



海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 揭示的亚洲夏季风变化及机制综述

杨会会, 周民, 仲义, 刘青松

Variations and mechanisms of the Asian summer monsoon revealed by stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records

YANG Huihui, ZHOU Youmin, ZHONG Yi, and LIU Qingsong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023020801>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

MIS3以来黄土高原东南部石笋阶段性沉积记录的夏季风演化

Variation of East Asian summer monsoon since MIS3 recorded by an absolutely-dated stalagmite from north China
海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(5): 171–177

川东北石笋记录的334~320 ka夏季风变化与影响机制

HIGH-RESOLUTION PALEOClimATIC RECORDS OF MIS9 IN NORTHEASTERN SICHUAN, CENTRAL CHINA
海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 102–106

末次冰期山西洪洞高分辨率粒度和磁化率记录的H5事件及其气候演化意义

Heinrich-5Event revealed by high-resolution grain-size and magnetic susceptibility records and its significance of climate evolution in the last glacial at Hongtong, Shanxi, China
海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(4): 193–202

MIS13时期黄土高原东西部地区夏季风不对称演化

Unparallel MIS13 climate evolution between western and eastern Chinese Loess Plateau
海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 185–192

对数比变换在因子分析法提取东亚冬季风敏感粒级中的应用——以南黄海中部泥质区H07孔为例

APPLICATIONS OF LOGARITHM RATIO TRANSFORMATION TO EXTRACTION OF THE SENSITIVE GRAIN SIZE OF EAST ASIAN WINTER MONSOON BY THE METHOD OF FACTOR ANALYSIS: A CASE STUDY OF CORE H07 FROM THE CENTRAL MUD AREA OF THE SOUTH YELLOW SEA

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 151–161

中全新世冲绳海槽北部的水文气候变化:浮游有孔虫群落证据

The hydroclimate changes in the northern Okinawa Trough during middle Holocene: Evidence from planktonic foraminiferal assemblages

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 113–123



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨会会, 周祐民, 仲义, 等. 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 揭示的亚洲夏季风变化及机制综述 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(1): 143-155.

YANG Huihui, ZHOU Youmin, ZHONG Yi, et al. Variations and mechanisms of the Asian summer monsoon revealed by stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(1): 143-155.

石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 揭示的亚洲夏季风变化及机制综述

杨会会^{1,2}, 周祐民^{2,3}, 仲义², 刘青松^{2,3}

1. 哈尔滨工业大学环境学院, 哈尔滨 150006

2. 南方科技大学海洋科学与工程系, 深圳 518055

3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458

摘要: 亚洲夏季风 (ASM, Asian Summer Monsoon) 是全球气候系统的重要组成部分, 也是目前地球系统科学的热点问题。亚洲石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 揭示的亚洲古季风变化, 加深了我们对其时空演化机制的理解。然而, 目前东亚夏季风区和印度夏季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在不同时间尺度上的相互关系和主控因素仍存在一些争议。针对这一问题, 本文综述了东亚夏季风 (EASM, East Asian Summer Monsoon) 区和印度夏季风 (ISM, Indian Summer Monsoon) 区的高分辨率石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 发现两者在轨道尺度上都受控于岁差驱动的北半球夏季日照量的变化, 其机制涉及海陆热力差异强度、辐合强度和上升气流强度以及夏季时长的变化。这些机制共同导致了在北半球夏季日照高值期 EASM 和 ISM 区夏季降雨量增加以及降雨和石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 值负偏。在千年尺度上, EASM 区和 ISM 区的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录则响应于北大西洋区的气候变化, 具体响应机制主要有热带辐合带南移导致的印度洋水汽分馏减弱 (主要影响 ISM 区和 EASM 区), 以及西风带调节的水汽来源和降雨季节性变化 (主要影响 EASM 区)。在百年及以下尺度, EASM 区和 ISM 区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录都受到与厄尔尼诺-南方涛动有关的大尺度大气环流影响。未来在关键区域构建更多高分辨率的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录及相关的降雨指标, 将有助于理解大气环流变化与东亚夏季风区降雨的关系。

关键词: 石笋氧同位素; 东亚夏季风; 印度夏季风; 北半球日照; Heinrich 事件

中图分类号:P532

文献标识码:A

DOI: [10.16562/j.cnki.0256-1492.2023020801](https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023020801)

Variations and mechanisms of the Asian summer monsoon revealed by stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records

YANG Huihui^{1,2}, ZHOU Youmin^{2,3}, ZHONG Yi², LIU Qingsong^{2,3}

1. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China

2. Department of Ocean Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China

Abstract: The Asian summer monsoon is an important part of the global climate system and a hot issue of the earth system science. The variation of the Asian paleo-monsoon revealed by $\delta^{18}\text{O}$ data from the Asian stalagmites deepens our understanding of the mechanisms of its spatiotemporal evolution. However, the main controlling factors of the stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records in the East Asian and Indian summer monsoon regions in different time scales remain controversial. Aiming at this problem, we reviewed the high-resolution stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records in the East Asian summer monsoon (EASM) and Indian summer monsoon (ISM) regions and revealed that they are in response to the variation in the Northern Hemisphere summer insolation driven by the precession on orbital scale. The specific mechanism involves the variation of zonal sea-land thermal contrast, seasonal humidity changes and cycles in low-level convergence, and the variation of summer length. These mechanisms jointly lead to increased summer rainfall with depleted $\delta^{18}\text{O}$ in the EASM and ISM regions during high Northern Hemisphere summer insolation. On millennial scale, the stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records in EASM and ISM regions are in response to the abrupt North Atlantic climate changes consistently, by mainly the weakening of water vapor fractionation in the Indian Ocean due to southward migration of the intertropical convergence zone (mainly influenced the ISM and EASM regions) and seasonal variation of water vapor sources and rainfall amount regulated

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“末次间冰期以来地磁漂移事件的高分辨率石笋古地磁记录研究”(42074071), “轨道尺度上北太平洋中层水的演化特征及其对全球气候变化响应机制”(42274094); 深圳市科技创新委员会项目(20200925154739001); 上海佘山地球物理国家野外科学观测研究站项目(SSKP202101, SSKP202102)

作者简介: 杨会会(1994—), 女, 博士研究生, 主要从事第四纪古气候研究, E-mail: 11849590@mail.sustech.edu.cn

通讯作者: 周祐民(1979—), 男, 副教授, 从事古地磁和环境磁学研究, E-mail: chouym@sustech.edu.cn

收稿日期: 2023-02-08; **改回日期:** 2023-07-01. 文凤英编辑

by the westerly (mainly influenced the EASM region). Finally, at the centennial or shorter scale, the stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records in both EASM and ISM regions are influenced by large-scale atmospheric circulation associated with El Niño-Southern Oscillation. In the future, the development of more high-resolution stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ and other rainfall indicators records in key areas would facilitate our understanding of the relationship between atmospheric circulation and rainfall changes in the Asian summer monsoon region.

Key words: stalagmite $\delta^{18}\text{O}$; East Asian Summer Monsoon; Indian Summer Monsoon; NHSI (Northern Hemispheric Summer Insolation); Heinrich stadials

季风系统是大气环流中季节变化最为显著的环流系统,也是全球气候系统的重要组成部分。季风异常往往会引起干旱、洪涝和其他极端天气事件,对人类的生产生活产生重要影响。同时,季风区也是全球大气运动能量和水汽的主要供应地,许多重要的天气气候现象也与季风活动密切相关^[1]。因此,季风一直以来是大气科学和气候学研究中的重要课题。基于各种指标重建的亚洲古季风记录,加深了人们对其演化及机制的理解。其中,石笋(Stalagmite)具有全球范围内分布广泛、单个石笋时间跨度长且连续性好、其 U-Th 含量可进行精确测年等优势,是重要的陆相气候记录载体^[2]。20世纪中期以来,随着全球季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 数据的累积^[3-8],学界对石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 古气候意义的理解也逐渐加深。

目前,对石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的古气候意义研究取得了重要进展,但是在不同时间尺度上,东亚夏季风和印度夏季风(也称为南亚夏季风)区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的相互关系和主要控制因素仍存在争议。首先,在天文轨道时间尺度上,国内外学者普遍强调中低纬度地区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的一致性,将其作为季风强度指标响应于岁差周期的变化。石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 低值表示强季风期,而石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 高值对应弱季风期^[9-10]。考虑到我国西南季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 受 ISM 主控, EASM 和 ISM 在轨道尺度上共同响应于岁差周期的变化。其次,在格陵兰冰芯末次冰期记录中存在多个千年尺度上冷暖振荡的气候事件,即 Dansgaard-Oeschger 旋回(D-O 旋回)^[11-12],在 D-O 旋回中又存在多期次的极冷时期,即 Heinrich 事件(又称 Heinrich Stadials 或者 Heinrich 冰阶)^[13-14]。EASM 和 ISM 区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 几乎同时一致响应于 Heinrich 事件^[15-20],但两者响应 Heinrich 事件的方式、幅度和途径因 EASM 和 ISM 性质的差异而不同^[21-23]。在百年及以下尺度,EASM 的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录较多,主要揭示了大气环流的变化^[24-28]。区分 EASM 和 ISM 之间在不同时间尺度上的异同,对于深入理解两者的性质,预测未来气候变化,以及制定相应的政策等都有重要意义。本文将从轨道、千年、百年及以下尺度对 EASM 和 ISM 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的相互关系及两者的受控因素进行论述。

