

张涛涛,李廷勇,韩立银,等. MIS 5a/5b 时期亚洲夏季风变化的高分辨率石笋记录[J]. 中国岩溶, 2017, 36(2): 162-170.  
DOI: 10. 11932/karst20170202

# MIS 5a/5b 时期亚洲夏季风变化的高分辨率石笋记录

张涛涛<sup>1,2,3</sup>, 李廷勇<sup>1,2,3</sup>, 韩立银<sup>1</sup>, 程海<sup>4</sup>, 李俊云<sup>1</sup>, 赵鑫<sup>1</sup>, 周菁俐<sup>1</sup>

(1. 西南大学地理科学学院岩溶环境学重庆重点实验室, 重庆 400715;

2. 国土资源部岩溶生态环境—重庆南川野外研究基地, 重庆 408435;

3. 中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004;

4. 西安交通大学全球环境变化研究院, 西安 710054)

**摘要:** 由于深海氧同位素阶段 5 时期 (Marine Isotope Stage 5, MIS 5) 高分辨率的亚洲夏季风记录较少, 限制了对该时期亚洲夏季风变化的认识。本文利用重庆金佛山羊口洞石笋的  $\delta^{18}\text{O}$  记录, 重建了 MIS 5a/5b 时期平均分辨率为 38 年的亚洲夏季风演变历史。发现该时段亚洲夏季风在千年—百年尺度上与北大西洋地区气候变化存在紧密联系。得益于误差小于 0.4% 的  $^{230}\text{Th}$  测年结果, 本文标定了中国间冰阶 (Chinese Interstadial, CIS) 21 的开始时间为  $84.6 \pm 0.3 \text{ ka BP}$ , CIS 22 的起止时间分别为  $91.2 \pm 0.3 \text{ ka BP}$  和  $88.9 \pm 0.3 \text{ ka BP}$ 。此外, 羊口洞石笋记录的 CIS 21 和 CIS 22 的变化模式与格陵兰记录不同, 而与南极冰芯记录呈反相对应, 可能表示在此阶段亚洲夏季风受到了南半球气候变化的影响。

**关键词:** 亚洲夏季风; 石笋  $\delta^{18}\text{O}$ ; 深海氧同位素阶段 5a/5b;  $^{230}\text{Th}$  年代; 南半球气候变化

**中图分类号:** P532

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4810(2017)02-0162-09

## 0 引言

亚洲夏季风 (Asian Summer Monsoon, ASM) 作为全球气候系统的重要组成部分, 深刻影响着全球约一半人口的生产生活甚至是文明的演替、朝代更迭<sup>[1-3]</sup>。因此, 充分理解亚洲夏季风的驱动原理和变化机制尤为重要。近十几年来, 关于亚洲夏季风演化的研究成果卓著, Wang 等<sup>[4]</sup>首次通过石笋氧同位素记录揭示了亚洲夏季风的演变与北大西洋地区气候变化之间存在紧密联系。之后, 大量的来自中国季风区的石笋记录陆续发表, 进一步证实了这种千年尺度上的联系<sup>[5-7]</sup>; 在百年尺度上, 亚洲夏季风也能迅速响应北半球高纬度地区气候变化<sup>[8-10]</sup>。然而, 这其中具有精确年代控制的高分辨率记录主要集中于深海氧同位素阶段 (Marine Isotope Stage, MIS) 1-3

时期。已报道的 MIS 5 时期的记录主要来自董歌洞<sup>[5]</sup>、山宝洞<sup>[7, 11]</sup>和万象洞<sup>[12]</sup>, 但分辨率都较低。最近发表的高分辨率的三星洞石笋记录覆盖了 113.5-86.6 ka BP 时段, 但缺少 MIS 5a 时期的记录<sup>[13]</sup>。Zhou 等<sup>[14]</sup>认为由于冰量等冰期边界条件的影响, 亚洲夏季风在 MIS 5d 时期与北高纬地区气候的联系减弱。而 Jiang 等<sup>[13]</sup>认为在 MIS 5b-5d 时期亚洲夏季风在千年—百年尺度上都与北大西洋地区气候紧密联系。此外, 近年来的研究发现在 Dansgaard-Oeschger (D/O) 5-12 以及 Heinrich (H) 事件 4、5 时期, 亚洲夏季风的演变模式与北高纬地区气候变化存在差异, 并推测这是由于受到了来自南半球气候变化的影响<sup>[15-17]</sup>。Jiang 等<sup>[13]</sup>发现 MIS 5 时期亚洲夏季风记录中也有南半球气候变化的印迹, 这是否是局部性的特殊现象, 有待更多高分辨率记录的证实。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41172165, 41302138, 41440020); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (XDJK2013A012, XDJK2014C010); 岩溶动力学重点实验室开放基金资助课题 (KDL201301) 和西南大学博士基金项目 (SWU114022)

第一作者简介: 张涛涛 (1992-), 男, 硕士研究生, 第四纪地质学专业。E-mail: ztt9204@163.com。

通信作者: 李廷勇 (1978-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事石笋古气候学研究。E-mail: cdlty@swu.edu.cn。

收稿日期: 2016-06-22

MIS 5 时期的海平面高度以及全球冰量等都不同于 MIS 1—4 时期<sup>[18-19]</sup>, 详细研究 MIS 5 时期亚洲夏季风的变化有助于全面理解其驱动机制及其与全球其他气候系统之间的相互关系。

分别发现于北大西洋深海沉积物和格陵兰冰芯的千年尺度的气候变化事件 H 事件和 D/O 循环<sup>[20-22]</sup> 是研究末次冰期气候变化良好的切入点, 精确标定各事件的起止时间有助于研究各气候系统之间相互联系。然而, 由于冰芯记录在年代上的限制, GICC05 年代模型在早于 60 ka BP 时段的年代误差超过 2 600 年<sup>[23]</sup>, 南极冰芯 WD 对其校正只覆盖了近 68 ka<sup>[24-25]</sup>。石笋可以通过 U—Th 测年方法得到独立精准的年代, 可以为其他记录提供年代上的参考<sup>[26-27]</sup>。本文所利用的重庆金佛山羊口洞石笋 YK1327 其<sup>238</sup>U 含量高达  $10 \times 10^{-6}$ , 年代误差小于 0.4%, 且平均分辨率为 38 年, 这为详细讨论亚洲夏季风的演化提供了可能。

## 1 研究区概况及石笋样品描述

本文所研究的 YK1327 石笋采自重庆市金佛山顶部发育于二叠系灰岩的羊口洞 (29°02'N, 107°11'E) (图 1), 全长 2 245 m, 洞口海拔 2 140 m, 洞内年平均气温 7.5 °C<sup>[33]</sup>。金佛山地处四川盆地东南部与云贵高原北部交界地带, 为大娄山主峰, 区内属典型的亚热带季风气候, 山上年平均气温 8.5 °C, 最热月 7—8 月平均气温 17.8 °C, 年平均降水量 1 400 mm 左右, 但季节分布不均, 约 83% 的降水发生在 4—10 月<sup>[34]</sup>。

