



倒数第三次冰消期气候变化的石笋多指标分析

陈公哲, 陈仕涛, 刘笑, 赵侃, 王真军, 张振球, 汪永进

引用本文:

陈公哲, 陈仕涛, 刘笑, 赵侃, 王真军, 张振球, 汪永进. 倒数第三次冰消期气候变化的石笋多指标分析[J]. 沉积学报, 2023, 41(4): 992-1001.

CHEN GongZhe, CHEN ShiTao, LIU Xiao, ZHAO Kan, WANG ZhenJun, ZHANG ZhenQiu, WANG YongJin. Multi-proxy Analysis from Stalagmite of Climate Change During the Ice Age Termination III[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(4): 992-1001.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

小冰期气候的湖北石笋碳同位素记录

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

沉积学报. 2020, 38(3): 497-504 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.058>

石笋初始 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 值的冰量周期特征及其环境意义——以湖北三宝洞为例

Ice Volume Cycle Characteristics and the Environmental Significance of the Initial $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ Ratio Inferred from Stalagmites: A case study from San-bao Cave, Hubei

沉积学报. 2019, 37(2): 301-308 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.123>

湖北高分辨率石笋记录的DO18事件特征

DO18 Event Depicted by a High-resolution Stalagmite Record from Yongx-ing Cave, Hubei Province

沉积学报. 2018, 36(4): 674-683 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.051>

早全新世季风演化的高分辨率石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录研究——以河南老母洞石笋为例

Early Holocene Monsoon Evolution of High-resolution Stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ Records: in Henan Laomu Cave

沉积学报. 2015, 33(1): 134-141 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.01.014>

湖北神农架年纹层石笋记录的YD与8.2 ka事件转型模式研究

Transitional Patterns of YD and 8.2 ka Event Recorded by Annually-laminated Stalagmites from Qingtian Cave, Mt.Shennongjia

沉积学报. 2015, 33(6): 1140-1148 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.06.007>

文章编号:1000-0550(2023)04-0992-10

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.020

倒数第三次冰消期气候变化的石笋多指标分析

陈公哲¹, 陈仕涛^{1,2}, 刘笑¹, 赵侃^{1,2}, 王真军^{1,2}, 张振球^{1,2}, 汪永进^{1,2}

1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023

2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

摘要 对生长于倒数第三次冰消期(简称“倒三冰消期”)的石笋进行多指标分析,有利于全面认识该时期气候的变化特征和成因机制。通过对湖北永兴洞石笋(编号:YXB)的同位素测试、石笋纹层生长直径和岩性特征分析,重建了倒三冰消期亚洲季风气候变化序列。结果表明:纹层生长直径与 $\delta^{18}\text{O}$ 具有基本一致的变化特征,主要表现在 $\delta^{18}\text{O}$ 负偏时,纹层生长直径变短, $\delta^{18}\text{O}$ 正偏时,纹层生长直径变长。特别是纹层生长直径变化与石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 一致,也记录了在倒三冰消期中存在一个明显的弱季风事件(亦称“类YD事件”)。石笋岩性特征对该事件也有明显的响应,表现为在该时段石笋主要发育白色不透光纹层,明显不同于其他时段发育的烟灰色透光纹层,表明纹层生长直径和岩性这类代表洞穴岩溶系统的信号也响应于 $\delta^{18}\text{O}$ 指示的气候变化。石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 在整体上与 $\delta^{18}\text{O}$ 变化类似,但对类YD事件响应不明显,说明在亚洲季风区, $\delta^{13}\text{C}$ 代表的局域环境响应于冰消过程,但对冰期向间冰期转换大背景下的季风减弱事件响应不敏感。功率谱分析发现,上述指标存在522 a、223~261 a、130~145 a、73~82 a、64 a、30 a等周期信号,这些次一级的气候变率可能是太阳活动与海气耦合的结果。

关键词 倒三冰消期;石笋;多指标;碳同位素;纹层生长直径;岩性特征

第一作者简介 陈公哲,男,2001年出生,本科,全球变化与区域响应,E-mail: cgznu@163.com

通信作者 陈仕涛,男,教授,全球变化与区域响应,E-mail: chenshitao@njnu.edu.cn

中图分类号 P532 **文献标志码** A

0 引言

晚第四纪被约100 ka的周期划分为一系列冰期—间冰期旋回,并被许多气候记录所证实^[1-3]。为深入理解气候旋回中冰期向间冰期转换(简称冰消期)的机制,需要借助高分辨率气候信息载体对各个冰消期内部结构进行深入剖析^[4]。倒数第三次冰消期(简称“倒三冰消期”)由于时段较老、测年精度与分辨率较低等原因,相对末次、倒二冰消期而言研究尚不够充分。湖北省永兴洞石笋以可靠的U/Th年龄、清晰的纹层重建了245 ka左右高分辨率 $\delta^{18}\text{O}$ 气候变化序列,在倒三冰消期发现了类似于末次冰消期的千年弱季风事件,简称“类YD事件”^[5]。本研究将辅以石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 、纹层生长直径、岩性等多种指标,以期进一步完善倒三冰消期气候演变细节,揭示完整的环境演化信息,为气候机制探索提供有力支撑。

近年来,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 在重建局域生态环境演化过程

中得到了进一步发展。印度Valmiki洞末次冰消期石笋氧碳同位素比对表明 $\delta^{13}\text{C}$ 能够反应局域植被变化,并与水文气候条件存在密切联系^[6];江西神农洞的两支晚全新世石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 与微量元素序列表明 $\delta^{13}\text{C}$ 主要反映了洞穴上覆植被的变化过程^[7];综合比对石笋SN17和JL1的氧碳同位素记录发现4.3~3.0 ka厄尔尼诺频率发生改变,且 $\delta^{13}\text{C}$ 指示的局域环境可能受水文气候调控^[8]。仍有诸多研究证明石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 能够指示区域生态环境的演化过程,可以作为研究季风降水变化的辅助指标^[9-10]。

石笋纹层由于能够为更老时段的气候研究给予精确的年代学支持^[11],同时还可以提供高分辨率气候变化信息^[12],因此越来越引起关注。已有研究表明,石笋纹层作为一种常见的岩溶沉积形态,能够响应于气候和环境的变化^[13]。这是因为,不同时期洞穴滴水条件的变化可能使石笋纹层形成明暗交替的沉积

收稿日期:2021-12-02;修回日期:2022-01-27;录用日期:2022-03-11;网络出版日期:2022-03-11

基金项目:国家自然科学基金项目(42072207,41931178,42071105);江苏高校优势学科建设工程(164320H116)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42072207, 41931178, 42071105; Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions, No. 164320H116]

