

文章编号:1001—4810(2003)03—0167—07

# 末次冰期东亚季风气候的变迁： 贵州都匀七星洞石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录\*

覃嘉铭，林玉石，张美良，王 华，冯玉梅，涂林玲

(中国地质科学院岩溶地质研究所、岩溶动力学开放研究实验室,广西 桂林 541004)

摘 要:通过对贵州都匀七星洞 4 根石笋系统的 31 件 TIMS U 系及 543 件稳定同位素分析,揭示出其气候变化记录时限范围为 1.1~8.5 万 a,相当于海洋同位素阶段的 MIS2、MIS3、MIS4 及 MIS5a。根据  $\delta^{18}\text{O}$  的变化可以准确确定它们之间的界线,其年龄值为:MIS1/MIS2 11.3kaB. P., MIS2/MIS3 28.7kaB. P., MIS3/MIS4 59.6kaB. P., MIS4/MIS5a 78.5kaB. P.。研究表明,末次冰期相当于格陵兰冰芯记录、北大西洋沉积记录的 YD、Heinrich 事件等的气候跃变事件,几根石笋取得了非常一致的准确定位及定年。其中 YD 事件发生于 12.76~11.52kaB. P., Heinrich 事件的 H1~H6 分别为 15~17kaB. P., 24.6kaB. P., 30.5kaB. P., 39.3kaB. P., 46.8~47.8kaB. P. 以及 60.4kaB. P.。在 MIS4 阶段,石笋记录于 66.4kaB. P. 及 73.8kaB. P. 揭示了两次冷事件,也可于格陵兰冰芯记录中找到相对应的冷谷。通过与 GISP2 的对比研究,表明东亚季风气候的百年至千年尺度的气候演变,与北大西洋及格陵兰高纬度地区的气候变化具有非常协调的对应关系。它对研究季风气候的动力机制及其与全球变化的响应关系具有特别重要的意义。

关键词:石笋;  $\delta^{18}\text{O}$ ; 末次冰期; 季风气候

中图分类号:P532;P597 文献标识码:A

## 0 前 言

新仙女木事件(YD)源于斯堪的那维亚指示气候变冷的 *Ctopenetala Dryas* 植物的发现<sup>[1]</sup>。Heinrich 事件则源于北大西洋钻孔岩芯中的数层粗碎屑含量增多,冷性有孔虫比例增多的所谓的冰筏事件<sup>[2]</sup>。起初认为,这些突然变冷的事件只是局限于北欧及北大西洋地区的局部现象,即新仙女木事件被认为是末次冰期尾声时全球气候变暖,北极冰盖融化,浮冰进入北大西洋深层水导致北大西洋地区温度迅速下降、气候变冷。而 Heinrich 则不同,是末次冰期中短周期的气候变冷,是岁差变化引起太阳辐射量的变化所触发的北极冰盖向南扩张<sup>[2]</sup>,或者是深海热卤水循环模式对千年气候周期的驱动<sup>[3]</sup>。后来的研究则利用加速质谱<sup>14</sup>C

测年及沉积速率外推把 Heinrich 事件分别确定为距今 14.3ka, 21ka, 28ka, 41ka, 52ka 及 69ka 等六个冷跃变事件<sup>[4,5]</sup>。

近十多年来,这些冷事件在世界许多地区均有所揭示,特别是格陵兰的 GISP2 及 GRIP 冰芯还揭示了一系列的 D-O 暖旋回<sup>[6,7]</sup>。在我国,青藏高原冰芯<sup>[8]</sup>及湖泊沉积<sup>[9]</sup>、黄土剖面及西北沙区的变迁<sup>[10]</sup>等研究,对 YD 及 Heinrich 事件也得到了充分的揭示<sup>[11~14]</sup>,Porter 等人则用气候的遥相关来解释这种记录的相似性<sup>[15]</sup>。尽管导致气候不稳定性机制至今仍有分歧,但随着研究的深入,其变化的全球意义已越来越被人们所接受。

我国西南地区是世界连片岩溶面积最广阔的地区,东起湖南、广西,西止云贵高原,还部分包括了广

\* 基金项目:国家自然科学基金(批准号:49632100)、(批准号:40152002)资助项目;国土资源部重点科技项目(批准号:9501104)

作者简介:覃嘉铭(1937—),男,副研究员,同位素地质及古环境专业。

收稿日期:2003—05—12

东和四川、重庆。西北侧与青藏高原接壤,东南临海,是典型的亚热带季风气候区。区内气候温暖,雨量充沛。由于喜山期以来地壳的不断上升,岩溶洞穴及沉积物极其发育,是研究全球变化及其区域响应关系的很好的地区。通过国际地质对比计划 IGCP—299 及 IGCP —379 的完成,对古环境重建的研究取得了重要的进展,包括了用 TIMS—U 系定年,碳氧稳定同位素,常量、微量元素,微层发光,沉积学等手段提取环境信息<sup>[16,17]</sup>。重建了本区 16 万年来高分辨率的环境变迁。对相当于海洋同位素记录 MIS1~MIS6 各个阶段界限的厘定及定年,以及末次冰期短尺度气候突变事件的揭示,都取得了重要的突破<sup>[18]</sup>。本文主要对贵州都匀七星洞 4 根末次冰期高分辨率的石笋记录,对其所揭示的东亚季风气候变化及突变事件发生的年代及其延续时间加以准确的界定。对研究季风的变化过程及其形成机制,研究季风气候与全球变化的响应关系,提供可靠的区域性资料。