YK1327 石笋整体呈圆柱体, 直径约 130 mm, 其顶部断裂不知去向。沿生长轴切开、抛光, 剖面总体呈黄褐色, 纹理清晰可见。沿生长轴量得石笋总长 395 mm, 本文研究距顶 103 mm 到 395 mm 之间的部分, 集中讨论深海氧同位素阶段 5a 和 5b 时期的气候记录。

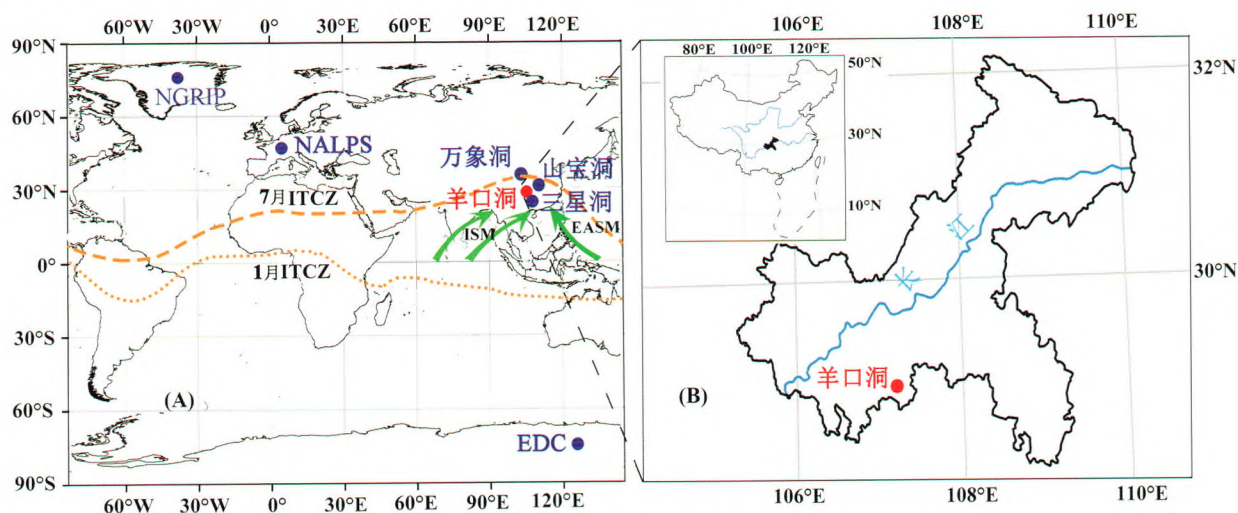


图 1 羊口洞及其他记录的地理位置(修改自[17])

Fig. 1 Locations of the Yangkou Cave and other records

注: 格陵兰冰芯记录 NGRIP<sup>[28]</sup>; 北阿尔卑斯地区石笋记录 NALPS<sup>[29]</sup>; 万象洞<sup>[12]</sup>; 山宝洞<sup>[7, 11]</sup>; 三星洞<sup>[13]</sup>; 南极冰芯记录 EDC<sup>[30]</sup>; 马斯克林高压(MH)<sup>[31]</sup>; 黄色虚线分别表示热带辐合带(ITCZ)在 1 月和 7 月的位置<sup>[32]</sup>; 绿色箭头表示印度夏季风(ISM)和东亚夏季风(EASM)。

## 2 方法与结果

### 2.1 <sup>230</sup>Th 测年与年龄模型

在石笋剖面上沿生长纹层用直径 1 mm 的牙钻钻取 24 个测年样品, 每个样品重量约 60~80 mg, 测年工作在西安交通大学用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成。化学前处理及仪器测试过程与方法参照 Shen 等<sup>[27, 35]</sup>, 年龄误差为  $\pm 2\sigma$  测量统计误差。衰变常数<sup>230</sup>Th 采用  $9.170 5 \times 10^{-6} \text{ yr}^{-1}$ ; <sup>234</sup>U 采

用  $2.822 05 \times 10^{-6} \text{ yr}^{-1}$ <sup>[26]</sup>; <sup>238</sup>U 采用  $1.551 25 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ <sup>[36]</sup>。初始<sup>230</sup>Th 年龄校正采用地壳<sup>230</sup>Th/<sup>232</sup>Th 平均比值:  $4.4 \pm 2.2 \times 10^{-6}$ <sup>[37]</sup>。测年结果见表 1。YK1327 石笋的<sup>238</sup>U 含量的变化范围为  $6 286 \times 10^{-9} \sim 13 596 \times 10^{-9}$ , 高<sup>238</sup>U 含量和<sup>230</sup>Th/<sup>232</sup>Th 比值为羊口洞石笋样品获得高精度年代数据奠定了基础, 24 个年龄数据的误差均小于 0.4%, 且都符合沉积序列。通过对<sup>230</sup>Th 年龄数据进行线性内插建立了 YK1327 的年龄模型(图 2)。

表 1 石笋 YK1327 <sup>230</sup>Th 测年结果  
Table 1 <sup>230</sup>Th dating results of stalagmite YK1327