韵律^[14]。相关指标中,石笋纹层类型^[15]、厚度^[16]、灰度^[17]、沉积学特征^[18]等指标已有了初步研究,但有关石笋纹层生长直径的研究却较少。其实,Franke^[19]早在1965年就提出,石笋生长可能与当地的降水量之间存在着一定的关联。石笋生长模拟研究结果也显示石笋生长形态可能受到洞内温度、滴水速率、CO₂等因素的影响^[20]。而纹层生长直径作为石笋形貌学上的重要特征,理论上也能够反映石笋发育状况及其与降水的关系。例如,湖北清江和尚洞HS4石笋顶部35 cm的生长直径与研究区的洪涝频率存在相关性^[21],进一步说明石笋纹层生长直径可以作为降水替代指标。

基于此,本文对一支采自湖北永兴洞石笋(编号:YXB)进行碳同位素、石笋纹层生长直径和岩性特征分析,重建倒三冰消期亚洲季风气候变化序列,进一步丰富和完善对亚洲季风冰消过程特征和机制的认识。

1 研究区域、材料与方法

1.1 研究区域与洞穴概况

永兴洞位于湖北神农架地区保康县歇马镇东10 km处(图1a),其经纬度为31°35′3.7″N, 111°14′42.3″E。该地区属扬子准地层区的大巴山一大洪山分区,以山高、坡陡、谷深为主要特征,石灰岩分布广泛,山势峭拔。该地区属于亚热带季风气候,主要受亚热带气候环流系统控制,大部分地区年霜期超过200天,且具高山气候的特点^[22]。

永兴洞洞口海拔约800 m,洞穴发育在奥陶纪石

灰岩地层中,上覆岩层厚约50 m,洞穴上覆植被茂盛,以多年生木本植物(C₃)为主。2016年1—9月监测结果显示,洞内温度约稳定在14.3℃,相对湿度接近100%,洞穴环境稳定^[23]。本研究使用的石笋YXB采于II号洞厅(图1b)。前期研究已经表明石笋生长所依靠的洞穴滴水直接来自上部地表降水的下渗,无其他外缘水的混入,因此石笋能直接记录洞穴上部的气候和生态环境信息^[24]。

1.2 材料与方法

石笋YXB长约403 mm,宽约110 mm,呈长柱状,外层风化状表皮为浅褐色,似覆盖一层黏土薄膜。沿石笋生长轴切开后,发现石笋距离顶部40~403 mm的部分生长轴未发生较大偏移,表明滴水中心基本稳定,为本次研究的主要部分。其剖面上可见次毫米级层厚的纹层,清晰而平直,弯曲弧度小,因而有利于减小在直径测定中产生的误差。

通过进一步观察,石笋YXB 40~403 mm的部分可以再细分为4个小段(图2)。其中:D段(40~207 mm)中的石笋纹层生长直径明显较短,且以烟灰色透光纹层为主;B段(256~338 mm)与D段存在较为明显的差别,主要表现在石笋纹层生长直径较长,发育大量白色不透光纹层;而C段(208~255 mm)、A段(339~403 mm)两段的纹层生长直径平均长度较D段大、但比B段小,烟灰色透光纹层和白色不透光纹层交替出现。

石笋YXB同位素样品采集与测试由南京师范大学洞穴同位素实验室完成,处理详情见文献[5]。石笋纹层生长直径的测定采用Muñoz-García *et al.*^[25]提出的方法,即利用同一生长层上的顶面和左右两边

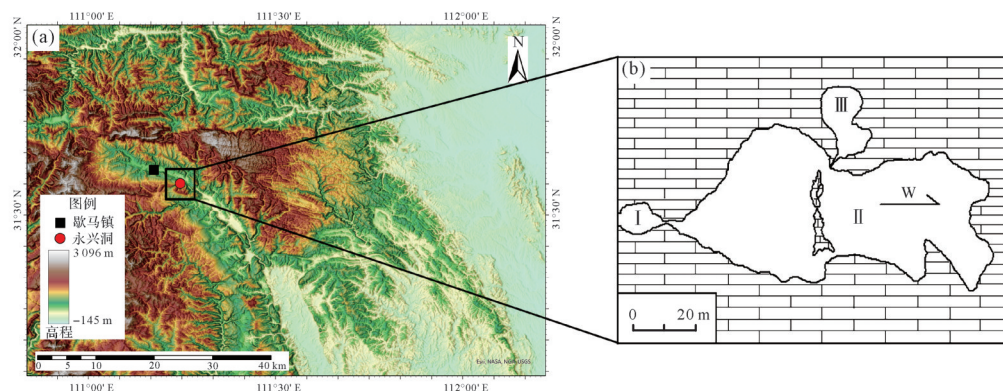


图1 永兴洞地理位置(a)及洞穴内部概况^[5](b)

图中罗马数字“I、II、III”分别表示永兴洞的三个洞厅

Fig.1 Location of Yongxing Cave (a) and the inner condition of Yongxing Cave^[5] (b)

The Roman numerals “I, II, and III” in the figure represent the three halls of Yongxing Cave

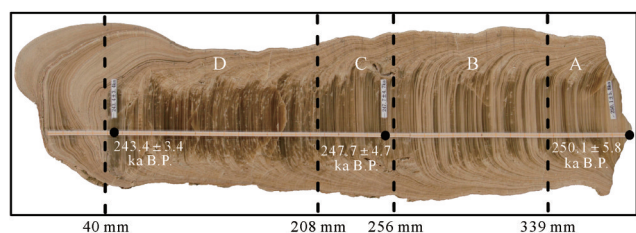


图2 石笋YXB纵剖面分层示意图

图中圆点为测年点、数字为U-Th定年数据、字母示意石笋分层结果

Fig.2 Profile and layers of stalagmite YXB

The dot in the figure is the dating point, the number is U-Th dating data, and the letters indicate stalagmite stratification results

的破发点限定碳酸盐晶体的生长区域,从而确定纹层生长直径。研究依据此方法使用游标卡尺,对YXB石笋的纹层生长直径进行测量,结果保留两位小数,分辨率为1 mm,最终共测得364个石笋纹层生长直径数据。

2 结果

陈仕涛等^[5]以U-Th测年结果为框架、纹层统计结果为基础,结合石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 建立了倒三冰消期亚洲季风年纹层时标。此次研究进一步分析 $\delta^{13}\text{C}$ 、石笋纹层生长直径以及石笋岩性特征变化,并探究它们与 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系。考虑到该石笋顶部可能存在沉积间断,本文主要对石笋40~403 mm连续生长部分进行分析。石笋YXB的 $\delta^{13}\text{C}$ 、纹层生长直径随深度变化序列如图3所示。