1 亚洲季风系统概述

1.1 亚洲夏季风的组成

亚洲季风区背靠欧亚大陆,面向太平洋和印度洋。当太阳直射北半球时,一方面,受海陆热力性质差异的影响,陆地上形成热低压中心,而大洋上则形成冷高压中心,导致风从海洋携带大量水汽输入到陆地,引发了亚洲夏季风;另一方面,全球气压带北移,南半球低纬东南信风向北越过赤道,受地转偏向力的影响向东逆转,形成西南风,构成亚洲夏季风的一部分,将大量的水分和热量从澳大利亚北部穿过印度洋向北输送到印度、中国东南部,远至中国东北部和日本^[5]。当太阳直射南半球时,欧亚大陆广阔的陆地上形成强势的冷高压中心,将寒冷干燥的亚洲冬季风从西伯利亚向南吹拂,穿越中国东部、印度和印度洋,向南越过赤道后,偏转成为东北风,形成澳大利亚夏季风的一部分^[29](图 1)。

亚洲夏季风包括两个重要的组成部分,分别是 EASM 和 ISM。虽然可以在地理上划分这两个次季风系统,但很难机械地区分它们。现代观测表明 ISM 环流和相关的水汽向东北方向可深入到亚洲东部,即 EASM 降水的一个重要组成部分源于印度季风区^[5,30-32]。EASM 降水的另一个组成部分则是西北太平洋地区^[30]。EASM 和 ISM 两个子系统之间既相互独立又互相影响,但与印度夏季风不同的是,东亚夏季风为热带和亚热带季风的混合性质,受到低、中、高纬各气候要素变化的共同影响。但由于位置偏北,南半球对东亚夏季风的影响较小,纬向海陆热对比就变得更重要^[33]。

1.2 东亚夏季风的降雨影响范围

为了更直观地呈现东亚夏季风的季节性演化,利用美国国家环境预测中心/大气研究中心提供的 1980 年以来的每月再分析数据集^[34],得到 1981—2020 年 1、4、7 月和 10 月平均的垂直综合水汽输送图(图 2)。结合相关研究表明 EASM 的季节演变为:5 月上旬至中旬,从南亚边缘地区(阿拉伯海、

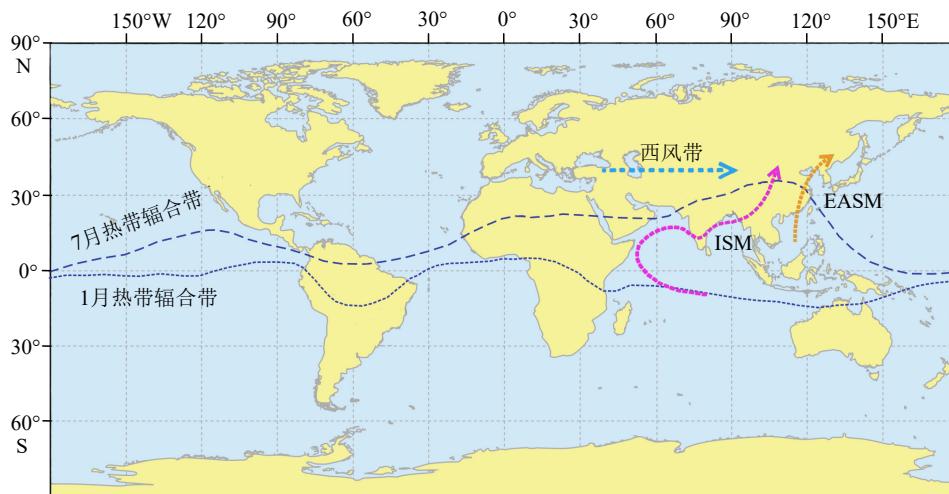


图 1 亚洲夏季风系统示意图^[5]
Fig.1 Schematic diagram of the Asian summer monsoon system^[5]

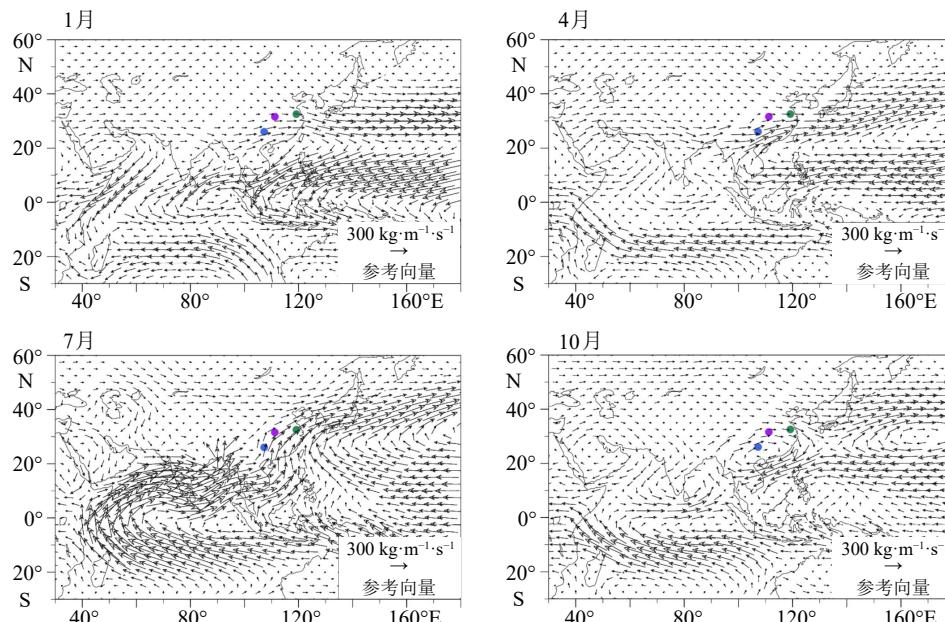


图 2 1981—2020 年 1、4、7 月和 10 月平均的垂直综合水汽输送图
紫色、绿色和蓝色的点分别表示三宝洞、葫芦洞和董哥洞的位置。

Fig.2 Average vertical synthesis of atmospheric moisture flux in January, April, July, and October from 1981 to 2020
The purple, green, and blue dots indicate the locations of Sanbao Cave, Hulu Cave, and Dongge Cave, respectively.

孟加拉湾和南海)到亚热带西北太平洋开始出现季雨;6月上旬至中旬,季雨突然延伸至长江流域、日本西部和南部、菲律宾海西南部,最终迁移至华北、朝鲜和日本部分地区以及局部西太平洋^[30]。东亚夏季风的季节性推进表现出明显的向北和向东北的阶梯式推进,有两次向北的突变和3个静止期。从东亚夏季风水汽输送路径上看,东亚夏季风区水汽主要来自印度洋,经由南海随西南季风带来;同时一部分水汽来自太平洋,随西太平洋副热带高压南侧气流带来;还有部分水汽随西风带气流

带来。以长江-淮河流域为例,前者的占比分别为48%、29%和18%^[31]。水汽来源的变化受太阳辐射、东西太平洋温度梯度、西太平洋副高位置和强度变化、欧亚大陆与太平洋海陆热力对比等要素形成的大尺度季风环流场决定,而且东亚夏季风区水汽在不同高度的水汽输送情况不同^[36-37]。

1.3 印度夏季风的降雨影响范围

从阿拉伯半岛到印度,再到中国西南地区以及青藏高原南侧的部分地区的广大范围,都受到印度

夏季风的影响^[5]。经向(南北向)温度和压力梯度的季节性逆转和相关的环流模式变化是印度季风最突出的特征^[38-39]。在北半球夏季,热带辐合带(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)北移导致赤道以南的东南信风越过赤道,受地转偏向力的影响变为西南风;这一转变伴随着印度洋上冷高压中心和南亚次大陆上热低压中心之间巨大的压力差,从印度洋携带了大量的水汽进入南亚次大陆,为印度带来占全年降水约70%的降雨量^[39]。这支西南季风登陆后有两个分支,阿拉伯海分支和孟加拉湾分支,阿拉伯海分支向东吹过印度半岛和喜马拉雅山,对印度半岛的影响更大;孟加拉湾的分支最初沿着东海岸,遇到喜马拉雅山脉的屏障,然后转向为西北风,继续在印度-恒河平原形成降雨。在北半球冬季,热带辐合带南移和青藏高原上形成的冷高压中心,共同导致了印度次大陆上的风向逆转,即干燥的冬季风由印度次大陆吹向印度洋^[39]。