| 样品<br>编号  | 深度<br>mm | <sup>238</sup> U<br>/×10 <sup>-9</sup> | <sup>232</sup> Th<br>/×10 <sup>-12</sup> | <sup>230</sup> Th / <sup>232</sup> Th<br>/atomic×10 <sup>-6</sup> | δ <sup>234</sup> U<br>测量值 | <sup>230</sup> Th / <sup>238</sup> U<br>活度比 | <sup>230</sup> Th Age/a<br>未校正 | <sup>230</sup> Th Age/a BP<br>已校正 |
|-----------|----------|----------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| YK1327-10 | 108      | 12 883±19                              | 42±6                                     | 2 924 245±400 776                                                 | 111.5±1.5                 | 0.582 2±0.001 1                             | 79 642±274                     | 79 578±274                        |
| YK1327-11 | 115      | 10 989±16                              | 37±6                                     | 2 871 619±424 819                                                 | 122.6±1.4                 | 0.590 7±0.001 1                             | 80 070±266                     | 80 006±266                        |
| YK1327-12 | 126      | 8 862±11                               | 40±7                                     | 2 153 043±351 478                                                 | 124.5±1.4                 | 0.594 4±0.000 9                             | 80 577±246                     | 80 513±246                        |
| YK1327-13 | 131      | 12 619±15                              | 29±5                                     | 4 200 677±714 103                                                 | 116.5±1.3                 | 0.594 5±0.000 9                             | 81 527±237                     | 81 462±237                        |
| YK1327-14 | 146      | 12 488±19                              | 28±6                                     | 4 319 564±863 048                                                 | 107.6±1.5                 | 0.589 9±0.001 2                             | 81 656±295                     | 81 592±295                        |
| YK1327-15 | 156      | 10 171±13                              | 33±5                                     | 2 920 490±473 284                                                 | 88.4±1.3                  | 0.579 5±0.001 0                             | 81 816±269                     | 81 752±269                        |
| YK1327-16 | 161      | 9 671±14                               | 113±6                                    | 823 264±40 205                                                    | 97.3±1.5                  | 0.585 4±0.001 1                             | 81 955±288                     | 81 891±288                        |
| YK1327-17 | 182      | 13 596±20                              | 52±6                                     | 2 595 881±296 160                                                 | 111.7±1.4                 | 0.600 4±0.001 1                             | 83 298±287                     | 83 234±287                        |
| YK1327-18 | 185      | 10 762±15                              | 267±8                                    | 399 148±11 478                                                    | 112.4±1.3                 | 0.601 4±0.001 1                             | 83 413±274                     | 83 348±274                        |
| YK1327-19 | 198      | 8 959±12                               | 223±7                                    | 394 862±11 524                                                    | 99.0±1.3                  | 0.596 7±0.001 0                             | 84 104±272                     | 84 039±272                        |
| YK1327-20 | 223      | 6 551±8                                | 209±6                                    | 314 435±9 610                                                     | 118.1±1.4                 | 0.608 7±0.001 0                             | 84 210±274                     | 84 145±274                        |
| YK1327-21 | 234.5    | 6 286±9                                | 93±6                                     | 682 941±453 47                                                    | 117.9±1.6                 | 0.614 0±0.001 1                             | 85 347±302                     | 85 283±302                        |
| YK1327-22 | 255      | 9 701±13                               | 37±4                                     | 2 689 515±317 836                                                 | 124.8±1.5                 | 0.622 7±0.001 1                             | 86 268±297                     | 86 204±297                        |
| YK1327-23 | 262.5    | 13 494±17                              | 29±6                                     | 4 813 456±966 973                                                 | 117.5±1.4                 | 0.620 1±0.001 0                             | 86 650±270                     | 86 586±270                        |
| YK1327-24 | 278      | 12 541±17                              | 55±5                                     | 2 350 425±195 845                                                 | 118.0±1.5                 | 0.620 9±0.001 1                             | 86 763±298                     | 86 699±298                        |
| YK1327-25 | 285      | 11 470±19                              | 39±6                                     | 3 086 234±471 147                                                 | 128.7±1.6                 | 0.630 5±0.001 2                             | 87 398±331                     | 87 333±331                        |
| YK1327-26 | 300      | 11 527±18                              | 111±6                                    | 1 081 962±55 850                                                  | 121.5±1.7                 | 0.631 2±0.001 2                             | 88 474±345                     | 88 410±345                        |
| YK1327-27 | 305.5    | 10 527±15                              | 102±5                                    | 1 086 192±51 440                                                  | 124.8±1.5                 | 0.635 3±0.001 1                             | 88 911±310                     | 88 847±310                        |
| YK1327-28 | 324      | 10 137±14                              | 42±5                                     | 2 502 123±283 394                                                 | 114.7±1.5                 | 0.633 2±0.001 1                             | 89 830±314                     | 89 766±314                        |
| YK1327-29 | 333      | 10 601±15                              | 52±5                                     | 2 130 975±211 512                                                 | 107.7±1.5                 | 0.632 7±0.001 2                             | 90 677±335                     | 90 613±335                        |
| YK1327-30 | 349      | 9 843±14                               | 40±5                                     | 2 559 769±299 042                                                 | 93.1±1.6                  | 0.628 3±0.001 1                             | 91 763±337                     | 91 698±337                        |
| YK1327-31 | 357.5    | 7 440±11                               | 235±7                                    | 328 236±9 441                                                     | 71.1±1.6                  | 0.627 8±0.001 2                             | 94 945±376                     | 94 880±376                        |
| YK1327-32 | 373      | 11 861±18                              | 87±5                                     | 1 397 119±77 548                                                  | 47.1±1.6                  | 0.621 0±0.001 2                             | 97 151±390                     | 97 086±390                        |
| YK1327-33 | 393      | 10 162±13                              | 60±5                                     | 1 658 867±128 553                                                 | 1.8±1.5                   | 0.598 1±0.001 0                             | 99 079±376                     | 99 015±376                        |

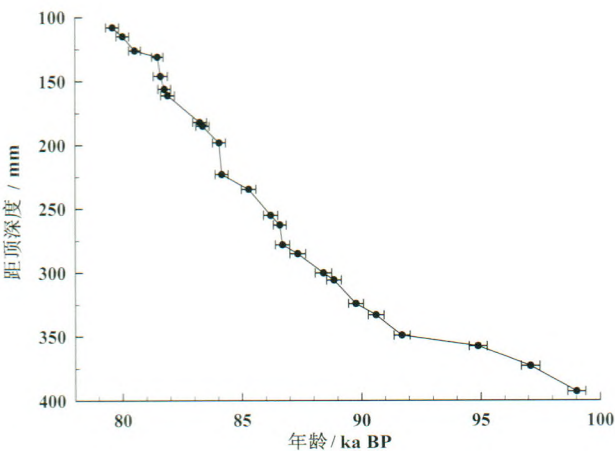


图 2 石笋 YK1327 的年代模型  
Fig. 2 Age model of stalagmite YK1327

2.2 碳氧稳定同位素测试

在抛光后的石笋剖面上,利用直径 0.5 mm 的牙钻沿石笋生长轴每间距 0.5 mm 钻取一个同位素样

品,共取得样品 584 个,平均时间分辨率约为 38 年。测试工作在西南大学地球化学与同位素实验室完成,利用美国热电公司(Thermo)碳酸盐自动进样装置 Kiel IV 与 Delta-V-Plus 型质谱仪联机测试,每 7 个样品插入一个标准样品(SWU 1);结果以 Vienna-Pee Dee Belemnite standard (V-PDB) 标准给出,分析误差(±1σ) 对 δ<sup>18</sup>O 小于 0.1‰,对 δ<sup>13</sup>C 小于 0.06‰<sup>[38]</sup>。

2.3 Hendy 检验

碳酸盐是否在同位素平衡条件下沉积,是石笋 δ<sup>18</sup>O 能否作为古气候代用指标的前提条件,Hendy 检验通常被用来评价同位素是否处于平衡分馏状态<sup>[39]</sup>。在距顶 135 mm、244 mm、310.5 mm 和 352 mm 处沿纹层从生长轴向两侧取样,每层取 7 个碳氧同位素样品,分析结果如图 3 所示,各层的 δ<sup>18</sup>O 值的变化幅度<0.5‰,且无富集现象,同一层的 δ<sup>18</sup>O 和 δ<sup>13</sup>C 也没有显著相关性,说明该段石笋在沉积过

