

文章编号: 1000-0550(2007) 01-0131-08

神农架天鹅洞石笋 76~ 58 kaB. P. 时段 DO 事件

刘殿兵 汪永进 陈仕涛

(南京师范大学地理科学学院 南京 210097)

摘要 据神农架高海拔天鹅洞一支石笋 9 个 ^{230}Th 年龄和 332 组氧、碳同位素数据, 建立了 76~ 58 kaB. P. Dansgaard-Oeschger (DO) 事件时间序列, 揭示了深海氧同位素 4 阶段 (M IS4) 东亚季风降水百年尺度变化过程。天鹅洞和葫芦洞石笋、格陵兰 NGRIP 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 对比显示, 天鹅洞记录 DO18 事件暖湿程度相当于深海氧同位素 3 阶段 (M IS3) 水平, 其振幅类似于格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录。起始时间上, 天鹅洞记录 DO18 事件在 710 年 ^{230}Th 测年误差范围内和葫芦洞记录保持一致, 并支持了 NGRIP 冰芯记录对应时标。在全球降温背景下, 如此典型 DO 事件指示了强季风降水过程。70 kaB. P. 左右, 冰芯 DO19 事件至少老于石笋记录约 950 年, 远大于 700 年左右的 ^{230}Th 测年误差, 对老于该时段的冰芯时标需高分辨率地质记录进一步验证。69 09~ 64 64 kaB. P. (DO19 ~ 18) 期间, 冰芯记录的百年尺度峰谷变化和天鹅洞石笋记录一一对应, 反映了低纬热带海洋和北大西洋温盐环流之间耦合作用。

关键词 DO 事件 氧同位素 石笋 神农架

第一作者简介 刘殿兵 男 1972 年出生 博士 自然地理学 E-mail: lhb9921@163.com

中图分类号 P534.63 **文献标识码** A

1 引言

千年尺度气候事件 (Dansgaard/Oeschger 事件, 以下简称 DO 事件) 首次发现于格陵兰冰芯^[1], 随后被证实具有全球意义^[2]。由于格陵兰冰芯年龄模式的不同^[3~5], 在 50kaB. P. 左右, GRIP 和 GISP2 时标相差 3000 年。而老于 50ka B. P. 时段, GISP2 冰芯时标误差达 5%~10%^[4], 超过单个 DO 事件的持续时间^[6,7], 给事件的全球对比及成因机制研究带来困难。依据葫芦洞独立铀系时标^[8], Clemens^[9] 调整了 GISP2 冰芯^[10] DO 事件时标, 谱分析结果与葫芦洞和 GRIP (SFCP 时标^[11]) 的频谱结构一致。进一步证实 GISP2 冰芯年龄模式导致了“1500 年”周期^[12] 假象, 由此提出千年尺度的周期可能由百年尺度的太阳活动引起, 并得到模拟结果的支持^[13]。

M IS3 (60 kaB. P.) 阶段以来, 格陵兰冰芯记录的 DO 事件获得了各类地质记录支持, M IS4 以及更老时段, 受年龄精度和分辨率影响, 冰芯短尺度 DO 事件难以找到其他相应地质记录加以印证。例如, DO18 事件在格陵兰冰芯振幅达 4‰ 持续约 250 年^[3,10,14], 但该快速冷暖转换事件在众多地质记录中并不显著^[15~17], 即便在高分辨率葫芦洞石笋记录中^[8] 也是如此, 对其是否具有全球性尚需要高分辨

率相关记录进一步验证。本文选择发育于黄土高原南缘神农架石笋材料, 通过高精度 U/Th 测年和高分辨率氧同位素分析, 建立了 M IS4 阶段气候变化序列, 识别出 DO18 在神农架地区为极强峰, 并进一步深入讨论了 69 09~ 64 64 kaB. P. (DO19 ~ 18) 期间百年尺度气候过程。

2 研究材料与方法

神农架位于湖北省西部, 平均海拔在 1000 m 以上, 能阻挡北来的冷空气侵入, 且有利于东南季风的深入。所处地区属北亚热带季风区, 年降水量为 1500~ 2000 mm, 季节分配上夏多冬少、春秋介于其间, 常年盛行东南风, 具有典型的东亚季风气候特征^[18]。

