

# 中世纪暖期和现代暖期中国季风 降水时空模式及其机制

崔英方<sup>1,2</sup>, 赵侃<sup>2</sup>, 赵彬<sup>2</sup>, 王权<sup>2</sup>, 汪永进<sup>2</sup>

(1. 南京旅游职业学院旅游管理学院, 江苏 南京 211100)

(2. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

**[摘要]** IPCC 第五次评估报告认为中世纪暖期(950—1250 A.D.)和现代暖期(20 世纪增温)存在具有高可信度。气象观测结果显示 20 世纪中期以来的显著增温时期, 中国降水变化呈现典型的“南涝北旱”两极模式。然而, 这一模式与中世纪暖期代用指标重建降水所揭示的“南干北湿”模式存在显著差异, 且这一差异的动力学机制亦不明确。继承大气降水氧同位素( $\delta^{18}\text{O}$ )的中国石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录是描述水循环演变历史信息的理想天然示踪剂。本文将北京石花洞(中国北方)和贵州董哥洞(中国南方)石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录进行对比, 基于  $\delta^{18}\text{O}$ -降水-大气环流信号之间的机理联系, 解析中世纪和现代暖期大气降水时空模式及其机制。结果显示中世纪暖期石花洞石笋  $\delta^{18}\text{O}$  值显著负偏, 指示亚洲夏季风增强, 雨带北移, 印度洋远源水汽输送增加, 而南方洞穴石笋  $\delta^{18}\text{O}$  值相对正偏, 指示降水减少或者蒸发加强, 局地环流降水增加。在中世纪暖期, 洞穴记录对比结果呈现与其他指标重建结果一致的“南干北湿”模式。20 世纪增温时期, 石花洞与董哥洞石笋记录均显示  $\delta^{18}\text{O}$  值正偏过程, 指示夏季风减弱, 雨带南移, 北方降水减少; 南方降水则由近源水汽输送所控制。研究结果暗示中世纪暖期亚洲夏季风增强可能是气候自然变率的结果, 而现代暖期季风减弱则可能与人类活动影响下的海温异常有关。

**[关键词]** 中世纪暖期, 现代暖期, 氧同位素, 降水, 水汽输送

**[中图分类号]** K903 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2019)04-0145-08

## Spatiotemporal Model and Mechanism of Monsoon Rainfall in China During the Medieval Warm Period and the Current Warm Period

Cui Yingfang<sup>1,2</sup>, Zhao Kan<sup>2</sup>, Zhao Bin<sup>2</sup>, Wang Quan<sup>2</sup>, Wang Yongjin<sup>2</sup>

(1. School of Tourism Management, Nanjing Institute of Tourism and Hospitality, Nanjing 211100, China)

(2. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** The Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change suggests that the existence of Medieval Warm Period (MWP, 950–1250 A.D.) and Current Warm Period (CWP, warming in the twentieth century) is very likely. In CWP, annual precipitation anomalies over eastern China are characterized by a north-south dipole pattern, referred to as the “southern flooding and northern drought” pattern (SF/ND). However, spatial pattern of rainfall during MWP shows a “southern dry and northern wet” mode, revealed by paleoclimate reconstructions. Therefore, the mechanism of precipitation variations during the warm periods remains unclear. Inherited from the  $\delta^{18}\text{O}$  signal of precipitation, Chinese stalagmite  $\delta^{18}\text{O}$  records are ideal natural tracers for describing the history of the water cycle. Here, this paper compares stalagmite  $\delta^{18}\text{O}$  records from Shihua Cave, North China with  $\delta^{18}\text{O}$  records from Dongge Cave, South China, to explore the spatiotemporal model of rainfall and its mechanism in late Holocene. In MWP, negative  $\delta^{18}\text{O}$  values in northern China and positive  $\delta^{18}\text{O}$  values in southern China indicate that strong ASM intensity and associated northward progress of the rainband delivered more remote moisture from Indian Ocean to northern China and less to southern China. During the CWP, stalagmite  $\delta^{18}\text{O}$  values show a notable positive trend in both Shihua Cave and Dongge Cave, suggesting that weak ASM intensity and associated southward withdraw of the rainband resulted in the SF/ND pattern. Furthermore, local water

收稿日期: 2019-01-25.

基金项目: 国家自然科学基金(41702180)、江苏省高校自然科学研究面上项目(16KJD170002).

通讯联系人: 赵侃, 博士, 副教授, 研究方向: 全球气候变化. E-mail: 09371@njnu.edu.cn

vapor from the Pacific Ocean probably contributed to increased rainfall in southern China. The North(dry)-South(wet) pattern during the CWP inversely similar to the spatial pattern during the MWP, probably suggesting different impacts of natural and anthropogenic forcing on precipitation distribution.

**Key words:** medieval warm period, current warm period, oxygen isotope( $\delta^{18}\text{O}$ ), rainfall, water vapor transport

受自然强迫和人类活动共同影响,地球系统正经历以变暖为主要特征的气候变化<sup>[1]</sup>. 在全球变暖可能导致的一系列环境效应中,降水的时空变化备受关注,直接影响着数十亿人口的生活、社会经济的发展以及生态系统的平衡. 中国位于亚洲季风区,季风环流对水汽输送起着重要作用,而水汽输送强度、路径和源汇决定了降水的时空分布. 因此,研究亚洲夏季风环流及其水汽输送的特征,对于了解区域水循环和预测旱涝的发生具有重要意义<sup>[2]</sup>.