### 1 石笋、样品及分析

Q1,Q2,Q4 及 Q6 石笋采自贵州都匀的七星洞。该洞穴位于都匀市西南 45km,属凯口镇辖,自凯口镇至凯西村有机耕路可通,再向西南步行 1.5km 即可到达。该区地处云贵高原的东南边缘与桂北丘陵接壤的斜坡地带,属亚热带季风气候区的高原岩溶峰丛洼地地区。凯口镇多年平均气温 15.3℃,多年平均降水量 1107mm。

七星洞分上、下两洞,前者高出洼地约 40m,后者与洼地高程接近,围岩为下石炭—中石炭统,洞穴为沿层面与裂隙发育,上部洞穴内部带由于顶板密集的滴水点,底板上形成一根根密集排列的石笋。Q1,Q2,Q4 及 Q6 石笋即采自其中距洞口约 200m 处。其高分别为 202.9cm,218.5cm,49.5cm 及 244.5cm,直径 8~15cm 左右。本文研究的时限范围为 11~85kaB. P.,包括了 Q4,Q6 的全部及 Q1 的 0~41cm 和 Q2 的 113cm~157cm。

石笋剖面沉积学的研究以及样品的采集系沿中轴纵向切开的剖面上进行。除 Q1 石笋部分属末次间冰期颜色较浅,方解石粒度较粗外,其余均表现为颜色较暗,粒度较细,呈致密状,暗浅相间的微纹状层纹极其发育,为末次冰期形成。根据结构构造特点可以分出多个沉积旋回,其间沉积无大的间断存在。样品的采集系严格沿中轴进行,Q6 石笋时限范围 11.22~59.49kaB. P.,碳氧同位素计 313 件,采样间隔为

0.5~2cm,根据沉积速率大小不同分别加以确定,以两样品间隔 150~160a 为准,实际达到的分辨率为 148~164a 之间,个别为 240~300a。平均为 155a。Q4 石笋时限范围 12.25~44.63kaB. P.,碳氧同位素取样间隔为 0.2~0.5cm 不等,计 145 件,平均分辨率为 225a。Q1 石笋时限范围 65.4~85.5kaB. P.,碳氧同位素样计 46 件,平均分辨率 447a。Q2 石笋时限范围 44.8~60.6kaB. P.,碳氧同位素样计 39 件,平均分辨率 416a。所有稳定同位素样品均以小型可调速、钻头直径 1.5mm 的钻机钻取 20~40mg 碳酸盐粉样。样品制备由岩溶地质研究所同位素实验室完成。用 100%磷酸反应制备 CO<sub>2</sub>,纯化后于 MM-903(VG 公司)进行质谱分析。实验中随意抽取 20%的样品作平行分析,两平行样的 δ<sup>18</sup>O 值误差小于 0.2‰,标准样品的多次分析误差小于 0.1‰。

年代系列的建立采用 TIMS—U 系法测定,用直径为 8 mm 空芯钻头钻取,每件样品约为 400mg,由美国明尼苏达大学地质地球物理系同位素实验室完成,10~100ka 间一般分析误差小于 1%(2σ)。分析结果列于表 1。

由表 1 可见,所有的年龄数据都按石笋沉积先后秩序正常排列,说明数据是可信的。

### 2 研究区降水—石笋体系 δ<sup>18</sup>O 与气候的响应关系

在同位素平衡的沉积条件下,石笋碳酸盐的 δ<sup>18</sup>O 主要受滴水的 δ<sup>18</sup>O 组成及沉积温度所制约,而滴水的 δ<sup>18</sup>O 组成则直接受当地的大气降水所制约。在高分辨率短尺度(年至数年)的情况下,年均气温相差不大,石笋 δ<sup>18</sup>O 的变化则反映大气降水 δ<sup>18</sup>O 的变化。在长尺度和百年千年以上尺度的研究,如气温相差较大,则反映气温和降水 δ<sup>18</sup>O 两者的综合制约因素。我国位于欧亚大陆的东部边缘,南侧为浩瀚的南海,东临辽阔的太平洋,是典型的季风气候区。我国夏季风的西界一般位于呼和浩特—西宁—拉萨一线,内蒙、新疆与藏北等地区是显著的大陆性气候区。我国南方东南夏季风自福建、广东及广西进入,往北西方向挺进。西部的云南和西藏则主要是西南季风区,水汽团主要从印度洋经孟加拉湾沿北东方向挺进,东部常止于乌蒙山—大凉山一线。西部可沿雅鲁藏布江及三江河谷进入藏南地区。海洋降水汽团的路径可从瑞利分馏显示出的 δ<sup>18</sup>O 的变化,由开始偏重向前进方向逐渐变轻得到证实(图 1)。