本文研究石笋 (编号: SW12) 采自神农架松柏镇天鹅洞。洞口海拔约 1600 m, 石笋生长高度 662 mm。沿生长轴切开抛光后, 可见垂直于生长轴的圆弧状纹层。在抛光面上, 用直径为 0.9 mm 的钻头钻取 U/Th 测年样品, 共获取 9 个铀系年代样 (结果见表 1)。分析仪器为 ICP-MS 测试方法参照^[19~20]。年龄误差为 $\pm 2\sigma$ 测量统计误差, 由美国明尼苏达大学同位素实验室测试。用直径为 0.3 mm 的钻头沿石笋生长中心轴钻取同位素测试样品, 每 2 mm 钻取

1 个样, 共获取 332 个样品。采用碳酸盐自动进样装置与 Finnigan MAT-253 型质谱仪联机测试, 每 9 个样品插一个标准样品 (NBS-19), 分析误差小于 ±

0.1‰, VPDB 标准, 由南京师范大学地理科学学院同位素实验室测试。

表 1 石笋 SW 12 的 ICP-MS 测年结果

Table 1 ICP-MS dating results of stalagmite SW 12

样号	^{238}U $\times 10^{-9} / \text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	^{232}Th $\times 10^{-12} / \text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	$\delta^{234}\text{U}$ 测量值	$\delta^{234}\text{U}$ 初始值	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 活度比	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ $\times 10^{-6} / \text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Age/yBP 未校正年龄	Age/yBP 校正年龄
SW 12-8	233.8 ± 0.3	4825 ± 24	146.9 ± 2.3	173.5 ± 2.7	0.4856 ± 0.0035	389 ± 3	59310 ± 590	58800 ± 640
SW 12-63	265.4544639	277.066546	145.8483154	172.64965	0.48764003	7713.980732	59714.2727	59688 ± 705
SW 12-106	301.6642921	523.21353	154.3458623	185.1109	0.52000514	4950.235223	64352.5296	64310 ± 715
SW 12-406	275.3673594	406.755335	142.9864541	174.51367	0.55032939	6151.416975	70536.2517	70500 ± 862
SW 12-532	359.038077	611.864641	147.3476258	180.13061	0.55589898	5385.850426	71119.9733	71078 ± 771
SW 12-540	242.7471079	394.503442	128.4197929	158.37533	0.5628999	5718.836702	74226.0009	74185 ± 815
SW 12-560	244.2 ± 0.3	3827 ± 18	129.3 ± 1.8	159.6 ± 2.2	0.5673 ± 0.0025	598 ± 4	74960 ± 500	74560 ± 540
SW 12-597	233.2553033	1076.46786	130.2194886	161.40422	0.57376696	2052.765055	76077.3637	75962 ± 1000
SW 12-614	219.9261529	2976.4382	128.1615353	158.93411	0.57476315	701.2004344	76481.6616	76141 ± 1106

$$\lambda_{230} = 9.1599 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}; \lambda_{234} = 2.8263 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}; \lambda_{238} = 1.55125 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$$

$$\delta^{234}\text{U} = \left(\frac{^{234}\text{U}/^{238}\text{U}}{\text{活度比}} - 1 \right) \times 100\%; \delta^{234}\text{U} \text{ 初始值是根据 } ^{230}\text{Th} \text{ 年龄获得, 即 } \delta^{234}\text{U}_{\text{初始值}} = \delta^{234}\text{U}_{\text{测量值}} \times e^{234 \times T};$$

校正 ^{230}Th 年龄假设初始的 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 原子比为 $4.4 \pm 2.2 \times 10^{-6}$ 。

3 结果

从表 1 可见, 石笋 SW 12 实测 9 个 U/Th 年龄, 生长时段覆盖 58.8~76.1 kaBP, 发育于 MIS4 阶段。笋体轴心上下垂直, 显示滴水中心稳定, 示滴水点未发生显著偏移。从顶部至距顶 532 mm 层段发育于 58.8~71 kaBP, 石笋抛光面呈均匀的蛋青色, 岩性相对均一, 沉积连续。距顶 532 mm 以下, 相距 8 mm 两个测年点 (SW 12-532, SW 12-540) (图 1), 实测年龄相差 3100 年 (71~74 kaBP), 测年误差分别为 ±770 年、±810 年, 石笋抛光面岩性特征表现为两条暗黄色条带, 说明该期石笋停止发育 3100 ± 1580 年。间断面下部呈浅褐色, 岩性致密, 纹层水平分布, 生长速率慢。

间断面 (532 mm) 以上, 实测 5 个年龄, 最大误差 0.86 ka, 最小误差 0.64 ka, 以下实测 4 个年龄, 最大误差 1.1 ka, 最小误差 0.54 ka。

