

小冰期气候的湖北石笋碳同位素记录

陈剑舜¹, 张伟宏¹, 陈仕涛², 邵庆丰², 赵侃², 尹敬文¹, 朱丽东¹

1. 浙江师范大学地理与环境科学学院, 浙江金华 321004

2. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023

摘要 研究季风区小冰期的结构特征和区域响应有助于深入了解季风系统与地球内外驱动力的耦合关系。利用湖北神农架永兴洞 YX275 石笋的 7 个 ²³⁰Th 年龄和 120 个碳同位素数据, 建立了 1 360~1 955 AD 期间 5 年分辨率的石笋碳同位素序列。石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在长期趋势上有很好的对应关系, 对小冰期气候响应明显, $\delta^{13}\text{C}$ 记录在大尺度季风环流影响下主要反映了局域湿度变化特征。 $\delta^{13}\text{C}$ 序列在 1 453~1 890 AD 显著正偏, 表明小冰期时湿度明显降低。此外, 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 与亚洲夏季温度、南方涛动指数和热带辐合带记录有较好的一致性, 表明亚洲大陆夏季温度和太平洋水汽可能通过影响夏季风的强弱来调控湖北地区的湿度变化。在小冰期内部, $\delta^{13}\text{C}$ 记录在 1 450~1 550 AD 和 1 790~1 830 AD 出现进一步正偏, 这些振荡分别对应于太阳活动的 Spörer 和 Dalton 极小期, 暗示太阳活动减弱期对中国中部小冰期水文振荡的进一步调控作用。

关键词 小冰期; 石笋; 碳同位素; 局域水文

第一作者简介 陈剑舜, 男, 1995 年出生, 硕士研究生, 自然地理学, E-mail: chenjs02@foxmail.com

通信作者 张伟宏, 女, 讲师, E-mail: zhangwh@zjnu.cn

中图分类号 P532 **文献标志码** A

0 引言

在全球变暖的气候演化背景下, 古气候的重建对人类预测未来气候变化至关重要。深入了解百年尺度和年代际尺度气候系统内部振荡规律和自我调控机制, 仍是一个迫切需要解决的问题。小冰期是全新世最后一次突然变冷事件, 与人类生活和历史文明发展密切相关, 为近年来古气候研究的热点。石笋因其绝对定年、高精度和高分辨率的特点引起学术界的高度关注^[1-6], 在小冰期气候研究中取得若干进展^[7-10]。甘肃省万象洞^[7]和黄谷洞石笋^[8]记录显示在小冰期时季风降水减少, 贵州董哥洞^[9]、湖北永兴洞^[10]和四川黑竹沟洞^[11]等记录也同样指示了小冰期时干旱的气候环境, 这些基于石笋重建的小冰期干旱气候环境并非呈现出所谓的“南涝北旱”气候模式^[12], 与历史文献、湖泊、树轮与冰芯等记录的重建结果并不完全一致^[13]。尽管这些石笋氧同位素记录都指示了小冰期时中国季风降水减少, 但是近些年来石笋氧同位素的气候意义倍受争议。目前主要争议

在于石笋氧同位素是否可以代表季风区的降水量或者平均季风强度, 亦或是水汽源区的变化。例如, Zhang *et al.*^[7] 基于现代降水量和降水同位素的对应关系, 认为石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 主要代表中国季风区降水量的变化; Cheng *et al.*^[4] 基于中国季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的重现性认为石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 主要指示季风平均强度; 谭明^[14] 基于中国石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与海平面气压差指数或海陆温差指数的良好对比关系, 认为中国石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 主要记录了来自印度洋和太平洋的水汽比例变化。由于这些争议, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 能否反映小冰期时东亚夏季风的变化还需要更多的气候指标来对比校验, 进而明确其气候意义。

同一石笋的碳氧同位素由仪器成对测得, 具有相同的时间标尺, 研究二者的对比关系有助于明确石笋氧同位素的气候意义。石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 在古气候和古环境重建中取得重要研究成果^[15-18]。总的来说, 在轨道和千年尺度上, 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 主要反映了洞穴上覆 C_3/C_4 植被类型比例变化^[15], 从而间接反映了区域气候的长期变化; 在百年尺度上, 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 主要受渗流

收稿日期: 2019-03-27; 收修改稿日期: 2019-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602350, 41572340, 41572345) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41602350, 41572340, 41572345]

水滞留时间、先期碳酸盐沉积 (Prior Calcite Precipitation, 简称为PCP)、洞穴通风状况、脱气作用及洞穴围岩等因素影响^[19]。近些年来,通过对秦岭大鱼洞^[19]和江西神农洞^[20]石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的研究,发现石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 在短时间尺度上在很大程度上主要受水文因素影响,主要反映了局域水文变化。此外,Li *et al.*^[21]和Kathayat *et al.*^[22]基于罗德里格斯岛西南部和印度东北部石笋研究,发现碳氧同位素同步变化。由于此两地水汽来源单一,主要来源于印度洋,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 主要反映了印度季风降水的强弱,因此认为 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化主要响应于与夏季风降水相关的地域水文变化。类似地,我国贵州董哥洞两支石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 也显著相关($R=0.64, N=1\ 177; R=0.7, N=2\ 116$),相关研究认为 $\delta^{13}\text{C}$ 在百年尺度上也主要反映局域水文循环的变化^[23]。本文将YX275石笋碳氧同位素序列相互对比分析,一方面有助于了解湖北地区的水文波动状况并进一步理解石笋氧同位素的气候意义,另一方面有助于理解小冰期时东亚大陆降水量的空间特征和相关驱动机制。