表 1 贵州都匀七星洞 Q4、Q6、Q1、Q2 石笋 TIMS 铀系测年结果

Tab. 1 Results of TIMS U series dating of Q4 , Q6,Q1 and Q2 stalagmites from Qixing Cave , Duyun , Guizhou

| 样号     | 距顶<br>(cm) | $^{238}\text{U}$<br>(10~9g/g) | $^{232}\text{Th}$<br>(10~12g/g) | $^{234}\text{U}_{\text{m}}$<br>(测量值) | $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$<br>(活度比) | $^{230}\text{Th}$ 年龄 (ka)<br>(未校正) | $^{230}\text{Th}$ 年龄 (ka)<br>(校正) |
|--------|------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Q4U—1  | 0.33       | 442±1                         | 87±19                           | 519.3±2.3                            | 0.1642±0.001                              | 12.41±0.08                         | 12.40±0.08                        |
| Q4U—2  | 2          | 2042±4                        | 1297±21                         | 596.8±2.2                            | 0.1983±0.0008                             | 14.36±0.06                         | 14.35±0.06                        |
| Q4U—3  | 3          | 268.2±0.6                     | 2738±23                         | 513.0±3.0                            | 0.2005±0.0056                             | 15.40±0.46                         | 15.21±0.47                        |
| Q4U—4  | 4.5        | 281.5±0.6                     | 1804±15                         | 562.2±2.1                            | 0.2134±0.0012                             | 15.94±0.10                         | 15.79±0.11                        |
| Q4U—5  | 7          | 1851±6                        | 4204±19                         | 546.3±2.9                            | 0.2416±0.0012                             | 18.37±0.10                         | 18.33±0.11                        |
| Q4U—6  | 18         | 656±1                         | 4930±22                         | 459.7±2.4                            | 0.3366±0.0016                             | 28.23±0.16                         | 28.08±0.17                        |
| Q4U—7  | 26         | 458±1                         | 3757±17                         | 427.9±2.6                            | 0.3907±0.0017                             | 34.33±0.19                         | 34.17±0.21                        |
| Q4U—8  | 35         | 1288±3                        | 2976±19                         | 460.2±2.1                            | 0.4362±0.0017                             | 37.99±0.18                         | 37.95±0.18                        |
| Q4U—9  | 39         | 265.6±0.6                     | 2027±18                         | 475.0±2.6                            | 0.4554±0.0025                             | 39.48±0.27                         | 39.34±0.28                        |
| Q4U—10 | 47         | 5546±19                       | 10950±35                        | 458.1±2.6                            | 0.4795±0.0021                             | 42.58±0.25                         | 42.54±0.25                        |
| Q4U—11 | 49         | 303.6±0.8                     | 2336±18                         | 477.2±3.0                            | 0.5040±0.0026                             | 44.48±0.30                         | 44.33±0.31                        |
| Q6U—1  | 距底 243.5   | 470.4±0.9                     | 19±16                           | 584.9±2.2                            | 0.1566±0.0010                             | 11.29±0.08                         | 11.29±0.08                        |
| Q6U—2  | 236.1      | 6330±23                       | 3433±16                         | 584.0±2.5                            | 0.1705±0.0008                             | 12.35±0.06                         | 12.34±0.06                        |
| Q6U—3  | 233        | 502±1                         | 24±14                           | 485.5±2.3                            | 0.1742±0.0009                             | 13.53±0.08                         | 13.53±0.08                        |
| Q6U—4  | 217.8      | 535.4±0.7                     | 515±17                          | 574.1±2.2                            | 0.2154±0.0012                             | 15.93±0.10                         | 15.90±0.10                        |
| Q6U—5  | 204        | 392.9±0.9                     | 925±19                          | 532.0±2.9                            | 0.2389±0.0016                             | 18.33±0.14                         | 18.28±0.14                        |
| Q6U—6  | 165        | 398±1                         | 1608±13                         | 516.0±2.4                            | 0.3087±0.0016                             | 24.54±0.15                         | 24.47±0.15                        |
| Q6U—7  | 130        | 227.2±0.5                     | 1729±11                         | 531.4±2.5                            | 0.4081±0.0019                             | 33.22±0.19                         | 33.08±0.20                        |
| Q6U—8  | 118        | 6770±36                       | 2362±14                         | 482.5±2.8                            | 0.4522±0.0029                             | 38.92±0.30                         | 38.91±0.30                        |
| Q6U—9  | 86         | 9217±29                       | 492±11                          | 667.1±2.0                            | 0.5924±0.0024                             | 46.46±0.43                         | 46.46±0.23                        |
| Q6U—11 | 40         | 289.8±0.6                     | 55±14                           | 526.3±2.5                            | 0.5969±0.0023                             | 52.48±0.28                         | 52.47±0.28                        |
| Q6U—12 | 1          | 295.1±0.8                     | 349±15                          | 483.5±3.2                            | 0.6413±0.0035                             | 59.70±0.46                         | 59.68±0.46                        |
| Q1u—1  | 距顶—3       | 7436±33                       | 2257±20                         | 347.3±3.8                            | 0.6244±0.0036                             | 65.9±0.6                           | 65.9±0.6                          |
| Q1u—2  | 1          | 11253±53                      | 931±20                          | 423.7±2.7                            | 0.7000±0.0037                             | 71.0±0.6                           | 71.0±0.6                          |
| Q1u—3  | 15         | 11676±56                      | 353±14                          | 407.0±3.2                            | 0.7591±0.0041                             | 80.9±0.8                           | 80.9±0.8                          |
| Q1u—4  | 31         | 6098±15                       | 148±14                          | 375.8±1.6                            | 0.7609±0.0027                             | 84.0±0.5                           | 84.0±0.5                          |
| Q1u—5  | 41         | 393±1                         | 92±13                           | 370.0±2.5                            | 0.7668±0.0032                             | 85.5±0.6                           | 85.5±0.6                          |
| Q2u—6  | 79         | 222.2±0.6                     | 2484±18                         | 517.4±3.4                            | 0.4613±0.0033                             | 38.7±0.4                           | 38.5±0.4                          |
| Q2u—7  | 127        | 5019±13                       | 1256±16                         | 494.9±1.8                            | 0.5329±0.0019                             | 46.9±0.2                           | 46.9±0.2                          |
| Q2u—8  | 157        | 4522±14                       | 24900±75                        | 453.2±3.6                            | 0.6343±0.0030                             | 60.5±0.5                           | 60.4±0.5                          |

