

末次冰期贵州七星洞石笋高分辨率 气候记录与 Heinrich 事件

张美良¹⁾ 程 海²⁾ 袁道先¹⁾ 林玉石¹⁾ 覃嘉铭¹⁾ 章 程¹⁾

1) 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 ;

2) 美国明尼苏达大学地质地球物理系, MN55455

摘 要 通过对贵州都匀七星洞 Q4、Q6 石笋进行高精度的 TIMS-U 系测年和氧同位素分析, 建立了末次冰期 60.5 ka B P 以来都匀凯西地区高分辨率的古气候变化时间序列。通过与格陵兰 GISP2 冰心的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线对比分析, 初步揭示并探讨了末次冰期以来反映的短时间尺度气候快速变化的 D-O 旋回事件 1~18 和 Heinrich 事件 H1~H5 在黔南七星洞中的石笋记录, 并对冷事件发生的年代给出了界定。研究表明, 黔南 60.5 ka B P 以来石笋记录冷暖事件所反映出的古季风环流变化, 明显受北大西洋气候振荡的影响, 显示与北极地区存在着古气候的遥相关。石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录表明, 在 60.5~11.29 ka B P 间的末次冰期, $\delta^{18}\text{O}$ 值由负偏逐渐向正偏方向变化, 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趋势。

关键词 石笋 氧同位素记录 D-O 旋回 Heinrich 事件 凯西七星洞

The High Resolution Climate Records from Two Stalagmites in Qixing Cave of Guizhou and the Heinrich Events of the Last Glacial Period

ZHANG Meiliang¹⁾ CHENG Hai²⁾ YUAN Daoxian¹⁾ LIN Yushi¹⁾ QIN Jiaming¹⁾ ZHANG Cheng¹⁾

1) Karst Dynamics Laboratory, Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi, 541004 ;

2) Geography Department, Minnesota University, MN55455, USA

Abstract The time sequence of high resolution paleo-climatic change since the last glacial period-60.5 ka B P-was reconstructed by means of high precision TIMS-U series dating and oxygen isotope analysis of Q4 and Q6 stalagmites from Qxing cave in southern Guizhou. Through a comparative analysis of $\delta^{18}\text{O}$ curves between the GISP2 ice core and two(Q4 and Q6)stalagmites from Qixing cave, the depositional records of the Dansgaard-Oeschger cycle events 1~18 and Heinrich events H1-H5 from the records of two stalagmites in southern Guizhou which can reflect rapid climate change in short time scale since the last glacial stage were preliminarily revealed and discussed, and the ages of the cold events were determined. The results have shown that the records of the cold and warm events from two stalagmites since 60.50 ka B P in southern Guizhou are reflections of the paleo-monsoon circulation changes, and that these changes are clearly affected by the climate oscillation of the North Atlantic Ocean. This suggests that they are obviously related to the paleo-climate changes in the North pole region. The records of $\delta^{18}\text{O}$ from the Q4 and Q6 stalagmites indicate that the $\delta^{18}\text{O}$ values from 60.59 ka B P to 11.29 ka B P changed from somewhat negative to relatively positive in the last glacial period, and suggest that the Asian summer monsoon gradually weakened and the climate tended to become drier and cooler.

Key words stalagmite oxygen isotope record Dansgaard-Oeschger cycles Heinrich events Qixing cave of southern Guizhou

在东亚季风区的黄土沉积(郭正堂等, 1996)、南海陆架沉积物和内陆湖泊沉积物的孢粉记录(吕厚远等, 1996; 顾兆炎等, 1998)研究中, 发现末次冰期内存在有 Heinrich 冷事件的印迹(Bond G 等, 1992 ;

Porter 等, 1995)。在洞穴石笋的古环境研究中, 也发现了末次冰期冷事件的记录, 如在桂林盘龙洞、响水洞, 贵州的衙门洞和南京汤山溶洞等的石笋均有冷事件存在(张美良等, 1998; 袁道先等, 1999; 汪永

进等 2000 Jeffrey 等,1998)。但是,可以与格陵兰冰心 Dansgaard-Oeschger 旋回中突出的干冷事件-Heinrich 事件(Bond 等,1993)进行较好的地质记录对比的不太多。为了解 Heinrich 事件对东亚季风区的影响机制、强度、气候变化尺度以及各冷事件发生时间,尚需对沉积物的精确定年和高分辨率的古气候指标进行分析和研究。本文根据七星洞 Q4、Q6 石笋 60.5 ka B P 以来高分辨率的古气候变化的连续记录,揭示了末次冰期南方东亚季风气候变化规律和低频振荡特征,通过与格陵兰冰心 Dansgaard-Oeschger 旋回中 Heinrich 冷事件的对比认为东亚季风区石笋记录的短尺度气候波动与全球的气候变化具有明显的一致性,但存在明显的地区性气候变化特征。