1 材料与方法

石笋YX275采自湖北省神农架保康县歇马镇东10 km处的永兴洞(31°35' N, 111°14' E),洞口海拔约800 m,洞穴封闭性较好(图1)。神农架属秦岭山系大巴山脉东端延伸部分,由中高山地组成,区内地势总体呈西南高而东北低阶梯状分布,有利于东南季风的深入,一定程度上阻碍了西南暖湿气流的深入。洞穴上覆植被茂盛,以多年生木本植物和草本植物为主。该区域气候受东亚季风气候控制,年均降水总量为1 500~2 000 mm,降水主要集中于夏半年;温

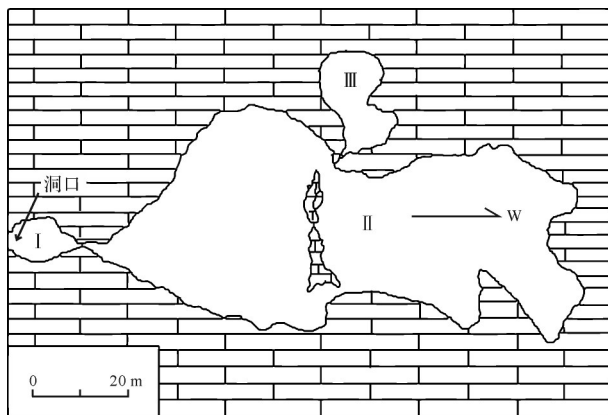


图1 永兴洞内部示意图^[24]

Fig.1 The internal structure of Yongxing Cave^[24]

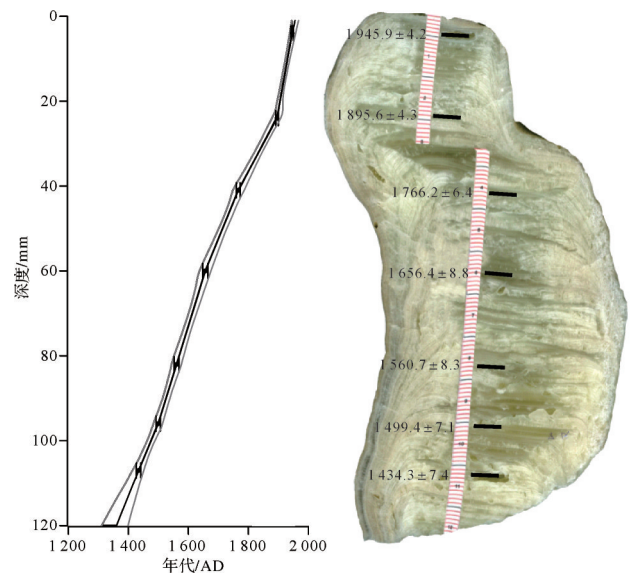


图2 YX275石笋年龄模式与样品剖面对照图^[10]

黑点及误差棒分别为实测年龄及对应 2σ 误差;中间黑色实线为MOD-AGE建立的年代模式,两侧灰色实线为95%置信度范围;石笋剖面上黑色条带为年代样采样位置

Fig.2 Age model and polished surface of stalagmite YX275^[10]

度季节变化显著,夏季高温达30℃,冬季低温至5℃,属于典型的亚热带季风气候^[25]。洞内温度年内波动小,在14℃~16℃之间变化,相对湿度约100%。YX275石笋长约120 mm,直径约35~55 mm。沿生长轴切开并抛光后发现,石笋岩性均一,轴部主要由纯净透明的方解石组成,边缘呈淡黄白色。部分层段纹层发育(图2)。

石笋抛光面上,用直径为0.5 mm牙钻分别从距顶4 mm、24 mm、41 mm、60 mm、82 mm、96 mm和107 mm处获取7个 ^{230}Th 年代样,每个样品层厚跨度为1~2 mm,重量为55~60 mg(图2)。铀系年代测试仪器为MC-ICP-MS Neptune,化学实验方法参照Shao *et al.*^[26],测试在南京师范大学同位素实验室完成,年龄分析误差为 $\pm 2\sigma$ 。采用直径0.5 mm的钻头沿生长轴方向钻取120组氧碳同位素样品,利用碳酸盐自动进样装置以及FinniganMAT-253型质谱仪联机完成测试,分析误差($\pm 2\sigma$)优于0.06‰,VPDB标准,由南京师范大学同位素实验室测试完成。

2 结果

图3显示了YX275石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征。石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值在-11.9‰~-9.2‰之间波动,波幅达2.7‰,平均值为-10.7‰。 $\delta^{13}\text{C}$ 值从1 434 AD时