基于中国气象台站观测数据,过去 50 多年中国降水变化呈现出显著的南北两极模式,即“南涝北旱”的空间特征<sup>[3-4]</sup>. 然而,这一空间模式的成因较为复杂. 水汽输送场的时空分析表明亚洲夏季风向北水汽输送的减弱,雨带南移是“南涝北旱”的主要原因<sup>[3-4]</sup>. 模型模拟结果揭示海洋表层温度(SST)异常,尤其是太平洋 SST 异常与北大西洋 SST 异常,可能通过影响大气环流变化和季风雨带推移,导致中国东部降水两极模式<sup>[5-6]</sup>. 同时,美国国家环境预测中心/大气研究中心的再分析资料的研究结果与亚洲季风指数重建结果也都呈现 20 世纪中期以来亚洲夏季风减弱与北方降水减少的事实<sup>[7-12]</sup>. 由此可见,“南涝北旱”模式可能与亚洲夏季风强度及其相关的水汽输送和雨带移动密切相关. 那么,一个关键的科学问题是 20 世纪中期以来的亚洲夏季风减弱是否与此间加剧的全球变暖有关<sup>[11,13-14]</sup>.

模拟结果显示自然增温与人为强迫对季风降水乃至全球降水的影响及其机理具有明显差异<sup>[15]</sup>. 因此,理清自然驱动与人为影响下亚洲夏季风降水行为特征及其变化机理,对理解未来季风降水的可能趋势具有参考价值. 其中,对历史时期暖期季风降水历史的研究,是了解自然强迫下降降水变化规律的重要手段,为深入理解现代暖期降水特征及其机制提供有意义的参照型. 然而,人类有气象仪器记录的历史太短,不足以捕捉气候系统全部的变率,比如百年尺度气候变率. 利用代用指标重建过去气候变化的历史可以在很大程度上弥补上述不足. 早在 1972 年,竺可桢<sup>[16]</sup>利用历史文献资料开展了中国近五千年来气候变迁的初步研究,由此开创了中国长序列气候变化研究之先河. 此后,众多学者和研究机构通过历史文献、树轮、冰芯、石笋及湖泊沉积等证据和载体,重建了亚洲季风区长达千年以上的高分辨率气候序列,研究历史时期温度和降水变化及其对社会发展的影响<sup>[17-25]</sup>.

IPCC 第五次评估报告<sup>[1]</sup>、过去 2 000 年亚洲气候变化集成研究<sup>[26]</sup>(PAGES-Asia2k)及最新树轮重建结果<sup>[27]</sup>都认可北半球无论欧亚大陆还是北美大陆均存在中世纪暖期、小冰期和现代暖期. 与温度变化大空间尺度范围的一致性相比,降水变化存在着显著的时空差异. 王绍武等<sup>[28]</sup>重建公元 950 年~1991 年的旱涝型,发现中世纪暖期长江及其以南地区降水偏多、以北偏少;小冰期则是南方及长江流域发生多雨型的频率减少. 根据历史文献记载重建的过去 2 000 年中国东部 63 个地区旱涝等级数据和基于代用资料重建的中国温度序列,郑景云等<sup>[29]</sup>研究发现,历史时期暖期和冷期旱涝格局存在多种模式,但在多数温暖时段,长江以北地区总体偏旱,以南偏涝. 甘肃万象洞石笋记录<sup>[17]</sup>与陇西地区干湿指数重建结果<sup>[30]</sup>显示亚洲夏季风北部边缘地区,中世纪暖期季风降水增加,以湿润气候为主;小冰期时期季风降水减少,以干旱气候为主. 基于中国 71 个代用指标记录(包括历史文献、湖泊、石笋、树轮、冰芯等)的综合分析结果显示在东部季风区,中世纪暖期北方湿润而南方干旱,小冰期时期则相反,呈现南北两极模式<sup>[31]</sup>. 由此可见,不同温度背景下,降水变化(或者干湿状况)存在时空差异,然而由于不同代用指标在重建方法、气候解译和代表区域范围的不同可能导致认识上的差异.

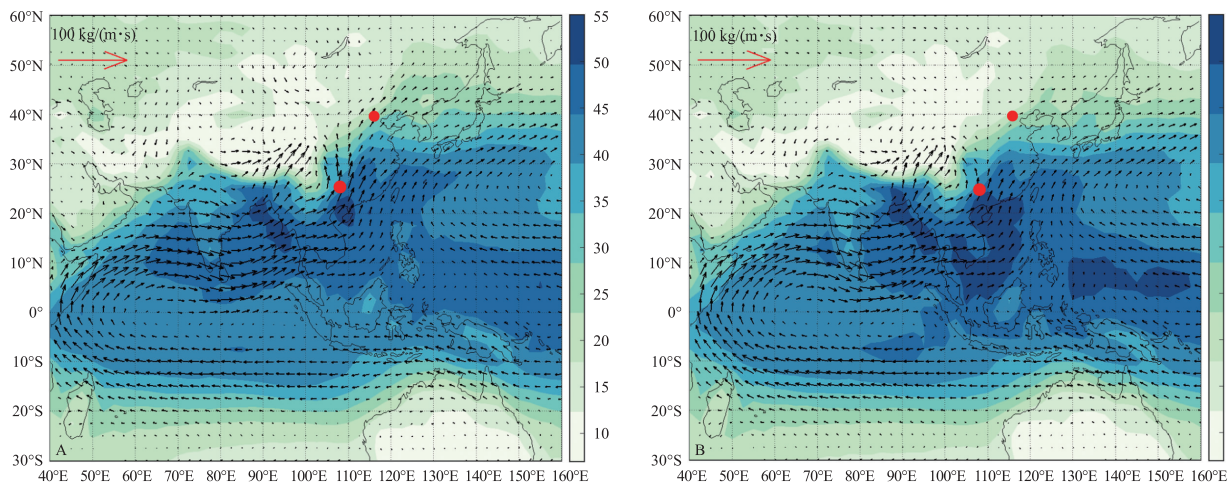
空间分布广泛的中国石笋氧同位素( $\delta^{18}\text{O}$ )记录可能包含了降水变化和大气环流特征的重要信息. 本文将北京石花洞和贵州董哥洞石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录进行对比,分析中世纪暖期和现代暖期石笋  $\delta^{18}\text{O}$  信号的时空变化特征,基于大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  信号的降雨量效应与大气环流效应,探索中国东部季风区暖期水汽源、输送路径与降水空间格局,讨论自然驱动与人为影响下亚洲夏季风降水行为特征及其变化机理.