1 样品采集和分析

本文研究的石笋产自贵州都匀西南约 100 km 的凯口镇凯西村西南 1.5 km 的七星洞(图 1)。

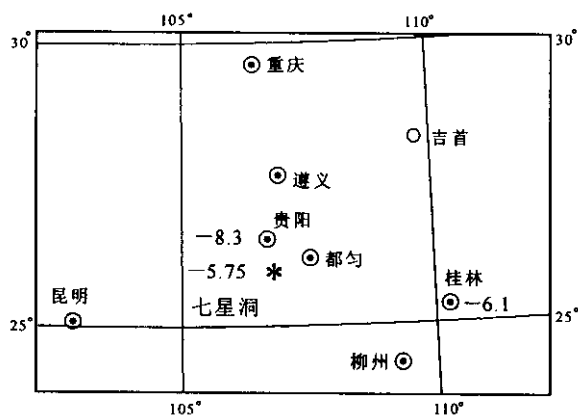


图 1 贵州都匀七星洞位置图

Fig. 1 The distribution position of Qixing cave in the south of Guizhou

* 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(据李彬等 2000,郑淑惠等,1983,林玉石等 2001,袁道先等,1999)

* -Qixing cave of Guizhou; The data in fig. 1 are the annual average $\delta^{18}\text{O}$ values of the precipitation (after Li et al., 2000;

Zheng et al., 1983; Lin Yushi et al., 2001;

Yuan et al., 1999)

石笋为 Q4、Q6,高分别为 50 cm 和 244.5 cm,直径分别为 12 cm 和 9 cm。Q4、Q6 石笋沿中心轴切开后,内部纹层清晰,石笋表现为灰色-灰白色,结晶较好,致密状,由 0.1~1.5 mm 厚的微粒-针状方解石纹层组成。

氧同位素样品主要沿石笋的中心轴采取。Q4

石笋按 0.2~0.5 cm 的间隔,取样 149 件,其中 4 件为平行样;Q6 石笋按 0.5~2 cm 的间隔,取样 313 件,其中 4 个为平行样。氧同位素样品由岩溶地质研究所同位素实验室完成。一般采用 20 mg 左右的碳酸盐粉末与 100% 磷酸反应生成 CO_2 ,经纯化后于 MM-903E 质谱仪(英国 VG 公司)进行同位素分析, $\delta^{18}\text{O}$ 值为相对于 PDB 标准,系统误差小于 0.1‰。

TIMS-U 系定年样, Q4 和 Q6 各取样品 11 件,由美国明尼苏达大学地质与地球物理系同位素实验室完成。测年样用直径为 8 mm 取心钻头钻取,取样厚度为 0.5~1 cm,每件样品约为 400 mg,稀释剂采用 ^{229}Th - ^{233}U - ^{236}U ,测试仪器为 Finnigan MAT262-RPQ 质谱仪,年龄误差小于 1%(2σ 统计误差)。

2 时间标尺与 $\delta^{18}\text{O}$ 记录

凯西七星洞 Q4、Q6 石笋的 TIMS-U 系测定年龄(表 1,图 2),指示石笋形成年龄在 60.5~11.29 ka B P 之间。表 1 所测年龄数据均按石笋沉积先后秩序正常排列。因此,根据 2 个石笋的 TIMS-U 系年龄,采用线性内插方法获得了两石笋的时间标尺。同时,在距 Q4 石笋顶部 18 cm 处和 Q6 石笋顶部 94.5 cm 处所标定的 28.08 ka B P 可作为 MIS2/3 的分界年龄。而在 Q6 石笋顶部 2.5 cm 处所标定的 11.3 ka B P 可作为 MIS1/2 或末次冰期终止点 I 的分界年龄。

Q4、Q6 石笋氧同位素记录的曲线如图 2 所示,两石笋的曲线变化趋势非常一致。在 60.5 ka B P 以来的整个末次冰期, Q4、Q6 石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为 -5.85‰ 和 -5.80‰,与 2000 年测得的现代洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ (-5.74‰) 值非常接近,可作为冷暖分界值。据氧同位素记录的变化特征,可划分为 2 个时段:① 距今 60.5~28.08 ka B P 时段, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 平均值为 -5.94‰,其低值(高峰区)接近于 -8.02‰~-10.70‰,而高值(低谷区)为 -2.65‰~-4.48‰ 之间,曲线呈现负偏,表现为大幅度的高频振动,说明该区在末次冰期 MIS3 全球相对暖湿的间冰阶阶段,东亚夏季风的强弱变化幅度也随之得到了响应;② 28.08~11.27 ka B P 时段, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 平均值为 -5.59‰,其低值(高峰区)接近于 -7.02‰~-8.10‰,而高值(低谷区)为 -3.27‰~-4.34‰ 之间,曲线变化幅度较小,呈现正偏,多数在平均值线附近或平均值线以下波动,说

表 1 贵州都匀凯西七星洞 4 号石笋铀系年龄值
Table 1 ²³⁰Th ages of Q4 and Q6 stalagmite from Qixing cave of Duyun ,Guizhou