的 $-11.9‰$ 增大到1618 AD时的 $-9.2‰$,再减小到1930 AD时的 $-11.6‰$,整体呈下凹形态,期间叠加了众多年代际振荡。 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-9.3‰\sim-7.8‰$ 之间波动,振幅为 $1.5‰$,平均值为 $-8.5‰$ 。 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 记录显著相关,但在年代际尺度上 $\delta^{13}\text{C}$ 振荡幅度和频率均高于 $\delta^{18}\text{O}$ 记录($\text{SD } \delta^{13}\text{C}=0.55$, $\text{SD } \delta^{18}\text{O}=0.32$)。YX275石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 表现出良好的对应关系,峰谷大致对应,在1490~1590 AD、1690~1790 AD和1830~1900 AD呈现出三次振荡旋回(图3)。YX275石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的时标都依据MOD-AGE模式建立,具体测年结果、年代模式和 $\delta^{18}\text{O}$ 数据已另文报道^[10]。

3 讨论

3.1 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的小冰期气候特征

众多研究表明石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 有效地反映了当地气候环境的变化^[119-20]。石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化主要取决于当地水文植被和洞穴环境的变化,如土壤微生物的活性、洞穴有效渗水量的多少、洞穴系统中渗流地带的PCP情况以及洞穴通风状况等^[19]。石笋C元素主要来源于植物根系呼吸产生的 CO_2 、大气中的 CO_2 以及生长环境中的基岩成分^[18,27]。石笋中80%~90%的C来源

于土壤 CO_2 ,主要通过改变土壤植被和微生物活动强度来影响石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 变化^[28]。在轨道—数千年尺度上, C_3/C_4 植物类型比例变化对石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 影响尤为显著^[28], C_3 植物产生的 CO_2 与土壤平衡后, CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 约为 $-22‰$,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负,而 C_4 植物产生的 CO_2 与土壤平衡后, CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 约为 $-8‰$,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 偏正,而在百年—数十年尺度上洞穴区域生态及水文因素变化对石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响相对显著^[19]。

尽管石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 在百年尺度上影响因素较多,但地球气候及其影响的洞穴环境发生变化时,这些影响因素促使 $\delta^{13}\text{C}$ 值朝同一方向变化。总体来说,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 主要指示了局域土壤干湿度的变化^[16,19]。1)局域降水量因素。降水量通过影响洞穴裂隙水与围岩的接触时间来影响洞穴滴水 and 石笋中 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化^[19]。当局域降水量增加时,水—岩接触时间减少,裂隙水中溶解的围岩减少,而由于围岩比土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大得多,因此局域降水量增大时,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值减小;降水量减小时,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值增大。洞穴顶部大气降水量的变化可由石笋生长速率来指示,YX275石笋的平均生长速率为 $222 \mu\text{m/a}$,而在1517~1912 AD期间($\delta^{13}\text{C}$ 较为偏正)平均速率减小为 $186 \mu\text{m/a}$ ^[10],暗示此

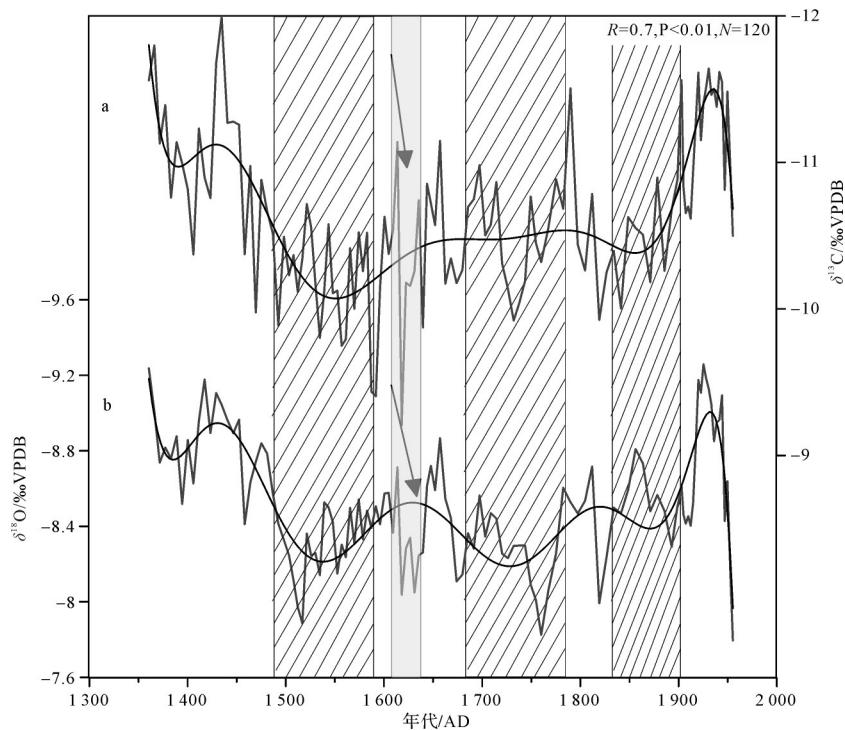


图3 YX275 $\delta^{13}\text{C}$ (a)与 $\delta^{18}\text{O}$ (b)记录对比

黑色粗实线为YX275石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的多项式拟合结果;灰色阴影部分为小冰期内1613~1643 AD的明朝末年弱季风事件;三条斜杠阴影部分代表小冰期时 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的三次振荡旋回

Fig.3 Comparison of $\delta^{13}\text{C}$ (a) and $\delta^{18}\text{O}$ (b) records for stalagmite YX275