## 1 数据

本文选择北京石花洞(115°56'E,39°47'N;图 1)和贵州董哥洞(108°05'E,25°17'N;图 1)石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记

录进行对比研究,主要基于以下考虑:

(1) 石花洞位于中国北方地区,处于亚洲夏季风北部边界,夏季风降水量(6—9月)占全年降水量的70%以上<sup>[32]</sup>;董哥洞位于中国南方地区,属于典型亚洲季风影响区域,夏季风降水量(5—10月)约占全年降水量的80%<sup>[33-34]</sup>. 随着夏季风爆发,雨带中国东部季风区由南向北推移<sup>[35]</sup>,两地洞穴相隔千里,为研究南、北方降水和水汽输送特征的理想区域. 由图1可见,在20世纪70年代末,两地风场和水汽输送通量发生了显著的年代际尺度变换.



基于 NCEP /NCAR 全球再分析数据的 1949—1978 年(A)和 1979—2016 年(B)夏季(6—8月)平均水汽输送通量( $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ , 地面-850 hPa). 图中红色圆点分别表示北京石花洞和贵州董哥洞所在位置.

Rainy season (June–August) water vapor flux ( $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ , surface -850 hPa) averaged for 1949–1978 (A) and for 1979–2016 (B) based on the NCEP/NCAR reanalysis datasets. Red dots show the Shihua Cave and Dongge Cave, respectively.

图1 研究区域

Fig. 1 Study area

大气环流模式变换后向北的水汽输送明显减弱,北方降水减少;南方降水有所增加,太平洋来源的水汽输送增强. 两地石花洞和董哥洞区域气候和环境特征详见文[32–33].

(2) 石花洞和董哥洞两个洞穴石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录具有年代精度和样点分辨率高、连续且重现性高的重要特征(图2). 比如,石花洞石笋 XMG-1 和 S312 两只样品,均为年层计数时标,并得到 U/Th 测年结果与  $\delta^{13}\text{C}$  周期旋回计数结果相互印证,且  $\delta^{18}\text{O}$  信号重现性好<sup>[32,36]</sup>. 董哥洞 DA、DX1 和 DX2 石笋铀含量较高, U/Th 测年精度较高,石笋生长速率较快,测试大量铀系年龄,DX1 和 DX2 石笋具有年纹层特征,年层计数时标与 U/Th 测年结果在误差范围内相一致. 3 支样品  $\delta^{18}\text{O}$  信号具有很好重现性<sup>[25,37]</sup>. 由于 DX1 样品于 1969 A.D. 左右停止生长,这里本文选择 DA 和 DX2 样品进行对比研究.

(3) Ding 等<sup>[3]</sup> 总结我国东部夏季降水的空间模式,除了偶极模式(南涝-北旱与南旱-北涝)外,还存在着三极模式,即长江涝、华北和华南旱,或相反分布. 然而,长江中下游流域的降水重建存在较大的不确定性,如湖北和尚洞石笋重建<sup>[38]</sup>结果显示和北方相似的中世纪暖期季风降水增加,小冰期降水减少;但重庆芙蓉洞石笋记录<sup>[39]</sup>、湖北大九湖孢粉记录<sup>[40]</sup>和江淮流域历史文献重建<sup>[41]</sup>结果显示和南方相似的中世纪暖期季风降水减少,小冰期降水增加. 湖北黑龙洞石笋多指

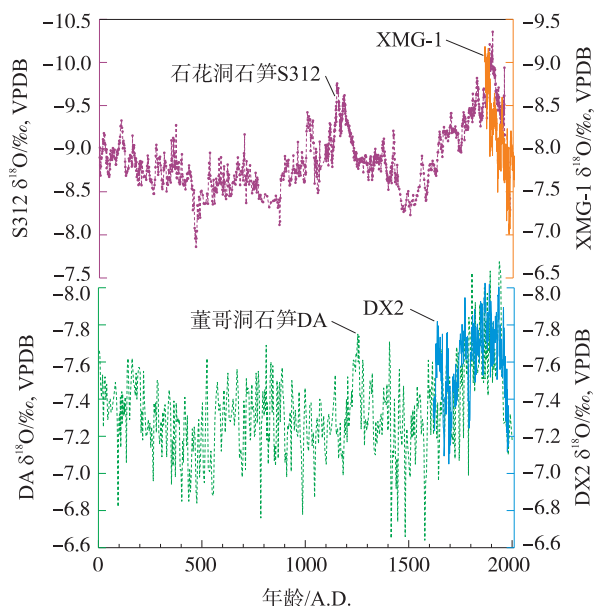


图2 石花洞与董哥洞石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录对比

Fig. 2 Comparison of stalagmite  $\delta^{18}\text{O}$  records from Shihua and Dongge Cave



标重建结果显示中世纪暖期和小冰期季风降水差异主要体现在周期频率上,其小冰期内部的百年尺度降水旋回与梅雨重建结果一致,但与北方降水重建呈反相位关系<sup>[42]</sup>. 上述差异表明长江中下游流域的指标重建和气候解译存在较大的不确定性,需要进一步重建更多高质量的气候意义明确的过去千年代用指标序列加以分析. 受限于此,本文仅考虑南、北方定年精度高且重现性较好的石笋代用指标记录.

