

# 石笋灰度和同位素对末次冰期气候事件的响应

王萌<sup>1,2,3</sup>, 陈仕涛<sup>1,2,3</sup>, 黄琬淳<sup>1,2,3</sup>, 蔡雯沁<sup>4</sup>, 龚清霖<sup>1,2,3</sup>,  
梁怡佳<sup>1,2,3</sup>, 王先锋<sup>5</sup>, 汪永进<sup>1,2,3</sup>

(1. 南京师范大学地理科学学院, 虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023; 2. 江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点, 南京 210023; 3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 4. 南京师范大学海洋科学与工程学院, 南京 210023; 5. 南洋理工大学, 新加坡地球观测研究所, 新加坡 639798)

**摘要:** 对石笋多指标的研究有利于全面理解季风气候事件的变化特征和机制。以湖北永兴洞 YX55 石笋为研究对象, 通过高精度 U/Th 定年和多指标分析重建了 65~35 ka B.P. 石笋灰度和稳定同位素的变化序列。在 65~40 ka B.P. 时段, 石笋灰度、 $\delta^{13}\text{C}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  都呈现出数个千年至亚千年尺度的变化, 但  $\delta^{13}\text{C}$  变化幅度比  $\delta^{18}\text{O}$  小得多。这说明灰度和  $\delta^{13}\text{C}$  这类代表局域气候的指标, 都响应于  $\delta^{18}\text{O}$  指示的 Heinrich (H) 事件和 Dansgaard-Oeschger (DO) 旋回, 但响应的程度各不相同。H4 期间, 石笋  $\delta^{13}\text{C}$  和灰度呈现不一致变化:  $\delta^{13}\text{C}$  不像在其他 H 事件一样小幅振荡, 而是大幅正偏 (相当于其他 H 事件 2~3 倍); 灰度则显示出和 DO 旋回一致的特征。这种  $\delta^{13}\text{C}$ /灰度与  $\delta^{18}\text{O}$  异常响应关系可能的机制是: H4 期间季风强度急剧减弱, 使得洞穴上覆土壤覆盖率大幅降低, 从而削弱或阻止了土壤-岩溶系统的过滤能力, 使石笋中杂质含量异常增加。

**关键词:** 突变事件; 灰度; 同位素; 亚洲季风

末次冰期频现千年尺度气候突变事件, 对这类事件的最初认识来源于北半球高纬地区大西洋海洋沉积<sup>[1]</sup>和格陵兰冰芯的研究<sup>[2-3]</sup>。北高纬的千年尺度气候变化已得到了众多地质记录的支持, Leuschner 等<sup>[4]</sup>曾总结了全球三十余个地点的研究成果, 指出在格陵兰、北大西洋、地中海、北太平洋、东亚、孟加拉湾、阿拉伯海、赤道大西洋、南极及其邻近海域都发现了类似的气候变化。在这些地质记录中, 洞穴石笋记录因其高分辨率、精确定年等优点而成为了刻画千年气候突变事件的有效载体, 受到越来越多的关注<sup>[5]</sup>。

在石笋众多的气候代用指标中,  $\delta^{18}\text{O}$  具有鲜明的全球可比性与区域重现性, 因此是目前应用最广泛的气候指标<sup>[6-8]</sup>。近年来, 石笋其他代用指标, 比如灰度、 $\delta^{13}\text{C}$  等的研究也在一些气候敏感区域逐步开展, 并表现出重建气候与环境的潜力。刘淑华等<sup>[9]</sup>报道的川北宋家洞石笋  $\delta^{13}\text{C}$  记录了一系列气候突变事件, 与格陵兰冰芯的 Dansgaard-Oeschger (DO) 5~10 事件相互对应, 表明洞穴外部的植被会对气候突变产生快速的更替响应。巴哈马石笋的  $\delta^{13}\text{C}$  则清晰记录了 Heinrich (H) 1~6 这六次冰漂碎屑事件<sup>[10]</sup>。Frappier 等<sup>[11]</sup>关于伯利兹高分辨率石笋的研究发现, 石笋碳同位素记录了较为明显的厄尔尼诺事件, 并

收稿日期: 2019-05-24; 修订日期: 2019-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41931178, 41572340); 江苏高校优势学科建设工程 (164320H116)

作者简介: 王萌 (1998-), 女, 甘肃天水人, 硕士, 主要从事全球气候变化与区域响应研究。

E-mail: wangmengnju@163.com

通讯作者: 陈仕涛 (1974-), 男, 湖北襄阳人, 博士, 教授, 主要从事全球气候变化与区域响应研究。

E-mail: chenshitao@njnu.edu.cn

反映了洞穴上覆土壤生产率的季节性变化。重庆水鸣洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与太平洋年代际涛动(Pacific Decadal Oscillation, PDO)有着较好的对应关系,并且该记录的周期特征与太阳世纪活动周期及ENSO(El Niño-Southern Oscillation)周期基本一致<sup>[12]</sup>。石笋剖面灰度是岩性变化的一种表现形式,和石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 指标相比,剖面灰度数据的采集具有操作简单快捷、成本低廉、实验周期短、样品损坏率低、数据分辨率高等优点<sup>[13,14]</sup>。湘西莲花洞的研究表明,石笋剖面灰度与组成石笋矿物的结晶形态有关,受温度和降雨量的控制<sup>[15]</sup>。黄土高原石笋的研究说明灰度值与 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的东亚地区夏季风强度变化有较为紧密的联系<sup>[16]</sup>。Duan等<sup>[17]</sup>在研究葫芦洞石笋时发现石笋微层、灰度、 $\delta^{18}\text{O}$ 等指标波动剧烈,可较敏感地反映出环境和气候的变化。重庆羊口洞的研究则分析了石笋剖面不同特征的形成原因,指出石笋剖面灰度与全球气候变化间存在密切联系<sup>[18]</sup>。甘肃万象洞石笋重建了末次冰消期石笋的灰度变化序列,发现其与葫芦洞石笋氧同位素记录所指示的季风强度密切相关<sup>[19]</sup>。这些研究都表明,若能给予 $\delta^{13}\text{C}$ 和灰度以合理的解释,则可进一步丰富用于示踪气候变化的石笋代用指标。

洞穴石笋是岩溶系统中水—岩—气等共同作用的结果,记录了大气圈、水圈、土壤圈和生物圈传递到洞穴沉积物中的环境信息<sup>[20,21]</sup>。从这个意义上讲,石笋灰度、氧碳同位素等指标都应该对气候变化有所反映。然而,由于受到局部环境、洞穴循环系统等诸多因素的影响, $\delta^{13}\text{C}$ 、灰度等指标对环境变迁的响应并不十分明确,因此难以获得对气候事件的全面认识<sup>[22,23]</sup>。本次研究基于一支生长于湖北神农架地区永兴洞的石笋(编号:YX55),通过对该石笋的剖面进行影像扫描和氧碳同位素测试,以期探讨石笋剖面灰度、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 等代用指标在末次冰期千年尺度事件上的响应模式及机理。