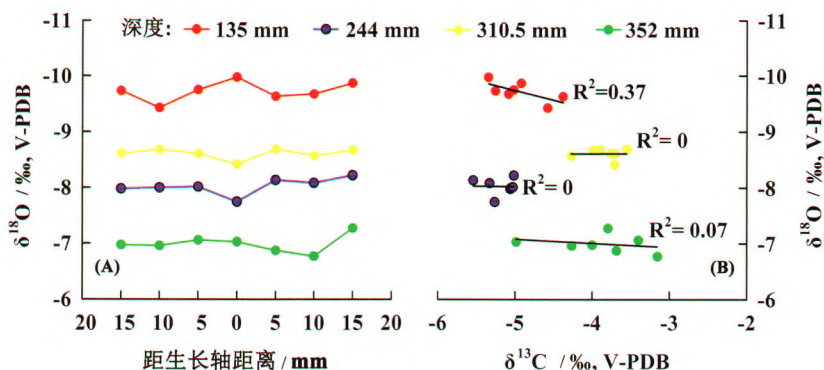


图3 Hendy 检测结果

Fig. 3 Hendy test for stalagmite YK1327

(A) 4个不同深度生长层  $\delta^{18}\text{O}$  值分布; (B) 各层  $\delta^{18}\text{O}$  与  $\delta^{13}\text{C}$  的关系(A) Distribution of  $\delta^{18}\text{O}$  in growth layers at different depths. (B) Relation between  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$ 

程中没有发生明显的动力分馏,其  $\delta^{18}\text{O}$  变化主要受气候因素的控制,可以用作古气候研究。

### 3 讨论

#### 3.1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的古气候意义

在同位素平衡分馏条件下,石笋  $\delta^{18}\text{O}$  值主要受洞穴内部平均气温和洞穴滴水  $\delta^{18}\text{O}$  的影响<sup>[39]</sup>。由洞穴滴水沉积为碳酸盐的过程中,温度对  $\delta^{18}\text{O}$  的影响为  $-0.23\text{‰}/\text{℃}$ <sup>[40]</sup>。在本研究时段内,石笋 YK1327 的  $\delta^{18}\text{O}$  值变幅达  $3.96\text{‰}$ ,由此计算出温度变化约为  $16\text{℃}$ 。然而,Caley 等的模拟结果表明,亚洲南部(包括葫芦洞、山宝洞、董歌洞等)地区在末次冰期的温度变化只有  $3\text{℃}$  左右<sup>[41]</sup>。所以,洞穴内部平均温度并不是石笋  $\delta^{18}\text{O}$  变化的主导因素,其主要受控于洞穴滴水的  $\delta^{18}\text{O}$ 。对羊口洞的洞穴滴水和当地大气降水的连续监测表明,从大气降水到形成滴水的过程中没有发生明显的蒸发作用,滴水的  $\delta^{18}\text{O}$  值表现出夏季偏轻,冬季偏重的趋势,反映当地大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  的平均水平<sup>[42]</sup>。

关于大气降水的  $\delta^{18}\text{O}$  值所代表的气候意义尚有争议<sup>[43-45]</sup>,但目前通常认为亚洲季风区石笋记录的大气降水的  $\delta^{18}\text{O}$  值在百年—千年尺度上反映的是亚洲夏季风的强度,而不是局地的降水量<sup>[4, 46-48]</sup>。Liu 等的模拟结果也证实石笋  $\delta^{18}\text{O}$  值可以指示亚洲夏季风强度<sup>[49]</sup>。在本文中,我们认为在百年—千年的时间尺度,整体上 YK1327 的  $\delta^{18}\text{O}$  偏轻表示亚洲夏季风增强,反之亦反。

#### 3.2 MIS 5a/5b 时期亚洲夏季风与北大西洋地区气候的联系

如图 4D 所示,石笋 YK1327 的  $\delta^{18}\text{O}$  值在本文研究时段的波动范围为  $-6.62\text{‰} \sim -10.58\text{‰}$  之间,波动幅度达  $3.96\text{‰}$ ,整体变化趋势与北纬  $30^\circ$  夏季太阳辐射变化相吻合<sup>[50]</sup>。这意味着在该时段内亚洲夏季风强度的变化在旭道尺度上主要受控于外部的天文轨道参数的变化。对照格陵兰冰芯 NGRIP 记录的千年尺度温度突变事件 (Greenland Interstadial, GIS) 22 和 21 的标定<sup>[20-21, 28]</sup> (图 4A), YK1327 记录了与之相对应的亚洲夏季风增强事件,即中国间冰阶 (Chinese Interstadial, CIS), CIS 22 和 CIS 21<sup>[51]</sup> (图 4D)。中国中部的山宝洞石笋 SB22 和 SB25 也清晰地记录了 CIS 22 和 CIS 21<sup>[7, 11]</sup> (图 4C); 位于亚洲夏季风边缘地区的万象洞石笋 WXSM 51 以及中国西南部的三星洞石笋 SX7 则分别记录了 CIS 21 和 CIS 22<sup>[12-13]</sup> (图 4B, 4E)。此外, YK1327 记录在 CIS 22 和 CIS 21 时段内时间分辨率达 25 年,可以显示出在百年尺度上与 NGRIP 记录的对应。例如,在 YK1327 记录中, CIS 22 内部被一个  $\delta^{18}\text{O}$  突然变重的季风减弱过程分割成双峰型的变化模式, CIS 22a 和 CIS 22b (图 4D)。在 NGRIP 记录中, GIS 22 也被一个持续约 200 年的降温事件分割成 GIS 22a 和 GIS 22b (图 4A)。这种结构在 2 支分辨率较低的山宝洞石笋 SB22 和 SB25 记录中都有所呈现<sup>[7, 11]</sup> (图 4C)。由于三星洞石笋 SX7 分辨率很高,我们对其数据进行 3 点平均处理,处理后的数据曲线也表现出双峰型的变化模式<sup>[13]</sup> (图 4E)。这些记录说明该时段在千年—百年尺度上,亚洲季风区内部各地的气候变化经历了相似的过程,且与北半球高纬度地区气候变

化存在紧密联系。这种联系可能是海洋—大气相互作用的结果,即大西洋经向翻转环流(Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC)的开启与闭合使北大西洋地区乃至整个北半球气温产生变化,而温度变化驱动热带辐合带(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)平均位置的南北移动进而影响亚洲夏季风强度的变化<sup>[52-54]</sup>。