2.1 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 序列

整段记录中石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化范围是 -9.83‰ ~ -12.97‰ ,均值为 -11.37‰ ,振幅为 3.14‰ 。总体上,将石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 进行比对,发现二者相关性较好,且均表现出逐渐负偏的趋势。从细节对比看,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 在A、C、D段变化趋势比较相似,而在B段存在差异。具体而言,A段 $\delta^{13}\text{C}$ 围绕 -10.57‰ 震荡,振幅是 1.37‰ ,变化幅度较 $\delta^{18}\text{O}$ 小;B段与 $\delta^{18}\text{O}$ 正偏并围绕一个均值上下波动不同,本段 $\delta^{13}\text{C}$ 从 -10.31‰ 变化到 -12.18‰ ,持续负偏;C段 $\delta^{13}\text{C}$ 从 -11.46‰ 负偏到 -12.79‰ ,变幅为 1.33‰ ,与B段类似,因此从这个层面上讲, $\delta^{13}\text{C}$ 在C和B中可以视为连续变化的一段;D段 $\delta^{13}\text{C}$ 围绕均值 -12.17‰ 上下震荡,变化幅度为 1.91‰ 与A段类似。

2.2 石笋纹层生长直径序列和岩性变化

整段记录中YXB纹层生长直径在3.88~8.14 cm

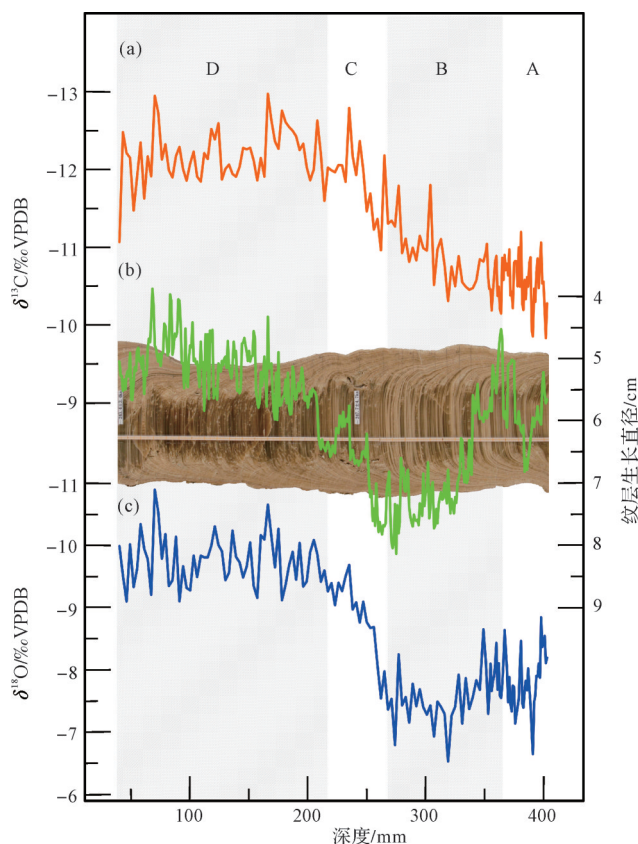


图3 YXB氧碳同位素与纹层生长直径随深度变化曲线图

(a) $\delta^{13}\text{C}$ (橘线)、(b) 纹层生长直径 (绿线)、(c) $\delta^{18}\text{O}$ (蓝线) 随深度变化曲线

Fig.3 Oxygen, carbon isotope, and laminae growth diameter with depth of stalagmite YXB

(a) $\delta^{13}\text{C}$ (orange curve), (b) laminae growth diameter (green curve), and (c) $\delta^{18}\text{O}$ (blue curve) variation with depth

内变化,均值是5.91 cm,并且其变化与石笋岩性密切相关,表现为白色不透光层的纹层生长直径整体上长于烟灰色透光层的纹层生长直径。相比 $\delta^{13}\text{C}$,纹层生长直径序列与 $\delta^{18}\text{O}$ 变化更相似,即 $\delta^{18}\text{O}$ 负偏时,YXB纹层生长直径较短,而 $\delta^{18}\text{O}$ 正偏时,YXB纹层生长直径相对较长。具体而言,A段YXB纹层生长直径变化与 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 类似,均值为5.77 cm,对应的岩性变化为一系列的烟灰色的透光层与白色的不透光纹层交替出现;B段中石笋纹层生长直径平均值为7.28 cm,为整个石笋纹层生长直径最长的部分,变幅为1.86 cm,对应的岩性变化为白色的不透光纹层夹少量的透明层,响应 $\delta^{18}\text{O}$ 同步变化,而与 $\delta^{13}\text{C}$ 相关性不明显,表明石笋纹层生长直径所传达的信号可能与 $\delta^{18}\text{O}$ 存在联系;C段纹层生长直径变化趋势与 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 一致,为转型期,从7.61 cm变小到5.76 cm,其岩性与A段类似,夹杂两种不同岩性的纹层;D段纹层

生长直径平均值是 5.14 cm,且发育了大量烟灰色透光纹层,质地纯净,是整个记录中纹层生长直径最短的部分,与纹层生长直径较长、以白色不透光纹层为主的 B 段形成鲜明对比,暗示这两个阶段的石笋生长状况存在较大差异。

3 讨论

石笋 YXB 生长覆盖时段为 241.00~245.70 ka,大致对应于倒三冰消期。和石笋 ZLP2 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的末次冰消期气候变化过程^[26]类似:在北高纬夏季太阳辐射升高的背景下^[27],亚洲季风在倒三冰消期的 245.70~245.20 ka 进入一个季风增强阶段,相当于末次冰消期的 BA 暖期,这里称之为类 BA 暖期;随着 $\delta^{18}\text{O}$ 正偏进入明显的季风减弱阶段,持续了 $1\,371\pm 59$ a,和末次冰消期的 YD 事件非常相似,这里称为类 YD 事件;之后气候经历 74 ± 4 a 转型, $\delta^{18}\text{O}$ 负偏进入 MIS 7e 阶段(图 4)。

3.1 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候变化的响应

轨道尺度上,石笋 YXB 的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 序列呈现大致相同的变化,伴随北高纬夏季太阳辐射升高, $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 均经历了较为明显的负偏,表明 $\delta^{13}\text{C}$ 响应了倒三冰消期气候变化。诸多研究表明,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化主要反应在温度降水等气候因子控制下的局域植被、土壤和洞穴环境的状况^[28-29]。伴随冰消过程的进行,趋于良好的水热条件有利于 C_3 植物发育,导致 C_3/C_4 植被类型比例增大,进而使 $\delta^{13}\text{C}$ 负偏^[30]。相比于寒冷干燥的环境,冰消期中局域植物发育状况逐渐变好,密度增大、呼吸作用变强、土壤微生物更加活跃、生产率提高,导致土壤中 $p\text{CO}_2$ 升高^[31],最终使得石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负,上述结果也得到了盘龙洞石笋^[32]和现代监测结果^[33]的支持。此外,洞穴环境也能够通过 PCP 作用、洞穴通风条件等因素影响石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 。尤其是在亚洲季风较弱、气候相对干旱的条件下,裂隙中的岩溶水易达到饱和,使得 CO_2 逸出,发生先期沉淀,导致石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 增大^[34],这与 YXB 所记录冰消期伊始 $\delta^{13}\text{C}$ 偏正的结果是一致的。现代监测还发现洞穴通风状况可以通过影响滴水中 CO_2 溢出速率使 $\delta^{13}\text{C}$ 发生偏移^[35],但永兴洞监测结果显示本研究采样区的洞穴环境较为稳定^[23],说明 YXB 的 $\delta^{13}\text{C}$ 能够反应较为纯净的环境演化信号。上述论述表明在轨道尺度上, YXB $\delta^{13}\text{C}$ 指示的局域气候和生态环境响应了冰消过程。