石笋实测 332 组氧、碳同位素数据, 样点平均分辨率为 44 年。由图 1 可见, 石笋发育时段, $\delta^{18}\text{O}$ 在 -10.95‰ ~ -7.65‰ 范围内波动, 变幅达 3.5‰。参照格陵兰冰芯记录 DO 事件^[3]起始时间、持续长短及振幅等特征, 在图 1 中标出了石笋相应的 DO 事件 (DO17~20)。各事件相邻峰谷变化达 3‰, 四个峰

值都在 -10‰ 以上, 最大相差约 0.7‰。受发育时段和沉积间断影响 DO19, DO20 峰形不完整, 部分信息缺失。

天鹅洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值 -9.2‰, 葫芦洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值 -7.8‰, 两地纬度差异小 (天鹅洞 31°46'N, 葫芦洞 32°N), 海拔差异大 (天鹅洞 1600 m, 葫芦洞 139.8 m)。受降水海拔和大陆效应影响^[21], 天鹅洞在整体上比葫芦洞偏负 1.4‰。两地石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的 DO 事件, 在峰形和振幅上具有良好的对应关系: (1) 四个测年点控制的天鹅洞石笋 DO20 事件和葫芦洞石笋对应记录都表现为“两峰一谷”结构, 峰谷振幅超过 1.5‰。这种“马鞍状”结构类似低纬热带大洋 Cariaco 盆地的沉积物色度反射比值记录^[22]。(2) SW 12 DO19~17 有五个测年点控制, 其中, DO19~18 期间, $\delta^{18}\text{O}$ 表现为阶梯式负向漂移; DO18~17 期间, 此时, 正值 H6 事件期间^[23], $\delta^{18}\text{O}$ 表现为缓慢正偏。指示神农架地区夏季风强度^[8]阶梯式推进和缓慢撤退过程。(3) DO17 事件期间, 两地石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 同时快速负偏, 峰谷振幅达 2.7‰, 进入 MIS3 阶段。DO18 事件两地记录略有不同: SW 12 的峰谷振幅达 1.5‰, 峰形显著, 暖湿强度接近 MIS3 阶段水平; 而葫芦洞对应振幅仅为 0.39‰, 表现为弱峰, 不甚显著。