### 3.3 CIS 22、CIS 21 年代的精确标定

在 YK1327 记录中,大约从 91.6 ka BP 到 90.5 ka BP,  $\delta^{18}\text{O}$  值缓慢偏轻 1.5‰, 响应于 GIS 22 的开始, 此过程有两个误差为  $\pm 0.3$  ka 的 U—Th 年龄点控制, 我们把此过程的中点作为 CIS 22 的开始时间, 标定为  $91.2 \pm 0.3$  ka BP (图 4D)。Jiang 等利用三星洞石笋将 CIS 22 的开始时间定为  $91.4 \pm 0.6$  ka BP<sup>[13]</sup> (图 4E), 山宝洞石笋 SB22 记录为  $90.5 \pm 0.8$  ka BP, SB25 记录为  $91.3 \pm 0.6$  ka BP<sup>[7,11]</sup> (图 4C), 各石笋记录在测年误差范围内一致。而在 NGRIP 记录中 GIS 22 的开始时间约为 90.0 ka BP, 比 YK1327 记录偏年轻 1.2 ka<sup>[28]</sup> (图 4A)。在  $89.2 \pm 0.3$  ka BP 时, YK1327 的  $\delta^{18}\text{O}$  值达到 CIS 22 时期的最轻值, 之后开始逐渐变重, 标志着 CIS 22 的结束, 此  $\delta^{18}\text{O}$  值变重过程的中点时间为  $88.9 \pm 0.3$  ka BP, 即 CIS 22 的结束时间 (图 4D)。SB25 记录为  $88.4 \pm 0.6$  ka BP<sup>[7,11]</sup>, 欧洲阿尔卑斯 (NALPS) 记录为  $88.7 \pm 0.3$  ka BP<sup>[29]</sup>, 均与 YK1327 记录一致。然而, 在 SB22 记录中, CIS 22 结束时间为  $87.2 \pm 0.6$  ka BP, 三星洞记录为  $87.7 \pm 0.3$  ka BP, 这两根石笋记录与 NGRIP 记录的 87.6 ka BP 较为一致, 比 YK1327 记录偏年轻 1.2~1.7 ka<sup>[7,13,28]</sup>。CIS 21 的开始时间在 YK1327 记录中为  $84.6 \pm 0.3$  ka BP (图 4D), 山宝洞记录为  $83.9 \pm 0.7$  ka BP<sup>[7,11]</sup>, NALPS 记录为  $85.0 \pm 0.4$  ka BP<sup>[29]</sup>, NGRIP 记录为 84.7 ka BP<sup>[28]</sup>, 与 YK1327 记录几乎一致。但在万象洞石笋 WXSM 51 记录中为  $85.7 \pm 2$  ka BP<sup>[12]</sup>, 比 YK1327 记录偏老 1.2 ka (图 4B), 可能是由于其较大的定年误差所致。

本文中, 冰芯 NGRIP 记录是建立在 GICC05modelext 年代标尺之上的, GICC05modelext 是将老于 60 ka BP 时段的 ss09sea 年代模型向年轻方向平移 705 年从而与 GICC05 年代模型进行拼接得出的<sup>[55]</sup>。而 GICC05 年代模型在 60 ka BP 时最大计数误差已达 2.6 ka<sup>[23]</sup>。通过上述对比发现, 在 CIS 22 (GIS 22) 的开始和结束时间上, NGRIP 记录比 YK1327 记录偏晚 1.2~1.3 ka, 而在 CIS 21 (GIS 21)

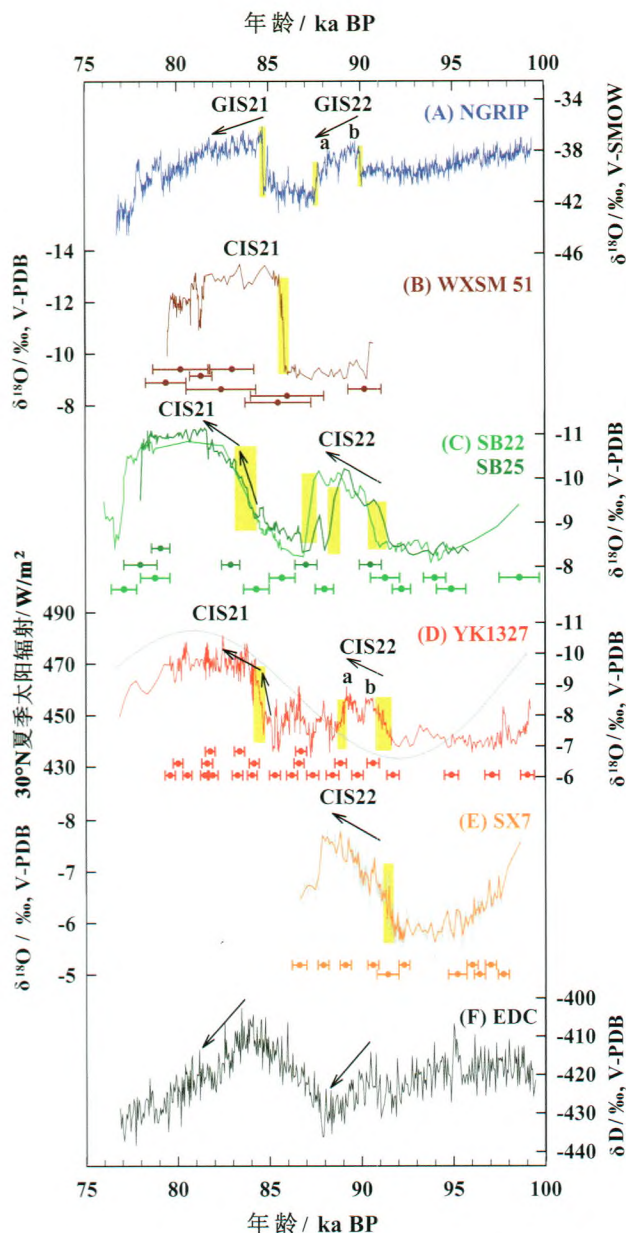


图 4 石笋 YK1327 记录与其他记录对比

Fig. 4 Comparison between the YK1327 record and the other paleoclimatic records

(A) 格陵兰冰芯 NGRIP<sup>[28]</sup>; (B) 万象洞石笋记录 WXSM 51<sup>[12]</sup>; (C) 山宝洞石笋记录 SB22 和 SB25<sup>[7,11]</sup>; (D) 羊口洞石笋记录 YK1327; (E) 三星洞石笋记录 SX7<sup>[13]</sup>; (F) 南极冰芯记录 EDC<sup>[30]</sup>。图中黄色条带表示 CIS (GIS) 22, 21 的在各记录中的开始和结束过程; 黑色箭头表示各记录的变化趋势。