衰变常数采用:  $\lambda_{238}=1.55125\times10^{-10}\text{Y}^{-1}$ ;  $\lambda_{234}=2.8263\times10^{-6}\text{Y}^{-1}$ ;  $\lambda_{230}=9.1577\times10^{-6}\text{Y}^{-1}$ 。 $^{234}\text{U}_{\text{m}}=[(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_{\text{a}}-1]\times1000$

七星洞 Q1、Q2、Q6 及 Q4 石笋,产出位置大大地高于地下水面,其滴水完全是洞穴顶部山体所接受的大气降水,而无其它外源水的补给。滴水的氧同位素组成即可视为该区大气降水的氧同位素组成。因此石笋的  $\delta^{18}\text{O}$  的变化直接受控于大气降水的  $\delta^{18}\text{O}$  的变化。

夏半年降水(本区为 5~10 月)主要为台风季节热带天气系统形成的降水,台风季节降雨因其水汽团在向大陆推进的过程中,沿途不断从中凝聚水滴,剩余的水汽团就越越富集轻同位素,因此到达内陆同

一地点上空的夏季风雨,比锋面雨(主要在冬半年)具有特别轻的  $\delta$  值。

事实上降水  $\delta^{18}\text{O}$  值的偏重,除夏半年降水的减少外,可能还意味着冬半年降水的增强。当冬季风增强,冷空气不断南下与海洋暖气流遭遇时则形成锋面降水。也就是说该冬季风的增强就会导致降水  $\delta^{18}\text{O}$  的偏重,导致石笋  $\delta^{18}\text{O}$  的偏重。黔桂地区石笋  $\delta^{18}\text{O}$  值与气温呈反向相关。其偏轻或偏重,反映气候的偏暖湿或偏干冷,反映夏季风偏强或偏弱<sup>[20]</sup>。

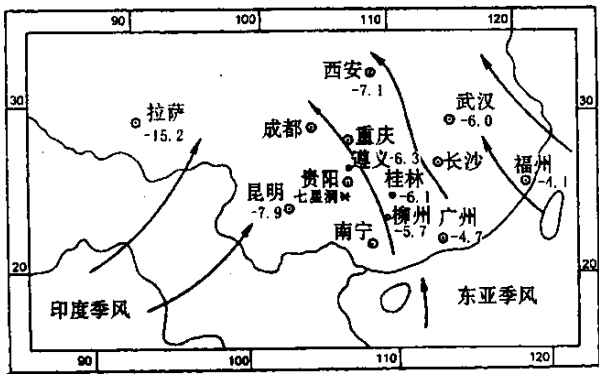


图 1 中国南方夏季降水汽团运移路线示意图

Fig.1 Sketch map showing the moving route of the summer rainy air mass in Southern China

\* 为贵州都匀七星洞;图中数据系大气降水年平均  $\delta^{18}\text{O}$  值,其中桂林数据引自岩溶地质研究所同位素实验室连续 16 年的监测资料,其余引自参考文献[19]

3 石笋的  $\delta^{18}\text{O}$  记录及其与格陵兰 GISP2 冰芯记录的对比

由图 2 可见,石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录的曲线形态及细部的峰谷位置都能很好的进行对比,而且与冰芯记录也具有很好的可比性。下面就石笋记录的气候演变特征及其与格陵兰冰芯记录的对比进行讨论。

3.1 11~85kaB. P. 石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录的气候演变

石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录前后两处最明显的突变界线 78.5kaB. P. 及 11.3kaB. P.,是末次冰期起始及终了的界限。78.5kaB. P. 以前是末次间冰期,相当于海洋同位素记录的 MIS5a 阶段,而 11.3kaB. P. 至今则为现代间冰期,即相当于海洋同位素记录的 MIS1 阶段。