时间段内,大气降水减少,水-岩作用时间增加。YX275石笋的生长速率与 $\delta^{13}\text{C}$ 的对应关系支持降水量变化对石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的控制作用。2)土壤植被根系和微生物因素。在百年尺度上, C_3/C_4 植被比例不大可能出现显著变化,土壤植被量、植被密度以及微生物活动变化可能对 $\delta^{13}\text{C}$ 变化有更重要的影响。植物根系和微生物产生的 CO_2 受土壤有效湿度控制^[28]。相对于较干旱的土壤环境来说,湿润的土壤有利于植被总体发育,植被密度增大,土壤 $p\text{CO}_2$ 上升,植被根系和微生物的呼吸作用和土壤有机体的腐败作用加强^[29],这些因素都会造成石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 降低。反之,干旱的环境会导致 $\delta^{13}\text{C}$ 值增大。3)岩溶系统中的PCP因素。大气降水经土壤带和洞穴上覆围岩的裂隙进入洞内,经 CO_2 逸出后,形成石笋。当大气降水减少时,裂隙中的岩溶水易达到饱和并发生 CO_2 逸出和沉积作用(PCP作用)^[30],由于岩溶水中 $^{12}\text{CO}_2$ 优先逸出,那么在岩溶通道发生PCP后,进入洞穴的岩溶水中则相对来说富集 $^{13}\text{CO}_2$,形成石笋时 $\delta^{13}\text{C}$ 值增大^[31]。4)洞穴通风状况因素。洞穴监测工作表明洞穴通风会促使洞穴滴水 CO_2 逸出速率发生变化,而使石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值发生偏移^[17,32]。永兴洞洞口最窄处直径不足1 m,洞穴通道复杂弯曲向上,永兴洞监测显示2016年1月—9月,洞内温度约稳定在14.3℃,相对湿度为100%,洞穴环境稳定^[24]。此外,石笋采于永兴洞III洞厅深处,通风作用影响石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的可能性较小。总之,局域降水、植被根系和微生物及PCP作用均指向干旱气候时,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 正偏;当气候转向湿润时, $\delta^{13}\text{C}$ 值负偏。因此,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 能有效指示局域干湿度变化。YX275石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与黄爷洞、万象洞、董哥洞和织金洞等记录对比,发现这些石笋记录在小冰期时均呈下凹形态,具有较好的重现性^[10]。YX275石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线在百年—数十年尺度上有良好的对应关系($R=0.7, P<0.01, N=120$),在小冰期时, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 都正偏,且在小冰期内部也有相对应的波动(图3),此对应关系表明 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 主要受同一气候因子控制。假如 $\delta^{18}\text{O}$ 指示了区域降水量或者平均季风强度,那么 $\delta^{13}\text{C}$ 主要反映了与季风降水相关的土壤湿度变化。另一方面, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的良好对应关系似乎并不支持石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 受不同水汽源区同位素信号控制的假说^[33]。

关于小冰期时间界定大致有两种认识,一种认为从16世纪开始,19世纪结束^[34];另一种认为小冰期

时间跨度为1300~1850 AD^[35]。Yang *et al.*^[36]基于冰芯、树轮、湖泊及历史文献等多种古气候指标将小冰期时间界定在1400~1920 AD。基于不同石笋界定的小冰期持续时间也不尽相同^[37-38],可能与定年精度、分辨率和气候变化响应的地域性等因素相关。总体上,尽管不同区域、不同气候载体记录的小冰期时间各有差异,但小冰期结束的时间较为一致,多在1850 AD前后。YX275石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录于1360~1941 AD整体正偏,指示土壤湿度明显降低,为对小冰期冷期的水文响应。基于石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化特征(图4),利用 $\delta^{13}\text{C}$ 序列的平均值,总体上可将石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 序列划分为三个阶段:1)1360~1452 AD, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 总体负偏,此时段土壤湿度未出现降低趋势;2)1453~1890 AD,这一阶段对应小冰期盛期, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 总体正偏,指示了小冰期盛期土壤湿度显著减弱;3)1891~1955 AD, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 总体负偏,指示此时段内季风水文循环增强,土壤湿度升高。在小冰期盛期(1453~1890 AD), $\delta^{13}\text{C}$ 存在年代际高频振荡,表明地球气候在极端期并非稳定不变。从这三个阶段来看,小冰期盛期土壤湿度降低和恢复的过程较快,在20年内完成。

16世纪末至17世纪初, $\delta^{13}\text{C}$ 逐渐正偏,在约1618 AD达到最正值-9.2‰,幅度达1.5‰(图3),此时期的土壤湿度达到最低值,与万象洞石笋所记录的“明末弱季风时期”相对应。这一弱季风事件还得到黄爷洞石笋记录^[8]、树轮记录^[39]及历史文献^[40]的支持,此干旱事件,可能促进明末农民起义,加速明朝灭亡^[41]。