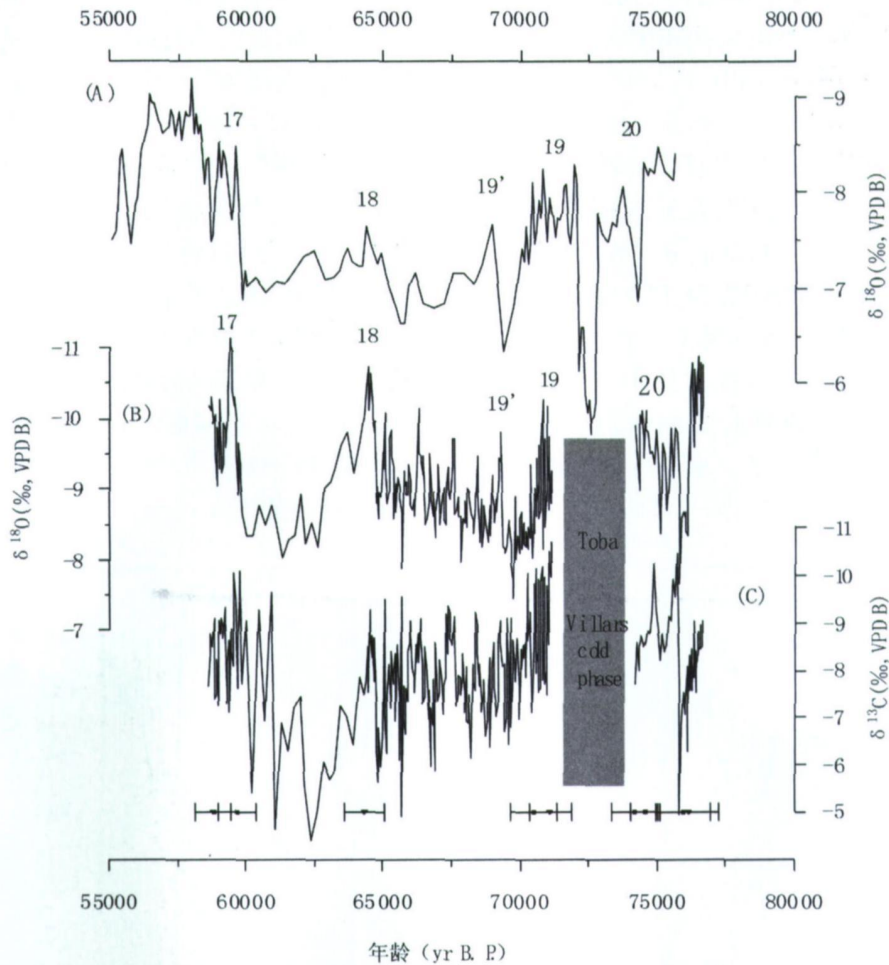


图 1 天鹅洞石笋 SW 12 和葫芦洞石笋 MSL 稳定同位素对比

(A) 石笋 MSL $\delta^{18}O$; (B) 石笋 SW 12 $\delta^{18}O$; (C) 石笋 SW 12 $\delta^{13}C$ 。图中阴影部分为沉积间断, 对应于 Toba 火山事件, 类似于法国石笋 Villars 冷事件。数字标注 DO 事件, 其中 19 指 DO18 和 DO19 之间的无名峰。底部给出各测年点误差范围。

Fig 1 Comparison between stable isotopes of stalagmite SW 12 Tian' e Cave and stalagmite MSL Hulu Cave

(A) stalagmite MSL $\delta^{18}O$ (B) stalagmite SW 12 $\delta^{18}O$ (C) stalagmite SW 12 $\delta^{13}C$. The shaded area represents a hiatus corresponding to Toba event and is similar to Villars cold phase from a stalagmite in France. Numbers represent DO events, in which 19 represents the anonymous peak between DO 18 and DO 19. Dating error bars are labeled below.

$\delta^{13}C$ 与 $\delta^{18}O$ 呈现峰谷对应关系。 $\delta^{13}C$ 波动范围为 $-4.38\text{‰} \sim -10.71\text{‰}$, 变幅达 6.33‰ 。在波形振荡特征上, 与 $\delta^{18}O$ 峰谷具有良好对应关系, 呈正相关变化。 $\delta^{18}O$ 与 $\delta^{13}C$ 在 DO20 同时出现“两峰一谷”振荡形式, 而在历经 3100 年 (74.1~71 kaB. P.) 的生长中断过后, 逐步阶梯式负向漂移, 直至 DO18 峰值。两者之间较大的差别在 DO18~17 期间, $\delta^{18}O$ 正偏的幅度较小, $\delta^{13}C$ 正偏的幅度较大。

4 讨论

4.1 天鹅洞石笋 DO 事件时标

天鹅洞石笋在距顶 532mm 以上层段, 沉积连续, 且测年点较多, 适于采用内插法建立石笋时标。经内插, 我们获得了实测年龄样点间平均沉积速率和不同

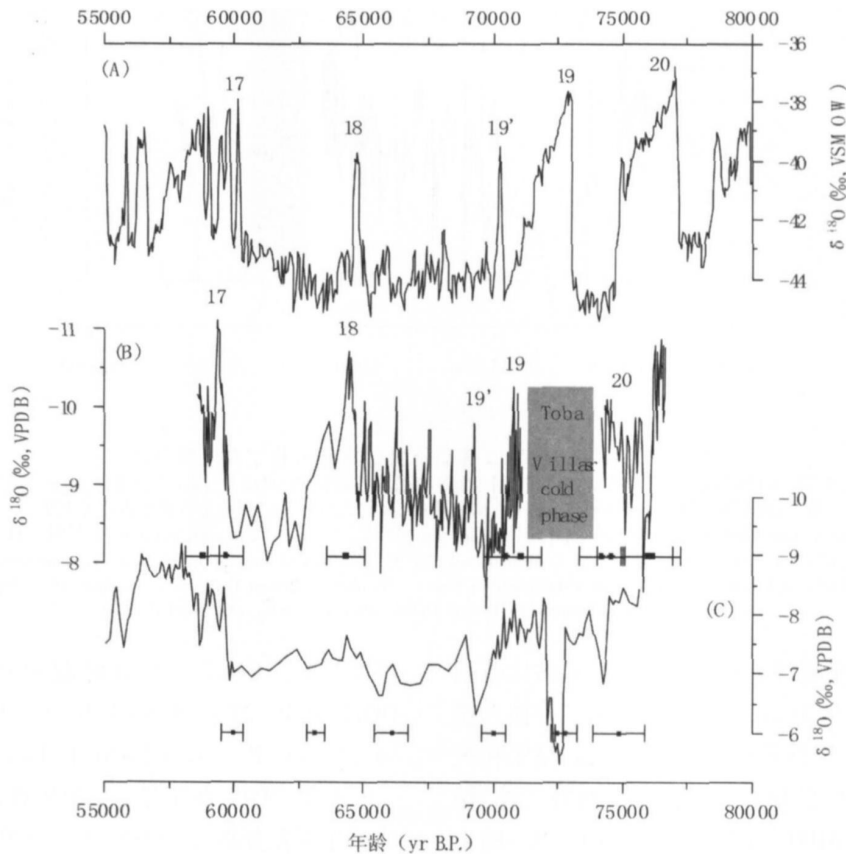
深度年龄。DO17~19 各峰起始和结束时间如下: DO17 为 59.27~59.68 kaB. P.; DO18 约 64.09~64.64 kaB. P.; DO19 约 70.45 kaB. P.~?