样品号	高度/cm	²³⁸ U/×10 ⁻⁹	²³² Th//×10 ⁻¹²	δ ²³⁴ U 测量值)	²³⁰ Th/ ²³⁸ U 活度比)	δ ²³⁴ U 初始值)	²³⁰ Th(校正年龄/ka)
Q4-1	1.0	442.0±1.0	87±19	519.3±2.3	0.1642±0.001	537.9±2.4	12.40±0.08
Q4-2	2.0	2042±4.0	1297±21	596.8±2.2	0.1983±0.0008	621.5±2.3	14.35±0.06
Q4-3	3.0	268.2±0.6	2738±23	513.0±3.0	0.2005±0.0056	535.5±3.3	15.21±0.47
Q4-4	4.5	281.5±0.6	1804±15	562.2±2.1	0.2134±0.0012	587.8±2.2	15.79±0.11
Q4-5	7.0	1851±6.0	4204±19	546.3±2.9	0.2416±0.0012	575.4±3.1	18.33±0.11
Q4-6	18.0	656.0±1.0	4930±22	459.7±2.4	0.3366±0.0016	497.9±2.6	28.08±0.17
Q4-7	26.0	458±1	3759±17	427.9±2.6	0.3907±0.0017	471.2±2.9	34.17±0.21
Q4-8	35.0	1288±3	2976±19	460.2±2.1	0.4362±0.0017	512.3±2.3	37.95±0.18
Q4-9	39	265.6±0.6	2027±18	475.0±2.6	0.4554±0.0025	531.1±3.0	39.34±0.28
Q4-10	47.0	5546±19	10950±35	458.1±2.6	0.4795±0.0021	516.7±3.0	42.54±0.25
Q4-11	49.0	303.6±0.8	2336±18	477.2±3.0	0.5040±0.0026	540.9±3.4	44.33±0.31
Q6U-1	1.0	470.4±0.9	19±16	584.9±2.2	0.1566±0.0010	603.9±2.2	11.29±0.08
Q6U-2	8.4	6330±23	3433±16	584.0±2.5	0.1705±0.0008	504.5±2.4	12.34±0.06
Q6U-3	11.5	502±1	24±14	485.5±2.3	0.1742±0.0009	504.5±2.4	13.53±0.08
Q6U-4	26.7	535.4±0.7	515±17	574.1±2.2	0.2154±0.0012	600.5±2.3	15.90±0.10
Q6U-5	40.5	392.9±0.9	925±19	532.0±2.9	0.2389±0.0016	560.2±3.1	18.28±0.14
Q6U-6	79.5	398±1	1608±13	516.0±2.4	0.3087±0.0016	553.1±2.6	24.47±0.15
Q6U-7	114.5	227.2±0.5	1729±11	531.4±2.5	0.4081±0.0019	583.5±2.8	33.08±0.20
Q6U-8	126.8	6770±36	2362±14	482.5±2.8	0.4522±0.0029	538.6±3.2	38.91±0.30
Q6U-9	158.5	9217±29	492±11	667.1±2.0	0.5924±0.0024	760.3±2.3	46.46±0.23
Q6U-11	204.5	289.8±0.6	55±14	526.3±2.5	0.5969±0.0023	610.7±2.9	52.47±0.28
Q6U-12	243.5	295.1±0.8	349±15	483.5±3.2	0.6413±0.0035	572.3±3.9	59.68±0.46

注 λ²³⁰=9.1577×10⁻⁶Y⁻¹ λ²³⁴=2.8263×10⁻⁶Y⁻¹ λ²³⁸=1.55125×10⁻⁶Y⁻¹ δ²³⁴U=($\frac{^{234}\text{U}}{^{238}\text{U}}$)_{active} -1)×1000 ;石笋 TIMS U-系年龄 ,由美国明尼苏达大学地质与地球物理学同位素实验室完成。

明在全球盛冰期干冷阶段 ,东亚夏季风则相对平静 ,冬季风强劲 ,气温较低 降雨量减少。

据氧同位素曲线记录显示 ,Q4、Q6 石笋δ¹⁸O_{PDB}平均值为-5.83‰ ,与相同时段的石笋记录相比较偏正 ,较低海拔的岩溶斜坡地带(比荔波董歌洞和衙门洞正偏 2‰~2.6‰)或岩溶平原区(桂林地区)和靠近东南沿海季风影响区较正偏 1‰~2‰ ,而较印度季风强影响的云南宣威下水龙洞的同位素正偏 5‰ ,比宁蒗泸沽湖仙人洞正偏 7.4‰。同时 ,与这些地区的最新沉积的碳酸盐、洞穴滴水 and 大气降水 (图 1、表 2、表 3)以及石笋的氧同位素(汪永进等 ,2000 ;李彬等 ,2000 ;郑淑蕙等 ,1983 ;林玉石等 ,

2001 ;袁道先等 ,1999)相比 ,其 δ¹⁸O 值也普遍正偏 1.5‰~5‰。该区因位于云贵高原西南的边缘地带 ,在其高原西部有近 SN 向—NE 向的大凉山-乌蒙山-梅花山脉相隔 ,并在云南形成准静止峰 ,而印度季风的夏季风到达该区已逐渐减弱 ,故印度季风对该区全年降水的贡献较小 ;而在该区的东南边是黔桂岩溶的斜坡地带 ,东亚夏季风在运移过程中 ,由于受高原和海拔高度特殊地形的影响 ,东亚夏季降雨和热带降水云团在此与高原气流相遇 ,普遍发生改变 ,使夏季降雨和热带降水云团对岩溶斜坡地带(800 m 以下地区)影响较大 ,而对该区岩溶高原区的影响逐渐减弱 ,其东亚夏季风对该区全年降水