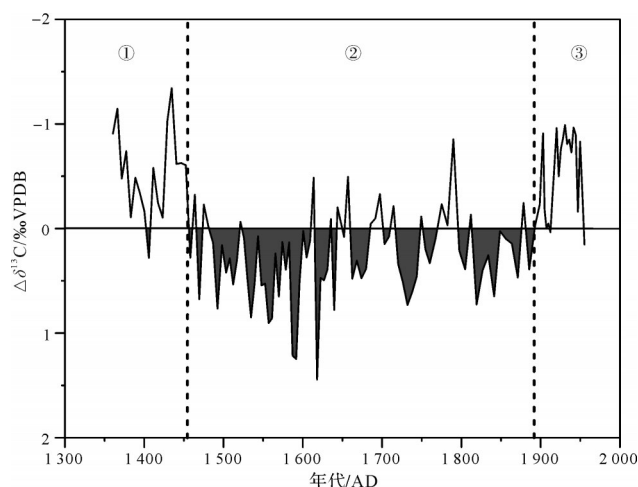


图4 YX275石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 内部结构特征

$\Delta\delta^{13}\text{C}=\delta^{13}\text{C}-\delta^{13}\text{C}$ 平均值所得;①、②和③分别为基于石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 特征划分的三个阶段

Fig.4 Characteristics of stalagmite YX275 $\delta^{13}\text{C}$

3.2 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 与陆地温度和太平洋水汽的同步变化

前人通过分析树轮的 $\delta^{14}\text{C}$ 序列(反映太阳活动)、冰芯的酸度或冰芯中的火山硫酸盐沉积物记录(H^+ 浓度,或重建气溶胶反映火山活动)、冰芯气泡的温室气体浓度等参数的变化再结合历史文献、湖泊沉积物和石笋等各种地质载体记录,认为小冰期气候的驱动机制是复杂的,受多种强迫因子影响,而太阳活动弱和火山活动强为主要强迫因子,大气环流和海洋环流的变化可能是太阳外部强迫通过地球内部的反馈作用,进一步加强或削弱外部强迫^[42-43]。为探究小冰期时湖北地区土壤水文对太阳辐射能量收支平衡的关系,将 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与太阳总辐照度(ΔTSI)^[44] 进行相关性分析,发现二者几乎不存在相关性。仅在 1450~1550 AD 和 1790~1830 AD 时期 $\delta^{13}\text{C}$ 的正偏变化大致对应于太阳活动的 Spörer 和 Dalton 极小期,而在 1550~1790 AD 期间太阳总辐照度与 $\delta^{13}\text{C}$ 变化的对应关系不明显(图 5),表明太阳活动印记在小冰期盛期的中部不显著。而 YX275 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 序列的功率谱分析结果显示,在 90% 置信度水平下存在显著的 ~11 年周期(图 6),与太阳黑子活动 11 年周期相一致,暗示太阳活动可能对湖北水文变化起部分调控作用。

小冰期时热带太平洋对东亚季风区水文循环影响显著。石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与亚洲大陆夏季温度^[45]、SOI 指数^[46]和卡里亚科 Ti 含量^[47]进行相关性分析,发现 $\delta^{13}\text{C}$ 与 SOI 指数相关程度最高($R=0.52, P<0.01, N=119$), $\delta^{13}\text{C}$ 与亚洲大陆夏季温度和卡里亚科 Ti 含量也有较好的相关性($R=-0.44, P<0.01, N=119$; $R=-0.42, P<0.01, N=95$)。Xu *et al.*^[48]通过研究亚洲季风区水文气候与赤道太平洋之间的联系,发现小冰期时赤道太平洋海温降低导致热带辐合带(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)南移和沃克环流增强,出现 La Niña 偏强状态,东亚夏季风减弱。YX275 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与 SOI 指数在小冰期内均表现出正偏特征且高度相关,即 La Niña 偏强时东亚季风带来的降水量减少导致湖北地区湿度降低,暗示小冰期时 ENSO 变化状态对东亚水文循环起主要控制作用,这与赵侃等^[49]通过报道 YX92 石笋认为 1788~1956 AD 期间东亚季风在年代际尺度旋回特征可能主要受控于 ENSO 机制相吻合。亚洲大陆夏季温度变化造成海陆间温度梯度差异,从而调控季风水文