根据石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录气候变化特征的差异性,末次冰期可分为 3 个气候期,分别相当于 MIS2~MIS4。MIS2  $\delta^{18}\text{O}$  的平均值为  $-5.35\text{‰}$ ,其中最冷时期在 18~14.6kaB. P. 间,平均值为  $-4.17\text{‰}$ ;MIS4  $\delta^{18}\text{O}$  的平均值为  $-3.42\text{‰}$ ;而末次间冰期的 MIS5a 为  $-6.71\text{‰}$ 。 $\delta^{18}\text{O}$  值偏重幅度最大的 MIS2 及 MIS4,反映最为干冷的气候特点,是整个末次冰期中低海面,全球冰量最多的盛冰期阶段。图 2 的 MIS4 具有最低的谷值,是否是 MIS4 比 MIS2 气候更为干冷? 或者是 Q1 石笋由于动力分馏作用(水分的蒸发) $\delta^{18}\text{O}$  值系统偏重? 此处  $\delta^{18}\text{O}$  的分辨率太低,只达 460~490a,而且也只是 1 根石笋,故有待进一步研究。MIS3 $\delta^{18}\text{O}$  的平均值为  $-6.05\text{‰}$ ,比 MIS2 及 MIS4 具有更轻的  $\delta^{18}\text{O}$  的平均值,是盛冰期中的相对暖期。整个末次冰期石笋  $\delta^{18}\text{O}$  频繁震荡,表明冷暖频繁波动,气候极不稳定。

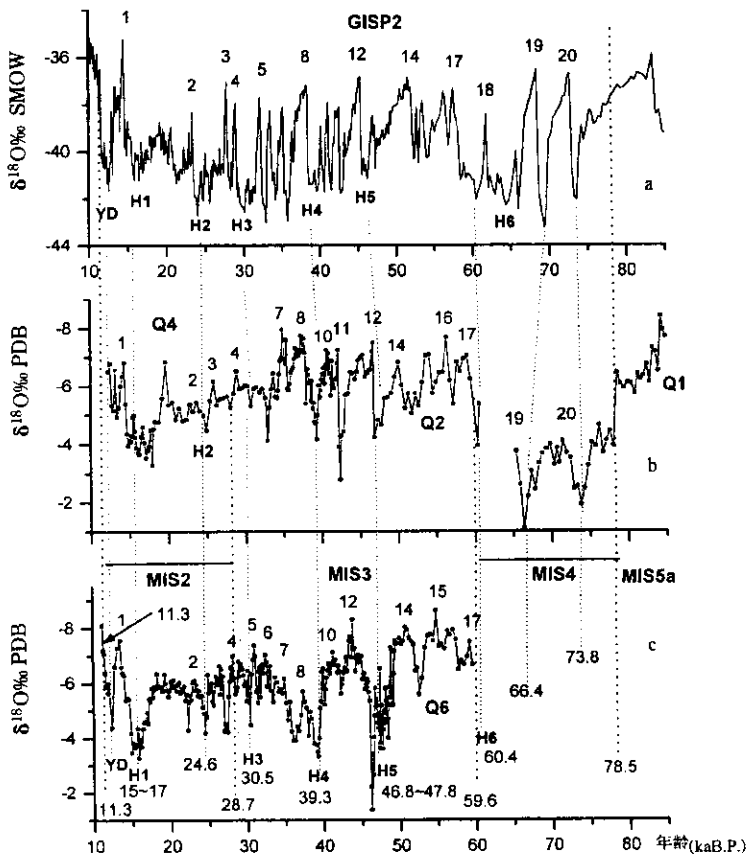


图 2 贵州都匀七星洞石笋同位素记录及其与格陵兰 GISP2 冰芯记录的对比 [21,22]

Fig.2 Comparison of stalagmite isotope records from Qixing Cave in Duyun, Guizhou and GISP2 ice records in Greenland  
a 为 GISP2 冰芯记录;b 为 Q4,Q2,Q1 石笋的  $\delta^{18}\text{O}$  记录;c 为 Q6 石笋的  $\delta^{18}\text{O}$  记录

石笋记录总的气候变化格局与海洋氧同位素记录以及格陵兰冰芯记录可以进行对比。石笋记录各气候期之间的界限年龄为: MIS2/MIS3 28.7kaB. P. , MIS3/MIS4 59.6kaB. P. , MIS4/MIS5a 78.5kaB. P. 。与其它记录的界线年代大体一致,但也有差异,如 MIS4/MIS5a 的界线年代,古里雅冰芯为 75kaB. P. <sup>[23]</sup>, 深海曲线为 74kaB. P. <sup>[24]</sup>, Q1 石笋则为 78.5kaB. P. 。上述石笋气候分期通过较高分辨率  $\delta^{18}\text{O}$  的定位以及 TIMS-U 系定年,测定误差比其它记录要小,对其所发生的年代及其延续时间可以认为具有更高的准确性。