的开始时间上二者却几乎一致。Jiang 等<sup>[13]</sup>也发现三星洞石笋记录的 CIS 23 和 CIS 24 与 GICC05modelext 年代较为一致, 而 CIS 25 的开始时间却晚于 GICC05modelext。所以, 格陵兰冰芯年代框架的精确度仍需要进一步提高。在本文研究时段内, YK1327 的测年误差小于 0.4%, 结合三星洞记

录,可以为亚洲季风区在 MIS 5 时期千年尺度气候事件之间的精确对比提供依据。

### 3.4 南半球气候变化对亚洲夏季风的可能影响

尽管在千年—百年尺度上亚洲夏季风与北高纬地区气候变化存在密切联系,但是南半球气候变化对亚洲夏季风的影响也是不可忽视的<sup>[15-17]</sup>。如图 4,在 NGRIP 记录中,GIS 22 的开始过程只持续了 0.1 ka<sup>[28]</sup>,而山宝洞记录的 CIS 22 开始过程持续 0.8—1 ka<sup>[7, 11]</sup>(图 4C),这也许与定年误差较大有关,但具有精确年代控制的 YK1327 和 SX7 也分别表现出持续 1.1 ka 和 1.3 ka 的开始过程<sup>[13]</sup>(图 4D, 4E),明显慢于 NGRIP 记录。在 CIS 22 的演变模式上,亚洲季风区石笋记录均表现出双峰型的模式,且 CIS 22a 时期的亚洲夏季风强度要高于 CIS 22b(图 4C, 4D, 4E)。与之相反,在 NGRIP 记录中,GIS 22a 时的温度要低于 GIS 22b<sup>[28]</sup>(图 4A)。此外,在格陵兰冰芯记录中 GIS 21 在约 80 年内迅速开始,之后温度开始缓慢下降(图 4A)。而在 YK1327 记录中,CIS 21 开始过程则表现为两段式,即在初期亚洲夏季风在 0.5 ka 内迅速增强,之后又经历了约 2 ka 的缓慢增强过程(图 4D)。在山宝洞记录也有类似的两段式过程,虽然其分辨率低,定年误差大,但 SB22 和 SB25 两条记录几乎一致,可以相互佐证。类似的现象也发现于 CIS 8 和 CIS 24 的开始阶段<sup>[56, 13]</sup>。万象洞石笋记录的 CIS 21 的开始过程只持续了 0.2 ka(图 4B),与 NGRIP 记录一致,却没有显示出与羊口洞、山宝洞记录类似的两段式结构,这一方面可能是由于其分辨率低,定年误差大<sup>[12]</sup>,另一方面可能因为其位于季风区边缘,对季风变化响应敏感,且位置较为靠近北方,更多受到西风带的影响<sup>[57-58]</sup>。Han 等<sup>[10]</sup>发现中国南方羊口洞和葫芦洞石笋记录的 CIS 14 的开始过程明显慢于中国北方石笋 XL-1 记录,推测可能是因为中国南方气候不仅响应北高纬地区气候变化还受到热带海洋的影响<sup>[59]</sup>。

上述亚洲夏季风地区羊口洞、山宝洞、三星洞石笋记录的 CIS 21 的开始过程和 CIS 22 的双峰结构演变模式与 NGRIP 记录的温度变化模式不同,而与南极冰芯 EDC 的  $\delta D$  记录呈反相对应<sup>[30, 60]</sup>,即亚洲夏季风缓慢增强对应于南极温度缓慢降低(图 4 中由黑色箭头标出),推测可能在该时段亚洲夏季风受到了南半球气候变化的影响。现代气象学研究表明,亚洲夏季风最主要的水汽源地是印度洋<sup>[61-63]</sup>。当南极温度降低时,马斯克林高压增强<sup>[64-65]</sup>。而马斯克林高压的增强则会加强跨赤道气流,输送更多的印度洋

水汽至东亚地区,增强亚洲夏季风<sup>[15, 17, 66-67]</sup>。最近,Chen 等对永兴洞石笋的研究也发现亚洲夏季风强度与南极温度之间反相的对应关系<sup>[68]</sup>。亚洲夏季风是一个复杂的气候系统,受到多种因素的影响<sup>[69-70]</sup>,南半球气候对亚洲夏季风的影响机制还需要更多古气候记录和数值模拟进一步解释和证实。

## 4 结 论

利用重庆金佛山羊口洞石笋 YK1327 的高分辨率  $\delta^{18}O$  记录,揭示了 MIS 5a/5b 时期亚洲夏季风的演变历史。发现在百年—千年尺度上,亚洲夏季风与北半球高纬度地区气候变化存在着紧密的联系。利用误差小于 0.4% 的  $^{230}Th$  定年数据,标定了 CIS 21 的开始时间为  $84.6 \pm 0.3$  ka BP, CIS 22 的开始和结束时间分别为  $91.2 \pm 0.3$  ka BP,  $88.9 \pm 0.3$  ka BP, 这为该时段亚洲夏季风地区百年—千年尺度气候事件之间的精确对比提供了新的证据。此外,中国南方石笋记录的 CIS 22 和 CIS 21 的演变模式与格陵兰记录有所差异,但与南极冰芯记录反相对应,推测该时段亚洲夏季风受到了南半球气候变化的影响。

**致 谢:**感谢西安交通大学全球环境变化研究院宁有丰老师在测年工作中给予的大力支持和帮助!

## 参考文献

- [1] An Z S, Porter S C, Kutzbach J E, et al. Asynchronous Holocene optimum of the East Asian monsoon [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(8): 743-762.
- [2] 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.
- [3] 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(15): 250-257.
- [4] 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.
- [5] Kelly M J, Edwards R L, Cheng H, et al. High resolution characterization of the AM between 146,000 and 99,000 years B. P. from Dongge Cave, China and global correlation of events surrounding Termination II [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2006, 236(1/2): 20-38.
- [6] Cosford J, Qing H R, Yuan D X, et al. Millennial-scale variability in the Asian monsoon: Evidence from oxygen isotope records from stalagmites in southeastern China [J]. *Palaeogeography*