2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的古气候意义

Dansgaard总结了影响降雨中氧同位素分馏的各要素^[40]。O’Neil利用实验研究提出了氧同位素在各种情况下的平衡分馏经验公式^[41]。随后,Hendy提出了判定石笋沉积时是否处于同位素平衡的条件:①石笋不同层位的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 之间无线性关系;②同一水平层位上不同位置的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相等^[42]。这些早期研究为后续石笋氧同位素的应用性研究提供了坚实的理论和实践基础。

早期研究认为石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 揭示了温度的变化。在同位素平衡分馏的前提下,通过测量地下水或石笋包裹体中水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{Water}}$ 和固体石笋 $\delta^{18}\text{O}_{\text{Calcite}}$ 可计算石笋沉积时的洞穴温度 T ($T=16.9-4.2(\delta^{18}\text{O}_{\text{Calcite}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{Water}})+0.13(\delta^{18}\text{O}_{\text{Calcite}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{Water}})^2$),进而推测该区域的地面温度^[43-45]。基于上述思想,我国学者在20世纪80—90年代将多个地区的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化与古温度相联系^[46]。

20世纪末,研究人员逐渐发现石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 主要反映了该地区降雨的 $\delta^{18}\text{O}$ 组成,因而可指示季风强弱的变化^[47]。Wang等系统研究了南京葫芦洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的主控要素,排除了温度效应对季风区降雨及石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响,并进一步指出冬夏季降雨比率的变化影响更大^[48]。Yuan等提出“上游耗竭机制”(Upstream depletion mechanism),认为石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化受控于水汽源与洞穴地点之间从水汽团中失去的水汽比例^[49]。当水汽源区到降雨点

的搬运距离较远时,下游地区降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 和石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录偏负。基于这一理论,Hu等提出通过上游石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 减去下游石笋 $\delta^{18}\text{O}$,可以获得两个位置中间区域降雨量的变化^[50]。Cheng和Lu也强调了上游地区的水汽状况对下游降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响^[51]。

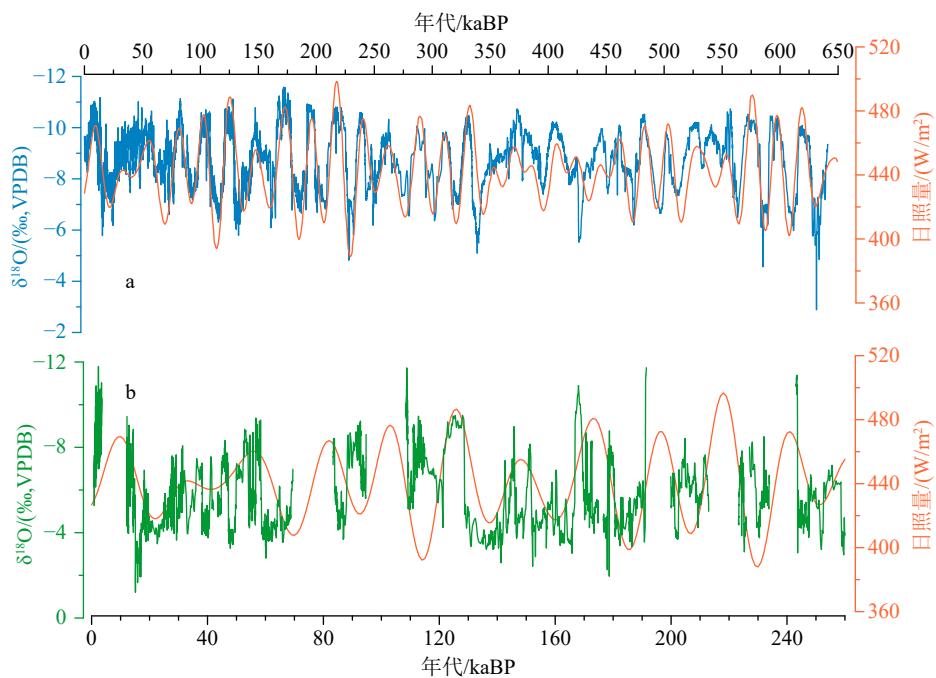
谭明进一步提出“环流效应”(Circulation effect),认为10—100年短尺度石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化受北半球大气环流变化的影响。印度洋和太平洋作为我国季风区降雨的两大来源,使得EASM和ISM的强度对我国降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 组成产生了重要影响^[24-25]。同时,Maher也强调东亚夏季风区降雨的水汽来源变化导致了我国季风区地质记录中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化,即来自印度洋的 $\delta^{18}\text{O}$ 组成较轻的水汽和来自太平洋的 $\delta^{18}\text{O}$ 组成较重的水汽在我国季风区组成降雨的混合比例不同^[52-53],这一观点与谭明基本一致。此外,也有学者将低纬度和热带地区的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化解释为季风降水量的变化^[54-55]。这些地区的对流强度与石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 呈负相关关系,因而可以根据石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 判断区域降雨量。这一假设主要适用于空气对流强度主导降雨量的热带低纬度地区。

总之,不同季节的降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 信息在下渗至溶洞的过程中混合,并记录在石笋中^[5,48,56]。在印度和东南亚等热带季风区,由于距离水汽源较近,故而与降雨量密切相关;而在亚热带季风区(我国大部分地区的主要季风类型),由于距离水汽源区较远,降雨的 $\delta^{18}\text{O}$ 组成更易受到“上游耗竭机制”的影响^[35]。

2.1 轨道尺度

海洋沉积物年代的不确定性和记录的低分辨率,导致了ISM在轨道尺度上的受控要素存在较大争议。Clemens和Prell认为ISM滞后北半球夏季日照(Northern Hemispheric Summer Insolation, NHSI)约8 kaBP(kaBP= thousand years ago before AD 1950),可能是ISM受到包括南半球的日照辐射引起的跨赤道潜热输送和全球冰量的共同作用导致的^[57]。An等认为当南半球温度较低时,跨赤道大气压力梯度会增加,促进了ISM的增强^[58],与Clemens等认为的较高的南半球温度促进跨赤道潜热输送,使得ISM增强的观点相反^[32]。Burns等通过对阿拉伯半岛阿曼北部Hoti洞石笋的生长速率和同位素记录研究发现,在间冰期的高峰时期,当地季风区降雨量增加,降雨范围的界限向北推移,提出轨道尺度上冰期-间冰期变化主导了ISM的变化^[59]。

近年来,上述观点逐渐受到质疑,尤其是印度北部Bittoo洞记录了240 kaBP以来的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记

图 3 东亚和南亚石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与北半球夏季日照量

a: 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 数据合成自三宝洞、葫芦洞和董哥洞^[10], b: Bittoo 洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 数据^[18]。橙色线为 7 月 21 日北半球 65°N 的日照量变化^[10,18]。

Fig.3 Stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records in eastern and southern Asia, and the Northern Hemisphere summer insolation

a: Composited stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ data synthesized from Sanbao Cave, Hulu Cave, and Dongge Cave^[10]; b: stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ data of Bittoo Cave^[18]. The orange lines show the variation in insolation at 65°N in the Northern Hemisphere on July 21.

录, 揭示了 ISM 的变化无滞后地响应于 23 ka 岁差周期主导的北半球 NHSI 的变化^[18](图 3b), 这与东亚夏季风区的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录一致^[9-10,49](图 3a), 也与之前诸多气候模拟的结果一致^[60-62]。东亚夏季风区的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录更加丰富, 覆盖时段为 640 kaBP 至今。EASM 区和 ISM 区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录均表现为在 NHSI 高值时期负偏, NHSI 低值时期正偏^[9,10,18,49](图 3)。

EASM 和 ISM 区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 信号在轨道尺度上响应岁差驱动 NHSI 的机制涉及多种解释。Wang 等指出轨道尺度上 NHSI 的变化通过海陆温度差异驱动着 EASM 的变化^[9]。这与 Ruddiman 的观点类似, 强调海陆之间环流强度的变化, 认为在岁差驱动的 NHSI 高值期, 海陆温差增强, 导致陆地在夏季获得更多来自海洋的水汽^[63](图 4a 右图)。Merlis 等则认为在岁差驱动的 NHSI 高值期, 低纬海洋区夏季热量增加, 辐合和上升气流增强, 更加湿润的风导致陆地降雨量增加^[61](图 4b 右图)。但是, Battisti 等认为 Merlis 的模拟没有充分考虑陆地分布状况, 他强调季风降雨的位置和范围由近地表等效势温最大值的位置决定^[62]。具体来说, 在低日照量期(比如现今), 近地表等效势温的位置由海洋区逐渐转移到陆地区, 即降雨区从海洋转移至陆地;

而在高日照期, 日照驱动的变化速率更快, 初夏陆地近地表温度的上升速度远快于海洋, 导致夏季风开始前的近地表等效势温最大值从海洋转移到了陆地, 且整个夏季风期间都位于陆地上, 延长了陆地夏季雨季的时长^[61]。

在印度和东南亚等热带季风区, 由于降雨和石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降雨量密切相关。岁差驱动的 NHSI 变化通过影响北半球热带降雨量变化, 从而影响了降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 进而影响到石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化。具体而言, NHSI 高值期热带对流增强导致降雨量增多, 而且强对流与降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈负相关, 即对流越强, 水汽从海洋蒸发到陆地凝结成的降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 值越负^[55]。因此, 具有热带季风属性的 ISM 控制的区域内, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录均表现为在 NHSI 高值时期负偏, NHSI 低值时期正偏。