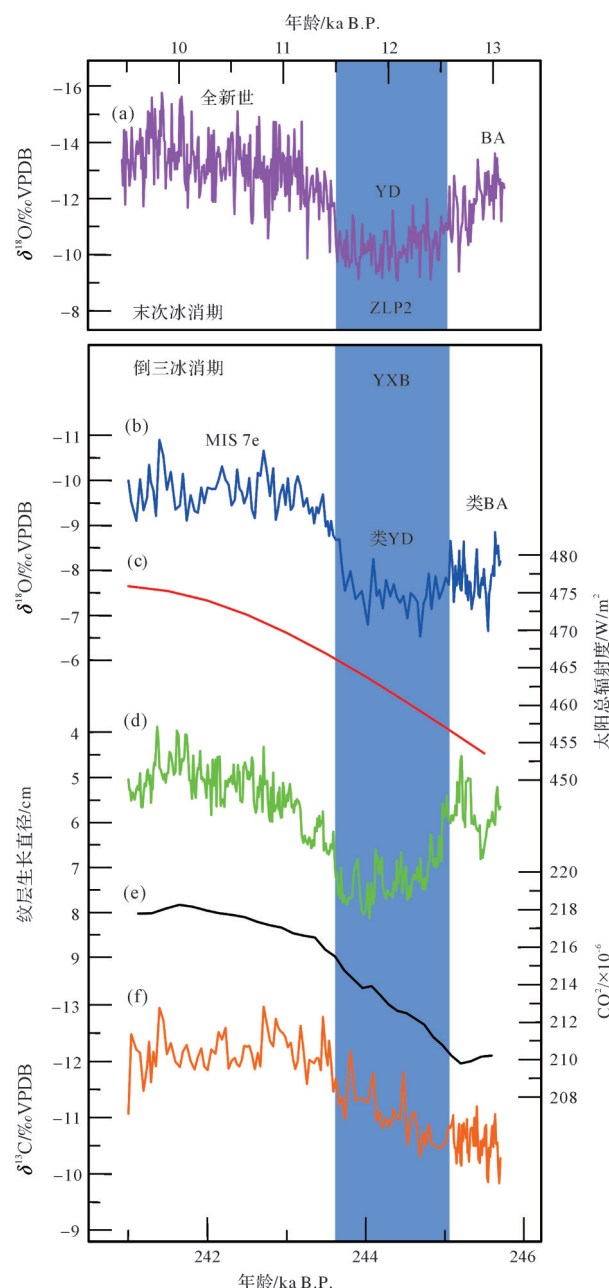


图 4 末次冰消期与倒三冰消期对比图

(a) 石笋 ZLP2 $\delta^{18}\text{O}$ ^[26] (紫线); (b) 石笋 YXB $\delta^{18}\text{O}$ (蓝线); (c) 65°N 夏季太阳辐射 (红线)^[27]; (d) 石笋 YXB 纹层生长直径 (绿线); (e) Vostok 冰芯中 CO_2 含量记录^[1]; (f) 石笋 YXB 碳同位素 (橘线)

Fig.4 Comparison of T I and T III

(a) $\delta^{18}\text{O}$ (purple curve) of stalagmite (ZLP2)^[26]; (b) $\delta^{18}\text{O}$ (blue curve) of stalagmite (YXB); (c) summer insolation at 65°N (red curve)^[27]; (d) laminae growth diameter (green curve) of stalagmite (YXB); (e) CO_2 of Vostok ice core (black curve)^[1]; (f) $\delta^{13}\text{C}$ (orange curve) of stalagmite (YXB)

千年尺度上,发现石笋 YXB 的 $\delta^{13}\text{C}$ 在倒三冰消期对 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的类 YD 事件没有明显响应,而是呈现出持续负偏的状态。可能是由于局域生态环境状况对千年尺度气候突变事件响应不敏感而导致的。轨道尺度冰期旋回产生的温湿差异显著,能够使赤道

太平洋海表温差高达5℃^[36],尤其在大陆或中高纬地区温差甚至更大,极有可能对生态环境状况造成巨大影响^[37]。相对而言,千年尺度上温度、降水等气候要素变幅较小,使得代表局地植被土壤状况的 $\delta^{13}\text{C}$ 指标对气候的响应相对较弱。例如,同一洞穴石笋YX55记录的末次冰期中,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 虽然响应于 $\delta^{18}\text{O}$ 指示的H事件和DO旋回,碳同位素的波动幅度普遍较小^[17]。特别是在YXB记录的冰消过程中,尽管 $\delta^{18}\text{O}$ 显示在类YD事件内东亚季风衰弱,但在倒三冰消期内北高纬夏季太阳辐射不断升高^[27]、南极Vostok冰芯中记录的 CO_2 总量升高^[11]等大背景下,局域植被生长获得了较好生长条件的支撑,使得洞穴上方的生态环境状况并没有发生显著改变,最终导致 $\delta^{13}\text{C}$ 对叠加在冰消期内的气候事件的响应不明显。这类 $\delta^{13}\text{C}$ 对突发事件响应不明显或滞后的情况也存在于其他冰消期^[26]。此外,热带印度洋SST^[38]、西太平洋暖池初级生产力^[39]等均对YD事件没有明显响应,说明在全球升温的气候背景下局域环境发生显著变化的概率降低。