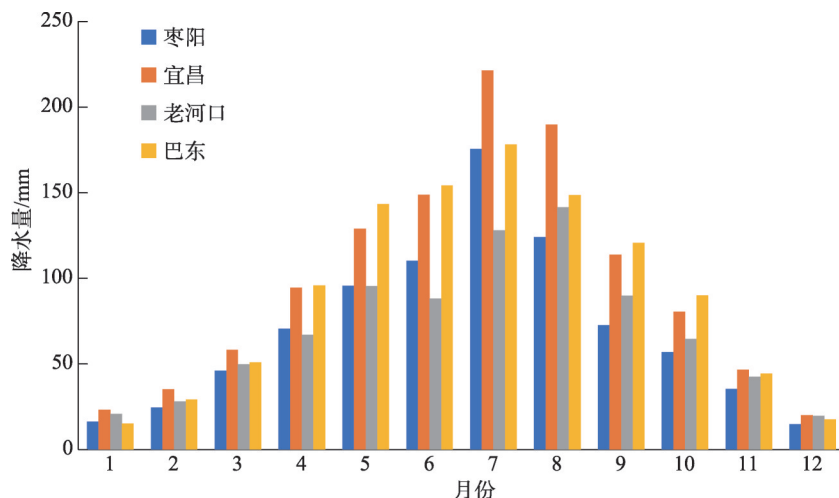
## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

石笋样品YX55采自湖北省神农架保康县永兴洞(31°35'N, 111°14'E)。神农架位于长江中下游秦岭—淮河以南地区,属于大巴山脉东部余脉,崇山峻岭,山峦起伏,平均海拔高于1500 m。此处地势总体从西南向东北呈阶梯状递减,为西部高原山地向东部丘陵平原过渡的地区。区内以碳酸盐岩为主,岩溶地貌广泛分布<sup>[24]</sup>,地表土壤发育良好,植被多以灌木和草本为主<sup>[25]</sup>。通过对永兴洞邻近的气象站(老河口、襄阳、巴东、宜昌)从1951—2010年月平均降水量的分析显示,当地夏季(6-8月)降水量约为500~600 mm,占全年降水量的50%以上;冬季(12至次年2月)降水则比较少,约为50 mm,占全年的5%左右(图1)。因此本地属于典型的亚热带季风气候区,主要由季风环流系统所控制。永兴洞洞口海拔约800 m,洞长约500 m。洞内共有三个大厅(图2),二号厅最高处约15 m,面积约400 m<sup>2</sup>,地面潮湿且覆盖有一层薄粘土。洞顶生长有较多石钟乳,石笋多生长在洞壁处,其中一处洞穴裂隙特别发育,常年处于滴水状态,YX55便采自此处,这也许是石笋YX55岩性特殊的主要原因。

### 1.2 材料与研究方法

石笋YX55全长333 mm,粗细均匀,直径约70 mm,外表无粘土层包裹。整支石笋由灰黄色与烟灰色方解石组成,纹层呈韵律叠覆,色率变化有序。在距石笋顶15 mm、43 mm、130 mm、188 mm、255 mm等处存在烟灰色纯净方解石条带。石笋YX55的岩



注：数据来源于中国气象数据网 <http://data.cma.cn>。

图1 1951—2010年间永兴洞邻近气象站月平均降水量

Fig. 1 The monthly precipitation for the four meteorological stations from 1951-2010

性沿中轴线呈对称分布，生长轴心稳定，说明石笋生长期间滴水通道未发生改变。

用直径0.5 mm的牙钻共采集371个样品用于氧碳同位素分析，采样间隔为0.5~1 mm。采用Kiel-IV与Finnigan MAT-253联机测试样品，实验均在南京师范大学石笋同位素实验室完成。每9个样品加测1个国际标准样品（NBS-19），以评估测试过程中仪器的稳定性。质谱仪 $\delta^{18}\text{O}$ 分析误差 $\leq 0.06\%$ ， $\delta^{13}\text{C}$ 分析误差 $\leq 0.05\%$ 。以美国南卡罗莱纳州白垩系皮狄组的拟箭石（VP-DB）作为数据结果的参考标准。

灰度数据采集使用光面采样法，即在石笋的抛光表面直接测量反射光的强度。具体步骤为：沿生长轴将石笋剖开，然后用抛光机将剖面磨至光滑，在超声波中清洗三次后晾干，获得石笋光滑剖面。用EPSON-4990型扫描仪扫描石笋抛光面，得到剖面扫描图，而后在生长轴附近生长纹层较为平直部位截取图片。使用ENVI 4.8软件读取生长轴附近4条轨迹线的灰度值（灰度 $=\sqrt{R^2+G^2+B^2}$ ， $R$ 、 $G$ 、 $B$ 强度值范围在0~255）<sup>[26]</sup>，将其进行平均，得到灰度矩阵，矩阵中每个数值与相应矩阵中像素的灰度值相对应。用该方法提取的灰度值应介于0~442之间，灰度值越大则灰度级愈高，表明反射光越强，剖面颜色越浅，代表其所含杂质含量也更高，反之亦然<sup>[17]</sup>。共获取16715个灰度数据，空间分辨率为20  $\mu\text{m}$ 。