在较为复杂的亚热带季风区(如东亚夏季风区), 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录如何对岁差驱动的降水和其他气候变量做出反应? 季风区在 NHSI 高值期降雨量增多的机制都有其合理性^[61-63]。在这些假设的基础上, 在 NHSI 高值期, 东亚夏季风区的夏季时长增长, 夏季降雨量增多。东亚夏季风区洞穴监测研究结果表明, 一年中不同季节的降雨在下渗至溶洞的过程中混合, 同时雨水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值信息也发生混合,

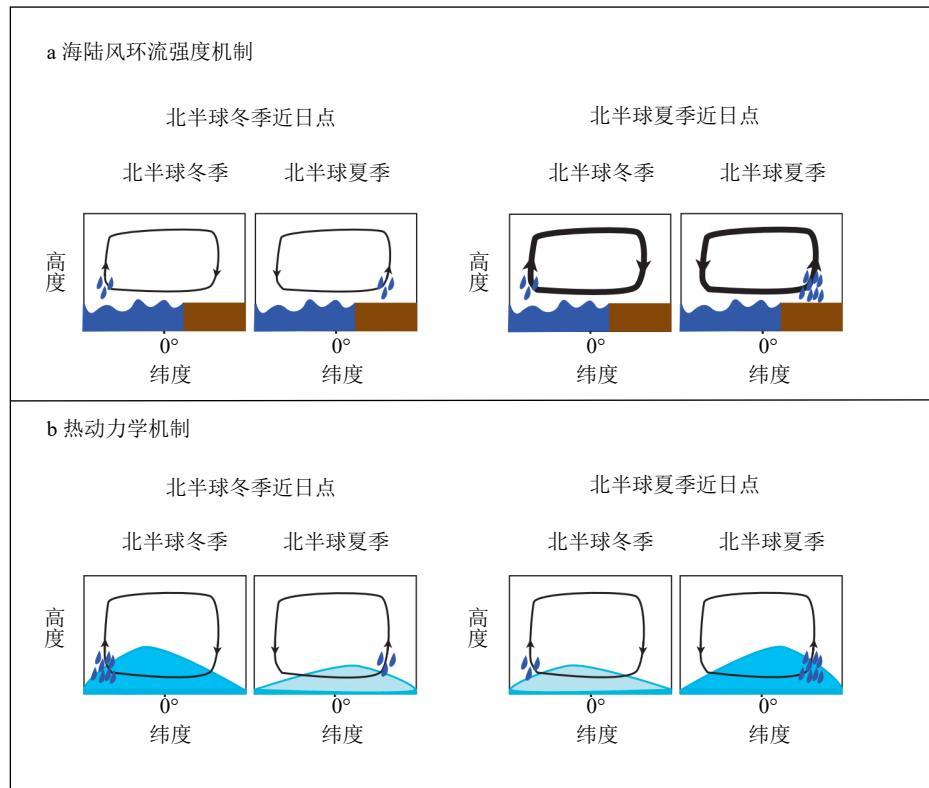


图 4 岁差驱动北半球热带降雨变化的两种机制示意图^[61]

a: 棕色区域表示陆地, 蓝色区域表示海洋; 黑色线代表平均径向环流, 较粗的线表示较高的输送强度; b: 蓝色阴影表示大气湿度, 较深的阴影表示较大的湿度。蓝色雨滴代表降水, 雨滴越多表示降水越多。

Fig.4 Mechanisms of precession driving tropical rainfall change in the Northern Hemisphere^[61]

a: Brown areas indicate land and blue areas indicate sea; the black lines represent the mean meridional circulation; the thicker lines indicate higher transport intensity; b: blue shadows indicate atmospheric humidity, and darker shadows indicate greater humidity; Blue raindrops represent precipitation, and more raindrops mean more precipitation.

并记录在石笋中^[56]。NHSI 高值期, 夏季 $\delta^{18}\text{O}$ 值较轻的降雨量占全年降雨组成的比例更大时, 当年的降雨混合后记录在石笋中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值越轻^[9,10,48]。

此外, Chiang 等提出东亚季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 组成的变化与西风急流从高原南部向北部的转变时间节点有关。具体而言, 这个转变时间节点决定了东亚夏季风区从春雨季到梅雨季的转变时间。在极端情况下, 如当 NHSI 的值较低时, 或者 Heinrich 事件期间, 西风急流并不移动至高原的北部, 使东亚基本上长期处于春季状态, 这阻止了 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负的低空季风流进入东亚地区, 导致中国东部降雨的 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正, 进而导致石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录偏正^[64]。

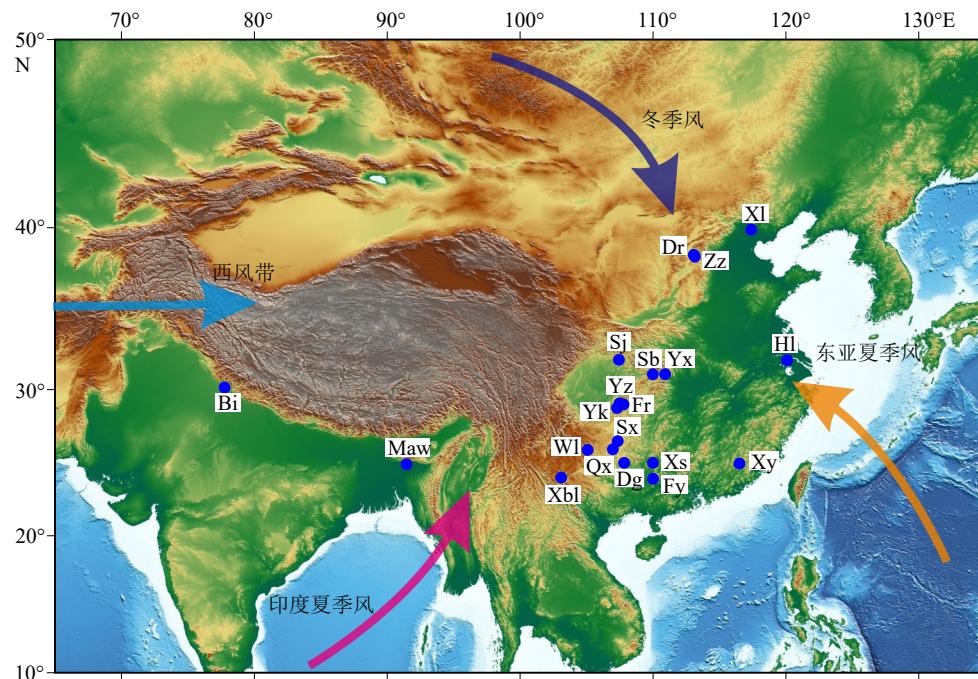
综上, 在天文轨道时间尺度上, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录揭示的 EASM 和 ISM 响应于北半球 NHSI 的变化^[9,10,18]。具体机制包括: 在 NHSI 高值期, 日照驱动的海陆对比强度增强^[9,60,63], 海洋上水汽源区的空气湿度与低空辐合强度增加^[61]和陆地季风区夏季(雨季)的延长^[62]。这些机制共同导致了在 NHSI 高值期热带对

流增强、降雨量增多, 进而降雨和石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 值负偏; 亚热带夏季降雨量增加、夏季降雨占全年降雨的比例增加, 进而降雨和石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 值负偏。反之, 在 NHSI 低值期, 降雨和石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 值则发生正偏。

2.2 千年尺度

在 Heinrich 事件期间, EASM 和 ISM 区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与格陵兰冰盖的冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录具有良好的相关性。格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的突然负偏, 指示气候突然变冷。我们搜集了 EASM 和 ISM 区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 在末次冰期的记录, 这些记录在 Heinrich 事件期间一致表现为突然正偏(图 5、图 6)。该正偏被广泛解释为东亚和印度夏季风强度的减弱^[15-20]。

目前, EASM 和 ISM 区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录响应北大西洋气候突变的过程和机制已有较为明确的解释。末次冰期欧亚大陆冰盖崩塌导致大量浮冰和冰盖融水进入北大西洋, 直接导致了全球温盐环流系统 (Thermohaline Circulation) 的减弱或关闭, 并通过全

图 5 末次冰期亚洲季风区洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录所在位置图

XI: 兴隆洞^[17], Dr: Dragon 洞/龙洞^[16], Zz: 珍珠洞^[65], Sj: 宋家洞^[66], Hl: 葫芦洞^[48], Sb: 三宝洞^[9], Yx: 永兴洞^[15], Bi: Bittoo 洞^[18], Yz: 扬子洞^[67], Fr: 芙蓉洞^[68], Yk: 羊口洞^[69-70], Sx: 三星洞^[71], Wl: Wulu/五路洞^[72], Qx: 七星洞^[23, 73], Maw: Mawmluh 洞^[74], Dg: 董哥洞^[49], Xs: 响水洞^[75], Xy: 仙云洞^[19-20], Xbl: 小白龙洞^[76], Fy: 风雨洞^[77]。

Fig.5 Locations of stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records during the last glacial period from different caves in the Asian monsoon region

XI: Xinglong Cave^[17], Dr: Dragon Cave^[16], Zz: Zhenzhu Cave^[65], Sj: Songjia Cave^[66], Hl: Hulu Cave^[48], Sb: Sanbao Cave^[9], Yx: Yongxing Cave^[15], Bi: Bittoo Cave^[18], Yz: Yangzi Cave^[67], Fr: Furong Cave^[68], Yk: Yangkou Cave^[69-70], Sx: Sanxing Cave^[71], Wl: Wulu Cave^[72], Qx: Qixing Cave^[23, 73], Maw: Mawmluh Cave^[74], Dg: Dongge Cave^[49], Xs: Xiangshui Cave^[75], Xy: Xianyun Cave^[19-20], Xbl: Xiaobailong Cave^[76], Fy: Fengyu Cave^[77].