石笋 DO17 事件有两个测年点控制 (图 2), 相应的测年误差分别为: ± 640 年、 ± 700 年。其起始时间 (59.68 kaB. P.) 与葫芦洞相应记录 (59.72 kaB. P.) 一致, NGRIP 冰芯相应记录 (59.9 kaB. P.) 偏老约 180 年。而 GISP2 (58.3 kaB. P.)^[10] 和 GRIP (57.2 kaB. P.)^[3] 冰芯相应记录分别偏年轻 1300 年、2500 年。石笋 DO17 年龄支持了 NGRIP 冰芯对应事件时标^[5]。DO19~18 期间有三个实测年龄点, 其中有两个年龄点 (64.3 ± 0.71 kaB. P.; 70.5 ± 0.86 kaB. P.) 位于两峰的结束时段。抛光面显示, 岩性相对均一, 沉积连续, 生长速率为 48.5 mm/ka 与整体平均

水平 46 5mm/ka 一致,说明此时石笋生长稳定。石笋 DO18 起始时间、峰谷振幅和 NGRIP 冰芯良好对应:石笋起始时间为 64 64 kaB. P., 对应的 NGRIP 冰芯记录约 64 72 kaB. P.。石笋 DO18 振幅达 1.5‰, 峰值接近 DO17 水平;冰芯相应峰谷振幅达 4.2‰。葫芦洞同期峰谷变化不甚显著,但对应的峰值时标(64 37 kaB. P.)和天鹅洞记录一致。可见,天鹅洞石笋 DO18 事件,在峰谷振幅上类似于 NGRIP 冰芯;起始时间和葫芦洞石笋保持一致,并证实了 NGRIP 冰芯 DO18 时标的可靠性。在 MIS4 阶段全球降温背景下,如此显著季风降水变化反映了海陆之间水汽传输维持在较高的水平。来自低纬热带大洋 Cariaco 盆地的有机碳总量^[22]、太平洋暖池西部的有

孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ ^[24] 记录显示, DO18 在低纬热带海洋表现为显著振幅,支持了天鹅洞石笋记录。说明在百年尺度上,东亚季风与低纬热带海洋变化具有相关性。

距顶 532~540 mm 层段(实测年龄为 74 1~71 kaB. P.), 天鹅洞石笋抛光面岩性存在显著沉积间断。此时,正值第四纪以来最大 Toba 火山喷发事件^[25~26]。巨大的喷发物至少覆盖全球 1% 的面积^[27],GISP2 冰芯显示^[28],火山喷发的“阳伞效应”造成持续 1000 年的显著降温,势必降低海陆热力对比,减弱东亚夏季风活动,造成高海拔洞穴石笋发育的中断。该沉积间断,大致对应于葫芦洞 72 7~72 kaB. P. 干事件^[8],或类似于法国西南洞穴石笋的 Villars 冷事件^[17]。



(A) NGRIP $\delta^{18}\text{O}$, (B) SW 12 $\delta^{18}\text{O}$, (C) MSL $\delta^{18}\text{O}$

图 2 石笋 SW 12 MSL 和 NGRIP 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 对比

Fig 2 $\delta^{18}\text{O}$ comparison between stalagmite SW 12 MSL and NGRIP ice core

受距顶 532~540 mm 沉积间断影响,天鹅洞石笋 DO19 事件起始时间无法确定,但 NGRIP 冰芯 DO19 和 20 之间的冷谷显著老于两地石笋记录。葫芦洞 DO19 有两个实测年龄控制(70 05 \pm 0.46 kaB. P.; 72 49 \pm 0.25 kaB. P.), 而天鹅洞石笋在 DO19