3.2 石笋纹层生长直径和岩性特征对气候的响应

与 $\delta^{13}\text{C}$ 对 $\delta^{18}\text{O}$ 的响应不同,石笋YXB的纹层生长直径不仅在轨道尺度上与 $\delta^{18}\text{O}$ 基本一致,而且在千年事件以及一些细节上均与 $\delta^{18}\text{O}$ 对应良好。对比石笋YXB的 $\delta^{18}\text{O}$ 和纹层生长直径序列发现,当气温升高、降水增多时,石笋YXB的生长纹层生长直径变短,反之亦然。例如,类YD事件的 $\delta^{18}\text{O}$ 为整段记录中最偏正的部分,这一范围内的平均纹层生长直径也是整段石笋中最长的部分,达7.28 cm。相反,伴随冰消期结束,进入MIS 7e阶段, $\delta^{18}\text{O}$ 相比于类YD期负偏2.27‰,石笋的平均纹层生长直径也随之减小,仅有5.14 cm,与类YD事件形成了鲜明对比。上述变化与石笋沉积的机理有关。已有研究表明,石笋的沉积经历了气—水—固三相系统的运行过程, CO_2 在三相开放系统中的转相是岩溶作用向溶解或沉积方向进行的主要驱动力^[15]。而滴水速率、洞穴内部 $p\text{CO}_2$ 等要素能够对 CO_2 的脱气过程产生显著影响^[40],进而控制碳酸盐的沉积情况。从永兴洞现代监测结果可以看出,洞穴滴水速率与外部降水量存在密切关系^[23],故而,石笋YXB的直径应当反映了区域降水量与洞穴沉积环境的变化。在倒三冰消期中,伴随亚洲季风的增强,降水量显著增加,导致洞穴滴水速率变快。但过短的滴水间隔可能导致石笋表面水膜中的

CO_2 没有足够时间释放,使得碳酸盐沉积减少^[41]、石笋纹层生长直径变短,而较为寒冷干燥的类YD事件内则恰好反之。此外,当水热条件较好时,洞穴上覆土壤中微生物活跃,土壤内部 $p\text{CO}_2$ 增大^[42-43],雨水将这部分 CO_2 淋滤进岩溶系统^[38],则会使洞穴内部 $p\text{CO}_2$ 升高。而过高的 $p\text{CO}_2$ 并不利于岩溶水中 CO_2 脱气,导致石笋生长受限,类YD事件内则反之,这一结果与石花洞的现代监测结果一致^[44]。这同时说明,使用石笋纹层生长直径作为古气候替代指标时,需要考虑影响碳酸盐沉积的各类因素,结合多指标分析方法,综合讨论。

与石笋纹层生长直径类似,石笋YXB的岩性也响应了倒三冰消期及其中的类YD事件,且在细节对应上也有一定可比性。对比石笋YXB的 $\delta^{18}\text{O}$ 序列和岩性发现,在类YD事件对应范围中,YXB发育了大量白色不透光纹层;相反,在较为温暖湿润MIS 7e对应范围内,YXB发育了大量烟灰色透光纹层,白色不透光纹层显著减少;而在二者的过渡时段范围内,则表现为白色不透光纹层与烟灰色透光纹层交替出现。这一现象与石笋中的杂质含量的差异有关。由于石笋中杂质的多少受到不同气候条件下降水的多寡以及洞穴上覆土壤的发育程度所制约,所以石笋YXB的岩性变化应当记录了区域古气候和古环境演化。降水量能够通过影响岩溶水的滞留时间控制杂质含量。永兴洞现代监测表明^[23],冬季下渗水会带来一定量杂质,特别在降水较少的条件下,由于地表雨水在土壤带和渗滤通道滞留时间较长^[45],可能夹带更多杂质进入石笋,这与YXB记录的类YD事件类似。汪永进等^[46]也发现南京葫芦洞石笋中乳白色层段对应于气候条件比较干冷时期(如YD和H事件)。洞穴上覆土壤发育程度能够影响其对杂质的过滤能力,进而控制进入岩溶系统杂质的含量。对于石笋YXB而言,当类YD事件所引起的气候波动干扰超过了土壤所能维持自身稳定变化的阈值,可能导致洞穴上覆土壤退化。这时,石笋母液所携带的杂质会直接经过岩石孔隙构成的渗水通道向下渗透^[17],形成杂质含量较高的白色不透光纹层。而MIS 7e内水热条件好,土壤发育程度高,过滤作用强,能够进入岩溶系统的杂质相对较少,从而形成了石笋YXB的烟灰色透光纹层。此外,YXB的岩性变化对类YD事件的内部结构也进行了非常清晰的响应,表现为烟灰色透光纹层、白色不透光纹层的沉积旋回,且纹层生

长直径长短也有相应变化。这一特征在 MIS 7e、类 BA 暖期中也有体现,说明石笋的岩相学特征能够记录同一气候状态下的次一级变率。

3.3 倒三冰消期季风气候周期分析

为进一步研究倒三冰消期内部的气候变率,在对石笋 YXB 的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 与生长纹层生长直径数据使用 Change Point 去趋势后,利用 Past 3 软件进行功率谱分析,结果显示石笋 YXB 的三个指标均存在系列百年、年代际的周期信号(图 5)。其中, $\delta^{13}\text{C}$ 的周期变化相对更为明显,主要有 522 a、261 a、130 a、80 a 共 4 个周期成分超过 80% 置信度,与殷自强等^[47]采用 EMD 对全新世石笋、冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 和树轮 $\Delta^{14}\text{C}$ 含量变化进行分析发现的百年尺度周期波动具有相似性。上述部分周期也存在于石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与生长纹层生长直径中,但其周期信号不如 $\delta^{13}\text{C}$ 分解成果清晰,这可能是由于 $\delta^{13}\text{C}$ 所指示的局域土壤、植被生产力放大了初始信号所导致的^[48],上述结果同时说明了 $\delta^{13}\text{C}$ 是研究气候变化对古生态影响的有力指标。

百年尺度上,522 a 周期在石笋 YXB 的 $\delta^{13}\text{C}$ 与生长纹层生长直径中均有体现。曾雅兰等^[49]对 640 ka 以来长时间序列石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 进行分解,发现亚洲季风中存在 500 a 的百年尺度变化。Champan *et al.*^[50]使用北大西洋 NEAP15k 岩心亮度作为北大西洋深层水循环的指标,发现其也存在显著的 550 a 周期。YXB 的 $\delta^{18}\text{O}$ 也有类似的百年尺度变化,这可能是由于北高纬的气候信号通过西风带影响东亚季风强度,进而导致土壤、植被生产力改变所产生的。此外,223 a 与 139 a、261 a 与 130 a、145 a 周期信号分别存在于 YXB 的碳氧同位素和纹层生长直径记录中,分别与太阳活动中的 205 a 与 120 a^[51-52]、大气 $\Delta^{14}\text{C}$ 序列中的 229 a 与

121 a^[53]准周期对应,说明东亚季风、土壤植被和岩溶系统能够在百年时间尺度上响应于太阳活动变化。类似的分解周期也存在于杨少华等^[54]基于 EEMD 分析的全新世石笋氧碳同位素中。