## 2 结果分析

Chen等<sup>[27]</sup>已报道YX55石笋的U/Th年龄和 $\delta^{18}\text{O}$ 测试结果。YX55测试了18组高精度

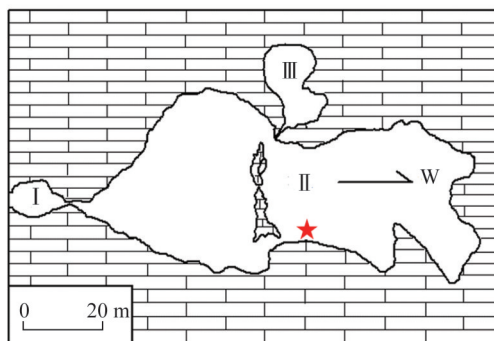


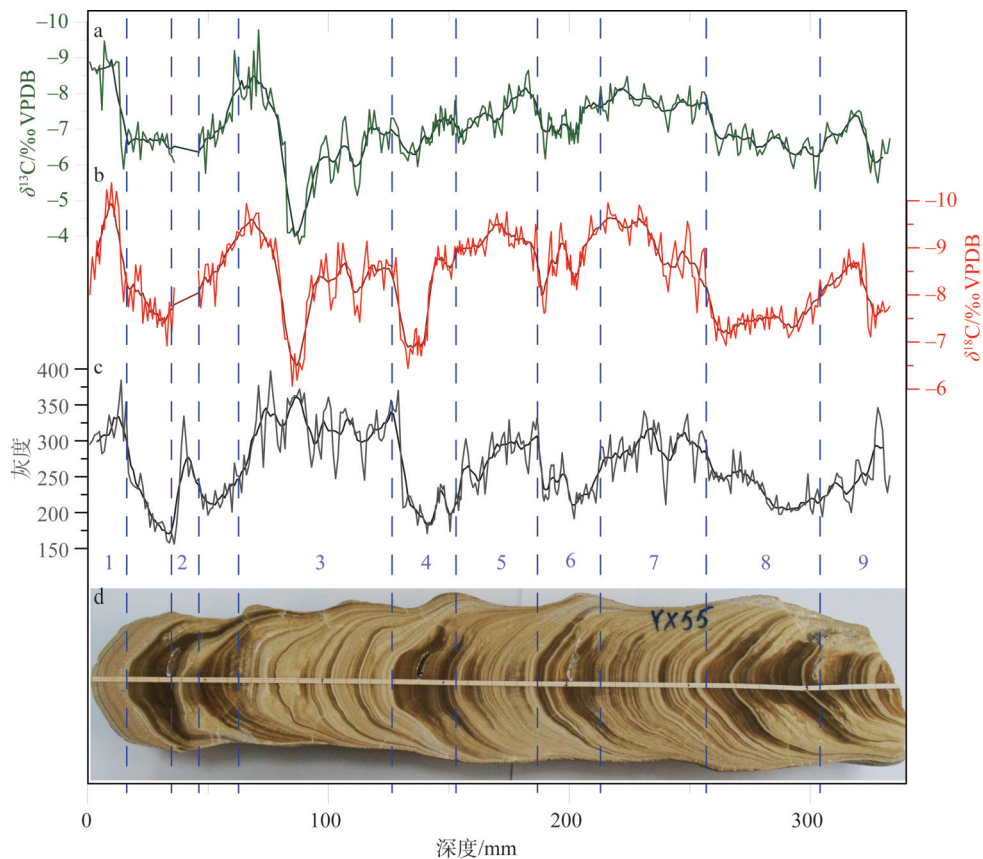
图2 永兴洞平面简图与YX55石笋采样位置

Fig. 2 The plain view of Yongxing Cave and the sampling location of YX55

U/Th年龄, 结果显示该石笋的最小年龄为 $29610 \pm 110$  a B.P., 最老年龄为 $64460 \pm 250$  a B.P.。样品剖面与年代数据显示, 37~45 mm层段存在一处沉积间断。因此在讨论部分主要对YX55石笋连续生长部分的灰度和 $\delta^{13}\text{C}$ 数据进行分析。为了方便对比灰度与相应深度的稳定同位素数据, 进一步使用MATLAB软件将灰度数据按0.5 mm或1 mm步长做等间距内插, 获得371个灰度值。最终得到灰度和 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的平均分辨率均为90 a。

## 2.1 YX55石笋的灰度变化

整支石笋灰度的变化范围在156~397之间, 平均值为295。整体上看, 石笋YX55灰度变化趋势可分为9个阶段(图3), 曲线呈现出峰谷交替变化的特征。奇数段(1, 3, 5, 7, 9)灰度平均值偏大, 在石笋剖面上表现为颜色灰黄、不透明的沉积特征。其中, 第3、5、7段内还存在诸多灰度的次级变化, 即灰度值在整体较高的背景下有几次短暂而迅速的下落。该现象在74 mm、82 mm、94 mm、103 mm、115 mm、175 mm、184 mm、224 mm、243 mm和253 mm处都较为明显, 其灰度曲线形态表现为“谷”, 并对应着窄且纯净的烟灰色沉积段。偶数段(2, 4, 6, 8)灰度平均值较小, 石笋剖面主要表现为烟灰色、透明度高的沉积特征。其中, 第6、8段中灰度的次级变化较多, 灰度值在193 mm、197 mm、271 mm和302 mm左右波动明显, 其峰值都与灰黄色杂质含量多的窄段相对



注: 绿色曲线为YX55的 $\delta^{13}\text{C}$ 深度序列, 深绿色曲线为7点平滑; 红色曲线为 $\delta^{18}\text{O}$ 深度序列, 深红色曲线为7点平滑曲线; 灰色曲线为灰度深度序列, 黑色曲线为7点平滑曲线; 虚线和蓝色数字指示沉积旋回及其序号。

图3 永兴洞石笋YX55  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、灰度深度序列及其剖面图

Fig. 3 The  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  and gray-level records and the polished section of YX55 stalagmite

应。由此可见,石笋灰度值的波动与石笋岩性的交替呈现一致的变化,较高的灰度值与灰黄色不透明的岩性段相吻合,较低的灰度值则与烟灰色纯净的岩性段相对应。因此YX55石笋灰度的变化可客观反映石笋岩性变化。

## 2.2 YX55石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化

图3显示,石笋YX55  $\delta^{13}\text{C}$ 数值变化范围为 $-9.8\text{‰}$ ~ $-3.8\text{‰}$ ,平均值约 $-7.0\text{‰}$ 。据其振荡形式的差异可将石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 深度序列分为三个部分。在1~83 mm以及96~333 mm深度段内, $\delta^{13}\text{C}$ 变化幅度较小、碳同位素均值整体偏负。在84~95 mm层段内, $\delta^{13}\text{C}$ 先急剧偏正,达到最大均值,后围绕背景值 $-4.2\text{‰}$ 振荡,在95 mm左右又快速偏负,振幅达 $4.5\text{‰}$ 。尽管在96~333 mm内 $\delta^{13}\text{C}$ 整体偏负,但仔细观察仍可发现其中存在一些次级变化,如在26 mm、138 mm、196 mm、287 mm处 $\delta^{13}\text{C}$ 都发生了不同程度正偏,振幅均值约 $1.2\text{‰}$ 。