自 85kaB. P. 至 59.6kaB. P. (包括 MIS5a 及 MIS4)及由 59.6kaB. P. 至 14.6kaB. P. (包括 MIS3 及 MIS2 的大部分),  $\delta^{18}\text{O}$  值均由偏轻逐渐向偏重方向变化,组成由暖到冷的气候变化旋回。反映东亚夏季风由强变弱,降雨由多变少,气温由高变低的变化。

14.6 kaB. P. 以后,进入了末次冰消期,全球变暖,石笋的  $\delta^{18}\text{O}$  向偏轻方向迅速变化,在 13~14 kaB. P. 前后达到了最轻值,可与北大西洋地区的布林暖期(Bolling Allerod)进行对比。这时,夏季风由冰盛期的萎缩状态开始了它的复苏并显示出强劲的姿态。至 12.5 kaB. P. 前后  $\delta^{18}\text{O}$  值又降至接近盛冰期的谷值,此后又迅速变轻,从而进入全新世(MIS1)阶段, MIS1/MIS2 界线年龄,石笋记录可明确确定为 11.3 kaB. P. 。

### 3.2 末次冰期石笋记录的气候突变事件与冰芯记录的对比

石笋记录更小旋回的划分可以与格陵兰 GISP2 冰芯记录对比,同样可以找到 IS1~IS20 相对应的峰值(图 2 中编号 1~20),唯 Q6 中的 IS7 及 IS8 两峰偏低,可能是因该区间两样品的分辨率太低(此处仅达 240a)而未能捕捉到更轻的  $\delta^{18}\text{O}$  信息的缘故。这些峰值区( $\delta^{18}\text{O}$  偏轻区)代表相对暖湿期,正好与冰芯记录的 D—O 暖旋回相对应。

末次冰期七星洞石笋记录了一系列的冷突变事件,最后一次冷事件即 YD 事件发生于 12.76~11.52kaB. P. 。前期,石笋的  $\delta^{18}\text{O}$  值由布林暖期的一 7.55‰向偏重方向迅速变化为一 6.60‰,变化幅度达 0.95‰。后期则由一 5.88‰向(全新世)偏轻方向迅速变化为一 8.10‰,变化幅度达 2.22‰。YD 事件最干冷时石笋的  $\delta^{18}\text{O}$  值达一 4.38‰,接近盛冰期冷谷底部的平均值。说明 YD 事件气温下降幅度很大。Q6 石笋记录的 YD 事件无论是发生的年代还是延续时间范围,都与邻近的荔波董歌洞 D4 石笋记录的 YD 事件(12.80~11.58kaB. P. )相一致的;与格陵兰 GISP2 记录 YD 事件发生时间 12.88~11.64kaB. P. 及 GRIP12.70~11.55kaB. P. 也完全可以进行对比<sup>[4,6,7]</sup>。

除 YD 事件外,石笋记录的低谷,Q4,Q6 石笋也比较一致,还有 15~17 kaB. P. , 24.6 kaB. P. , 30.5kaB. P. , 39.3kaB. P. , 46.8~47.8kaB. P. 及 60.4 kaB. P. 等,它们可分别相当于 GISP2 冰芯的 Heinrich 事件 H1~H6(表 2)。

表 2 末次冰期七星洞 Q4,Q6 石笋记录气候跃变事件年代表  
Tab.2 Chronological table showing climatic transition events in the last glacial epoch obtained from Q4 and Q6 stalagmite records in Qixing Cave

| 项目  | 气候跃变事件年代(kaB. P. ) |           |       |       |       |           |
|-----|--------------------|-----------|-------|-------|-------|-----------|
|     | YD                 | H1        | H2    | H3    | H4    | H5        |
| Q4  |                    | 14.9~17.9 | 24.75 | 30.7  | 39.34 |           |
| Q6  | 11.52~12.76        | 14.9~15.9 | 24.5  | 30.37 | 39.2  | 46.8~47.8 |
| 采用值 | 11.52~12.76        | 15~17     | 24.6  | 30.5  | 39.3  | 46.8~47.8 |

\* 该年龄数据为 Q2 石笋的实际测定值

另外 Q1 石笋还有两个最低的谷值,其时限分别为 66.4kaB. P. 及 73.8kaB. P. ,也可与冰芯记录相应的冷谷进行对比。

除上述这些冷事件以外,在 22.3kaB. P. , 35.7kaB. P. 及 42.3kaB. P. 等处都同样表现为明显的冷谷,而且它们也可以在冰芯记录中找到相应对比的位置。

虽然这些事件的年代与冰芯及其它记录所确定的年代稍有出入,但这显然是与各种不同记录采用不同类型的样品和不同测年方法所带来的误差所致。不应该用这种数据的差异对具有全球意义的冷跃变事件,在不同地区发生时间上引出幅度很大的超前或滞后的概念。

七星洞石笋记录了亚洲季风气候的变化,其  $\delta^{18}\text{O}$

记录除了冷跃变事件外还以一系列的峰值,与格陵兰冰芯记录的 D—O 暖旋回的峰值逐一对比。无论长尺度还是百至千年尺度上的时空变化和格陵兰冰芯记录完全都可以对比,表明亚洲季风气候与全球变化具有积极的响应关系。