年代际尺度上,YXB 的碳氧同位素中存在 70~80 a 周期,而这一结果与 Huggett^[55]于 20 世纪提出由于太阳直径的扩张和伸缩变化产生的 80~90 a 太阳活动周期相契合。由于 YXB 纹层生长直径的数据测定密度较氧碳同位素高,分辨率达 14 a,能够揭示更短尺度的年代际气候变化,故而分解出 56 a、30 a 两个周期,其中 56 a 周期与 Wang *et al.*^[56]从未次间冰期石笋中分解出的 60 a 周期极为相似。Nagovisyn^[57]认为 70~80 a、120~130 a 是太阳活动的主导周期,而模拟结果显示太阳活动 60 a 周期较为微弱,可能难以直接对地球气候产生显著影响^[58],但是具有近 60 年周期的变化特征的 AMO(北大西洋多年代际涛动)可能通过海气耦合对亚洲季风产生影响^[56]。此外,30 a 周期与杨少华等^[54]分解出的 29 a 周期一致,其中可能也存在太阳活动、海汽相互作用之间类似的耦合关系。

4 结论

通过对永兴洞石笋 YXB 进行 $\delta^{13}\text{C}$ 、纹层生长直径测定和岩性分析,并与 $\delta^{18}\text{O}$ 数据比对,得到以下结论。

(1) 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 在整体上与 $\delta^{18}\text{O}$ 变化大致相同,说明洞穴上覆生态环境在轨道尺度上受控于冰消过程。但 $\delta^{13}\text{C}$ 对 $\delta^{18}\text{O}$ 记录类 YD 事件几乎没有响应,可能是由于在冰消期回暖大背景下,局域生态环境受气候事件影响较小所致。

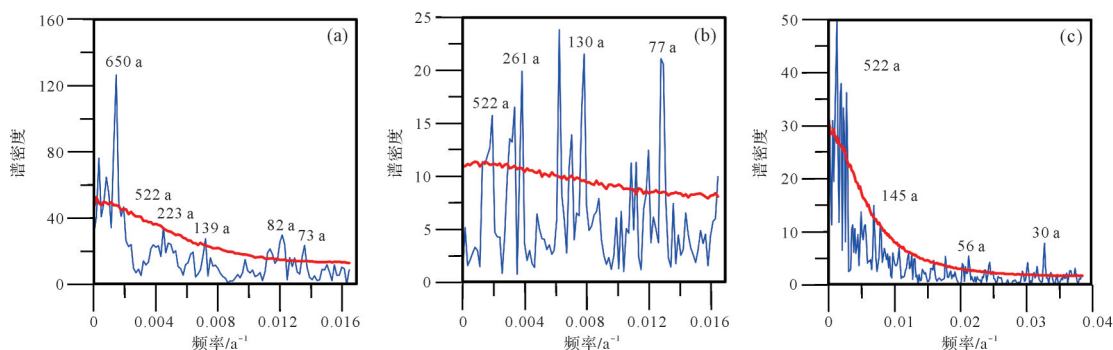


图5 YXB $\delta^{18}\text{O}$ (a)、 $\delta^{13}\text{C}$ (b)、纹层生长直径(c)功率谱示意图

图中红线曲线代表80%置信度

Fig.5 Power spectral analysis of stalagmite YXB $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, and laminae growth diameter

The 80% confidence level is labeled by the red line

(2) 石笋纹层生长直径和岩性变化无论在轨道尺度还是千年尺度上,都与 $\delta^{18}\text{O}$ 变化一致。石笋纹层生长直径变化与降水密切相关,因而石笋纹层生长直径可能是一个有效降水的替代指标,有望在石笋古气候的研究中得到应用。

(3) 功率谱结果显示,石笋 YXB 记录中存在 522 a、223~261 a、130~145 a、73~82 a、64 a、30 a 等周期分量,与太阳活动、海气相互作用等周期接近,并有可能受到二者耦合的影响。此外,3 个指标当中 $\delta^{13}\text{C}$ 的周期最为显著,可能是由于局域土壤放大了百年一年代际气候变率信号所致。

致谢 感谢审稿专家和编辑部老师对本文提出的有益修改意见。

参考文献 (References)

- [1] Parrenin F, Rémy F, Ritz C, et al. New modeling of the Vostok ice flow line and implication for the glaciological chronology of the Vostok ice core[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D20): D20102.
- [2] Beck J W, Zhou W J, Li C, et al. A 550,000-year record of East Asian monsoon rainfall from ^{10}Be in loess[J]. *Science*, 2018, 360(6391): 877-881.
- [3] Miller K G, Browning J V, Schmelz W J, et al. Cenozoic sea-level and cryospheric evolution from deep-sea geochemical and continental margin records[J]. *Science Advances*, 2020, 6(20): eaaz1346.
- [4] 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.
- [5] 陈仕涛,汪永进,孔兴功,等. 倒数第三次冰消期亚洲季风气候可能的类 Younger Dryas 事件[J]. *中国科学(D辑):地球科学*, 2006, 36(5): 445-452. [Chen Shitao, Wang Yongjin, Kong Xing-gong, et al. A possible Younger Dryas-type event during Asian monsoonal termination 3[J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 2006, 36(5): 445-452.]
- [6] Raza W, Ahmad S M, Sarma D S, et al. A 2500 years deglacial record of paleo-vegetation over a cave of southern India as inferred from carbon isotopes of stalagmite[J]. *Journal of Earth System Science*, 2021, 130(2): 113.
- [7] 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.
- [8] Zhang H W, Cheng H, Sinha A, et al. Collapse of the Liangzhu and other Neolithic cultures in the Lower Yangtze region in response to climate change[J]. *Science Advances*, 2021, 7(48): eabi9275.
- [9] 黄俊华,胡超涌,周群峰,等. 长江中游和尚洞石笋的高分辨率同位素、微量元素记录及古气候研究[J]. *沉积学报*, 2002, 20(3): 442-446. [Huang Junhua, Hu Chaoyong, Zhou Qunfeng, et al. Study on high-resolution carbon, oxygen isotope and trace element records and paleoclimate from Heshang Cave, the middle reach of the Yangtse River[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(3): 442-446.]
- [10] 张美良,林玉石,覃嘉铭,等. 黔南七星洞石笋古气候变化记录及末次间冰期终止点的确定[J]. *沉积学报*, 2003, 21(3): 473-481. [Zhang Meiliang, Lin Yushi, Qin Jiaming, et al. The record of paleoclimatic change and the termination of the last interglacial period from a stalagmite of Qingxin Cave in south Guizhou[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(3): 473-481.]
- [11] 王权,刘殿兵,汪永进,等. 湖北神农架年纹层石笋记录的 YD 与 8.2 ka 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.]
- [12] 张银环,杨琰,杨勋林,等. 早全新世季风演化的高分辨率石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录研究:以河南老母洞石笋为例[J]. *沉积学报*, 2015, 33(1): 134-141. [Zhang Yinhan, Yang Yan, Yang Xunlin, et al. Early Holocene monsoon evolution of high-resolution stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records: In Henan Laomu Cave[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(1): 134-141.]
- [13] 吴尧,李廷勇,陈朝军,等. 中国石笋微层在古气候重建中的应用研究[J]. *第四纪研究*, 2020, 40(4): 1008-1024. [Wu Yao, Li Tingyong, Chen Chaojun, et al. Application of stalagmite laminae in paleoclimate reconstructions of China[J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40(4): 1008-1024.]
- [14] 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.]
- [15] 张美良,林玉石,覃嘉铭. 洞穴石笋纹(壳)层层组类型研究[J]. *沉积学报*, 2002, 20(3): 435-441. [Zhang Meiliang, Lin Yushi, Qin Jiaming. Study on laminae or lamella groups and types of stalagmite in caves[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(3): 435-441.]
- [16] 张振球,刘殿兵,汪永进,等. 中全新世东亚季风年至 10 年际气候变率:湖北青天洞 5.56~4.84 ka B. P. 石笋年层厚度与地球化学证据[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(6): 1246-1255. [Zhang Zhenqiu, Liu Dianbing, Wang Yongjin, et al. Annual-to decadal-scale variability of Asian monsoon climates during mid-Holocene: Evidence from proxies of annual bands and geochemical behaviors of a speleothem from 5.56 ka B. P. to 4.84 ka B. P. in Qingtian Cave, central China[J]. *Quaternary Sci-*