球水汽和海洋环流系统, 影响全球的气候变化^[14, 78-80]。具体而言, 当温盐环流的减弱甚至关闭, 阻断了大西洋低纬热量向高纬的输送, 导致北大西洋地区大幅度降温^[81-82], 增加了北半球极地与赤道之间的温差。为了保持纬向热量均衡, 热带辐合带发生南移^[82-83]。这直接导致了热带印度洋和北印度洋海域洋表蒸发减弱^[84], 同时, 北大西洋地区发生的冷异常导致北半球大部分地区(包括印度洋北部、阿拉伯海、孟加拉湾等)海表温度降低^[74, 85-86], 导致了北印度洋表面蒸发分馏作用减弱、ISM 强度及其相关的环流明显减弱、印度季风区降雨减少且降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 值正偏, 进而导致 ISM 区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的正偏^[84, 87-90]。

与热带季风属性的 ISM 不同, EASM 处于亚热带, 受低、中、高纬气候要素变化的共同影响。在 Heinrich 事件期间, EASM 区降雨及石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 一方面受到上述印度洋源区水汽正偏及印度洋源区与洞穴之间降雨减少的影响而发生正偏^[22, 49, 85]; 另一方面, EASM 的水汽源地, 即远源热带水汽(印度洋、南海)与近源亚热带水汽(西北太平洋)之间的比例还受到西风带位置的调节而变化。

一般而言, 西风急流的位置在很大程度上受高纬度海冰范围和海温经向梯度的控制^[91], 在北方变冷的情况下向南移动, 类似于现代冬季的南移^[92]。西风带的南北移动在冰期-间冰期旋回^[93-95]、千年尺度突冷事件期间^[80, 96], 乃至季节转变的尺度上^[97-100], 都影响着 EASM 区降雨带的位置和强度, 并通过调节近源和远源的水汽比例, 从而影响 EASM 区降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

Porter 和 An 提出 ASM 在 Heinrich 事件期间的减弱通过西风带而与北大西洋的突然变冷相联系^[96]。Chiang 等提出西风急流的位置影响中国东部水汽来源的季节性和降雨及石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化。当西风急流的纬度位置更偏南时, 中国季风区 6—10 月的水汽来源轨迹(水汽来源轨迹: 6—7 月来自孟加拉湾; 8 月来自中国南海; 9—10 月来自西北太平洋)快速移动, 压缩了 8 月降雨的中国南海地区水汽来源, 增加了 9—10 月份中国东部西北太平洋海域水汽来源, 导致中国季风区降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正^[101]。印度洋和西风带在 Heinrich 事件期间的变化, 共同导致了 EASM 区降雨减少, 降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 及石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 正偏。

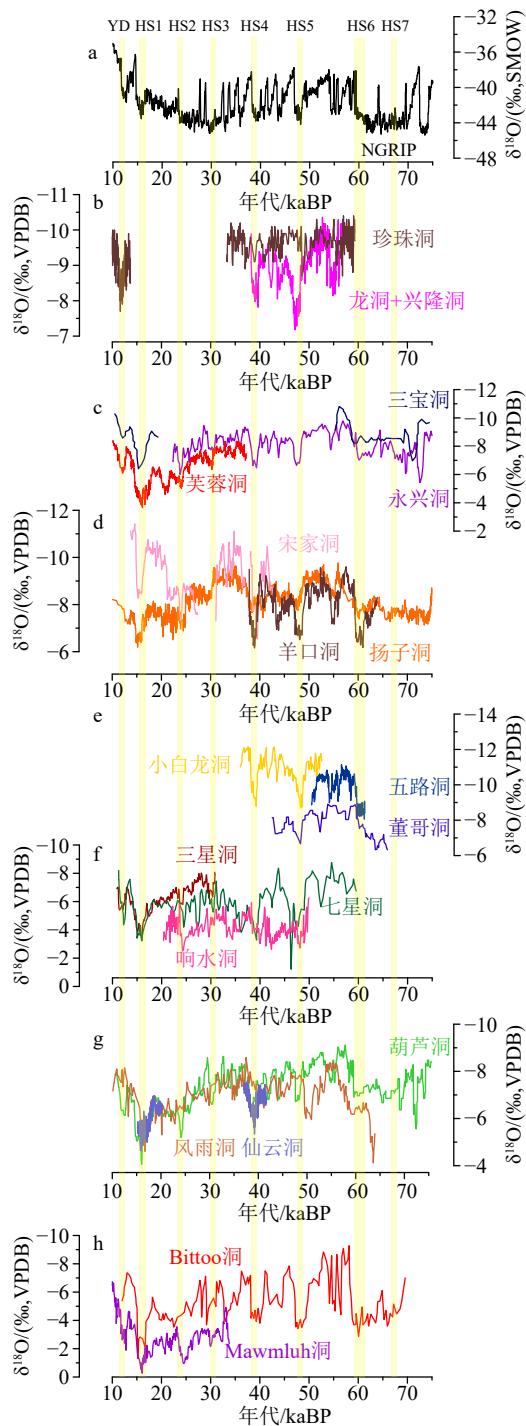


图 6 亚洲季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的末次冰期千年尺度事件波动

a: NGRIP 表示北格陵兰冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[78], b-h:各个洞穴数据的引用文献与图 5 中相同。浅黄色条带指示了 Heinrich 事件 1-7 和 Younger Dryas 事件的持续时间^[48,79]。

Fig.6 Millennial-scale events during the last glacial period recorded by stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ in the Asian monsoon region

a: NGRIP represents the $\delta^{18}\text{O}$ record of the North Greenland ice core^[78], b-h: citations of the references are the same as in Fig. 5. The light yellow bands indicate the duration of Heinrich stadials 1-7 and Younger Dryas stadials^[48,79].

Liang 等基于不同区域石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的对比,肯定了西风急流在 Heinrich 1 期间通过调节水汽来源,从而调节东亚夏季风区不同洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的变幅^[22]。

此外,Cheng 等认为,在 Younger Dryas 事件(类似于 Heinrich 事件,发生在 12.9~11.6 kaBP)恢复初期,整个热带太平洋存在西部降雨(对流)或温度增加,而东部降雨减少的“类似拉尼娜”(La Niña-like)状态^[80]。Zhang 等则提出在拉尼娜年间,西太平洋副热带高压向东北退缩导致中国东南部梅雨期季节性降水相对减少。这些原因也可能与 Heinrich 事件期间中国东南部石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录正偏有关^[102]。

2.3 百年及以下尺度

百年及以下尺度石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 研究在 EASM 区较多,主要揭示了与水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 组成有关的大尺度大气环流的信息。谭明发现中国季风区短尺度(10—100 年尺度)石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在大区域范围内具有一致信号,且无法匹配洞穴附近器测的降雨或温度信号,却与海平面气压差指数或海陆温差指数关系最好,从而揭示了中国季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在短尺度变化的环流意义。当印度洋海水和中东太平洋海水温度偏低时,西太平洋副热带高压偏北东缩而变弱,中国季风区内来自印度洋的水汽份额增大,由于这些水汽的输送路程很远,导致中国季风区的雨水氧同位素及石笋氧同位素较轻。而当印度洋海水和中东太平洋海水温度偏高时,西太平洋副热带高压偏南西伸而强,中国季风区内来自印度洋的远源水汽份额减少,而来自西太平洋的水汽份额增大,由于后者输送路程较近,导致中国季风区的雨水氧同位素及石笋氧同位素较重^[24]。Tan 进一步量化了厄尔尼诺-南方涛动(EI Niño-Southern Oscillation, ENSO)变化对中国季风区降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 在年际尺度上的影响。在厄尔尼诺年(EI Niño),0~30°N 之间的信风减弱,中国季风区从西南源印度洋接受的水汽减少,使总体上中国季风区年降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏正。在拉尼娜年(La Niña),信风增强,从印度洋输送到我国季风区的水汽充足^[25],与实测数据揭示的 EASM 与 ISM 降雨呈负相关关系相符合^[103],导致中国季风区总体上年降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负。