亚洲季风通过外部的轨道因素(太阳辐射能量),以及内部的大气圈、陆地—海洋、青藏高原及冰盖之间的相互作用诸多因素的影响而变化。季风强弱受轨道因素变化的改变在 20 世纪 80 年代就已提出<sup>[25]</sup>,然而,轨道因素如何制约季风的强弱?通过什么方式制约季风气候的变化?要深入研究这个问题,揭示亚洲古季风的变化历史及其变化过程就显得尤为重要。

太阳辐射能量变化首先影响大气温度、海洋表面温度(SST)和大气环流。青藏高原的隆升、高原表面的热力作用,把季节性受热的地球表面高耸到大气的一半高度以上,使得 500hPa 的副热带高压在那里断裂缺口,对亚洲季风的形成有着举足轻重的决定性影响<sup>[26]</sup>。这也说明季风的强弱变化除高原隆升因素外,主要受控于太阳辐射能量的变化。石笋记录百、千至万年尺度与海洋同位素记录及冰芯记录的可比性,进一步证明了季风气候变化也和高纬地区气候变化一样随太阳幅射能量的变化而改变。

## 4 结 论

(1) 贵州都匀七星洞 4 根石笋记录的研究结果表明,末次冰期该区季风气候的演变历史与极地及北大西洋地区一样均具有高度的不稳定性。末次冰期相当于海洋同位素阶段的 MIS2, MIS3 及 MIS4。根据石笋  $\delta^{18}\text{O}$  的变化可以准确确定它们之间的界线,其年龄值为: MIS1/ MIS2 11.3kaB. P., MIS2/MIS3 28.7kaB. P., MIS3/MIS4 59.6kaB. P., MIS4/MIS5a 78.5kaB. P.。MIS3 阶段,石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录以振幅较大的高频振动为主,平均值接近末次间冰期的平均值,气温和降水变化较大,为相对暖湿的间冰阶。MIS4 及 MIS2 阶段,夏季风相对平静而冬季风相对增强,是气候极其恶劣的干冷时期。

(2) 冰期中的冷事件包括 YD 及 Heinrich 事件,石笋记录通过  $\delta^{18}\text{O}$  的定位以及 TIMS-U 系定年,对其所发生的年代及其延续时间给出了准确的界定。其中 YD 事件发生于 11.76 ~ 11.52kaB. P., 而 Heinrich 事件的 H1 ~ H6, 则分别发生于 15 ~ 17kaB. P., 24.6kaB. P., 30.5kaB. P., 39.3kaB. P., 46.8 ~ 47.8kaB. P. 及 60.4kaB. P.。石笋记录揭示的这些冷突变事件,都可以和北大西洋沉积与格陵兰冰

芯记录逐一进行对比。

(3) 末次冰期石笋记录的亚洲季风气候的变化,这种较长时间尺度和短时间尺度上与海洋记录及冰芯记录的协调可比性,说明亚洲季风气候与全球变化具有积极的响应关系。它对研究亚洲季风的动力机制与形成演变过程,对全球变化的研究,都将具有重要的意义。因此,我们应充分利用我国的资源优势,为研究各种不同尺度的高分辨率区域环境变化及其对全球变化的响应关系,深入研究各种驱动因素的影响程度,为预测未来气候变化做出积极的贡献。

致 谢:参加野外工作的还有谢运球、王兆荣, TIMS U 系测年由美国明尼苏达大学地质地球物理系程海先生完成,在此表示感谢。

## 参考文献

- [1] Petter D. Global Younger Dryas? [J]. Quaternary International, 1995, 28: 93—104.
- [2] Heinrich H. Origin and consequence of cyclic ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130 000 years [J]. Quaternary Research, 1998, 29: 142—152.
- [3] Bond G, Showers W, Cheseby M et al. A pervasive millennial scale cycle in north Atlantic Holocene and glacial climates [J]. Science, 1997, 278: 1257—1266.
- [4] Bond G, Heinrich H., Broecker W, et al. Evidence for massive discharges of icebergs into North Atlantic ocean during the last glacial period [J]. Nature, 1992, 360: 245—249.
- [5] Broecker W, Bond G, Klas M et al. Origin of the northern Atlantic's Heinrich events [J]. Climate Dynamics, 1992, 6: 265—273
- [6] Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250—ka ice—cores record [J]. Nature, 1993, 364: 218—220.
- [7] Bond G, Broecker W S, Johnsen S, et al. Correlation between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice [J]. Nature, 1993, 365: 143—147.
- [8] 姚檀东. 末次冰期青藏高原的气候突变——古里雅冰芯与 GRIP 冰芯对比研究 [J]. 中国科学(D 辑), 1999, 29(2): 175—184.
- [9] 胡东生, 张华京, 李炳元. 青藏高原腹地湖泊沉积系列与古气候变化 [J]. 地质学报, 2000, 74(4): 363—370.
- [10] 李保生, 吴正, Zhang D D. 中国季风沙区晚更新世以来环境及其变化 [J]. 地质学报, 2001, 75(1): 127—137.
- [11] 安芷生, Porter S C, Chappell J, Shackleton N T, 孙东怀, 等. 最近 130ka 洛川黄土堆积系列与格陵兰冰芯记录 [J]. 科学通报, 1994, 39(24): 2254—2256.
- [12] 丁仲礼, 任剑章, 刘东生, 等. 晚更新世季风—沙漠系统千年尺度的不规则变化及其机制问题 [J]. 中国科学(D 辑), 1986, 26(5): 386—391.
- [13] 郭正堂, 刘东生, 吴乃琴, 等. 最后两次冰期黄土记录中的

Heinrich 型气候节拍[J]. 第四纪研究,1996,(1):21—28.