IPCC 第五次评估报告<sup>[1]</sup>综合介绍了 2013 年之前发表的大部分过去两千年北半球温度重建序列. 尽管报告中引用的温度序列的分辨率有所不同、振幅也有明显差异,但是所有温度曲线的低频趋势比较一致. 虽然开始时间、持续时间、变化幅度和区域特征存在差异,但是报告认为中世纪暖期(950—1250 A.D.)、小冰期(1450—1850 A.D.)和现代暖期(20 世纪增温)存在可信度较高. 本文选取 Moberg 等<sup>[43]</sup>北半球温度重建记录(1—1979 A.D.),作为与石笋  $\delta^{18}\text{O}$  信号对比的温度曲线. Moberg 等<sup>[43]</sup>序列融合了树轮重建高频信号和其他代用指标(冰芯、湖泊、石笋等)低频信号,该序列与 Esper 等<sup>[44]</sup>、D'Arrigo 等<sup>[45]</sup>、Wilson 等<sup>[27]</sup>等重建记录具有较好的可比性,尤其中世纪暖期、小冰期和 20 世纪快速增温特征明显. 同时,本文将 Wilson 等<sup>[27]</sup>基于树轮资料重建的欧亚大陆夏季温度变化记录(750—2011 A.D.)作为补充对比材料,弥补 Moberg 等<sup>[38]</sup>数据在现代暖期不够完整(重建记录止于 1979 A.D.)的不足.

2 结果

北京石花洞和贵州董哥洞石笋提供了过去 2 000 年连续的高分辨率  $\delta^{18}\text{O}$  序列<sup>[36-37]</sup>. 与过去 2 000 年北半球温度重建记录<sup>[43]</sup>对比(图 3),结果显示:

(1)石花洞石笋  $\delta^{18}\text{O}$  序列与温度记录在长期变化趋势上具有很好的协同变化特征. 尤其在中世纪暖期、小冰期和现代暖期两者变化高度吻合,表现为温度增高, $\delta^{18}\text{O}$  值整体负偏;温度降低, $\delta^{18}\text{O}$  值正偏. 暖期-冷期转换  $\delta^{18}\text{O}$  振幅(变幅)超过 1.5‰. 这一线性相关特征得到了同样来自中国北方季风边缘区的甘肃万象洞<sup>[17]</sup>和黄爷洞<sup>[46]</sup>石笋记录的支持. (2)在长期变化趋势上,董哥洞  $\delta^{18}\text{O}$  记录和温度曲线同样具有很好的相似性,但是在中世纪暖期两者关系明显“解耦”,表现在此暖期  $\delta^{18}\text{O}$  值明显偏正. 暖期-冷期转换  $\delta^{18}\text{O}$  最大变幅亦达~1.5‰. 这一特征在同一洞穴石笋 DAS<sup>[47]</sup>和 D4<sup>[34]</sup>记录以及贵州黑洞石笋记录<sup>[48]</sup>中得到证实. (3)在现代暖期(20 世纪增温),石花洞和董哥洞石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录均显示一致的持续正偏过程,正偏幅度约 1‰(图 4).

在部分时段的细节特征上,石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录与温度记录,以及石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录之间存在不一致,比如石花洞记录在 500 A.D.和 800 A.D.附近存在  $\delta^{18}\text{O}$  值正向漂移事件,在温度和董哥洞记录中均不明显

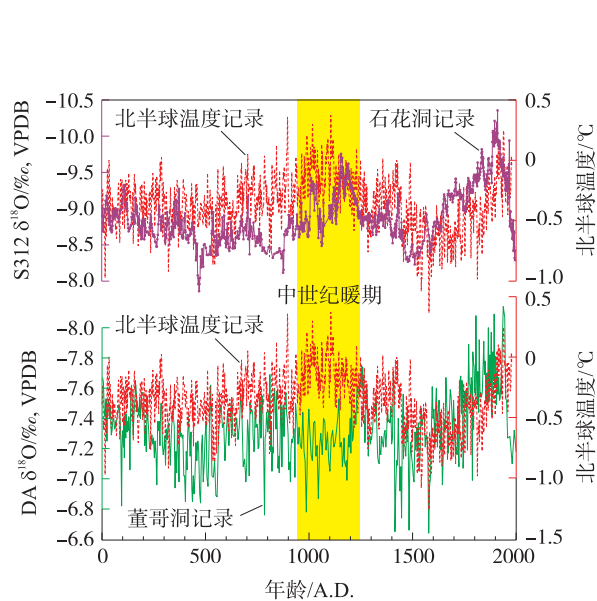


图 3 中国石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录与北半球温度记录对比  
Fig. 3 Comparison of Chinese stalagmite  $\delta^{18}\text{O}$  records and Northern Hemisphere temperature record