- Palaeoclimatology Palaeoecology, 2008, 266(1-2): 3-12.
- [7] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years [J]. *Nature*, 2008, 451(7182): 1090-1093.
- [8] Liu D B, Wang Y J, Cheng H, et al. Sub-millennial variability of Asian monsoon intensity during the early MIS 3 and its analogue to the ice age terminations [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(9-10): 1107-1115.
- [9] Liu Y H, Henderson G M, Hu C Y, et al. Links between the East Asian monsoon and North Atlantic climate during the 8.200 year event [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(2): 117-120.
- [10] Duan W H, Cheng H, Tan M, et al. Onset and duration of transitions into Greenland Interstadials 15.2 and 14 in northern China constrained by an annually laminated stalagmite [J]. *Scientific Reports*, 2016, doi:10.1038/srep20844.
- [11] 夏志峰, 孔兴功, 汪永进, 等. 东亚季风 95~56 ka BP 期间 D/O 事件年代的精确测定: 以中国神农架山宝洞石笋为例 [J]. *中国科学(D 辑)*, 2006, 36(9): 830-837.
- [12] Johnson K R, Ingram B L, Sharp W D, et al. East Asian summer monsoon variability during Marine Isotope Stage 5 based on speleothem  $\delta^{18}\text{O}$  records from Wanxiang Cave, central China [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2006, 236(1): 5-19.
- [13] Jiang X Y, Wang X Y, He Y Q, et al. Precisely dated multidecadally resolved Asian summer monsoon dynamics 113,500–86,600 years ago [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 143: 1-12.
- [14] Zhou H Y, Zhao J, Zhang P Z, et al. Decoupling of stalagmite-derived Asian summer monsoon records from North Atlantic temperature change during marine oxygen isotope stage 5d [J]. *Quaternary Research*, 2008, 70(2): 315-321.
- [15] Cai Y J, An Z S, Cheng H, et al. High-resolution absolute-dated Indian monsoon record between 53 and 36 ka from Xiaobailong Cave, southwestern China [J]. *Geology*, 2006, 34(8): 621-624.
- [16] Zhou H Y, Zhao J X, Feng Y X, et al. Heinrich event 4 and Dansgaard Oeschger events 5–10 recorded by high-resolution speleothem oxygen isotope data from central China [J]. *Quaternary Research*, 2014, 82(2): 394-404.
- [17] Han L Y, Li T Y, Cheng H, et al. Potential influence of temperature changes in the Southern Hemisphere on the evolution of the Asian summer monsoon during the last glacial period [J]. *Quaternary International*, 2016, 392: 239-250.
- [18] Waelbroeck C, Labeyrie L, Michel E, et al. Sea-level and deep water temperature changes derived from benthonic foraminifera isotopic records [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(1): 295-305.
- [19] Shackleton N J. Oxygen isotopes, ice volume and sea level [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1987, 6(3): 183-190.
- [20] Johnsen S J, Clausen H B, Dansgaard W, et al. Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core [J]. *Nature*, 1992, 359(3): 311-313.
- [21] Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice core record [J]. *Nature*, 1993, 364(6434): 218-220.
- [22] Heinrich H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years [J]. *Quaternary Research*, 1988, 29(2): 142-152.
- [23] Svensson A, Andersen K K, Bigler M, et al. A 60,000 year Greenland stratigraphic ice core chronology [J]. *Climate of the Past*, 2008, 4(1): 47-57.
- [24] Buizert C, Cuffey K M, Severinghaus J P, et al. The WAIS Divide deep ice core WD2014 chronology—Part 1: Methane synchronization (68–31 kaBP) and the gas age-ice age difference [J]. *Climate of the Past*, 2015, 11(2): 153-173.
- [25] WAIS Divide Project Members. Precise inter-polar phasing of abrupt climate change during the last ice age [J]. *Nature*, 2015, 520(7549): 661-665.
- [26] Cheng H, Edwards R L, Shen C C, et al. Improvements in  $^{230}\text{Th}$  dating,  $^{230}\text{Th}$  and  $^{234}\text{U}$  half-life values, and U-Th isotopic measurements by multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 371-372: 82-91.
- [27] Shen C C, Wu C C, Cheng H, et al. High-precision and high-resolution carbonate  $^{230}\text{Th}$  dating by MC-ICP-MS with SEM protocols [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 99: 71-86.
- [28] North Greenland Ice Core Project members. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period [J]. *Nature*, 2004, 431(7005): 147-151.
- [29] Boch R, Cheng H, Spötl C, et al. NALPS: a precisely dated European climate record 120–60 ka [J]. *Climate of the Past*, 2011, 7(4): 1247-1259.
- [30] EPICA community members. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core [J]. *Nature*, 2007, 449(6992): 623-628.
- [31] 施能, 朱乾根. 南半球澳大利亚、马斯克林高压气候特征及其对我国东部夏季降水的影响 [J]. *气象科学*, 1995, 15: 20-27.
- [32] Lutgens F K, Tarbuck E J, Tasa D. *The atmosphere* [M]. Prentice-Hall, 1995.
- [33] Li T Y, Shen C C, Huang L J, et al. Stalagmite-inferred variability of the Asian summer monsoon during the penultimate glacial-interglacial period [J]. *Climate of the Past*, 2014, 10(3): 1211-1219.
- [34] 张任, 朱学稳, 韩道山, 等. 重庆市南川金佛山岩溶洞穴发育特征初析 [J]. *中国岩溶*, 1998, 17(3): 196-211.
- [35] Shen C C, Cheng H, Edwards R L, et al. Measurement of attogram quantities of  $^{231}\text{Pa}$  in dissolved and particulate fractions of seawater by isotope dilution thermal ionization mass spectrometry [J]. *Analytical Chemistry*, 2003, 75(5): 1075-1079.
- [36] Jaffey A H, Flynn K F, Glendenin L E, et al. Precision measurement of half-lives and specific activities of  $^{235}\text{U}$  and  $^{238}\text{U}$  [J]. *Physical Review*, 1971, C4(5): 1889-1906.
- [37] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics* [J]. 1995, 33(2):