结束时段也有两个年龄控制(70 5 \pm 0.86 kaB. P.; 71 07 \pm 0.77 kaB. P.)。在 DO19 事件起始时间上,NGRIP 记录老于葫芦洞相应记录 950 \pm 710 年。DO19 事件结束时间在天鹅洞记录为 70 45 kaB. P., 葫芦洞为 70 05 kaB. P., 在测年误差范围内保持一

致, 而 NGR IP 冰芯为 71.55 kaB. P., 分别老于两地记录 1100 年和 1500 年, 远大于石笋测年误差范围, 支持了葫芦洞石笋和 NGR IP 冰芯的 DO19 起始时间对比结果。NGR IP 冰芯的 DO19 至少老于东亚季风区相应记录 950 ± 710 年。

可见, DO18 以来, 季风区石笋和高北纬 NGR IP 冰芯记录的 DO 事件具有良好的对应关系。而老于 DO19 (约 70 ka B. P. 以前), 季风区和高北纬冰芯记录存在显著差异。NGR IP 冰芯 DO 事件时标, 在老于 70 ka B. P. 时段尚需要独立定年、沉积连续高分辨率的地质记录验证。

4.2 百年尺度气候变率的遥相关

DO18~17 期间 (59.68~64.09 kaB. P.), 天鹅洞石笋在 $\delta^{18}\text{O}$ 波动趋势上, 和冰芯相差很大 (图 2): 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 由 -10.72% 缓慢上升至 -8.03% , 然后突然下降至 -11.11% , 进入 MIS3 峰谷振幅达 2.7% ; 而冰芯记录则突然从 -40.07% 下降到 -44.7% , 然后缓慢上升到 -43.27% , 再突然上升进入 MIS3。

DO19 结束时段, 石笋和冰芯记录存在一典型无名峰, 本文命名为 DO19' 事件。DO19'~18 期间 (64.64~69.09 kaB. P.), 天鹅洞石笋和极地 NGR IP 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$, 在趋势上差异显著 (图 3)。石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 表

现为缓慢偏负, 而冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 则稳定在均值为 -44% 上下波动。其间, 冰芯记录叠加四次显著峰谷振荡, 各峰历时 150~350 年, 振幅达 $1.6\% \sim 1.9\%$, 各峰之间平均相隔 1000 年, 构成三次千年尺度的峰谷旋回。相同时段, 天鹅洞石笋在负向漂移的趋势上, 叠加了四次历时达 120~330 年、振幅达 $1\% \sim 1.6\%$ 峰谷变化, 各峰起始和结束相对时间为: 65.17~65.34 kaB. P.; 66.16~66.49 kaB. P.; 67.44~67.65 kaB. P.; 68.31~68.47 kaB. P., 平均相隔时间与冰芯一致。冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正指示格陵兰气温升高^[29], 此时, 东亚夏季风环流强度增强^[8,30], 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负。在 MIS4 阶段, 东亚季风和格陵兰冰芯之间百年尺度的峰谷对应关系在其他记录中尚未揭示。

图 3 显示, NGR IP 冰芯各暖峰平均老于石笋对应峰约 600 年左右。在百年尺度上, NGR IP 冰芯和天鹅洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化虽不同步, 但存在很强的相关性。DO19~18 时段, 天鹅洞石笋岩性相对均一, 沉积连续, 其间石笋冰段、间冰段年龄基于平均沉积速率内插获得。冰芯时标相对于石笋记录这种系统偏差, 也许是较老时段冰芯冰流模式时标造成, 或石笋内插时标依赖的相邻实测年龄点误差导致。