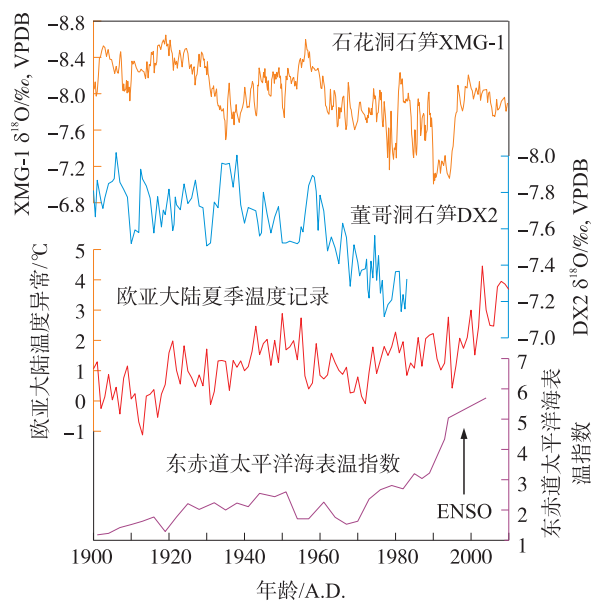


图 4 中国石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录、温度记录和海表温指数对比  
Fig. 4 Comparison of Chinese stalagmite  $\delta^{18}\text{O}$  records, temperature record and sea surface temperature (SST) record

(图3). 石花洞和董哥洞记录在20世纪的正偏过程中,十年际尺度振荡不能完全一一对应(图4). 这些差异可能来自两个方面:(1)各自重建曲线的不确定性造成的<sup>[47,49]</sup>,包括温度重建方法和指标筛选、石笋记录年龄误差和分辨率差异;(2)除温度以外,其他因素的影响,如局地气候-环境要素的作用,包括局地气候状况和洞穴岩溶过程的差异等等.

### 3 讨论

“中国石笋  $\delta^{18}\text{O}$  信号解译”不甚明确,存在反映亚洲夏季风强度<sup>[37]</sup>、夏季风降雨量<sup>[17]</sup>、上游水汽输送强度(即印度季风降水变化)<sup>[33]</sup>和环流效应<sup>[50]</sup>等不同观点. 本文将基于大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  数据分析结果,进一步认识石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录的气候意义. 洞穴现代过程的监测结果发现石笋  $\delta^{18}\text{O}$  信号继承于大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  信号,能够反映不同时间尺度大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  变化的平均信号特征<sup>[51-52]</sup>. 大气降水同位素观测结果显示降水同位素是描述水循环演化历史信息的理想示踪剂,能够为记录降水变化和识别水汽输送提供有效信息<sup>[53-54]</sup>. 中国东部季风区降水  $\delta^{18}\text{O}$  信号对季风进退和东部季风区雨带的移动有较强的指示作用<sup>[55-56]</sup>. 因此,中国东部季风区石笋  $\delta^{18}\text{O}$  数据很可能包含了季风降水变化<sup>[17,32]</sup>和水汽输送过程的关键信息<sup>[33,50,54]</sup>.

北京石花洞和贵州董哥洞石笋  $\delta^{18}\text{O}$  序列与北半球温度记录对比结果(图3)揭示在低频信号上(百年及百年以上尺度),中国东部季风区大气降水和水汽输送与北半球陆地温度变化密切相关. 这一结果支持海陆热力差异或者半球间热力梯度是季风产生和维持的主要驱动力<sup>[57]</sup>. 然而,石笋  $\delta^{18}\text{O}$  序列和北半球温度记录的协同变化关系在中世纪暖期和20世纪暖期出现偏差. 如图3和图4所示,在中世纪暖期,北京石花洞石笋  $\delta^{18}\text{O}$  值显著负偏,而董哥洞石笋  $\delta^{18}\text{O}$  值则明显正偏;在20世纪暖期,两地洞穴  $\delta^{18}\text{O}$  值显现一致的正偏过程. 上述结果说明受热力学驱动影响的季风区水循环过程具有复杂性,大气降水和石笋  $\delta^{18}\text{O}$  时空变化特征可能反映降水量变化、水汽源和水汽输送路径等多重因素的变化<sup>[53-54]</sup>.

中世纪暖期,北京石花洞石笋  $\delta^{18}\text{O}$  值显著负偏,说明北半球陆地增温时,亚洲夏季风增强,尤其是远源的西南水汽输送(印度季风)增强,在中国东部季风区雨带北移,华北降水增加. 西南水汽输送是我国夏季降水最主要水汽来源<sup>[58-59]</sup>. 根据瑞利分馏原理<sup>[60]</sup>,长距离输送的水汽在输送路径的上游可能发生一系列的降水过程,重同位素不断分离体系,导致降水  $\delta^{18}\text{O}$  值偏低<sup>[50,54]</sup>. 与此同时,贵州董哥洞石笋  $\delta^{18}\text{O}$  值明显正偏,指示由于雨带北移,南方降水相对减少,而陆地增温加强蒸发效应,一方面导致南方变干,另一方面导致局地水循环加强. 由于局地水汽主要来源于稳定同位素富集的内陆河流和湖泊的蒸发,该类型水汽产生的降水  $\delta^{18}\text{O}$  值偏重<sup>[54]</sup>. 在中世纪暖期,中国季风区洞穴记录对比结果呈现“南干北湿”模式,这与其他代用指标重建结果相一致<sup>[31]</sup>. 最近2000年印度夏季风降水重建结果也发现在低频特征(数百年尺度)上与北半球温度变化非常相似,认为北半球温度通过改变海陆热力差和半球间热力梯度影响印度夏季风变化<sup>[14]</sup>. 该记录亦可证实中世纪暖期印度夏季风增强,即在中国季风区来自西南的水汽输送增强. 将石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录与太平洋海表温重建记录对比,发现中世纪暖期远源的西南水汽输送(印度季风)增强,对应于热带太平洋维持在类-拉尼娜的平均态<sup>[61-62]</sup>(图5). 这一结果与近百年印度夏季风和 ENSO 之间关系的统计分析结果相一致,即在厄尔尼诺年印度季风倾向于减弱,而在拉尼娜年则倾向于增强<sup>[63]</sup>. 因此,中世纪暖期中国季风区降水空间格局和水汽输送过程主要受控于北半球陆地增温,而热带海表温变化也起到一定的调节作用.