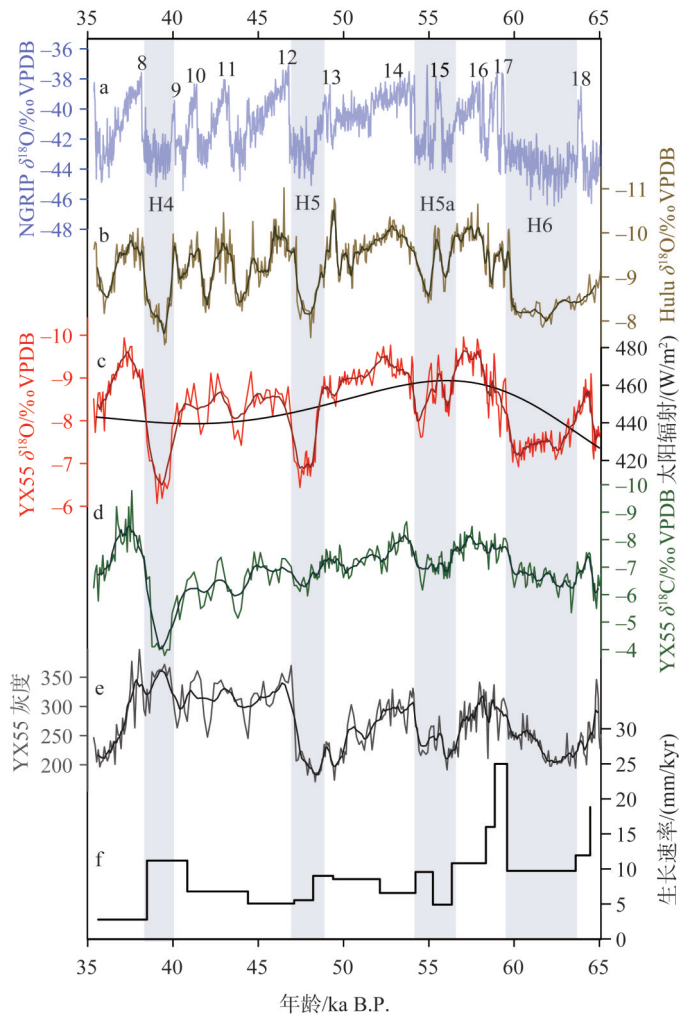
## 3 讨论

### 3.1 灰度、氧碳同位素与气候突变事件的响应关系

图4显示,在轨道尺度上,YX55的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线具有 $65^\circ\text{N}$ 太阳辐射变化趋势,说明亚洲季风在轨道尺度上受太阳辐射影响,支持前人的研究结果<sup>[28-30]</sup>。仔细观察发现 $\delta^{18}\text{O}$ 序列出现4次显著的快速正偏。这些正偏分别发生在39.5 ka B.P.、48.0 ka B.P.、56.0 ka B.P.、61.9 ka B.P.,振荡幅度约为 $2.2\text{‰}$ ~ $3.9\text{‰}$ ,持续时间为1500~3000年左右,大致对应于北大西洋4次显著的冰漂碎屑事件(H4、H5、H5a、H6事件)。格陵兰冰芯在65~35 ka B.P.时段记录了11个持续时间不等的千年尺度暖事件,即DO8~DO18<sup>[3,31]</sup>,这些事件也清晰地记录在YX55石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列中。将永兴洞和葫芦洞的石笋记录<sup>[28,30]</sup>进行比对后发现,两处洞穴沉积物的记录无论是在气候突变事件的持续时间、突变特征、还是事件的相对振幅等方面都呈现基本一致的对应关系。永兴洞记录还进一步刻画了千年事件的亚旋回特征,比如DO15事件的双峰特征。此外, $\delta^{18}\text{O}$ 记录中峰谷的相对振幅、持续时间、起始突变性均与格陵兰气温变化具有可比性。因此石笋YX55  $\delta^{18}\text{O}$ 序列记录的千年尺度季风事件是清晰而准确的。

YX55石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线所记录的H事件和DO旋回也在 $\delta^{13}\text{C}$ 序列的变化上体现(图4)。当 $\delta^{13}\text{C}$ 偏正时,在曲线上表现为“谷”的形态特征,其中心年代集中在39.7 ka B.P.、48.0 ka B.P.、55.9 ka B.P.、61.9 ka B.P.,分别对应于H4、H5、H5a、H6这四次冰漂碎屑事件; $\delta^{13}\text{C}$ 偏负时则对应一系列的DO事件。但是 $\delta^{13}\text{C}$ 波动幅度明显较 $\delta^{18}\text{O}$ 小,除了H4之外, $\delta^{13}\text{C}$ 对H事件响应的最大振幅不超过 $1.8\text{‰}$ ,同时 $\delta^{13}\text{C}$ 记录中DO事件的最大振幅也不超过 $2.0\text{‰}$ 。这表明碳同位素同样记录了气候变化的特征,但对气候事件的响应或许并不敏感。虽然整段石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 变幅较小,但H4时段内的 $\delta^{13}\text{C}$ 数值发生显著的正向偏移,平均振幅达到 $4.5\text{‰}$ 。该时段内 $\delta^{13}\text{C}$ 均值高达 $-4.2\text{‰}$ ,比整个时段内的碳同位素均值高出 $2.8\text{‰}$ ,明显不同于其他H事件的 $\delta^{13}\text{C}$ 波动特征。

在65~40 ka B.P.时段,石笋灰度也呈现出与 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线类似的变化特征。当 $\delta^{18}\text{O}$ 正偏时,灰度减小,而 $\delta^{18}\text{O}$ 负偏时,灰度增大。特别地,石笋灰度值变化甚至岩性特征基本可以和H事件及DO事件一一对应。具体来看,H事件在石笋剖面上表现为灰度值小的纯净烟灰色沉积特征,DO事件则对应于灰度值大的不透明灰黄色岩性变化。这种对应关系甚至延伸到亚千年尺度:在DO15期间, $\delta^{18}\text{O}$ 记录的双峰特征在灰度变化中也有明显的体



注: 浅蓝色曲线为格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列, 数字指示DO事件; 褐色曲线为葫芦洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列, 暗绿色为7点平滑曲线; 永兴洞石笋YX55 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列(红色)、7点平滑曲线(深红色)及 $65^\circ\text{N}$ 夏季(7月)太阳辐射(黑色); 绿色曲线为永兴洞石笋YX55 $\delta^{13}\text{C}$ 时间序列, 深绿色曲线为7点平滑曲线; 灰色曲线为永兴洞石笋YX55灰度时间序列, 黑色曲线为7点平滑曲线; 黑色线段为石笋的生长速率序列; 四条阴影分别指示H4、H5、H5a和H6事件。

图4 永兴洞石笋YX55多指标记录与其他地质记录对比

Fig. 4 Comparison of gray-level,  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  records of YX55 with other paleoclimatic records

现。在H4期间(约40~38 ka B.P.), 石笋岩性呈现异常变化, 不像其他H事件在石笋剖面上表现为灰度值小的透明烟灰色沉积特征, 而是显示出和DO旋回一致的灰度值大的不透明灰黄色岩性段。

综合各项指标来看, 除了H4事件期间各指标呈现出异常的对对应关系外, 其他时段石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 及灰度序列的各主要峰谷与末次冰期气候事件一一对应。此外, 结合图3的岩性分段, 上述三套指标的曲线峰值大多对应于灰黄色、不透明岩性段, 谷值则对应于烟灰色透明的岩性段。

### 3.2 灰度、同位素与气候突变事件的响应机理

已有研究表明, 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与季风降水有关<sup>[31]</sup>, 而石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 反映与洞穴滴水相关的