[14] 汪永进,吴江滢,吴金全. 末次冰期南京石笋高分辨率气候记录与 GRIP 冰芯对比[J]. 中国科学(D 辑),2000,30(5):533—539.

[15] Porter S C, An Z S. Correlation between climatic events in the North Atlantic and China during the last glaciation [J]. Nature,1995,375:305—308.

[16] 李彬,袁道先,林玉石,等. 洞穴次生化学沉积物中 Mg, Sr, Ca 及其比值的环境意义[J]. 中国岩溶, 2000,19(2):115—122.

[17] 林玉石,张美良,覃嘉铭. 洞穴石笋沉积速率研究中值得注意的几个问题[J]. 中国岩溶, 2001,20(2):131—136.

[18] 覃嘉铭,袁道先,林玉石,等. 我国南方黔桂地区最近 16 万年高分辨率石笋记录的气候事件[J]. 地学前沿,2001, 8(1):99—105.

[19] 王东升. 中国大气降水氢氧同位素场的时间——空间展布及其环境效应[A]. 中国同位素水文地质学之进展[C]. 天津大学出版社, 1993,8.

[20] 覃嘉铭,袁道先,林玉石,等. 桂林 4.4 万年来石笋同位素记录及其环境解释[J]. 地球学报,2000,21(4): 407—416.

[21] Tarlor K C, Lamorey G W, Doyle G A et al. The flickering switch of late Pleistocene climate change[J]. Nature,1993, 361:432—436.

[22] Grootes P. M, M Stuiver, J W C White et al. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores[J]. Nature 1993,366:552—554.

[23] 刘东生,施雅风,王汝建,等. 以气候变化为标志的中国第四纪地层对比表[J]. 第四纪研究, 2000, 20(2) 108—128.

[24] Martinson D G, Piasias N G, Hays J D et al. Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high — resolution 0 to 300 000 — year chronostratigraphy [J]. Quaternary Research, 1987, 27: 1—29.

[25] Kutzbach J E. Monsoon climate of the Early Holocene:Climate experiment with Earth's orbital parameters for 9000 years ago [J]. Science,1981,214:59—61.

[26] 余志豪. 南海季风研究的近况[J]. 海洋地质动态,2002,18 (4):23—24.

CHANGE OF THE EAST-ASIAN MONSOON CLIMATE DURING THE  
LAST GLACIATION : $\delta^{18}\text{O}$  RECORDS OF STALAGMITES IN  
QIXING CAVE, DUYUN CITY, GUIZHOU PROVINCE

QIN Jia-ming, LIN Yu-shi, ZHANG Mei-liang, WANG Hua, FENG Yu-mei, TU Lin-ling

(Institute of Karst Geology, CAGS; Karst Dynamic Laboratory, MLR, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract:** Through 31 TIMS-U series dating and 543 samples of carbon oxygen stable isotope analysis from 4 stalagmites in Qixing cave, 11000 to 85000a climatic changes isotope records are obtained continuously. The study indicates that stalagmite's oxygen isotope records are same with the sea isotope records, which also may be divided correspondingly to MIS2, MIS3, MIS4 and MIS5a climates stages. And the demarcation lines are as follows: 11.3ka B. P. between MIS1 and MIS2, 28.7 ka B. P. between MIS2 and MIS3, 59.6 ka B. P. between MIS3 and MIS4, and 78.5 ka B. P. between MIS4 and MIS5a. It is showed by the study on stalagmite records that the last glacial epoch corresponds to YD and the Heinrich events recorded in North Atlantic sediment, and also corresponds to ice core from Greenland. Several pieces of stalagmite are of extremely consistent and exact locating and timing. The age of the YD event occured 12.76~11.52 kaB. P. , and H1~H6 of the Heinrich event is respectively 15~17 kaB. P. , 24.6kaB. P. , 30.5kaB. P. , 39.3kaB. P. , 46.8~47.8kaB. P. , 60.4kaB. P. . The stalagmite records expose out two cold events at 66.4kaB. P. and 73.8 kaB. P. during MIS4, those are very similar to the two clough in Greenland ice core record curve. A comparing study with GISP2 indicated that the climate transition of East Asian monsoon in hundred and thousand years scale is consistent to the North Atlantic and Greenland climate change. It is significant for the study on the dynamical mechanism of East Asia monsoon climate and on the corresponding relationship to global change.

**Key words:** Stalagmite;  $\delta^{18}\text{O}$ ; Last glacial period; Monsoon climate