在20世纪暖期,南、北洞穴石笋  $\delta^{18}\text{O}$  值显现一致的持续正偏过程<sup>[25,32]</sup>,指示亚洲夏季风减弱,尤其是远源的西南水汽输送减弱,导致雨带

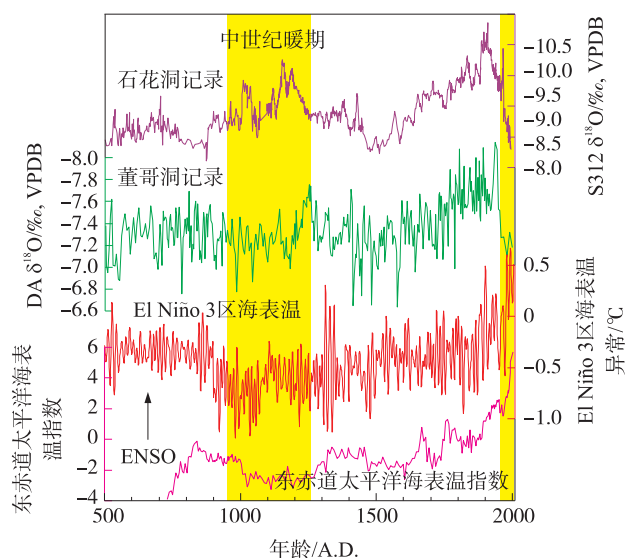


图5 中国石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录和 ENSO 指数对比  
Fig. 5 Comparison of Chinese stalagmite  $\delta^{18}\text{O}$  records and ENSO index

南移,北方降水减少,此时北方降水主要以西风带水汽输送、局地水汽循环和近海(太平洋)水汽输送所贡献,降水  $\delta^{18}\text{O}$  值偏重<sup>[54]</sup>;与此同时,南方降水增加,降水由远源、近源水汽输送和局地水汽循环共同控制,其中西南水汽输送持续减弱<sup>[49]</sup>,近源和局地水汽贡献逐渐增大,导致降水  $\delta^{18}\text{O}$  值偏重趋势.就降雨量而言,20 世纪暖期南北降水格局出现与中世纪暖期相反的“南涝北旱”模式,这一结果与现代气象观测结果<sup>[3-4]</sup>相一致.海陆热力差异减小被认为是 20 世纪暖期西南水汽输送减弱,即印度季风减弱的主要因素<sup>[64]</sup>.而海陆热力梯度持续减小则与印度洋海温快速增温<sup>[64-65]</sup>和人类活动释放气溶胶的快速增加所造成的陆地降温<sup>[13,66]</sup>密切相关.此外,海洋表层温度(SST)异常,尤其是热带太平洋 SST 异常可能通过影响大气环流模式,导致中国东部降水两极模式<sup>[5-6]</sup>.将石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录与太平洋海表温重建记录对比,发现现代暖期远源西南水汽输送减弱,近源太平洋水汽增强,对应于赤道东太平洋 SST 持续增温,长期维持类-厄尔尼诺的平均态<sup>[61-62]</sup>(图 4 和 5).这一结果支持中国季风区降水  $\delta^{18}\text{O}$  变化的“环流效应”模式<sup>[50]</sup>.模型模拟结果进一步表明在不同外强迫条件下的海表温度变化在热带太平洋区域截然不同,即自然因子影响下(中世纪暖期)为类-拉尼娜型;温室气体影响下(现代暖期)为类-厄尔尼诺型<sup>[67]</sup>.因此,现代暖期中国降水空间格局和水汽输送过程主要受控于热带 SST 变化,同时 ENSO 对水汽源和输送路径有重要影响.

## 4 结语

大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  是描述中国季风区水循环演变历史信息的理想天然示踪剂,能够反映季风降水变化、示踪和反演水汽源和水汽输送路径<sup>[53-56]</sup>.石笋  $\delta^{18}\text{O}$  继承于大气降水  $\delta^{18}\text{O}$ ,能够研究更长时间尺度大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  演变历史.基于中世纪暖期和现代暖期中国石笋  $\delta^{18}\text{O}$  时空变化的对比,本文得出以下结论:

(1)中世纪暖期,石花洞石笋  $\delta^{18}\text{O}$  值显著负偏,指示亚洲夏季风增强,雨带北移,印度洋远源水汽输送增加,而南方洞穴石笋  $\delta^{18}\text{O}$  值相对正偏,指示降水减少或者蒸发加强,局地环流降水增加.

(2)20 世纪增温时期,石花洞与董哥洞石笋  $\delta^{18}\text{O}$  值持续正偏,指示印度夏季风减弱,远源西南水汽输送减少,雨带南移,北方降水减少;而近源太平洋水汽和局地水汽循环对南方降水贡献增大.

(3)海陆热力差异是亚洲季风变化的主要驱动力.北半球陆地增温是中世纪暖期亚洲夏季风增强的主导控制因素,而热带海温异常增温是 20 世纪暖期亚洲季风减弱的主控因子.