大气降水中的氧同位素的变化情况,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值正偏,指示亚洲夏季风减弱, $\delta^{18}\text{O}$ 值负偏则指示亚洲夏季风增强<sup>[28,33-35]</sup>。石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 和格陵兰冰芯记录高度一致,说明千年尺度上亚洲季风与北大西洋气候联系密切。模拟结果显示西风带可能是北高纬与印度洋季风区/欧亚大陆季风区气候联系的重要纽带<sup>[36,37]</sup>。最近的研究表明,北高纬气候变化和千年尺度季风气候事件的耦合关系不仅发生在末次冰期,而且稳定持续在最近数个冰期旋回中<sup>[38]</sup>。

石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 受控因素较为复杂,植物根系呼吸、土壤微生物活动等产生的 $\text{CO}_2$ 、洞内环境(空气流通性、 $\text{pCO}_2$ 等)以及滴水在洞穴裂隙内的滞留时间等都有可能影响石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化<sup>[39-41]</sup>。YX55石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化虽然与 $\delta^{18}\text{O}$ 有着一定的对应关系,但是石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 整体变化幅度较小(除H4外)。其他洞穴石笋也出现类似的结果,比如南京葫芦洞 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的DO12事件,其变化幅度也大于 $\delta^{13}\text{C}$ 记录<sup>[42]</sup>。已有研究表明,上覆土壤 $\text{CO}_2$ 的变化在石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 变化中起着重要的作用<sup>[43]</sup>,而土壤的性质及其变化过程会影响土壤 $\text{CO}_2$ 的产量<sup>[44]</sup>。贵州雾露洞石笋研究也显示,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 在百年尺度上的变化反映上覆土壤恢复/流失过程<sup>[45]</sup>,这表明上覆土壤性质的变化会引起石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 波动。当YX55石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 在H5、H5a、H6事件处发生明显正偏时, $\delta^{13}\text{C}$ 的振幅远不如 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化幅度,而是整体呈现负偏的状态,说明在这些时期,上覆土壤仅仅发生微弱的改变或土壤覆盖处于较良好的状态<sup>[46]</sup>。

在石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 负偏指示的夏季风强盛时段,良好的水热条件使得季风区植被生长茂盛,洞穴上覆植被与频繁的土壤生物活动产生了大量有机质,丰富的渗水在经过土壤的时候也携带了大量有机质进入洞穴,使得石笋的灰度在此时处于峰值<sup>[47]</sup>。反之,当石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 正偏时,季风开始衰退,雨量和热量大幅度下降,造成洞穴上覆植被演替、土壤微生物活动也随之减弱,因此下渗水带来的有机物质及杂质含量也相应降低。永兴洞石笋YX15的研究表明, $\delta^{18}\text{O}$ 负偏的时段对应着灰度高、杂质含量多的部分,说明在温暖湿润的气候条件下会有大量杂质随洞穴滴水沉积在石笋中,表明季风强度与洞穴碎屑含量之间存在相关性<sup>[40]</sup>。北京石花洞和湖北仙女洞洞穴滴水观测结果显示,石笋层面中所含的杂质与降水携带的物质有关<sup>[47-49]</sup>且石花洞现代监测结果同时也显示在温度较低时洞穴沉积物为杂质较少、更为纯净的方解石段<sup>[50]</sup>。张德忠等<sup>[19]</sup>通过对武都万象洞石笋的研究表明,石笋剖面透明度较差、灰度值大且密度小的米黄色岩性段对应于葫芦洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负的部分,表明季风的衰退导致洞穴环境的变化会使方解石形成规则整齐的晶体形态。此外,洞穴观测表明冬季下渗水会带来一定量有机物质或杂质<sup>[51]</sup>,但是土壤—岩溶系统的过滤作用会阻碍有机物质或无机物质参与石笋沉积<sup>[52]</sup>,从而使石笋沉积为灰度值小的纯净方解石。这或许可以解释YX55石笋灰度在DO旋回和H5、H5a、H6事件期间沉积特征的差异。

如图4所示,石笋YX55记录的所有弱季风事件中,H4是 $\delta^{18}\text{O}$ 正偏幅度最大的。虽然从YX55石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化来看,H4的振幅并非显著大于其他H事件,但神农架地区大九湖的孢粉记录则表示在H4阶段植被的类型曾发生较大的变动<sup>[53]</sup>,期间木本含量下降约20%,草本花粉比例持续增长,主导组分莎草科和禾本科稳定增加,木本含量小且变幅较大。此外,同样位于长江流域的若尔盖盆地及苏北盆地孢粉记录也显示该时段内植被丰度和类型发生过变化<sup>[54,55]</sup>。这些记录都表明H4期间气候变化的确对长江流域不同海拔高度区域的植被及生态环境产生了较大的影响。同时,大九湖泥炭记录也显示该时段内温度持续缓慢降低,湿度在MIS 3阶段相对最低并且气候波动频繁<sup>[56]</sup>。当气候波动引起植被类型、丰度及盖度等都发生巨大的变化时,环境对土壤的干扰程度超过了土壤所能维持自身稳定变化的阈值,极有可能导致土壤在降水的侵蚀下产生突然的大幅度退化,

此时母液所携带的杂质就会直接经过岩石孔隙构成的渗水通道向下渗透<sup>[52]</sup>。此外, H4期间石笋的生长速率不像在其他H事件处一样呈现下降趋势, 却异常上升(图4f)。研究表明, 洞穴上覆生态环境(土壤和植被)的变化会引起石笋生长速率发生变化<sup>[57]</sup>。当环境恶化、岩溶系统的过滤作用减弱或失灵时, 流速较快的下渗水将携带更多的物质形成石笋的结晶核<sup>[58]</sup>, 可能会使得此处生长速率异常增加。由于YX55生长处洞穴顶部岩溶系统的裂隙十分发育, 使得此处岩溶系统调蓄能力较弱, 于是洞穴上覆土壤的变化便能更大程度且更为清楚地反映在石笋沉积物中。因此在H4期间, 尽管下渗水带来的有机物质及杂质含量和其他H事件一样减少, 但是由于此时上覆土壤的覆盖率降低、土壤—岩溶系统的过滤作用减弱或失灵(表现为石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 显著正偏、生长速率异常增加), 下渗水带来的有机物质及无机杂质全部进入洞穴, 石笋中有机物及杂质的含量异常增加, 造成石笋灰度及岩性呈现异常变化, 不像其他H事件一样在石笋剖面上表现为灰度值小的纯净烟灰色沉积特征, 而是显示出和DO旋回一致的灰度值大的不透明灰黄色岩性变化。

#### 4 结论

本文基于湖北神农架地区永兴洞的石笋YX55的高精度U/Th定年结果和多指标分析数据, 重建了65~35 ka B.P.神农架地区石笋灰度、 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化序列, 建立了石笋灰度、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 等代用指标之间的联系, 得出以下结论:

(1) 在65~40 ka B.P.时段, 石笋灰度与 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线有着类似的变化特征, 都响应于千年尺度的气候变化事件。其中, H事件在石笋剖面上表现为灰度值小、纯净的烟灰色岩性段, DO旋回则与灰度值大、灰黄色含杂质的岩性段相对应。