最近,Zhang 等发现在年代际尺度上,长江中游的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与历史记载的干湿状况呈反相关,认为短尺度石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录反映的是不同水汽来源的相对贡献而非降水量^[28]。同样,来自中国东南地区江西省峨眉洞 1810—2009 年的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录,通过与器测资料对比发现,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化主要受降

水季节性的控制, 即季风降雨/非季风降雨的比例^[26]。这与谭明的研究结果一致。

此外, 结合大气降水、洞穴滴水和现代洞穴氧同位素研究, Sun 等对中国中部南北分界区鸡冠洞进行了长达 7 年的洞穴监测研究, 其成果表明, 洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值经过下渗通道混合后不具有季节性, 但是在年际尺度上明显地响应于 ENSO 的变率, 表现为在厄尔尼诺事件期间 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏正, 反之偏负。其模拟结果表明在厄尔尼诺年, 季风降水的 50% 以上由太平洋来源提供; 在拉尼娜年, 季风降水则是印度洋来源占主导^[104]。

综上所述, 模拟、地质记录和洞穴监测的研究结果表明, 东亚夏季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 主要受控于大尺度环流的变化, 即石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值记录了陆地降水中不同水汽来源 $\delta^{18}\text{O}$ 组成的差异。

百年及以下尺度的 ISM 区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录较为匮乏, 主要观点表明控制印度夏季风区降雨和季风强度变化的主要因素是太阳辐射的变化^[105-106]。Neff 等通过阿曼北部全新世石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录发现其与来自树木年轮的 $\Delta^{14}\text{C}$ 记录具有很好的相关性, 而树木年轮的 $\Delta^{14}\text{C}$ 记录很大程度上反映了太阳活动的变化。由此, 控制热带地区百年-十年尺度上降雨和季风强度变化的主要因素是太阳辐射的变化^[105]。Wang 等通过季风记录与大气 ^{14}C 记录的互相关分析表明, 在十年到百年尺度上的季风变化, 部分由太阳活动的变化所引起^[106]。最近, Wang 等利用 ISM 季风区数十年分辨率的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录揭示, 在太平洋短尺度涛动 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 的冷期(暖期), 来自印度洋的降水减少(增加)。这表明 ISM 季风区降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 及石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值受到太平洋大尺度海气环流的影响^[107]。

3 结论与展望

综上所述, EASM 和 ISM 区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在轨道尺度上都受控于岁差驱动的北半球夏季日照量的变化。其机制涉及海陆热力差异强度的变化、辐合和上升气流强度的变化与夏季时长的变化。这些机制共同导致了在北半球夏季日照高值期, EASM 和 ISM 夏季降雨量增加, 降雨和石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 值负偏。在千年尺度上, EASM 和 ISM 区的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录则一致地响应于北大西洋气候突变, 具体响应的机制主要有热带辐合带南移导致的印度洋水汽分馏减弱(主要影响 ISM 区和 EASM 区), 以及西风带调节的水汽来源和降雨季节性变化(主要影响 EASM

区)。在百年及以下尺度, EASM 和 ISM 区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录都受到与厄尔尼诺-南方涛动有关的大尺度大气环流的影响。

本文讨论了石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在不同时间尺度上的古气候意义, 但将其用来单独指示古降水时, 往往与其他地质记录(如黄土、湖泊记录)存在不一致性^[108-110], 这可能是因为降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 揭示的是全球季风的季节性变化^[2], 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结果, 理论上并不指示降水主要发生在水汽路径的哪一段^[10]。中国季风区面积广大, 南北方地区降雨的季节性和降雨模式差异较大^[36], 与石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录相比, 黄土、湖泊和树轮等记录揭示的是区域内降雨量的变化。

类似地, 中国中部石笋的磁学记录与石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录也不一致^[111]。除了大颗粒的碎屑是由溪流和暗河输入岩溶洞穴外, 石笋中按照层状分布的细粒磁性矿物, 主要是由降雨形成的基岩裂隙水搬运至石笋中沉积^[112]。因此, 石笋中磁性矿物的含量和粒径是对区域降雨的间接指示剂, 可能比石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 包含了更局部的水文气候信息, 如 Xie 等揭示的石笋中磁性矿物粒径与泥炭沉积物中的生物指标有较好的一致性^[113]。同时, 与黄土、湖泊和树轮这些传统的指标相比, 石笋的环境磁学指标既拥有石笋的优势, 如记录分布广泛、单个石笋时间跨度长且连续性好、其 U-Th 含量可进行精确测年等, 又具有磁学方面的优势, 如测试精度高、实验测量快、测试价格低等。综合而言, 石笋的环境磁学是一个可供深入探索的方向。

由此, 更多区域性降水指标(如黄土、湖泊、树轮和环境磁学)和更精确石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的建立, 将有助于进一步理解石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 信号的意义和动力学机制, 及其与区域性气候指标的关系, 从而揭示古气候(尤其古降水)的演变。其中, 更精确的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的建立, 一方面有赖于更为先进的石笋 U-Th 测年技术的进步和开发新的指标和技术(如 Δ^{47} 测温技术)^[2]。这将是未来石笋研究的重要方向之一。另一方面, 更精确的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录意味着来自多区域多记录的相互验证和统筹分析。东亚夏季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的研究较为丰富和成熟, 但是亚洲夏季风覆盖范围广阔, 涉及南半球的马斯克林高压-澳洲北部、印度洋-孟加拉湾-南海、中国东部、日本和韩国等地区^[2]。作为亚洲夏季风重要组成区域的澳大利亚、南亚孟加拉湾地区、东亚日本和韩国等地区, 其石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 研究尚有较大的发展空间。

此外, 将石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 研究空间扩展到全球范围,

跨越时间较长且精度较高的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 基本上分布在南北纬 $0\sim30^\circ$ 的中低纬度地区, 尤其是北半球地区。这与中低纬度地区降水丰富有利于石灰岩溶洞和石笋的发育有关。那么, 高纬地区是否有可揭示气候信息的石笋分布, 是否可以展开相关研究? 程海等提出直接将北大西洋中—高纬度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, 可以直接用来检验高纬驱动还是低纬驱动的前沿问题^[2]。另外, 南半球(包括南太平洋、非洲南部地区)记录也较少, 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。

参考文献 (References)

- [1] 安芷生, 吴国雄, 李建平, 等. 全球季风动力学与气候变化 [J]. 地球环境学报, 2015, 6(6): 341-381. [AN Zhisheng, WU Guoxiong, LI Jianping, et al. Global monsoon dynamics and climate change[J]. Journal of Earth Environment, 2015, 6(6): 341-381.]
- [2] 程海, 张海伟, 赵景耀, 等. 中国石笋古气候研究的回顾与展望 [J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(10): 1565-1589. [CHENG Hai, ZHANG Haiwei, ZHAO Jingyao, et al. Chinese stalagmite paleoclimate researches: a review and perspective[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(10): 1489-1513.]
- [3] McDermott F. Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(7-8): 901-918.
- [4] Lachniet M S. Climatic and environmental controls on speleothem oxygen-isotope values[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(5-6): 412-432.
- [5] Cheng H, Sinha A, Wang X F, et al. The Global Paleomonsoon as seen through speleothem records from Asia and the Americas[J]. *Climate Dynamics*, 2012, 39(5): 1045-1062.
- [6] Atsawaranunt K, Comas-Bru L, Mozdzehi S A, et al. The SISAL database: A global resource to document oxygen and carbon isotope records from speleothems[J]. *Earth System Science Data*, 2018, 10(3): 1687-1713.
- [7] Comas-Bru L, Harrison S P. SISAL: bringing added value to speleothem research[J]. *Quaternary*, 2019, 2(1): 7.
- [8] Zhang H W, Brahim Y A, Li H Y, et al. The Asian summer monsoon: teleconnections and forcing mechanisms: a review from Chinese speleothem $\delta^{18}\text{O}$ records[J]. *Quaternary*, 2019, 2(3): 26.
- [9] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224 000 years[J]. *Nature*, 2008, 451(7182): 1090-1093.
- [10] Cheng H, Edwards R L, Sinha A, et al. The Asian monsoon over the past 640 000 years and ice age terminations[J]. *Nature*, 2016, 534(7609): 640-646.
- [11] Dansgaard W, Clausen H B, Gundestrup N, et al. A new Greenland deep ice core[J]. *Science*, 1982, 218(4579): 1273-1277.
- [12] Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record[J]. *Nature*, 1993, 364(6434): 218-220.
- [13] Heinrich H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130 000 years[J]. *Quaternary Research*, 1988, 29(2): 142-152.
- [14] Hemming S R. Heinrich events: massive late Pleistocene detritus layers of the North Atlantic and their global climate imprint[J]. *Reviews of Geophysics*, 2004, 42(1): RG1005.
- [15] Chen S T, Wang Y J, Cheng H, et al. Strong coupling of Asian Monsoon and Antarctic climates on sub-orbital timescales[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 32995.
- [16] Dong J G, Shen C C, Kong X G, et al. Asian monsoon dynamics at Dansgaard/Oeschger events 14-8 and Heinrich events 5-4 in northern China[J]. *Quaternary Geochronology*, 2018, 47: 72-80.
- [17] Duan W H, Cheng H, Tan M, et al. Onset and duration of transitions into Greenland Interstadials 15.2 and 14 in northern China constrained by an annually laminated stalagmite[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20844.
- [18] Kathayat G, Cheng H, Sinha A, et al. Indian monsoon variability on millennial-orbital timescales[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24374.
- [19] Zhang X, Qiu W Y, Jiang X Y, et al. Three-phase structure of the East Asia summer monsoon during Heinrich Stadial 4 recorded in Xianyun Cave, southeastern China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 274: 107267.
- [20] Qiu W Y, Zhang X, Jiang X Y, et al. Double-plunge structure of the East Asian summer monsoon during Heinrich stadial 1 recorded in Xianyun Cave, southeastern China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2022, 282: 107442.
- [21] Li D, Tan L C, Cai Y J, et al. Is Chinese stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ solely controlled by the Indian summer monsoon?[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53(5): 2969-2983.
- [22] Liang Y J, Zhao K, Edwards R L, et al. East Asian monsoon changes early in the last deglaciation and insights into the interpretation of oxygen isotope changes in the Chinese stalagmite record[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 250: 106699.
- [23] Mi X, Liu D B, Wang Y J, et al. Spatial pattern of orbital-to millennial-scale East Asian stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ variations during MIS 3[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2022, 298: 107844.
- [24] 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. [TAN Ming. Circulation effect: climatic significance of the short term variability of the oxygen isotopes in stalagmites from monsoonal China: dialogue between paleoclimate records and modern climate research[J]. Quaternary Sciences, 2009, 29(5): 851-862.]
- [25] Tan M. Circulation effect: response of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ to the ENSO cycle in monsoon regions of China[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42(3-4): 1067-1077.
- [26] Zhang H W, Cheng H, Spötl C, et al. A 200-year annually laminated stalagmite record of precipitation seasonality in southeastern China