## [参考文献]

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 竺可桢. 东南季风与中国之雨量[J]. 地理学报, 1934(1): 1-27.
- [3] DING Y H, WANG Z Y, SUN Y. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: observed evidences[J]. International journal of climatology, 2008, 28: 1139-1161.
- [4] ZHOU X X, DING Y H, WANG P X. Moisture transport in the Asian summer monsoon region and its relationship with summer precipitation in China[J]. Acta meteorologica sinica, 2010, 24(1): 31-42.
- [5] LIU Y, CHIANG J C H. Coordinated abrupt weakening of the Eurasian and North African monsoons in the 1960s and links to extratropical North Atlantic cooling[J]. Journal of climate, 2012, 25: 3532-3548.
- [6] YANG Q, MA Z G, FAN X G, et al. Decadal modulation of precipitation patterns over Eastern China by sea surface temperature anomalies[J]. Journal of climate, 2017, 30: 7017-7033.
- [7] LI J, ZENG Q. A unified monsoon index[J]. Geophysical research letters, 2002, 29(8): 1274. doi:10.1029/2001GL013874.
- [8] LI J, ZENG Q. A new monsoon index and the geographical distribution of the global monsoons[J]. Advances in atmospheric sciences, 2003, 20: 299-302.
- [9] 郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅, 等. 东亚季风的年代际变率对中国气候的影响[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 569-5761.
- [10] 郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅, 等. 1873—2000 年东亚夏季风变化的研究[J]. 大气科学, 2004, 28(2): 206-215.
- [11] 姜大膀, 王会军. 20 世纪后期东亚夏季风年代际减弱的自然属性[J]. 科学通报, 2005, 50(20): 2256-2262.
- [12] 张博, 周秀骥, 陈隆勋, 等. 东亚海陆热源差指数及其与环流和中国夏季降水的关系[J]. 中国科学, 2010, 40(6): 789-801.
- [13] BOLLASINA M A, MING Y, RAMASWAMY V. Anthropogenic aerosols and the weakening of the South Asian summer — 150 —

- monsoon[J]. *Science*,2011,334(6055):502–505.
- [14] SINHA A,KATHAYAT G,CHENG H,et al. Trends and oscillations in the Indian summer monsoon rainfall over the last two millennia[J]. *Nature communications*,2015,6:6309. doi:10.1038/ncomms7309.
- [15] LIU J,WANG B,CANE M A,et al. Divergent global precipitation changes induced by natural versus anthropogenic forcing[J]. *Nature*,2013,493:656–659.
- [16] 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究[J]. *考古学报*,1972,1:168–189.
- [17] ZHANG P Z,CHENG H,EDWARDS R L,et al. A test of climate,sun,and culture relationships from an 1810-Year Chinese cave record[J]. *Science*,2008,322(5903):940–942.
- [18] LIU X,DONG H,YANG X,et al. Late Holocene forcing of the Asian winter and summer monsoon as evidenced by proxy records from the northern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Earth and planetary science letters*,2009,280:276–284.
- [19] CHEN F H,CHEN J H,HOLMES J A,et al. Moisture changes over the last millennium in the Arid Central Asia;a review, synthesis and comparison with monsoon region[J]. *Quaternary science reviews*,2010,29:1055–1068.
- [20] CHEN F H,XU Q H,CHEN J H,et al. East Asian summer monsoon precipitation variability since the last deglaciation[J]. *Scientific reports*,2015,5:11186. doi:10.1038/srep11186.
- [21] SELVARAJ K,WEI K,LIU K,et al. Late Holocene monsoon climate of northeastern Taiwan inferred from elemental(C,N) and isotopic( $\delta^{13}\text{C}$ , $\delta^{15}\text{N}$ ) data in lake sediments[J]. *Quaternary science reviews*,2012,37:48–60.
- [22] GE Q S,HAO Z X,ZHENG J Y,et al. Temperature changes over the past 2 000 yr in China and comparison with the Northern Hemisphere[J]. *Climate of the past*,2013,9:1153–1160.
- [23] YANG B,QIN C,WANG J L,et al. A 3 500-year tree-ring record of annual precipitation on the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*,2014,111(8):2903–2908.
- [24] 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.
- [25] ZHAO K,WANG Y J,EDWARDS R L,et al. A high-resolved record of the Asian Summer Monsoon from Dongge Cave,China for the past 1 200 years[J]. *Quaternary science reviews*,2015,122:250–257.
- [26] 葛全胜,郑景云,郝志新. 过去 2 000 年亚洲气候变化(PAGES-Asia2k)集成研究进展及展望[J]. *地理学报*,2015,70(3):355–363.
- [27] WILSON R,ANCHUKAITIS K,BRIFFA K R,et al. Last millennium northern hemisphere summer temperatures from tree rings:part I:the long term context[J]. *Quaternary science reviews*,2016,134:1–18.
- [28] 王绍武,赵宗慈,陈振华. 公元 950 年—1991 年的旱涝型[M]//王绍武,黄朝迎. 长江黄河旱涝灾害发生规律及其经济影响的诊断研究. 北京:气象出版社,1993:55–66.
- [29] 郑景云,郝志新,张学珍,等. 中国东部过去 2 000 年百年冷暖的旱涝格局[J]. *科学通报*,2014,59(30):2964–2971.
- [30] TAN L C,CAI Y J,YI L,et al. Precipitation variations of Longxi,northeast margin of Tibetan Plateau since AD 960 and their relationship with solar activity[J]. *Climate of the past*,2008,4:19–28.
- [31] CHEN J H,CHEN F H,FENG S,et al. Hydroclimatic changes in China and surroundings during the Medieval Climate Anomaly and Little Ice Age:spatial patterns and possible mechanisms[J]. *Quaternary science reviews*,2015,107:98–111.
- [32] LI X L,CHENG H,TAN L C,et al. The East Asian summer monsoon variability over the last 145 years inferred from the Shihua Cave record,North China[J]. *Scientific reports*,2017,7:7078. doi:10.1038/s41598-017-07251-3.
- [33] 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.
- [34] DYKOSKI C A,EDWARDS R L,CHENG H,et al. A high-resolution,absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave,China[J]. *Earth and planetary science letters*,2005,233:71–86.
- [35] WANG B,LIN H. Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon[J]. *Journal of climate*,2002,15:386–396.
- [36] WAN N J,LI H C,LIU Z Q,et al. Spatial variations of monsoonal rain in eastern China:instrumental,historic and speleothem records[J]. *Journal of Asian earth sciences*,2011,40:1139–1150.
- [37] 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.
- [38] 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*,2008,266:221–232.
- [39] LI H C,LEE Z H,WAN N J,et al. The  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  records in an aragonite stalagmite from Furong Cave,Chongqing,China: a-2 000-year record of monsoonal climate[J]. *Journal of Asian earth sciences*,2011,40:1121–1130.
- [40] 何报寅,张穗,蔡述明. 近 2 600 年神农架大九湖泥炭的气候变化记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*,2003,23:109–115.