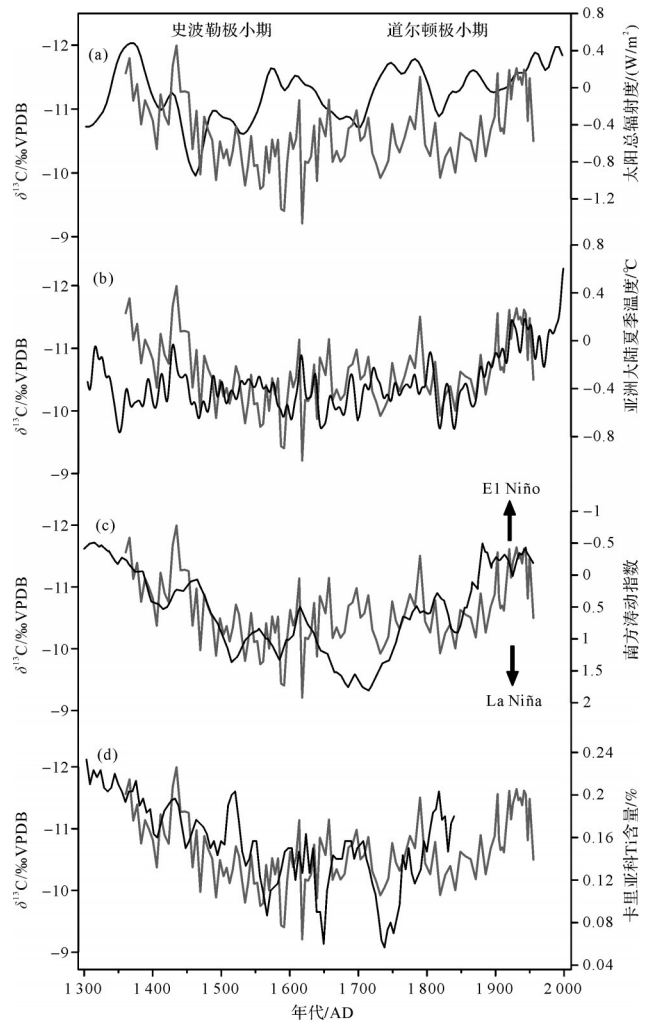


图 5 永兴洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与其他记录对比

灰色实线代表 YX275 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录; (a) 为太阳总辐照度 (ΔTSI) 记录^[44]; (b) 为亚洲大陆夏季温度记录^[45]; (c) 为南方涛动指数^[46]; (d) 为卡里亚科海盆 Ti 含量^[47]; 灰色阴影部分分别代表太阳活动 Spörer 和 Dalton 极小期

Fig.5 Comparison of the stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ data from Yongxing Cave with other records

循环^[50]。此外,季风水文循环与 ITCZ 移动密切相关,此时期 ITCZ 南偏,造成东亚大气降水减少,土壤湿度降低。因而,太平洋水汽对中国中部小冰期水文循环的重要调控作用。

4 结论

基于湖北神农架永兴洞 YX275 石笋 7 组 ^{230}Th 年龄和 120 组碳同位素数据,建立了 1360~1955 AD 期间该区域高分辨率石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 序列。 $\delta^{13}\text{C}$ 记录主要响应于大尺度季风环流影响下的局域湿度变化。小冰期时,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 显示出与 $\delta^{18}\text{O}$ 记录相似的整体正偏波动特征,并呈现出共有的 3 次内部振荡旋回特征。此

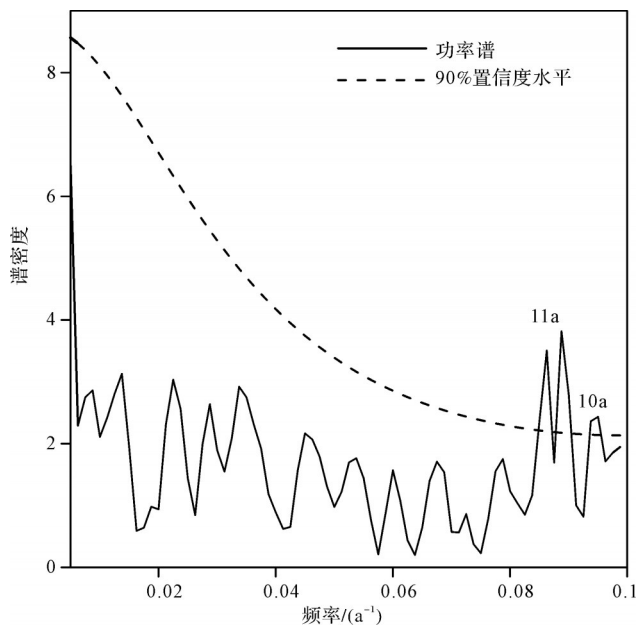


图6 YX275石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 功率谱分析图
虚线代表90%置信度水平

Fig.6 Power spectral analysis of stalagmite YX275 $\delta^{13}\text{C}$ data
the 90% confidence level is labeled by the dotted line

外,在1 613~1 644 AD期间,YX275石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录呈现出约1.5‰的正偏,对应于明末的弱季风时期。石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与亚洲夏季温度、南方涛动指数和热带辐合带记录呈现出良好的对应关系,暗示太平洋水汽对中国中部小冰期水文循环的重要调控作用。

参考文献(References)