- and its linkages to ENSO and PDO[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 12344.
- [27] Zhao J Y, Cheng H, Yang Y, et al. Reconstructing the western boundary variability of the Western Pacific Subtropical High over the past 200 years via Chinese cave oxygen isotope records[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 52(5-6): 3741-3757.
- [28] Zhang Z Q, Liang Y J, Wang Y J, et al. Evidence of ENSO signals in a stalagmite-based Asian monsoon record during the medieval warm period[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 584: 110714.
- [29] An Z S. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(1-5): 171-187.
- [30] Ding Y H, Chan J C L. The East Asian summer monsoon: an overview[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2005, 89(1-4): 117-142.
- [31] 周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 夏季亚洲季风区的水汽输送及其对中国降水的影响 [J]. 气象学报, 2008, 66(1): 59-70. [ZHOU Xiaoxia, DING Yihui, WANG Panxing. Moisture transpot in Asian summer monsoon region and its relationship with summer precipitation in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66(1): 59-70.]
- [32] Clemens S C, Prell W L, Sun Y B. Orbital-scale timing and mechanisms driving Late Pleistocene Indo-Asian summer monsoons: reinterpreting cave speleothem $\delta^{18}\text{O}$ [J]. *Paleoceanography*, 2010, 25(4): PA4207.
- [33] Shi Z G, Liu X D, Cheng X X. Anti-phased response of northern and southern East Asian summer precipitation to ENSO modulation of orbital forcing[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 40: 30-38.
- [34] National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, NOAA, et al. NCEP/NCAR global reanalysis products, 1948-continuing[R]. Research Data Archive at NOAA/PSL, 1994.
- [35] Liu Z Y, Wen X Y, Brady E C, et al. Chinese cave records and the East Asia Summer Monsoon[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 83: 115-128.
- [36] Wang H J, Chen H P. Climate control for southeastern China moisture and precipitation: Indian or East Asian monsoon?[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D12): D12109.
- [37] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437-472.
- [38] Turner A G, Annamalai H. Climate change and the South Asian summer monsoon[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(8): 587-595.
- [39] Kaushal N, Breitenbach S F M, Lechleitner F A, et al. The Indian summer monsoon from a speleothem $\delta^{18}\text{O}$ perspective: a review[J]. *Quaternary*, 2018, 1(3): 29.
- [40] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436-468.
- [41] O'Neil J R, Clayton R N, Mayeda T K. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1969, 51(12): 5547-5558.
- [42] Hendy C H. 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[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1971, 35(8): 801-824.
- [43] 陈跃, 黄培华, 朱洪山. 北京周口店地区洞穴内第四纪石笋的同位素古温度研究 [J]. 科学通报, 1986(20): 1576-1578. [CHEN Yue, HUANG Peihua, ZHU Hongshan. Study on isotopic paleotemperature of Quaternary Speleothem in caves in Zhoukoudian area, Beijing[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1986(20): 1576-1578.]
- [44] Talma A S, Vogel J C. Late quaternary paleotemperatures derived from a speleothem from cango caves, cape province, South Africa[J]. *Quaternary Research*, 1992, 37(2): 203-213.
- [45] Boch R, Spötl C, Kramers J. High-resolution isotope records of early Holocene rapid climate change from two coeval stalagmites of Katerloch Cave, Austria[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(23-24): 2527-2538.
- [46] 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, 17(1): 41-51. [LIU T, TAN Ming, QIN Xiaoguang, et al. Discovery of Microbedding in Speleothems in China and its significance in the study of Global change[J]. *Quaternary Sciences*, 1997, 17(1): 41-51.]
- [47] 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. [TAN Ming, LIU Dongsheng, QIN Xiaoguang, et al. Preliminary study on the data from Microbanding and Stable isotopes of Stalagmites of Beijing Shihua Cave[J]. *Carsologica Sinica*, 1997, 16(1): 1-10.]
- [48] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China[J]. *Science*, 2001, 249(5550): 2345-2348.
- [49] Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, et al. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon[J]. *Science*, 2004, 304(5670): 575-578.
- [50] Hu C Y, Henderson G M, Huang J H, et al. Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 266(3-4): 221-232.
- [51] Cheng T F, Lu M Q. Moisture source-receptor network of the East Asian summer monsoon land regions and the associated atmospheric steerings[J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(21): 9213-9231.
- [52] Maher B A. Holocene variability of the east Asian summer monsoon from Chinese cave records: a re-assessment[J]. *The Holocene*, 2008, 18(6): 861-866.
- [53] Maher B A, Thompson R. Oxygen isotopes from Chinese caves: records not of monsoon rainfall but of circulation regime[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2012, 27(6): 615-624.
- [54] Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from Southern Oman[J]. *Science*, 2003, 300(5626): 1737-1739.
- [55] Tan L C, Shen C C, Löwemark L, et al. Rainfall variations in central Indo-Pacific over the past 2,700 y[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(35): 17201-17206.
- [56] Qiu H Y, Li T Y, Chen C J, et al. Significance of active speleothem $\delta^{18}\text{O}$ at annual-decadal timescale: a case study from monitoring in Furong Cave[J]. *Applied Geochemistry*, 2021, 126: 104873.