- [41] 满志敏. 中国历史时期气候变化研究[M]. 济南:山东教育出版社,2009.
- [42] CUI Y F, WANG Y J, CHENG H, et al. Isotopic and lithologic variations of one precisely-dated stalagmite across the Medieval/LIA period from Heilong Cave, central China[J]. *Climate of the past*, 2012, 8: 1541–1550.
- [43] MOBERG A, SONECHKIN D M, HOLMGREN K, et al. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data[J]. *Nature*, 2005, 433: 613–617.
- [44] ESPER J, COOK E R, SCHWEINGRUBER F H. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability[J]. *Science*, 2002, 295(5563): 2250–2253.
- [45] D'ARRIGO R, WILSON R, JACOBY G. On the long-term context for late twentieth century warming[J]. *Journal of geophysical research*, 2006, 111(D3): 375–402.
- [46] TAN L C, CAI Y J, AN Z S, et al. Centennial- to decadal-scale monsoon precipitation variability in the semi-humid region, northern China during the last 1 860 years: records from stalagmites in Huangye Cave[J]. *Holocene*, 2011, 21: 287–296.
- [47] DUAN F C, WANG Y J, SHEN C C, et al. Evidence for solar cycles in a late Holocene speleothem record from Dongge Cave, China[J]. *Scientific reports*, 2014, 4: 5159. doi:10.1038/srep05159.
- [48] JIANG X Y, HE Y Q, SHEN C C, et al. Replicated stalagmite-inferred centennial to decadal-scale monsoon precipitation variability in southwest China since the mid Holocene[J]. *The holocene*, 2013, 23(6): 841–849.
- [49] 杨保, 王鑫, 宋苗, 等. 过去 2 000 年温度集成重建研究: 进展与展望[J]. *第四纪研究*, 2017, 37(5): 945–962.
- [50] 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: 1067–1077.
- [51] 罗维均, 王世杰. 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[J]. *科学通报*, 2008, 53(17): 2071–2076.
- [52] DUAN W H, RUAN J Y, LUO W J, et al. The transfer of seasonal isotopic variability between precipitation and drip water at eight caves in the monsoon regions of China[J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 2016, 183: 250–266.
- [53] 陶涛, 谭明, 段武辉. 最短时间尺度环流效应: 单场降水  $\delta^{18}\text{O}$  对复合水汽来源的示踪[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(3): 615–617.
- [54] 宋献方, 唐瑜, 张应华, 等. 北京连续降水水汽输送差异的同位素示踪[J]. *水科学进展*, 2017, 28(4): 488–495.
- [55] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 我国南部夏季季风降水水汽来源的稳定同位素证据[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(6): 1004–1012.
- [56] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 中国东部季风区大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  的特征及水汽来源[J]. *科学通报*, 2009, 54(22): 3521–3531.
- [57] 曾庆存, 李建平. 南北两半球大气的相互作用和季风的本质[J]. *大气科学*, 2002, 26(4): 433–448.
- [58] 田红, 郭品文, 陆维松. 中国夏季降水的水汽通道特征及其影响因子分析[J]. *热带气象学报*, 2004, 20(4): 401–408.
- [59] BAKER A J, SODEMANN H, BALDINI J U L. 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: 5850–5862.
- [60] RAYLEIGH S R S L. Theoretical considerations respecting the separation of gases by diffusion and similar processes[J]. *Philosophical magazine*, 1896, 42(259): 493–498.
- [61] MANN M E, ZHANG Z, RUTHERFORD S, et al. Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and medieval climate anomaly[J]. *Science*, 2009, 326(5957): 1256–1260.
- [62] CONROY J L, RESTREPO A, OVERPECK J T, et al. Unprecedented recent warming of surface temperatures in the eastern tropical Pacific Ocean[J]. *Nature geoscience*, 2009, 2(1): 46–50.
- [63] SHUKLA J, PAOLINA D. The southern oscillation and long range forecasting of the summer monsoon rainfall over India[J]. *Monthly weather review*, 1983, 111: 1830–1837.
- [64] ROXY M K, RITIKA K, TERRAY P, et al. Drying of Indian subcontinent by rapid Indian Ocean warming and a weakening land-sea thermal gradient[J]. *Nature communications*, 2015, 6: 7423. doi:10.1038/ncomms8423.
- [65] CHUNG C E, RAMANATHAN V. Weakening of North Indian SST gradients and the monsoon rainfall in India and the Sahel[J]. *Journal of climate*, 2006, 19: 2036–2045.
- [66] RAMANATHAN V, CHUNG C, KIM D, et al. Atmospheric brown clouds: impacts on South Asian climate and hydrological cycle[J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 2005, 102(15): 5326–5333.
- [67] 王志远, 刘健. 过去 2 000 年全球典型暖期特征与机制的模拟研究[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(6): 1136–1145.