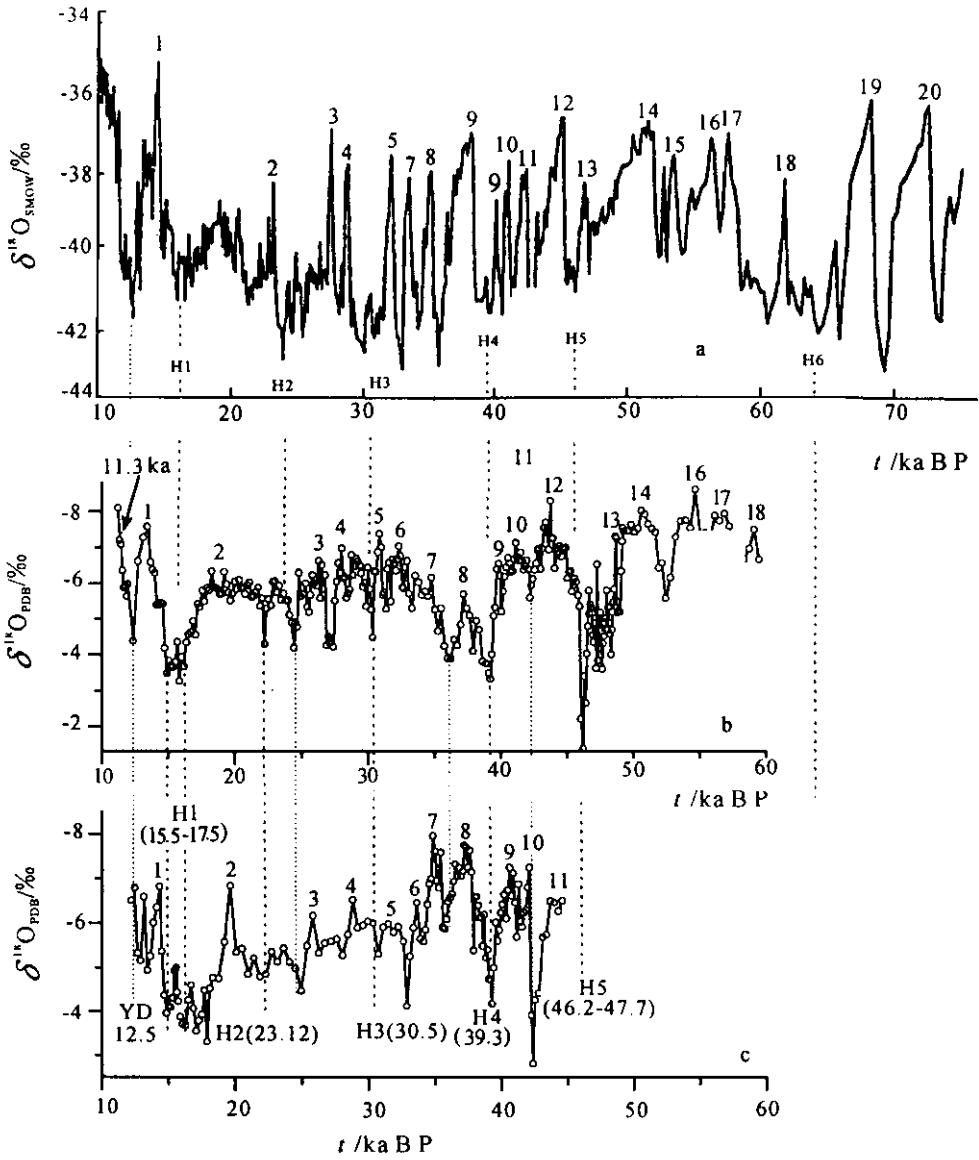


图 2 贵州都匀七星洞石笋同位素记录及其与格陵兰 GISP2 冰芯记录的对比

Fig. 2 The comparison of the oxygen isotope record of two stalagmites in Guizhou with the Greenland ice core-GISP2 core
a 为 GISP2 冰心记录 (Dansgaard 等, 1993; Stuiver 等, 2000); b, c 分别为 Q6、Q4 石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录
a-GISP2 core (from Dansgaard et al., 1993; Stuiver et al., 2000); b, c- $\delta^{18}\text{O}$ record of Q6 and Q4 stalagmites respectively

的贡献较小。所以,该区的气候变化趋势,总体上显示东亚季风的暖湿气流和冬季风冷峰以及西北冷气团比东亚夏季风和印度季风对该区的影响更为重要,特别是东亚季风的冬季风在本区占绝对优势,反映 $\delta^{18}\text{O}$ 正偏,气温降低,降水减少等特点。