- ences, 2014, 34(6): 1246-1255.]
- [17] 王萌,陈仕涛,黄琬淳,等. 石笋灰度和同位素对末次冰期气候事件的响应[J]. 自然资源学报,2020,35(12):3064-3075. [Wang Meng, Chen Shitao, Huang Wanchun, et al. The response of stalagmite gray-level and isotopes to the climatic events during the last glacial Period[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(12): 3064-3075.]
- [18] 张美良,林玉石,覃嘉铭. 桂林水南洞石笋的沉积学特征[J]. 沉积学报,1999,17(2):233-239. [Zhang Meiliang, Lin Yushi, Qin Jiaming. Sedimentological characteristics of a stalagmite from Shuinan Cave, Guilin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(2): 233-239.]
- [19] Franke H W. The theory behind stalagmite shapes[Z]. 1965.
- [20] Kaufmann G, Dreybrodt W. Stalagmite growth and palaeoclimate: An inverse approach[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 224(3/4): 529-545.
- [21] 高滨升,胡超涌. 石笋生长直径的测定及其在古气候重建中的应用[J]. 中国岩溶,2019,38(3):353-360. [Gao Binsheng, Hu Chaoyong. Measurement of a stalagmite diameter and its application for paleoclimate [J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(3): 353-360.]
- [22] Liang Y J, Chen S T, Zhang Z Q, et al. Abrupt monsoonal shifts over the precessional cycles documented in Yongxing Cave in China during the antepenultimate glacial period[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(6): 228.
- [23] 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(12): 474.
- [24] 姜修洋,汪永进,孔兴功,等. 末次间冰期东亚季风气候不稳定的神农架洞穴石笋记录[J]. 沉积学报,2008,26(1):139-143. [Jiang Xiuyang, Wang Yongjin, Kong Xinggong, et al. Climate variability in Shennongjia during the last interglacial inferred from a high-resolution stalagmite record[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(1): 139-143.]
- [25] Muñoz-García M B, Cruz J, Martín-Chivelet J, et al. Comparison of speleothem fabrics and microstratigraphic stacking patterns in calcite stalagmites as indicators of paleoenvironmental change[J]. Quaternary International, 2016, 407: 74-85.
- [26] Huang W, Wang Y J, Cheng H, et al. Multi-scale Holocene Asian monsoon variability deduced from a twin-stalagmite record in southwestern China[J]. Quaternary Research, 2016, 86(1): 34-44.
- [27] Berger A L. Long-term variations of caloric insolation resulting from the earth's orbital elements [J]. Quaternary Research, 1978, 9(2): 139-167.
- [28] 黄伟,刘殿兵,王璐瑶,等. 洞穴石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 在古气候重建研究中的现状与进展[J]. 地球科学进展,2016,31(9):968-983. [Huang Wei, Liu Dianbing, Wang Luyao, et al. Research status and advance in carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}$) variation from stalagmite[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(9): 968-983.]
- [29] 陈剑舜,张伟宏,陈仕涛,等. 小冰期气候的湖北石笋碳同位素记录[J]. 沉积学报,2020,38(3):497-504. [Chen Jianshun, Zhang Weihong, Chen Shitao, et al. Carbon isotope record in stalagmites from Hubei during the little ice age[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(3): 497-504.]
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 覃嘉铭,林玉石,张美良,等. 桂林全新世石笋高分辨率 $\delta^{13}\text{C}$ 记录及其古生态意义[J]. 第四纪研究,2000,20(4):351-358. [Qin Jiaming, Lin Yushi, Zhang Meiliang, et al. High resolution records of $\delta^{13}\text{C}$ and their paleoecological significance from stalagmites formed in Holocene Epoch in Guilin[J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(4): 351-358.]
- [33] 李红春,顾德隆,Stott L D,等. 北京石花洞石笋500年来的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与古气候变化及大气 CO_2 浓度变化的关系[J]. 中国岩溶,1997,16(4):285-295. [Li Hongchun, Gu Delong, Stott L D, et al. Interannual-resolution $\delta^{13}\text{C}$ record of stalagmites as proxy for the changes in precipitation and atmospheric CO_2 in Shihua Cave, Beijing [J]. Carsologica Sinica, 1997, 16(4): 285-295.]
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] Lea D W, Pak D K, Spero H J. Climate impact of Late Quaternary equatorial pacific sea surface temperature variations [J]. Science, 2000, 289(5485): 1719-1724.
- [37] Dorale J A, Edwards R L, Ito E, et al. Climate and vegetation history of the midcontinent from 75 to 25 ka: A speleothem record from crevice cave, Missouri, USA [J]. Science, 1998, 282(5395): 1871-1874.
- [38] Saraswat R, Lea D W, Nigam R, et al. Deglaciation in the tropical Indian Ocean driven by interplay between the regional monsoon and global teleconnections [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2013, 375: 166-175.
- [39] Fraser N, Kuhnt W, Holbourn A, et al. Precipitation variability within the West Pacific Warm Pool over the past 120ka: Evidence from the Davao Gulf, southern Philippines [J]. Paleoceanography, 2014, 29(11): 1094-1110.
- [40] Dreybrodt W. Processes in karst systems: Physics, chemistry,