(2) 整体来看, 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 都响应于 $\delta^{18}\text{O}$ 指示的H事件和DO旋回, 但除H4事件外, 碳同位素的波动幅度普遍较小, 说明代表局地土壤覆盖状况的 $\delta^{13}\text{C}$ 指标对气候的响应并不十分敏感。

(3) 在H4期间石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 和灰度呈现异常变化:  $\delta^{13}\text{C}$ 大幅正偏, 振幅相当于其他H事件的2~3倍, 灰度显示出和DO旋回一致的特征。这种异常对应关系可能的机制是, H4期间季风急剧减弱, 超过了土壤所能维持自身稳定变化的阈值, 使得裂隙发育的洞穴上覆土壤覆盖率大幅降低, 从而削弱或阻止了土壤—岩溶系统的过滤能力。这个阈值的大小目前尚不清楚, 还需进一步研究加以确定。

#### 参考文献(References):

- [1] HEINRICH H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130000 years. *Quaternary Research*, 1988, 29(2): 142-152.
- [2] DANSGAARD W, OHNSEN S J, CLAUSEN H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-ka ice-core record. *Nature*, 1993, 364(6434): 218-220.
- [3] GROOTES P M, STUIVER M, WHITE J W C, et al. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores. *Nature*, 1993, 366(6455): 552-554.
- [4] LEUSCHNER D C, SIROCKO F. The low-latitude monsoon climate during Dansgaard-Oeschger cycles and Heinrich Events. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(1-5): 243-254.
- [5] FAIRCHILD I J, SMITH C L, BAKER A, et al. Modification and preservation of environment signals in speleothems. *Earth Sciences Reviews*, 2006, 75(1-4): 105-153.
- [6] 殷建军, 唐伟. 桂林茅茅头大岩近50年来石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与局地气候/大尺度环流关系探讨. *地质学报*, 2016, 90(8): 2035-2042. [YIN J J, TANG W. Discussion about the relationship between local climate/large scale circulation and  $\delta^{18}\text{O}$



- recorded by stalagmite from Maomaotou big cave, Guilin in the past 50 years. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(8): 2035-2042.]
- [7] 程海, 艾思本, 王先锋. 中国南方石笋氧同位素记录的重要意义. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 157-163. [CHENG H, EDWARDS R L, WANG X F, et al. Oxygen isotope records of stalagmites from Southern China. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2): 157-163.]
- [8] LUNDBERG J, MCFARLANE D A. Post-speleogenetic biogenic modification of Gomantong Caves, Sabah, Borneo. *Geomorphology*, 2012, 157-158(1): 153-168.
- [9] 刘淑华, 杨亮, 黄嘉仪, 等. 川东北宋家洞高分辨率石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与D/O事件5-10. *地球化学*, 2015, 44(5): 413-420. [LIU S M, YANG L, HUANG J Y, et al. A high-resolution speleothem  $\delta^{13}\text{C}$  record from Songjia Cave in NE Sichuan, Central China and D/O event 5 to 10. *Geochimica*, 2015, 44(5): 413-420.]
- [10] ARIENZO M M, SWART P K, BROAD K, et al. Multi-proxy evidence of millennial climate variability from multiple Bahamian speleothems. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 161: 18-29.
- [11] FRAPPIER A B, SAHAGIAN D, CARPENTER S J, et al. Stalagmite stable isotope record of recent tropical cyclone events. *Geology*, 2007, 35(2): 111-114.
- [12] 张月明, 杨勋林, 黄帆, 等. 重庆丰都高分辨率石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与AD1250-1750 a季风气候变化. *西南大学学报: 自然科学版*, 2013, 35(3): 117-123. [ZHANG Y M, YANG X L, HUANG F, et al. A high-resolution stalagmite  $\delta^{13}\text{C}$  record from shuiming cave over the past 500 years. *Journal of Southwest University: Natural Science*, 2013, 35(3): 117-123.]
- [13] 孙东怀, 刘禹, 谭明. 古环境记录的数字图像分析及应用. *科学通报*, 2002, 47(23): 1957-1963. [SUN D H, LIU Y, TAN M. Digital image analysis of palaeoenvironmental records and applications. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(23): 1957-1963.]
- [14] 方默勤, 杨勋林, 刘秀明, 等. 重庆黑风洞石笋灰度记录的全新世季风气候变化. *地球与环境*, 2017, 45(2): 126-134. [FANG M Q, YANG X L, LIU X M, et al. Holocene monsoon variations in stalagmite grey value for Heifeng cave, Chongqing, China. *Earth and Environment*, 2017, 45(2): 126-134.]
- [15] 张会领, 殷建军, 林玉石. 中晚全新世湘西莲花洞石笋灰度变化特征及其古气候意义. *热带地理*, 2018, 38(6): 810-818. [ZHANG H L, YIN J J, LIN Y S. Variations in grey scale of a stalagmite from Lianhua cave, hunan and its paleoclimatic implications during the mid-late holocene. *Tropical Geography*, 2018, 38(6): 810-818.]
- [16] 董梦彩, 崔英芳, 张小青, 等. 近3000年东亚夏季风变化的黄土高原石笋记录研究. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(10): 147-153. [DONG M C, CUI Y F, ZHANG X Q, et al. The East Asian monsoon variability over the past 3000 years as recorded by an absolute-dated stalagmite from Northern China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(10): 147-153.]
- [17] DUAN F C, WU J Y, WANG Y J, et al. A 3000-a annually laminated stalagmite record of the last glacial maximum from Hulu Cave, China. *Quaternary Research*, 2015, 83(2): 360-369.
- [18] 崔古月, 杨勋林, 方默勤, 等. 全新世早期石笋灰度序列记录的气候环境信息分析: 以重庆羊口洞石笋为例. *中国岩溶*, 2017, 36(2): 171-178. [CUI G Y, YANG X L, FANG M Q, et al. Climatic implications of stalagmite grey scale sequence during the early holocene from the Yangkou cave, Chongqing. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(2): 171-178.]
- [19] 张德忠, 白益军, 桑文翠, 等. 末次冰消期亚洲季风强度变化的黄土高原西部万象洞石笋灰度记录. *第四纪研究*, 2011, 31(5): 791-799. [ZHANG D Z, BAI Y J, SANG W C, et al. Asian monsoon intensity variations during the last deglaciation recorded by stalagmite gray scale from Wanxiang cave, Western Loess Plateau. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(5): 791-799.]
- [20] AHARON P, DHUNGANA R. Ocean-atmosphere interactions as drivers of mid-to-late Holocene rapid climate changes: Evidence from high-resolution stalagmite records at DeSoto Caverns, Southeast USA. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 170: 69-81.
- [21] FOHLMEISTER J, PLESSEN B, DUDASHVILI A S, et al. Winter precipitation changes during the medieval climate anomaly and the little ice age in arid Central Asia. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 178: 24-36.
- [22] BERGEL S J, CARLSON P E, LARSON T E, et al. Constraining the subsoil carbon source to cave-air  $\text{CO}_2$  and speleothem calcite in central Texas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 217: 112-127.
- [23] 胡尊语, 覃荣蓓, 樊仁为, 等. 湖北清江和尚洞石笋色度对温度的响应. *第四纪研究*, 2018, 38(6): 1487-1493. [HU Z Y, QIN R B, FAN R W, et al. The paleo-temperature significance of color of annual laminae stalagmite from Heshang