3 石笋同位素记录与 Heinrich 事件和 GISP2 (GRIP) 冰心对比

末次冰期北大西洋沉积物岩心中常包括有数层粗颗粒含量增多,有孔虫急剧减少的沉积物,这些时间跨度为几百年或上千年的气候快速波动的 Hein-

rich 事件 (Heinrich 等, 1998; Bond 等, 1992; Dansgaard 等, 1993), 很难用天文气候理论解释。Bond 等人认为 Heinrich 冰漂碎屑层是由北极地区冰山向海中大量倾泻、浮冰南移及溶解携带而来,其间当海表面温度和盐度下降时,而在环北大西洋地区引起大幅度寒冷事件,其形成年代与格陵兰冰心中的 Dansgaard-Oeschger 旋回的冷阶段一致 (Bond 等, 1993)。Broecker (1994) 认为, H 事件可能曾引起全球性气候反映。近年研究表明,中国北方黄土、青藏高原冰心、南海沉积物以及湖泊沉积物等均有这些冷事件记录 (Porter 等, 1995; Yao Tandong 等, 1997;

表 2 现代洞穴滴水 and 大气降水的氧同位素
Table 2 Oxygen isotopes of present drip water in caves and rain water

送样号	采样地点	样品类型	采样日期 年-月-日	$\Delta D_{SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{SMOW}/\text{‰}$
QW-1	贵州都匀七星洞	现代洞穴滴水	1999-12-30	- 35.6	- 5.74
DW-1	贵州荔波董歌洞	现代洞穴滴水	1999-12-28	- 57.6	- 8.52
LW-1	贵州荔波龙泉洞	现代洞穴滴水	1999-12-30	- 53.3	- 7.75
YW-1	贵州荔波衙门洞	现代洞穴滴水	1999-12-30	- 44.0	- 7.08
XW-1	桂林灌阳响水洞	现代洞穴滴水	1997-10-09	- 35.60	- 6.16
Xw-2	桂林灌阳响水洞	现代洞穴滴水	1997-10-09	- 38.3	- 6.66
Pw-1	桂林盘龙洞	现代洞穴滴水	1993~1995	- 36.86	- 5.66
Pw-1	拉萨地区 *	雨水	1980-2-9	- 93.30	- 13.43
Pw-1	昆明地区 *	雨水	1980-27-9	- 72.0	- 10.02
Pw-1	贵阳地区	雨水	—	—	- 8.30
Pw-1	北京地区 *	雨水	1980-28-8	- 63.0	- 9.29
Gw-1	桂林雁山	雨水	1993~1998	- 31.4	- 5.65~- 6.10
Gw-1	广州地区 *	雨水	1980-23-9	- 44.6	- 6.32

注 据郑淑蕙等 (1983) ,引自李彬等 ,2000 ;郑淑蕙等 ,1983 ;林玉石等 ,2001。

表 3 洞穴石笋和现代沉积碳酸盐的碳氧同位素特征
Table 3 The characteristics of carbon and Oxygen isotope from new stalagmites and present carbonate depositin caves

送样号	采样地点	样品类型	采样日期 年-月-日	$\Delta D_{SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{SMOW}/\text{‰}$
Pc-1	桂林盘龙洞	现代碳酸盐	1994~1995	- 6.76	- 5.89 *
XC-2	灌阳响水洞	现代碳酸盐	1997-09-10	- 8.96	- 6.18 *
XC-3	灌阳响水洞	现代碳酸盐	1997-09-10	- 10.17	- 6.35 *
DC-1	贵州董歌洞	现代碳酸盐	1999-30-12	- 6.18	- 7.73 *
DC-1	桂林盘龙洞	1 号石笋	1994-5-16	- 7.26	- 6.14 *
DC-1	灌阳响水洞	1 号石笋	1997-09-10	- 6.06	- 7.76 *
DC-1	州董歌洞	4 号石笋	1999-12-28	- 5.06	- 7.73 *
DC-1	贵州衙门洞	1 号石笋	1999-12-30	- 10.35	- 8.45 *
Qc	贵州七星洞	4 号石笋	1997-04-21	- 5.79	- 5.85
Qc	泸沽湖仙人洞	1 号石笋	1999-7-7	- 6.46	- 13.55 * *
Qc	宣威下水龙洞	1 号石笋	1999-11-15	- 5.85	- 11.10 * *
Lc-1	泸沽湖仙人洞	近代碳酸盐	1999-7-7	- 4.32	- 17.53 * *
Xac-1	宣威下水龙洞	近代碳酸盐	1999-11-15	- 6.24	- 10.98‰ * *

注 : * 东南季风影响区 ; * * 西南季风影响区 ;引自张美良等 ,1998 ;袁道先等 ,1999。

Linsley 等 ,1996 ;顾兆炎等 ,1998) ,而且 ,在中国南方的一些洞穴石笋中也存在有类似的记录。

3.1 石笋记录中的 Heinrich 事件与 GISP2(GRIP) 冰心对比

根据 Q4、Q6 石笋的沉积旋回特征、TIMS-U 系测定和氧同位素记录曲线的变化特征显示(图 2) ,两石笋的氧同位素数据非常协调一致 ,峰谷的位置与振

幅基本一一对应。两石笋记录的几次干冷事件分别发生在 15.5~17.89 ka B P、22.0~24.32 ka B P、30.74 ka B P、38.65~39.34 ka B P 和 46.2~47.7 ka B P 期间 ,与北大西洋深海沉积物岩心中的 Heinrich 事件 ,即 H1~H5 (14.3 ka 或 16.0ka、21.0 ka 或 24.0 ka、28.0 ka 或 30.0 ka、39.0 ka 或 41.0 ka、51.0ka或52.0ka)冷事件(Schultz 等 ,1998)具有