- and geology[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1988: 287.
- [41] Duan W H, Cai B G, Tan M, et al. The growth mechanism of the aragonitic stalagmite laminae from Yunnan Xianren Cave, SW China revealed by cave monitoring[J]. *Boreas*, 2012, 41(1): 113-123.
- [42] 潘根兴,曹建华. 表层带岩溶作用:以土壤为媒介的地球表层生态系统过程:以桂林峰丛洼地岩溶系统为例[J]. *中国岩溶*, 1999, 18(4): 287-296. [Pan Genxing, Cao Jianhua. Karstification in epikarst zone: The earth surface ecosystem processes taking soil as a medium: Case of the Yaji Karst Experiment Site, Guilin[J]. *Carsologica Sinica*, 1999, 18(4): 287-296.]
- [43] 唐灿,周平根. 北京典型溶洞区土壤中的CO₂及其对岩溶作用的驱动[J]. *中国岩溶*, 1999, 18(3): 213-217. [Tang Can, Zhou Pinggen. The soil CO₂ and its driving action on karstification in typical karst area in Beijing [J]. *Carsologica Sinica*, 1999, 18(3): 213-217.]
- [44] Shang J Y, Flury M, Chen G, et al. Impact of flow rate, water content, and capillary forces on in situ colloid mobilization during infiltration in unsaturated sediments[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(6): W06411.
- [45] Ayalon A, Bar-Matthews M, Kaufman A. Petrography, strontium, barium and uranium concentrations, and strontium and uranium isotope ratios in speleothems as palaeoclimatic proxies: Soreq Cave, Israel[J]. *The Holocene*, 1999, 9(6): 715-722.
- [46] 汪永进,孔兴功,邵晓华,等. 末次盛冰期百年尺度气候变化的南京石笋记录[J]. *第四纪研究*, 2002, 22(3): 243-251. [Wang Yongjin, Kong Xinggong, Shao Xiaohua, et al. Century-scale climatic oscillations during the last glacial maximum recorded in a stalagmite from Nanjing [J]. *Quaternary Sciences*, 2002, 22(3): 243-251.]
- [47] 殷自强,刘冬雁,庞重光,等. 全新世气候变化与太阳活动百千年尺度周期分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2017, 47(7): 112-120. [Yin Ziqiang, Liu Dongyan, Pang Chongguang, et al. The centennial to millennial-scale cycles analysis of Holocene climatic variability and solar activity [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(7): 112-120.]
- [48] Hodge E J, Richards D A, Smart P L, et al. Effective precipitation in southern Spain (~ 266 to 46 ka) based on a speleothem stable carbon isotope record[J]. *Quaternary Research*, 2008, 69(3): 447-457.
- [49] 曾雅兰,陈仕涛,杨少华,等. 过去640ka亚洲季风变化的多尺度分析[J]. *中国科学(D辑):地球科学*, 2019, 49(5): 864-874. [Zeng Yalan, Chen Shitao, Yang Shaohua, et al. Multiscale analysis of Asian monsoon over the past 640 ka[J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 2019, 49(5): 864-874.]
- [50] Chapman M R, Shackleton N J. Evidence of 550-year and 1000-year cyclicities in North Atlantic circulation patterns during the Holocene[J]. *The Holocene*, 2000, 10(3): 287-291.
- [51] Wagner G, Beer J, Masarik J, et al. Presence of the solar de Vries cycle (~205 years) during the last Ice Age[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(2): 303-306.
- [52] Ogurtsov M G, Nagovitsyn Y A, Kocharov G E, et al. Long-period cycles of the sun's activity recorded in direct solar data and proxies[J]. *Solar Physics*, 2002, 211(1/2): 371-394.
- [53] Stuiver M, Grootes P M, Braziunas T F. The GISP2 $\delta^{18}\text{O}$ climate record of the past 16,500 years and the role of the sun, ocean, and volcanoes[J]. *Quaternary Research*, 1995, 44(3): 341-354.
- [54] 杨少华,陈仕涛,汪永进,等. 基于EEMD方法的全新世亚洲季风石笋氧碳同位素对比研究[J]. *地理研究*, 2017, 36(8): 1455-1466. [Yang Shaohua, Chen Shitao, Wang Yongjin, et al. Comparison of oxygen-carbon isotopes from a Holocene stalagmite by EEMD method[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(8): 1455-1466.]
- [55] Huggett R J. Climate, earth processes, and earth history[M]. New York: Springer-Verlag, 1991.
- [56] Wang Z J, Chen S T, Wang Y J, et al. Sixty-year quasi-period of the Asian monsoon around the Last Interglacial derived from an annually resolved stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 541: 109545.
- [57] Nagovitsyn Y A. A nonlinear mathematical model for the solar cyclicity and prospects for reconstructing the solar activity in the past[J]. *Astronomy Letters*, 1997, 23(6): 742-748.
- [58] Liu H Y, Lin Z S, Qi X Z, et al. Possible link between Holocene East Asian monsoon and solar activity obtained from the EMD method[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2012, 19(4): 421-430.

Multi-proxy Analysis from Stalagmite of Climate Change During the Ice Age Termination III

CHEN GongZhe¹, CHEN ShiTao^{1,2}, LIU Xiao¹, ZHAO Kan^{1,2}, WANG ZhenJun^{1,2}, ZHANG ZhenQiu^{1,2}, WANG YongJin^{1,2}

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

2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

Abstract: Multi-proxy Analysis from a stalagmite that grew during Ice Age Termination III (referred to as T III) is conducted to comprehensively understand the climate change characteristics and monsoon mechanisms during this period. Based on isotopes, stalagmite laminae growth diameter, and lithologic characteristic analysis of the stalagmite (No: YXB) from Yongxing Cave, Hubei province, the Asian monsoon climate change sequence during the T III was reconstructed. The lamina growth diameter is related to $\delta^{18}\text{O}$ and has the same variation characteristics, i.e., when stalagmites $\delta^{18}\text{O}$ is negative, the laminae growth diameter decreases, and when $\delta^{18}\text{O}$ is positive, the laminae growth diameter increases. When the change of laminae growth diameter is same as stalagmite $\delta^{18}\text{O}$, there is an obvious weak monsoon event (known as “YD-like event”) during T III. The lithologic characteristics of stalagmites also have an obvious response to this event. In this period, stalagmites develop white opaque lamina, which is obviously different from the gray transparent lamina developed in other periods. This shows that the karst system signals, such as laminae growth diameter and lithology, also respond to $\delta^{18}\text{O}$ indications of climate change. Stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ is same as $\delta^{18}\text{O}$, but the response to YD-like events is not obvious. It shows that in the Asian monsoon region, the vegetation represented by $\delta^{13}\text{C}$ responds to the deglaciation process, but is not sensitive to the weakening response of monsoon during the transition from glacial period to interglacial period. Using power spectrum analysis of the above indices, periodic components, such as 522 a, 223-261 a, 130-145 a, 73-82 a, 64 a, and 30 a, are obtained, which may be the result of the coupling of solar activity and ocean-atmosphere interaction.

Key words: ice age termination III; stalagmite; multi-proxy; carbon isotope; diameter of stalagmite laminae; lithologic characteristics