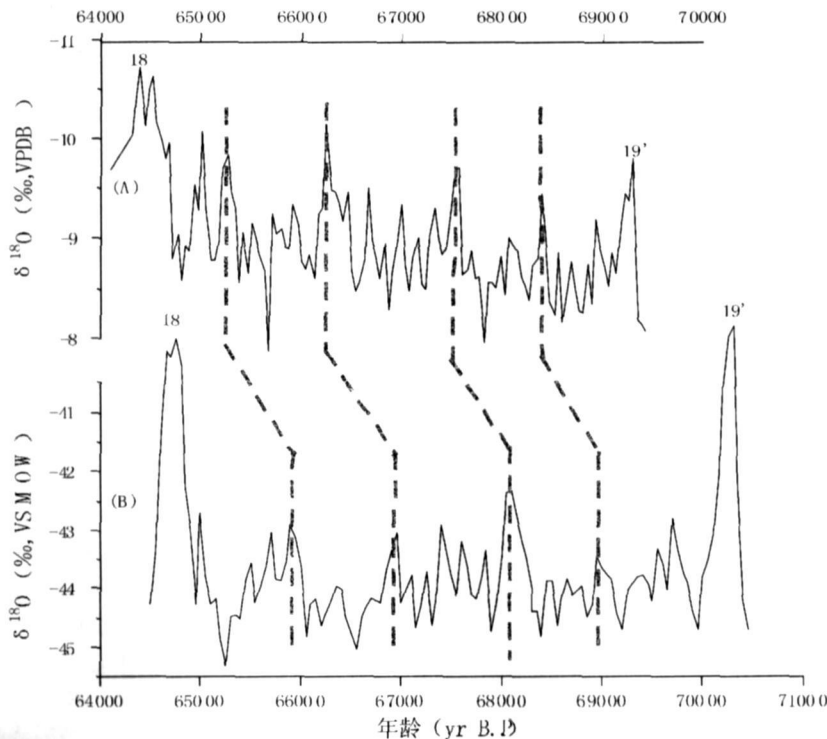


图 3 天鹅洞石笋和 NGR IP 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 对比

Fig 3 Comparison between $\delta^{18}\text{O}$ of stalagmite SW 12, Tian'e Cave and NGR IP ice core

东亚季风区千年尺度 DO 事件与高北纬联系已得到众多记录支持^[31-34], 天鹅洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 百年尺度峰谷振荡和高纬具有一致性, 但千年尺度的趋势上与冰芯存在差异。百年尺度太阳辐射与千年气候周期之间的联系得到谱分析结果的支持^[9], 也得到模拟结果证实^[13]。石笋 SW 12 间断面以上部分 $\delta^{18}\text{O}$ 谱分析显示 (图 4), 在 95% 置信度水平上, 出现 286 年, 213 年, 179 年, 106 年显著周期成分, 对应于 88 年太阳辐射周期^[35], 大气剩余 ^{14}C 产率 ($\Delta^{14}\text{C}$) 200 年^[36]。从洞穴石笋同位素形成机理看, 其同位素组成主要反映当地大气降水同位素组成变化^[37]。热带大洋, 特别是西太平洋暖池, 是东亚季风水汽的主要源地, 影响东亚季风区的水圈平衡^[38]。低纬百年尺度的太阳辐射变化, 导致海面温度变化达 5°C 左右^[39], 通过海—气系统作用, 引起高纬环境的显著变化^[40]。在 DO 19' ~ 18 期间, 天鹅洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与高、低纬这种对应关系, 说明低纬热带海洋水汽循环对东亚季风影响显著, 然而, 叠加其上的千年尺度夏季风降水趋势可能与北大西洋温盐环流等因素有关^[8]。

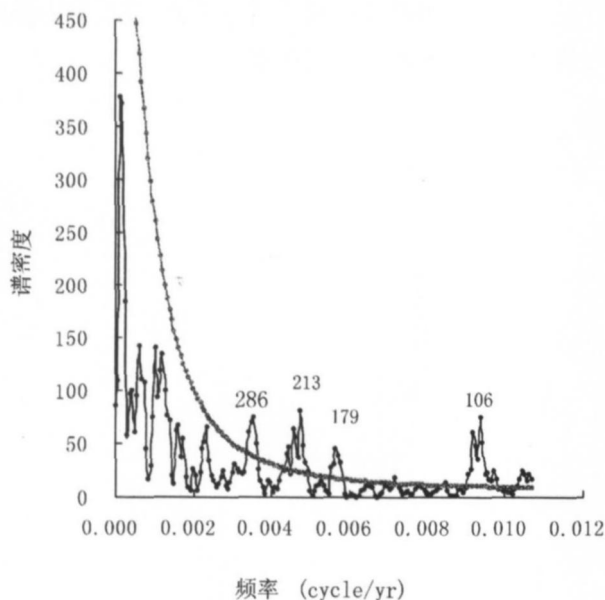


图 4 石笋 SW 12 氧同位素谱分析

Fig 4 Spectral analysis for stalagmite SW 12 $\delta^{18}\text{O}$.