- cave, Central China. *Quaternary Sciences*, 2018, 38(6): 1487-1493.]
- [24] DU Q D, WANG Z J, WANG J, et al. Geochronology and geochemistry of tuff beds from the shicaohe formation of Shennongjia Group and tectonic evolution in the Northern Yangtze Block, South China. *International Journal of Earth Sciences*, 2016, 105(2): 521-535.
- [25] 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. *沉积学报*, 2018, 36(4): 674-683. [ZHANG W H, LIAO Z B, CHEN S T, et al. DO18 event depicted by a high-resolution stalagmite record from Yongxing cave, Hubei province. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(4): 674-683.]
- [26] 顾宁, 吴江滢. 辽宁暖洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的古气候环境意义初探. *中国岩溶*, 2012, 31(2): 107-114. [GU N, WU J Y. Paleoclimate significance of  $\delta^{13}\text{C}$  in stalagmite from Nuanhe cave, Liaoning. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(2): 107-114.]
- [27] CHEN S T, WANG Y J, CHENG H, et al. Strong coupling of Asian monsoon and antarctic climates on sub-orbital timescales. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 32995.
- [28] WANG Y J. Correlation between high-resolution climate records from a Nanjing stalagmite and GRIP ice core during the last glaciation. *Science in China: Series D*, 2001, 44(1): 14-23.
- [29] WANG Y J, CHENG H, EDWARDS R L, et al. Millennial and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224000 years. *Nature*, 2008, (451): 1090-1093.
- [30] CHENG H, EDWARDS R L, SINHA A, et al. The Asian monsoon over the past 640000 years and ice age terminations. *Nature*, 2016, 534(7609): 640-646.
- [31] 郝玥, 余新晓, 邓文平, 等. 北京西山大气降水D和 $\delta^{18}\text{O}$ 组成变化及水汽来源. *自然资源学报*, 2016, 31(7): 1211-1221. [HAO Y, YU X X, DENG W P, et al. The variations of hydrogen and oxygen compositions and moisture sources in the precipitation in western mountain areas of Beijing. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(7): 1211-1221.]
- [32] DANSGAARD W, OHNSEN S J, CLAUSEN H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-ka ice-core record. *Nature*, 1993, 364(6434): 218-220.
- [33] 许涛, 蔡健榕, 孙晓双, 等. 台风“杜鹃”降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的云雨区效应初探. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 184-194. [XU T, CAI J R, SUN X Q, et al. A tentative study of "cloudy and rainy area effect" of the  $\delta^{18}\text{O}$  in the precipitation of typhoon "Dujuan". *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(12): 184-194.]
- [34] 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. *第四纪研究*, 2009, 29(5): 851-862. [TAN M. 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. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(5): 851-862.]
- [35] ZHANG W H, ZHANG Z Q, LIAO Z B, et al. Changes in the Asian monsoon climate during the late last interglacial recorded in oxygen isotopes of a stalagmite from the Yongxing cave, Central China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 179(1): 211-218.
- [36] CHIANG J C H, FRIEDMAN A R. Extratropical cooling, interhemispheric thermal gradients, and tropical climate change. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 2012, 40(1): 383-412.
- [37] SUN Y, CLEMENS S C, MORRILL C, et al. Influence of atlantic meridional overturning circulation on the East Asian winter monsoon. *Nature Geoscience*, 2012, 5(1): 46-49.
- [38] 曾雅兰, 陈仕涛, 杨少华, 等. 过去640 ka亚洲季风变化的多尺度分析. *中国科学: 地球科学*, 2019, (5): 864-874. [ZENG Y L, CHEN S T, YANG S H, et al. Multiscale analysis of Asian monsoon over the past 640 ka. *Science China Earth Sciences*, 2019, (5): 864-874.]
- [39] 张美良, 朱晓燕, 吴夏, 等. 洞穴次生化学碳酸盐沉积物—石笋的气候替代指标的意义与不确定性因素. *地球与环境*, 2015, 43(2): 138-151. [ZHANG M L, ZHU X Y, WU X, et al. Significance and uncertainty of speleothem-stalagmite proxies. *Earth and Environment*, 2015, 43(2): 138-151.]
- [40] 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. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(6): 228.
- [41] 李廷勇, 李红春, 李俊云, 等. 重庆芙蓉洞洞穴沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及意义. *地质论评*, 2008, 54(5): 712-720. [LI T Y, LI H C, LI J Y, et al. The  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  features and their significances of speleothems in Furong cave, Chongqing, China. *Geological Review*, 2008, 54(5): 712-720.]