- 241-265.
- [38] 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.
- [39] Hendy C H. The isotopic geochemistry of speleothems-I. The calculation of the effects of different modes of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as palaeoclimatic indicators [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1971, 35 (8): 801-824.
- [40] O'Neil J R, Clayton R N, Mayeda T K. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1969, 51(12): 5547-5559.
- [41] Caley T, Roche D M, Renssen H. Orbital Asian summer monsoon dynamics revealed using an isotope-enabled global climate model [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5371 doi: 10.1038/ncomms6371.
- [42] 王海波, 李廷勇, 袁娜, 等. 重庆金佛山羊口洞滴水水和  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  变化特征及其环境意义 [J]. *中国岩溶*, 2014, 33 (2): 146-155.
- [43] Dayem K E, Molnar P, Battisti D S, et al. Lessons learned from oxygen isotopes in modern precipitation applied to interpretation of speleothem records of paleoclimate from eastern Asia [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 295(1): 219-230.
- [44] Pausata F S, Battisti D S, Nisancioglu K H, et al. Chinese stalagmite  $\delta^{18}O$  controlled by changes in the Indian monsoon during a simulated Heinrich event [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(7): 474-480.
- [45] Tan M. Circulation effect: response of precipitation  $\delta^{18}O$  to the ENSO cycle in monsoon regions of China [J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42(3-4): 1067-1077.
- [46] 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.
- [47] Cheng H, Edwards R L, Broecker W S, et al. Ice age terminations [J]. *Science*, 2009, 326(5950): 248-252.
- [48] Cheng H, Sinha A, Wang X, et al. The Global Paleomonsoon as seen through speleothem records from Asia and the Americas [J]. *Climate Dynamics*, 2012, 39(5): 1045-1062.
- [49] Liu Z Y, Wen X Y, Brady E C, et al. Chinese cave records and the East Asia Summer Monsoon [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 83: 115-128.
- [50] Berger A, Loutre M F. Insolation values for the climate of the last 10 million years [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1991, 10(4): 297-317.
- [51] Cheng H, Edwards R L, Wang Y J, et al. A penultimate glacial monsoon record from Hulu Cave and two-phase glacial terminations [J]. *Geology*, 2006, 34(3): 217-220.
- [52] Chiang J C H, Bitz C M. Influence of high latitude ice cover on the marine Intertropical Convergence Zone [J]. *Climate Dynamics*, 2005, 25 (5): 477-496.
- [53] Broccoli A J, Dahl K A, Stouffer R J. Response of the ITCZ to Northern Hemisphere cooling [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(1): 1-4.
- [54] Deplazes G, Lückge A, Peterson I. C, et al. Links between tropical rainfall and North Atlantic climate during the last glacial period [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(3): 213-217.
- [55] Wolff E W, Chappellaz J, Blunier T, et al. Millennial-scale variability during the last glacial: The ice core record [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(21-22): 2828-2838.
- [56] Duan F C, Liu D B, Cheng H, et al. A high-resolution monsoon record of millennial-scale oscillations during Late MIS 3 from Wulu Cave, south-west China [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2014, 29(1): 83-90.
- [57] Porter S C, An Z S. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation [J]. *Nature*, 1995, 375(6529): 305-308.
- [58] Railsback L B, Xiao H, Liang F, et al. A stalagmite record of abrupt climate change and possible Westerlies-derived atmospheric precipitation during the Penultimate Glacial Maximum in northern China [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2014, 393 (2): 30-44.
- [59] Han L Y, Li T Y, Cheng H, et al. Evolution of the Asian summer monsoon during the D/O events 13-17 recorded in a Chinese stalagmite constrained by high-precision chronology [J]. monsoon during D/O events 13-17 recorded in a Chinese stalagmite constrained by high-precision chronology. *Quaternary Research*, 2017, Accepted.
- [60] Veres D, Bazin L, Landais A, et al. The Antarctic ice core chronology (AICC2012): an optimized multi-parameter and multi-site dating approach for the last 120 thousand years [J]. *Climate of the Past*, 2013, 9(4): 1733-1748.
- [61] Ding Y H, Li C Y, Liu Y J. Overview of the South China Sea monsoon experiment [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21(3): 343-360.
- [62] 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(9): 1139-1161.
- [63] Drumond A, Nieto R, Gimeno L. Sources of moisture for China and their variations during drier and wetter conditions in 2000-2004: a Lagrangian approach [J]. *Climate Research*, 2011, 50(2-3): 215-225.
- [64] 崔锦, 杨修群, 张爱忠. 马斯克林高压的变化特征 [J]. *气象科技*. 2008, 36 (1): 35-42.
- [65] Xue F, Wang H J, He J H. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influences on summer rainfall over East Asia [J]. *Chinese Science Bulletin* 2003, 48 (5): 492-497.
- [66] Rohling E J, Liu Q S, Roberts A P, et al. Controls on the East Asian monsoon during the last glacial cycle, based on comparison between Hulu Cave and polar ice-core records [J]. *Quater-*

- nary Science Reviews, 2009, 28(27): 3291-3302.
- [67] An Z S, Clemens S C, Shen J, et al. Glacial-interglacial Indian summer monsoon dynamics [J]. Science, 2011, 333 (6043): 719-723.
- [68] Chen S T, Wang Y J, Cheng H, et al. Strong coupling of Asian Monsoon and Antarctic climates on suborbital timescales [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 32995; doi:10.1038/srep32995.
- [69] Sun J Q, Wang H J, Yuan W. A possible mechanism for the co-variability of the boreal spring Antarctic Oscillation and the Yangtze River valley summer rainfall [J]. International Journal of Climatology, 2009, 29(9): 1276-1284.
- [70] Liu J B, Chen J H, Zhang X J, et al. Holocene East Asian summer monsoon records in northern China and their inconsistency with Chinese stalagmite  $\delta^{18}\text{O}$  records [J]. Earth Science Reviews, 2015, 148: 194-208.

## Variation of the Asian summer monsoon during the MIS 5a/5b period inferred from a new high-resolution stalagmite record

ZHANG Taotao<sup>1,2,3</sup>, LI Tingyong<sup>1,2,3</sup>, HAN Liyin<sup>1</sup>, CHENG Hai<sup>4</sup>,  
LI Junyun<sup>1</sup>, ZHAO Xin<sup>1</sup>, ZHOU Jingli<sup>1</sup>

(1. Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Field Scientific Observation & Research Base of Karst Eco-environments at Nanchuan in Chongqing, Ministry of Land and Resources of China, Chongqing 408435, China;

3. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MLR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China;

4. Institute of Global Environmental Change, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

**Abstract** Due to the paucity of the high-resolution records of the Asian summer monsoon (ASM) during the marine isotope stage (MIS) 5, our understanding about the ASM in this period is limited. In this study, a 38-yr resolution stalagmite oxygen isotope record from the Yangkou Cave, Chongqing, southwestern China, is used to reconstruct the detailed evolution of the ASM during the period of MIS 5a/5b. The Yangkou record exhibits a close correlation between the ASM and the climate of the North Atlantic at a centennial-millennial-scale. In terms of the precise  $^{230}\text{Th}$  dating with error less than 0.4%, the onset and termination of Chinese Interstadial (CIS) 22 are constrained to  $91.2 \pm 0.3$  ka BP and  $88.9 \pm 0.3$  ka BP, respectively, and the beginning of the CIS 21 is defined at  $84.6 \pm 0.3$  ka BP. In addition, the evolution pattern of CIS 22 and CIS 21 recorded in the stalagmite from the Yangkou Cave is slightly different from those recorded in NGRIP, which is anti-phased with the trend of temperature change in the Antarctica. We speculate that the ASM during MIS 5a/5b may be affected by climate variation in the southern hemisphere.

**Key words** Asian summer monsoon, stalagmite  $\delta^{18}\text{O}$ , marine isotope stage 5a/5b,  $^{230}\text{Th}$  dating, climate change in the southern hemisphere

(编辑 张玲)