- [1] 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, 294(5550): 2345-2348.
- [2] 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.
- [3] 刘殿兵,汪永进,陈仕涛. 神农架天鹅洞石笋76~58kaB. P. 时段DO事件[J]. *沉积学报*, 2007, 25(1): 131-138. [Liu Dianbing, Wang Yongjin, Chen Shitao. DO events during 76~58kaB. P. from a stalagmite in Tian'e Cave, Shennongjia area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(1): 131-138.]
- [4] Cheng H, Edwards R L, Broecker W S, et al. Ice age terminations[J]. *Science*, 2009, 326(5950): 248-252.
- [5] 王权,刘殿兵,汪永进,等. 湖北神农架年纹层石笋记录的YD与8.2ka事件转型模式研究[J]. *沉积学报*, 2015, 33(6): 1140-1148. [Wang Quan, Liu Dianbing, Wang Yongjin, et al. Transitional patterns of YD and 8.2 ka event recorded by annually-laminated stalagmites from Qingtian Cave, Mt. Shennongjia[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(6): 1140-1148.]
- [6] 张伟宏,廖泽波,陈仕涛,等. 湖北高分辨率石笋记录的DO18事件特征[J]. *沉积学报*, 2018, 36(4): 674-683. [Zhang Weihong, Liao Zebo, Chen Shitao, et al. DO18 event depicted by a high-resolution stalagmite record from Yongxing Cave, Hubei province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(4): 674-683.]
- [7] 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.
- [8] 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 1860 years: Records from stalagmites in Huangye cave[J]. *The Holocene*, 2011, 21(2): 287-296.
- [9] 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 1200 years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 122: 250-257.
- [10] 张伟宏,陈仕涛,汪永进,等. 小冰期东亚夏季风快速变化特征:湖北石笋记录[J]. *第四纪研究*, 2019, 39(3): 765-774. [Zhang Weihong, Chen Shitao, Wang Yongjin, et al. Rapid change in the East Asian summer monsoon: Stalagmite records in Hubei, China[J]. *Quaternary Sciences*, 2019, 39(3): 765-774.]
- [11] 蒋文静,赵侃,陈仕涛,等. 小冰期十年际尺度亚洲季风变化的四川黑竹沟洞石笋记录[J]. *第四纪研究*, 2017, 37(1): 118-129. [Jiang Wenjing, Zhao Kan, Chen Shitao, et al. Decadal climate oscillations during the Little Ice Age of stalagmite record from Heizhugou Cave, Sichuan[J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(1): 118-129.]
- [12] Tan L C, Cai Y J, Cheng H, et al. High resolution monsoon precipitation changes on southeastern Tibetan Plateau over the past 2300 years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 195: 122-132.
- [13] 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.
- [14] 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.]
- [15] Dorale J A, González L A, Reagan M K, et al. A high-resolution record of Holocene climate change in Speleothem calcite from cold water cave, northeast Iowa[J]. *Science*, 1992, 258(5088): 1626-1630.
- [16] Rudzka D, Mcdermott F, Baldini L M, et al. The coupled $\delta^{13}\text{C}$ -

- radiocarbon systematics of three Late Glacial/early Holocene speleothems; insights into soil and cave processes at climatic transitions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75 (15): 4321-4339.
- [17] Li T Y, Shen C C, Li H C, et al. Oxygen and carbon isotopic systematics of aragonite speleothems and water in Furong Cave, Chongqing, China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(15): 4140-4156.
- [18] Campos M C, Chiessi C M, Voigt I, et al. $\delta^{13}\text{C}$ decreases in the upper western South Atlantic during Heinrich Stadials 3 and 2 [J]. *Climate of the Past*, 2017, 13(4): 345-358.
- [19] Tan L C, Zhang H W, Qin S J, et al. Climatic and anthropogenic impacts on $\delta^{13}\text{C}$ variations in a stalagmite from central China [J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2013, 24 (3): 333-343.
- [20] Zhang H W, Cai Y J, Tan L C, et al. Large variations of $\delta^{13}\text{C}$ values in stalagmites from southeastern China during historical times: Implications for anthropogenic deforestation [J]. *Boreas*, 2015, 44(3): 511-525.
- [21] Li H Y, Cheng H, Sinha A, et al. Hydro-climatic variability in the southwestern Indian Ocean between 6000 and 3000 years ago [J]. *Climate of the Past*, 2018, 14(12): 1881-1891.
- [22] Kathayat G, Cheng H, Sinha A, et al. Evaluating the timing and structure of the 4.2ka event in the Indian summer monsoon domain from an annually resolved speleothem record from Northeast India [J]. *Climate of the Past*, 2018, 14(12): 1869-1879.
- [23] Liu D B, Wang Y J, Cheng H, et al. Strong coupling of centennial-scale changes of Asian monsoon and soil processes derived from stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records, southern China [J]. *Quaternary Research*, 2016, 85(3): 333-346.
- [24] Wang Q, Wang Y J, Zhao K, et al. The transfer of oxygen isotopic signals from precipitation to drip water and modern calcite on the seasonal time scale in Yongxing Cave, central China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77: 474.
- [25] 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.
- [26] Shao Q F, Bahain J J, Wang W, et al. Coupled ESR and U-series dating of Early Pleistocene *Gigantopithecus* faunas at Mohui and Sanhe Caves, Guangxi, southern China [J]. *Quaternary Geochronology*, 2015, 30: 524-528.
- [27] Cheng H, Spötl C, Breitenbach S F, et al. Climate variations of Central Asia on orbital to millennial timescales [J]. *Scientific Reports*, 2016, 5: 36975.
- [28] Genty D, Baker A, Massault M, et al. Dead carbon in stalagmites: carbonate bedrock paleodissolution vs. ageing of soil organic matter. Implications for ^{13}C variations in speleothems [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(20): 3443-3457.
- [29] Cruz F W Jr, Burns S J, Karmann I, et al. A stalagmite record of changes in atmospheric circulation and soil processes in the Brazilian subtropics during the Late Pleistocene [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(21/22): 2749-2761.
- [30] Fairchild I J, Smith C L, Baker A, et al. Modification and preservation of environmental signals in speleothems [J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 75(1/2/3/4): 105-153.
- [31] Riechelmann D F C, Deininger M, Scholz D, et al. Disequilibrium carbon and oxygen isotope fractionation in recent cave calcite: Comparison of cave precipitates and model data [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 103: 232-244.
- [32] Tremaine D M, Froelich P N, Wang Y. Speleothem calcite formed *in situ*: Modern calibration of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ paleoclimate proxies in a continuously-monitored natural cave system [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(17): 4929-4950.
- [33] 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.
- [34] Mann M E. Little ice age, medieval climatic optimum, encyclopedia of global environmental change [M]//Munn T, Wiley J, Ghil M. The earth system: Physical and chemical dimensions of global environmental change. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2007: 1.
- [35] Miller G H, Geirsdóttir Á, Zhong Y F, et al. Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea-ice/ocean feedbacks [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(2): L02708.
- [36] Yang B, Braeuning A, Johnson K R, et al. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29 (9) : 38-1-38-4.
- [37] Tan M, Liu T S, Hou J Z, et al. Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2650-year stalagmite record of warm season temperature [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30 (12): 1617.
- [38] Fleitmann D, Burns S J, Neff U, et al. Palaeoclimatic interpretation of high-resolution oxygen isotope profiles derived from annually laminated speleothems from Southern Oman [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(7/8): 935-945.
- [39] Cook E R, Anchukaitis K J, Buckley B M, et al. Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium [J]. *Science*, 2010, 328(5977): 486-489.
- [40] Shen C M, Wang W C, Hao Z X, et al. Exceptional drought events over eastern China during the last five centuries [J]. *Climate Change*, 2007, 85(3/4): 453-471.
- [41] Zheng J Y, Xiao L B, Fang X Q, et al. How climate change impacted the collapse of the Ming Dynasty [J]. *Climate Change*, 2014, 127(2): 169-182.
- [42] Renssen H, Goosse H, Muscheler R. Coupled climate model simulation of Holocene cooling events: Oceanic feedback ampli-