表 4 Q4、Q6 石笋年龄与北大西洋 Heinrich 层及渭南黄土年龄的对比

Table 4 The comparison of the ages from Q4 and Q6 stalagmites with the Heinrich layers in the North Atlantic Ocean and Weinan loess beds in the north of China

项目	气候跃变事件年代/ka B P					
	YD	H1	H2	H3	H4	H5
H 层年龄(DSDP 609 孔)	—	14.3	21.0	28.0	41.0	52.0
Schultz H 等(Schultz H et al ,1998)	—	16.0	24.0	30.0	39.00	51.00
渭南黄土标尺 H(郭正堂等 ,1996)	—	13.3~14.1	20.4~21.9	28.9~30.8	36.9~40.4	50.6~54.5
则克台黄土(叶玮等 ,2000)	—	14.0	23.9	33.0	37.9	47.8
南京汤山(汪永进等 ,2000)	—	16.2	24.2	30.5	38.90	—
桂林响水洞(张美良等 ,1998)	10.8	15.3~16.2	21.0~25.0	29.0~32.0	36.7~41.0	—
七星洞 Q4	12.5	15.9~17.9	20.99~24.32	30.74	38.65~39.47	—
七星洞 Q6	12.5	15.5~17.0	22.25~24.0	30.37	39.2	46.22~47.7
本文采用值	12.5	15.5~17.5	22.3	30.5	39.3	46.2~47.7

较好的对应关系(表 4)。同时,也可以与中国北方的渭南黄土、伊犁则克台黄土(叶玮等,2000)以及南京汤山洞穴石笋记录的冷事件逐一对应。

两个石笋与 GISP2(GRIP)冰心 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线具有十分相似的变化历程(图 2),具有彼此对应的时间标尺范围。GISP2 冰心 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线呈现的 5 个显著干冷低谷段,被认为是北大西洋冰筏事件 H1~H5 的极地气候响应(Dansgaard 等,1993)。这 5 个冰筏事件在两个石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录曲线上均有明显的反映。在 GISP2 冰心的 D-O 旋回中存在的这些冰筏事件之间,一般持续时间为 200~2 000 a,而且与石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线找到的冷事件具一一对应关系。如在石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线上找到的(IS)1~18 暖峰值,这些峰值区($\delta^{18}\text{O}$ 偏轻区)代表该区东亚夏季风的强盛期,正好与 GISP2(GRIP)冰心记录的 D-O 旋回中的暖阶峰相对应;而记录的低谷区($\delta^{18}\text{O}$ 偏重区)代表东亚冬季风的强盛期,与冰心记录 D-O 旋回中的冷事件、北大西洋深海沉积物岩心中的 Heinrich 冷事件可逐一对比,且石笋中记录的各个事件的 TIMS 年龄与 GISP2 相应事件的高分辨测年结果基本一致。

Heinrich 事件发生在 D-O 旋回中的最寒冷期,代表上一次旋回的结束,随后的变暖又代表新的旋回开始。GISP2 冰心 D-O 旋回中的寒冷期与北大西洋的 Heinrich 事件具有较好的相关性。该事件不仅在西太平洋、中国南海陆架沉积物、北方黄土、青藏高原冰心、湖泊沉积物中存在,而且在南方洞穴石笋中也有完整的记录。并可与北大西洋沉积物、格陵兰冰心记录逐一进行对比,根据其分布的广泛性及其可比性,说明这些事件可能不是局部现象,而可

能具有全球意义的短周期的气候振荡事件。

3.2 石笋记录中的新仙女木事件及终止点 I

新仙女木事件大致发生于 12.5 ka B P 期间的一次短暂的气候变冷,是末次冰期向冰后期过渡的最后一次冷事件。近年来,这一事件在南美、南极冰盖、中国南海、苏禄海等地均有反映。因此,它不可能是早期认为的北欧及北大西洋高纬度地区的局部现象,而是具有全球意义的突发性的冷事件。Q4、Q6 石笋记录表明,新仙女木事件发生于 11.60~12.8 ka B P,是末次冰消期气候总体变暖过程中的气候降温事件,其后,在约 11.6 ka B P 至冰消期的终止点 I,即 11.3 ka B P,气温又急剧回升,从而步入全新世的演化阶段。