- [57] Clemens S C, Prell W L. The timing of orbital-scale Indian monsoon changes[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(3-4): 275-278.
- [58] An Z S, Clemens S C, Shen J, et al. Glacial-interglacial Indian summer monsoon dynamics[J]. *Science*, 2011, 333(6043): 719-723.
- [59] Burns S J, Fleitmann D, Matter A, et al. Speleothem evidence from Oman for continental pluvial events during interglacial periods[J]. *Geology*, 2001, 29(7): 623-626.
- [60] Kutzbach J E, Liu X D, Liu Z Y, et al. Simulation of the evolutionary response of global summer monsoons to orbital forcing over the past 280, 000 years[J]. *Climate Dynamics*, 2008, 30(6): 567-579.
- [61] Merlis T M, Schneider T, Bordoni S, et al. The tropical precipitation response to orbital precession[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(6): 2010-2021.
- [62] Battisti D S, Ding Q H, Roe G H. Coherent pan-Asian climatic and isotopic response to orbital forcing of tropical insolation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(21): 11997-12020.
- [63] Ruddiman W F. Orbital changes and climate[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(23-24): 3092-3112.
- [64] Chiang J C H, Fung I Y, Wu C H, et al. Role of seasonal transitions and westerly jets in East Asian paleoclimate[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 108: 111-129.
- [65] Li Y X, Rao Z G, Xu Q H, et al. Inter-relationship and environmental significance of stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ records from Zhenzhu Cave, north China, over the last 130 ka[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 536: 116149.
- [66] Zhou H Y, Zhao J X, Feng Y X, et al. Distinct climate change synchronous with Heinrich event one, recorded by stable oxygen and carbon isotopic compositions in stalagmites from China[J]. *Quaternary Research*, 2008, 69(2): 306-315.
- [67] Wu Y, Li T Y, Yu T L, et al. Variation of the Asian summer monsoon since the last glacial-interglacial recorded in a stalagmite from southwest China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 234: 106261.
- [68] Li T Y, Wu Y, Shen C C, et al. High precise dating on the variation of the Asian summer monsoon since 37 ka BP[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 9375.
- [69] Han L Y, Li T Y, Cheng H, et al. Potential influence of temperature changes in the Southern Hemisphere on the evolution of the Asian summer monsoon during the last glacial period[J]. *Quaternary International*, 2016, 392: 239-250.
- [70] Li T Y, Han L Y, Cheng H, et al. Evolution of the Asian summer monsoon during Dansgaard/Oeschger events 13-17 recorded in a stalagmite constrained by high-precision chronology from southwest China[J]. *Quaternary Research*, 2017, 88(1): 121-128.
- [71] Jiang X Y, He Y Q, Shen C C, et al. Decoupling of the East Asian summer monsoon and Indian summer monsoon between 20 and 17 ka[J]. *Quaternary Research*, 2014, 82(1): 146-153.
- [72] Liu D B, Wang Y J, Cheng H, et al. Sub-millennial variability of Asian monsoon intensity during the early MIS 3 and its analogue to the ice age terminations[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(9-10): 1107-1115.
- [73] Zhang Z Q, Wang Y J, Liu D B, et al. Multi-scale variability of the Asian monsoon recorded in an annually-banded stalagmite during the Neoglacial from Qixing Cave, Southwestern China[J]. *Quaternary International*, 2018, 487: 78-86.
- [74] Dutt S, Gupta A K, Clemens S C, et al. Abrupt changes in Indian summer monsoon strength during 33, 800 to 5500 years B. P. [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(13): 5526-5532.
- [75] Cosford J, Qing H R, Yuan D X, et al. Millennial-scale variability in the Asian monsoon: evidence from oxygen isotope records from stalagmites in southeastern China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 266(1-2): 3-12.
- [76] Cai Y J, An Z S, Cheng H, et al. High-resolution absolute-dated Indian Monsoon record between 53 and 36 ka from Xiaobailong Cave, southwestern China[J]. *Geology*, 2006, 34(8): 621-624.
- [77] Li H C, Bar-Matthews M, Chang Y P, et al. High-resolution $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records during the past 65ka from Fengyu Cave in Guilin: variation of monsoonal climates in south China[J]. *Quaternary International*, 2017, 441: 117-128.
- [78] North Greenland Ice Core Project Members. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period[J]. *Nature*, 2004, 431(7005): 147-151.
- [79] Bradley R S, Diaz H F. Late quaternary abrupt climate change in the tropics and sub - tropics: the continental signal of tropical hydroclimatic events (THEs)[J]. *Reviews of Geophysics*, 2021, 59(4): e2020RG000732.
- [80] Cheng H, Zhang H W, Spötl C, et al. Timing and structure of the Younger Dryas event and its underlying climate dynamics[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(38): 23408-23417.
- [81] Dong B W, Sutton R T. Adjustment of the coupled ocean-atmosphere system to a sudden change in the Thermohaline Circulation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(15): 1728.
- [82] Dahl K A, Broccoli A J, Stouffer R J. Assessing the role of North Atlantic freshwater forcing in millennial scale climate variability: a tropical Atlantic perspective[J]. *Climate Dynamics*, 2005, 24(4): 325-346.
- [83] Clement A C, Peterson L C. Mechanisms of abrupt climate change of the last glacial period[J]. *Reviews of Geophysics*, 2008, 46(4): RG4002.
- [84] Mohtadi M, Prange M, Oppo D W, et al. North Atlantic forcing of tropical Indian ocean climate[J]. *Nature*, 2014, 509(7498): 76-80.
- [85] Pausata F S R, Battisti D S, Nisancioglu K H, et al. Chinese stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ controlled by changes in the Indian monsoon during a simulated Heinrich event[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(7): 474-480.
- [86] Tierney J E, Pausata F S R, deMenocal P. Deglacial Indian monsoon failure and North Atlantic stadials linked by Indian Ocean surface cooling[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 46-50.
- [87] Gupta A K, Anderson D M, Overpeck J T. Abrupt changes in the Asian southwest monsoon during the Holocene and their links to the North Atlantic Ocean[J]. *Nature*, 2003, 421(6921): 354-357.
- [88] Deplazes G, Lücke A, Stuut J B W, et al. Weakening and strengthening of the Indian monsoon during Heinrich events and Dansgaard-Oeschger oscillations[J]. *Paleoceanography*, 2014, 29(2): 99-114.
- [89] Sijinkumar A V, Clemens S, Nath B N, et al. $\delta^{18}\text{O}$ and salinity variability from the Last Glacial Maximum to Recent in the Bay of Bengal

- and Andaman Sea[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 135: 79-91.
- [90] Zorzi C, Goñi M F S, Anupama K, et al. Indian monsoon variations during three contrasting climatic periods: the Holocene, Heinrich stadial 2 and the last interglacial-glacial transition[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 125: 50-60.
- [91] Laîné A, Kageyama M, Salas-Mélia D, et al. Northern hemisphere storm tracks during the last glacial maximum in the PMIP2 ocean-atmosphere coupled models: energetic study, seasonal cycle, precipitation[J]. *Climate Dynamics*, 2009, 32(5): 593-614.
- [92] Schiemann R, Lüthi D, Schär C. Seasonality and interannual variability of the westerly jet in the Tibetan Plateau region[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(11): 2940-2957.
- [93] Yanase W, Abe-Ouchi A. The LGM surface climate and atmospheric circulation over East Asia and the North Pacific in the PMIP2 coupled model simulations[J]. *Climate of the Past*, 2007, 3(3): 439-451.
- [94] Ono Y, Irino T. Southern migration of westerlies in the Northern Hemisphere PEP II transect during the Last Glacial Maximum[J]. *Quaternary International*, 2004, 118-119: 13-22.
- [95] Nagashima K, Tada R, Tani A, et al. Millennial-scale oscillations of the westerly jet path during the last glacial period[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(6): 1214-1220.
- [96] Porter S C, An Z S. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation[J]. *Nature*, 1995, 375(6529): 305-308.
- [97] Hu H H, Lin S M. Asymmetry of the tripole rainfall pattern during the east Asian summer[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(17): 4443-4458.
- [98] Sampe T, Xie S P. Large-scale dynamics of the Meiyu-Baiu Rainband: environmental forcing by the westerly jet[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(1): 113-134.
- [99] Baker A J, Sodemann H, Baldini J U L, et al. Seasonality of westerly moisture transport in the East Asian summer monsoon and its implications for interpreting precipitation $\delta^{18}\text{O}$ [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(12): 5850-5862.
- [100] Zhang H B, Griffiths M L, Chiang J C H, et al. East Asian hydroclimate modulated by the position of the westerlies during Termination I[J]. *Science*, 2018, 362(6414): 580-583.
- [101] Chiang J C H, Herman M J, Yoshimura K, et al. Enriched East Asian oxygen isotope of precipitation indicates reduced summer seasonality in regional climate and westerlies[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(26): 14745-14750.
- [102] Zhang J W, Zhao K, Wang Y J, et al. Modulation of centennial-scale hydroclimate variations in the middle Yangtze River Valley by the East Asian-Pacific pattern and ENSO over the past two millennia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, 576: 117220.
- [103] Huang R H, Liu Y, Du Z C, et al. Differences and links between the East Asian and South Asian summer monsoon systems: characteristics and variability[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(10): 1204-1218.
- [104] Sun Z, Yang Y, Zhao J Y, et al. Potential ENSO effects on the oxygen isotope composition of modern speleothems: Observations from Jiguan Cave, central China[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 566: 164-174.
- [105] Neff U, Burns S J, Mangini A, et al. Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6 kyr ago[J]. *Nature*, 2001, 411(6835): 290-293.
- [106] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate[J]. *Science*, 2005, 308(5723): 854-857.
- [107] Wang X F, Duan W H, Tan M, et al. Variability of PDO identified by a last 300-year stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record in Southwest China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 261: 106947.
- [108] Yang X L, Liu J B, Liang F Y, et al. Holocene stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records in the East Asian monsoon region and their correlation with those in the Indian monsoon region[J]. *The Holocene*, 2014, 24(12): 1657-1664.
- [109] Chen F H, Chen X M, Chen J H, et al. Holocene vegetation history, precipitation changes and Indian summer monsoon evolution documented from sediments of Xingyun Lake, south-west China[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2014, 29(7): 661-674.
- [110] Liu J B, Chen J H, Zhang X J, et al. Holocene East Asian summer monsoon records in northern China and their inconsistency with Chinese stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 148: 194-208.
- [111] Zhu Z M, Feinberg J M, Xie S C, et al. Holocene ENSO-related cyclic storms recorded by magnetic minerals in speleothems of central China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(5): 852-857.
- [112] Lascu I, Feinberg J M. Speleothem magnetism[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(23-24): 3306-3320.
- [113] Xie S C, Evershed R P, Huang X Y, et al. Concordant monsoon-driven postglacial hydrological changes in peat and stalagmite records and their impacts on prehistoric cultures in central China[J]. *Geology*, 2013, 41(8): 827-830.