- fies solar forcing[J]. *Climate of the Past*, 2006, 2(2): 79-90.
- [43] Sigl M, McConnell J R, Toohey M, et al. Insights from Antarctica on volcanic forcing during the Common Era[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(8): 693-697.
- [44] Steinhilber F, Beer J, Fröhlich C. Total solar irradiance during the Holocene [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(19): L19704.
- [45] Shi F, Ge Q S, Yang B, et al. A multi-proxy reconstruction of spatial and temporal variations in Asian summer temperatures over the last millennium[J]. *Climatic Change*, 2015, 131(4): 663-676.
- [46] Yan H, Sun L G, Wang Y H, et al. A record of the Southern Oscillation Index for the past 2, 000 years from precipitation proxies[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(9): 611-614.
- [47] Haug G H, Hughen K A, Sigman D M, et al. Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene [J]. *Science*, 2001, 293(5533): 1304-1308.
- [48] Xu H, Lan J, Sheng E G, et al. Hydroclimatic contrasts over Asian monsoon areas and linkages to tropical Pacific SSTs [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33177.
- [49] 赵侃,陈仕涛,崔英方,等. 神农架石笋记录的近200年东亚季风变化及其ENSO响应[J]. *地理研究*, 2015, 34(1): 74-84. [Zhao Kan, Chen Shitao, Cui Yingfang, et al. East Asian monsoon changes and its ENSO response revealed by a 200-year stalagmite record from Yongxing Cave on the Mountain Shennongjia [J]. *Geographical Research*, 2015, 34(1): 74-84.]
- [50] Davis B A S, Brewer S. Orbital forcing and role of the latitudinal insolation/temperature gradient [J]. *Climate Dynamics*, 2009, 32(2/3): 143-165.

Carbon Isotope Record in Stalagmites from Hubei during the Little Ice Age

CHEN JianShun¹, ZHANG WeiHong¹, CHEN ShiTao², SHAO QingFeng², ZHAO Kan², YIN JingWen¹, ZHU LiDong¹

1. College of Geography and Environment Science, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China

2. College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

Abstract: Studying the structural characteristics and regional response in the monsoon region during the Little Ice Age (LIA) is helpful in understanding the coupling relationship between the monsoon system and the earth's internal and external driving forces. Using 7^{230}Th ages and 120 carbon isotope data from the YX275 stalagmite of Yongxing Cave, Hubei Province, we establish the carbon isotope time-series with a 5-yr-resolution from 1 360-1 955 AD. A close similarity between the long term trend of carbon and oxygen isotope records ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$) indicates that the $\delta^{13}\text{C}$ record responds to climate change during the LIA. Stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ mainly reflects the local humidity variation influenced by the large-scale monsoon circulation. The $\delta^{13}\text{C}$ values show a significantly positive shift from 1 453-1 890 AD, indicating that the soil moisture decreased significantly during the LIA. The stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ record is consistent with the Asian summer temperature, the Southern Oscillation Index, and the mean position of the intertropical convergence zone (ITCZ), suggesting that the Asian continental summer temperature and Pacific Ocean water vapor may regulate the humidity variation in Hubei province by influencing the strength of the summer monsoon. During the LIA, the $\delta^{13}\text{C}$ record was heavier in 1 460-1 550 AD and 1 815-1 865 AD. These fluctuations correspond to the Spörer and Dalton Minimums, respectively, implying that the solar activity weakening period further regulated the hydrological oscillations during the LIA in central China.

Key words: Little Ice Age; stalagmite; carbon isotope; local hydrology