Y F, Edwards R L, Cheng H. 2019. The Asian summer monsoon: Teleconnections and forcing mechanisms—A review from Chinese speleothem $\delta^{18}\text{O}$ records. *Quaternary*, 2: 26
- Zhang P Z, Cheng H, Edwards R L, Chen F H, Wang Y J, Yang X L, Liu J, Tan M, Wang X F, Liu J H, An C L, Dai Z B, Zhou J, Zhang

- D Z, Jia J H, Jin L Y, Johnson K R. 2008. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record. *Science*, 322: 940–942
- Zhang T T, Li T Y, Cheng H, Edwards R L, Shen C C, Spötl C, Li H C, Han L Y, Li J Y, Huang C X, Zhao X. 2017. Stalagmite-inferred centennial variability of the Asian summer monsoon in southwest China between 58 and 79 ka BP. *Quat Sci Rev*, 160: 1–12
- Zhao J Y, Cheng H, Yang Y, Tan L, Spötl C, Ning Y, Zhang H, Cheng X, Sun Z, Li X, Li H, Liu W, Edwards R L. 2018. Reconstructing the western boundary variability of the Western Pacific Subtropical High over the past 200 years via Chinese cave oxygen isotope records. *Clim Dyn*, 52: 3741–3757
- Zhao K, Wang Y, Edwards R L, Cheng H, Liu D. 2010. High-resolution stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records of Asian monsoon changes in central and southern China spanning the MIS 3/2 transition. *Earth Planet Sci Lett*, 298: 191–198
- Zhao X, Cheng H, Sinha A, Zhang H, Baker J L, Chen S, Kong X, Wang Y, Edwards R L, Ning Y, Zhao J. 2019. A high-resolution speleothem record of Marine Isotope Stage 11 as a natural analog to Holocene Asian summer monsoon variations. *Geophys Res Lett*, 46, <https://doi.org/10.1029/2019GL083836>
- Zhou H, Zhao J, Feng Y, Gagan M K, Zhou G, Yan J. 2008. Distinct climate change synchronous with Heinrich event one, recorded by stable oxygen and carbon isotopic compositions in stalagmites from China. *Quat Res*, 69: 306–315
- Zhou H, Zhao J, Qing W, Feng Y, Tang J. 2011. Speleothem-derived Asian summer monsoon variations in Central China, 54–46 ka. *J Quat Sci*, 26: 781–790
- Zhu Z, Feinberg J M, Xie S, Bourne M D, Huang C, Hu C, Cheng H. 2017. Holocene ENSO-related cyclic storms recorded by magnetic minerals in speleothems of central China. *Proc Natl Acad Sci USA*, 114: 852–857

(责任编辑: 赵艳)