- [42] KONG X, WANG Y, WU J, et al. Complicated responses of stalagmite  $\delta^{13}\text{C}$  to climate change during the last glaciation from Hulu cave, Nanjing, China. *Science in China*, 2005, 48(12): 2174-2181.
- [43] GENTY D, BAKER A, MASSAULT M, et al. Dead carbon in stalagmites: Carbonate bedrock paleodissolution vs. ageing of soil organic matter. Implications for  $^{13}\text{C}$  variations in speleothems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(20): 3443-3457.
- [44] GRÜNZWEIG J M, HEMMING D, MASEYK K, et al. Water limitation to soil  $\text{CO}_2$  efflux in a pine forest at the semiarid 'timberline'. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, 114(G3): 1-14.
- [45] LIU D B, WANG Y J, CHENG H, et al. High-resolution stalagmite  $\delta^{13}\text{C}$  record of soil processes from southwestern China during the early MIS 3. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(7): 796-802.
- [46] 李廷勇, 李红春, 袁道先, 等. 重庆新崖洞 XY6 石笋 4.5 ka 以来高分辨率  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  记录的气候变化. *中国岩溶*, 2006, 25(2): 95-100. [LI T Y, LI H C, YUAN D X, et al. A 4500-year high-resolution climatic record from a stalagmite in Xinya cave, Chongqing, China. *Carsologica Sinica*, 2006, 25(2): 95-100.]
- [47] 杨勋林, 袁道先, 张月明, 等. 湖北仙女山人工隧洞现代石笋气候学: 灰度及其指示意义. *中国岩溶*, 2012, 31(3): 248-252. [YANG X L, YUAN D X, ZHANG Y M, et al. Grayscale and climatic instructions of modern stalagmite from artificial tunnel inside the Fairy Hillin Hubei. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(3): 248-252.]
- [48] 班凤梅, 潘根兴, 王新中. 北京石花洞石笋微层层面有机物质的形成时间及机理初探. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 265-268. [BAN F M, PAN G X, WANG X Z. Timing and possible mechanism of organic substances formation in stalagmites laminae from Beijing Shihua cave. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2): 265-268.]
- [49] 王新中, 班凤梅, 潘根兴. 洞穴滴水地球化学的空间和时间变化及其控制因素: 以北京石花洞为例. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 258-264. [WANG X Z, BAN F M, PAN G X. Temporal and spatial variation of cave drip water geochemistry in Shihua cave, Beijing, China. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2): 258-264.]
- [50] CAI B G, ZHU J, BAN F M, et al. Intra-annual variation of the calcite deposition rate of drip water in Shihua cave, Beijing, China and its implications for palaeoclimatic reconstructions. *Boreas*, 2011, 40(3): 525-535.
- [51] 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. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(12): 474.
- [52] 秦小光, 刘东生, 谭明, 等. 北京石花洞石笋微层灰度变化特征及其气候意义: II. 灰度的年际变化. *中国科学: 地球科学*, 2000, 30(3): 239-248. [QIN X G, LIU D S, TAN M, et al. Characteristics of annual laminae gray level variations in a stalagmite from Shihua cave, Beijing and its climatic significance (II). *Science China Earth Sciences*, 2000, 43(5): 521-533]
- [53] 李杰, 郑卓, CHEDDADI R, 等. 神农架大九湖四万年以来的植被与气候变化. *地理学报*, 2013, 68(1): 69-81. [LI J, ZHENG Z, CHEDDADI R, et al. Pollen-based environmental reconstruction around Dajihu Lake, Shennongjia Mountains since 40 ka BP. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(1): 69-81.]
- [54] 萧家仪, 王丹, 吕海波, 等. 苏北盆地晚更新世以来的孢粉记录与气候地层学的初步研究. *古生物学报*, 2005, 44(4): 591-598. [XIAO J Y, WANG D, LYU H B, et al. A study of pollen and climatic stratigraphy in the Northern Jiangsu Basin since late pleistocene. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2005, 44(4): 591-598.]
- [55] 沈才明, 唐颌余, 王苏民, 等. 若尔盖盆地 RM 孔孢粉记录及其年代序列. *科学通报*, 2005, 50(3): 246-254. [SHEN C M, TANG L Y, WANG S M, et al. RM aleurio spore records and its chronological list of Ruergai Basin. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(3): 246-254.]
- [56] 朱芸, 赵志军, 陈晔, 等. 神农架泥炭记录的 MIS3 阶段环境变化及千年尺度气候波. *第四纪研究*, 2013, 33(1): 155-166. [ZHU Y, ZHAO Z J, CHEN Y, et al. Record of environmental and millennial-scale climatic changes during mis 3 by peat at Shennongjia. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(1): 155-166.]
- [57] 张美良, 朱晓燕, 李涛, 等. 桂林现代洞穴碳酸盐: 石笋的沉积速率及其环境意义. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, (1): 125-133. [ZHANG M L, ZHU X Y, LI T, et al. Study on sedimentation rate of modern cave stalagmite carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) deposits and its environmental significance: A case from Panlong cave, Guilin, China. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, (1): 125-133.]
- [58] 张德忠, 张平中, 桑文翠, 等. 石笋密度蕴含的过去气候变化信息: 以末次冰消期黄土高原西部武都万象洞石笋为例. *科学通报*, 2010, 55(31): 3040-3047. [ZHANG D Z, ZHANG P Z, SANG W C, et al. Implications of stalagmite density for past climate change: An example from stalagmite growth during the last deglaciation from Wanxiang cave, Western Loess Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(31): 3040-3047.]

## The response of stalagmite gray-level and isotopes to the climatic events during the last glacial period

WANG Meng<sup>1,2,3</sup>, CHEN Shi-tao<sup>1,2,3</sup>, HUANG Wan-chun<sup>1,2,3</sup>, CAI Wen-qin<sup>4</sup>,  
GONG Qing-lin<sup>1,2,3</sup>, LIANG Yi-jia<sup>1,2,3</sup>, WANG Xian-feng<sup>5</sup>, WANG Yong-jin<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. State Key Laboratory of Cultivation Base of Geographical Environment Evolution (Jiangsu Province), Nanjing 210023, China; 3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Environment Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 4. Department of Marine Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 5. Nanyang Technological University, Earth Observatory of Singapore, Singapore 639798, Singapore)

**Abstract:** The study of various proxies of stalagmites is conducive to understand the characteristics and mechanisms of monsoon climate events comprehensively. Here, we present a high-resolution and multi-proxy stalagmite record from Yongxing Cave, Central China, spanning the interval between 65 and 35 ka B.P. based on high precision U/Th dating method and multi-proxy analyses. A total of 371 subsamples were drilled for oxygen and carbon isotopic measurements along the growth axis at a spacing of 0.5-mm-diameter carbide dental burrs. The analyses were conducted using a Finnigan MAT 253 mass spectrometer linked to a Kiel Carbonate Device at the School of Geography, Nanjing Normal University. The precision is 0.06‰ for  $\delta^{18}\text{O}$  and 0.05‰ for  $\delta^{13}\text{C}$  at the  $1\sigma$  level. For the gray-level measurements, the polished surface of the studied section was scanned at a resolution of 1200 dpi using an EPSON Perfection 4990 Photo Scanner. The gray level was then obtained from the image using the Environment for Visualizing Images (ENVI 4.8) software while traversing down the growth axis. The values range between 0 and 442, with a spatial resolution of 20  $\mu\text{m}$ . The experimental results show that during the period of 65-40 ka B.P., the stalagmite records of gray-level,  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  all presented millennial to sub-millennial changes, but the amplitude of  $\delta^{13}\text{C}$  is much smaller than that of  $\delta^{18}\text{O}$ . This indicates that the local climate indicators of  $\delta^{13}\text{C}$ , gray-level and lithology also respond to the Heinrich (H) events and Dansgaard-Oeschger (DO) events, but their sensitivities to events are different. During the H4 episode (about 40-38 ka B.P.),  $\delta^{13}\text{C}$  and the gray-level of the stalagmite showed anomalous changes. The significantly positive shift of  $\delta^{13}\text{C}$  reached an amplitude of 4.5‰ during H4, which was 2-3 times than other H events, while the gray-level presented the same characteristics to that of the DO cycles. We imply that the state of soil erosion may play an important role in such correspondence during H4. When the monsoon weakened to a certain threshold, the soil cover above the permeable cave was greatly deteriorated, thus weakening and/or preventing the infiltration ability of the soil-karst system and increasing the impurity contents in the stalagmite.

**Keywords:** abrupt climate events; gray-level analysis of stalagmite; isotope; Asian monsoon