终止点 I 是末次冰期旋回的结束点,无论是海洋氧同位素记录还是冰心记录,都能较容易地加以确定。南方高分辨率的石笋同位素记录,也表现出极明显的突变点。新仙女木事件后,紧接着在很短的时间内(0.2~0.3 ka)气温急速变暖,南方石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 由偏重急速变轻,呈现跳跃式的变化。Q4、Q6 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化幅度为 2.14‰~4‰,是两石笋记录中距今最近的最大的突变点。这与桂林地区盘龙洞 PL₁ 石笋、响水岩 X₁ 石笋和贵州荔波董哥洞 D4 石笋、龙泉洞 L1 石笋、衙门洞 Y1 石笋记录完全可以对比(张美良等,1998;袁道先等,1999)。

石笋记录表明,15.5 ka B P 以后,进入了末次冰期的尾声,全球变暖,石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 向偏轻方向迅速转变(变轻),在 13.0~14.0 ka B P 前后达到了最轻值,说明这时的夏季风有一个强劲的峰值,随之又迅速变重,至 12.5 ka B P 前后又降至接近盛冰期的

低谷值。此后 $\delta^{18}\text{O}$ 值又迅速变轻,从而进入全新世(MIS1)阶段,其中,MIS1/MIS2 界线年龄,石笋记录可明确确定为 11.3 ka B P。12.5 ka B P 的低谷,显然可以与高纬度地区的 YD 事件对比。

4 结论与问题

贵州都匀七星洞 Q4、Q6 石笋记录的研究结果表明,末次冰期该区夏季风兴衰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。在 MIS2 阶段以前,东亚夏季风的变化强度以振幅较大的高频振动为主,而在 MIS2 阶段以后,东亚夏季风相对平静而冬季风则相对增强,是气候极其恶劣的干冷时期。末次冰期中的冷事件包括 YD 及 Heinrich 事件,通过对两石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 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。

贵州七星洞 Q4、Q6 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值真实地记录了东亚季风的演变历史,其 $\delta^{18}\text{O}$ 值不仅记录了冷跃变事件,而且也记录了一系列的暖阶-峰值,表现出夏季风的强劲时段与格陵兰冰心记录的 D-O 旋回的暖阶峰值逐一对比。末次冰期石笋记录的气候变化,无论是在长尺度上,还是在百年-千年尺度上的时空变化,均与格陵兰冰心记录完全一致。研究表明,石笋记录的古季风环流变化的动力机制与全球变化是一致的,显示东亚古季风气候变化的直接动力可能来自于全球冰量的变化,即主要受北半球日照辐射强度、北大西洋冰漂碎屑带的扩张以及低纬太平洋海面温度变化等因素的影响。其依据主要表现在:①当南极海水和广阔海洋表面为升温时,全球冰量减少,导致中国东部的夏季风(即东亚季风)将随之增加;②无论是从黔南的石笋、桂林的石笋、滇东宣威石笋和南京的石笋记录(张美良等,1998;袁道先等,1999;汪永进等,2000),还是从北方黄土的记录(郭正堂等,1996;Porter 等,1995)入内陆湖泊和南海沉积记录都有与北大西洋冰筏事件记录的对应反映,即具有同时性的反映。这也说明冰量变化或冰山倾入大洋引起海水温度的变化对中国古季风环流具有一定的影响;③苏禄海氧同位素高分辨率的记录被认为是全球冰量变化的最好记录(Yao Tandong 等,1997),而黔南的七星洞、董哥洞、桂林的响水洞和盘龙洞以及南京汤山洞石笋的记录(张美良等,1998;汪永进等,2000)与其具有较好的一致性,这也从侧面支持了上述观点。

黔南石笋记录的冷暖事件所反映出的古季风环

流变化,既显示受到了北大西洋气候振荡的影响,也显示与北极地区存在着古气候的遥相关。

根据两个石笋 TIMS-U 系测年和氧、碳同位素分析,建立了黔南 60.5 ka B P 以来石笋的古气候时标序列,并对末次冰期 MIS2/MIS3 及 MIS1/MIS2 或终止点 I 的界线年龄进行了明确的界定,其年龄分别为 28.08 ka B P 和 11.3 ka B P,并证实了末次冰期中国南方东亚季风气候也存在与北大西洋 H1 至 H5 对应的冷事件。

参 考 文 献

郭正堂,刘东生,吴乃琴等.1996.最后两个冰期黄土 Heinrich 型的气候节拍.第四纪研究(1):21~23.
顾兆炎,赵惠敏,王振海等.1998.末次间冰期以来新疆巴里坤湖蒸发盐的沉积环境记录.第四纪研究(4):328~334.
李彬,袁道先,林玉石等.2000.桂林地区降水、洞穴滴水及现代洞穴碳酸盐碳氧同位素研究及其环境意义.中国科学(D辑),30(1):81~87.
林玉石,张美良,覃嘉铭等.2001.云南宁蒺泸沽湖地区的古环境重建.中国岩溶,20(3):174~182.
吕厚远,郭正堂,吴乃琴等.1996.黄土高原和海南陆架古季风演变的生物记录与 Heinrich 事件.第四纪研究(1):11~20.
汪永进,吴江滢,吴金全等.2000.末次冰期南京石笋高分辨率气候记录与 GRIP 冰芯对比.中国科学(D辑),30(5):533~539.
叶玮,董光荣,袁玉江等.2000.新疆伊犁地区末次冰期气候的不稳定性.科学通报,45(6):641~646.
袁道先,覃嘉铭,林玉石等.1999.桂林 20 万年石笋高分辨率古环境重建.桂林:广西师范大学出版社,17~28.
张美良,袁道先,林玉石等.1998.广西灌阳县响水洞石笋的同位素年龄及其古气候意义.中国岩溶,17(4):311~318.
郑淑惠,侯发高,倪葆龄.1983.中国大气降水的氢氧同位素研究.科学通报,28(3):801~806.

References

Bond G, Heinrich H, Broecker W S et al. 1992. Evidence for massive discharges of icebergs into North Atlantic Ocean during the Last Glacial period. Nature, 360: 245~249.
Bond G, Broecker W S, Johnson S et al. 1993. Correlations between climate records from North Atlantic Sediments and Greenland Ice. Ibid. 365: 143~147.
Broecker W S. 1994. Massive iceberg discharges as triggers for global climate change. Nature, 372: 421~424.
Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B et al. 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250 ka ice-core record. Nature, 364: 218~220.
Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B et al. 1993. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice core. Nature, 366: 552~554.

- Guo Zhengtang , Liu Tungsheng , Wu Naiqin. 1996. Heinrich-rhythm pulses of climates recorded in Loess of the last two glaciations. *Quaternary Sciences* (1):21 ~ 23(in Chinese with English abstract).
- Gu Zhaoyan , Zhao Huimin , Wang Zhenhai et al. 1998. Evaporation salt records of environmental response to climate change in Barkol lake basin , Northwestern China. *Quaternary Sciences* (4):328 ~ 334 (in Chinese with English abstract).
- Heinrich H. 1988. Origin and consequence of cyclic ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130 000 years. *Quaternary Research* 29 : 142 ~ 152.
- Jeffrey A Dorale , Lawrence R , Edwards , Emi Ito , Luis A. 1998. Gonzalez climate and vegetation history of the midcontinent from 75 to 25 ka : a speleothem record from Crevice Cave , Missouri , USA. *Science* 282 :185 ~ 187.
- Li Bin , Yuan Daoxian , Qin jiaming et al. 2000. Oxygen and carbon isotopic characteristics of rainwater , drip water and present speleothems in a cave in Guilin area and their environmental meanings. *Science in China*(D) , 43(3) : 277 ~ 285(in Chinese with English abstract).
- Linsley B K. 1996. Oxygen-isotope record of sea level and climate variations in Sulu sea over past 150 000 years. *Nature* 380 :234 ~ 237.
- Lin Yushi , Zhang Meiliang , Qin Jiaming et al. 2001. The record of paleo-climatic environment in Lugu lake area of Ninglang county , Yunnan. *Carsologica Sinica* , 20(3) :174 ~ 182(in Chinese with English abstract).
- Lu Houyuan , Guo Zhengtang , Wu Naiqin. 1996. Paleo-monsoon evolution and Heinrich events :Evidence from the Loess plateau and the South China sea. *Quaternary Sciences* (1) :11 ~ 20(in Chinese with English abstract).
- Porter S , An Z S. 1995. Correlations between climate events in the North Atlantic and China during the Last Glaciation. *Ibid.* , 375 :305 ~ 308.
- Stuiver M , Grootes P M. 2000. GIPS2 oxygen isotope ratios. *Quaternary Research* 53 :277 ~ 284.
- Schultz H , Rad U , Erlenkeuser H. 1998. Correction between Arabian Sea and greenland climate oscillations of the past 110 000 years. *Nature* 393 :54 ~ 57.
- Wang Yongjin , WU Jiangying , WU Jinquan et al. 2001. Correlation between high-resolution climate records from a Nanjing stalagmite and GRIP ice core during the last glaciation. *Science in China*(D) , 40(1) :14 ~ 21(in Chinese with English abstract).
- Yao Tandong , Thompson L G , Shi Yafeng et al. 1997. The record study of climate change from Guliya ice core since the Last glacial period. *Science in China*(D) , 27(5) :447 ~ 452(in Chinese with English abstract).
- Ye Wei , Dong Guangrong , Yuan Yujiang et al. 2000. Climate instability in the Yili region , Xinjiang during the last glaciation. *Chinese Science Bulletin* 45(17) :1604 ~ 1609.
- Yuan Daoxian , Qin jiaming , Lin Yushi et al. 1999. High resolution paleo-environmental reconstruction up to 200 ,000 years B. P. with speleothems from Guilin. *Guangxi Teachers University Press* , 17 ~ 30(in Chinese with English abstract).
- Zhang Meiliang , Yuan Daoxian , Lin Yushi et al. 1998. Ages and paleo-climatic meanings of a stalagmite from Xianshui cave at Guanyang county , Guilin. *Carsologica Sinica* , 17(4) :311 ~ 318(in Chinese with English abstract).
- Zheng Shuhui , Hou Fagao , Ni Baoling. 1983. Study on stable hydrogen and oxygen isotope in China. *Chinese Science Bulletin* 28(3) :801 ~ 806(in Chinese).