The curve represents 95% confidence level

5 结论

76 ~ 58 ka B. P. 期间, 天鹅洞和葫芦洞石笋、NGR IP 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 对比显示, DO 18 事件在起始时间、峰形振幅上, 东亚季风和极地记录良好对应。石笋记

录的显著 DO 18 事件表明, 在 MIS 4 阶段全球降温背景下, 海陆间水汽输送应维持在较高水平, 达到 MIS 3 阶段暖湿程度。70 ka B. P. 以前, NGR IP 冰芯 DO 19 事件老于季风区记录至少 950 年。细节对比显示, 东亚季风降水与格陵兰气温变化百年峰谷振荡保持一致, 但千年尺度趋势存在差异。反映了低纬热带海洋海—气耦合作用^[24-38], 也可能受到北大西洋温盐环流的影响^[8]。

参考文献 (References)

- 1 Johnsen S J, Clausen H B, Dansgaard W, *et al*. Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core. *Nature*, 1992, 359: 311 ~ 313
- 2 Clark P U, Webb R S, Keigwin L D, eds. Mechanisms of Global Climate Change at Millennial Time Scales. Vol. 112 of Geophysical Monograph Series (American Geophysical Union, Washington, DC, 1999)
- 3 Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, *et al*. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 1993, 364: 218 ~ 220
- 4 Meese D A, Gow A J, Alley R B, *et al*. The Greenland ice sheet project 2 depth-age scale methods and results. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 26411 ~ 26423
- 5 Johnsen S J, Dahl-Jensen D, Gundestrup N, *et al*. Oxygen isotope and paleotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye-3, GRIP, GISP2, Renland and North GRIP. *Journal of Quaternary Science*, 2001, 16: 299 ~ 307
- 6 Bender M, Sowers T, Dickson M, *et al*. Climate teleconnections between Greenland and Antarctica throughout the last 100,000 years. *Nature*, 1994, 372: 663 ~ 666
- 7 Lang C, Leuenberger M, Schwander J, *et al*. 16C rapid temperature variations in Central Greenland 70000 years ago. *Science*, 1999, 286: 934 ~ 937
- 8 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, *et al*. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, 2001, 294: 2345 ~ 2348
- 9 Clemens S C. Millennial-band climate spectrum resolved and linked to centennial-scale solar cycles. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24: 521 ~ 531
- 10 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: 552 ~ 554
- 11 Shackleton N J, Fairbanks R G, Chiu Tzu-chien, *et al*. Absolute calibration of the Greenland time scale: implications for Antarctic time scales and for $\delta^{14}\text{C}$. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23: 1513 ~ 1522
- 12 Schulz M. On the 1470-year pacing of Dansgaard-Oeschger warm events. *Paleoceanography*, 2002, 17(4): 1 ~ 10
- 13 Braun H, Christl M, Raimstorf S, *et al*. Possible solar origin of the 1470-year glacial climate cycle demonstrated in a coupled model. *Nature*

- ture 2005, 480: 208~ 211
- 14 North Greenland Ice Core Project members. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, 2004, 431: 147~ 151
 - 15 Bar-Matthews M., Ayalon A., Kaufmann A. Timing and hydrological conditions of sapropel events in the Eastern Mediterranean as evidence from speleothem, Soreq Cave. *Chemical Geology*, 2000, 169: 145~ 156
 - 16 Shackleton N. J., Hallam A. Phase relation between millennial-scale events 64000-24000 years ago. *Paleoceanography*, 2001, 15: 565~ 569
 - 17 Genty D., Blamart D., Ouahdi R., *et al.* Precise dating of Dansgaard/Oeschger climate oscillations in western Europe from stalagmite data. *Nature*, 2003, 421: 833~ 837
 - 18 朱兆泉, 宋朝枢. 神农架自然保护区科学考察集. 北京: 中国林业出版社, 1999: 38~ 41 [Zhu Zhaoquan and Song Chaoshu. Overview on Shennongjia Nature Reserve. Beijing: Forestry Publishing Company China, 1999: 38~ 41]
 - 19 Shen Chuanchen, Edwards L. R., Cheng H. Uranium and thorium isotopic and concentration measurements by magnetic sector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Chemical Geology*, 2002, 185: 165~ 178
 - 20 王兆荣, 彭子城, 孙卫东, 等. 高精度热电离质谱 (TMS) 铀系法洞穴沉积物 (石笋) 年龄的研究. *沉积学报*, 2000, 18(1): 162~ 164 [Wang Zhaorong, Peng Zicheng, Sun Weilong, *et al.* Timing on cave deposit (stalagmite) by high-resolution thermal ionization mass spectrometry (TMS). *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(1): 162~ 164]
 - 21 Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 1964, 16(4): 436~ 468
 - 22 Peterson L. C., Haug G. H., Hughen K. A., *et al.* Rapid changes in the hydrologic cycle of the tropical Atlantic during the Last Glacial. *Science*, 2000, 290: 1947~ 1951
 - 23 Bond G., Broecker W., Jansen S., *et al.* Correlation between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*, 1993, 365: 143~ 147
 - 24 Stott L., Poulsen C., Lund S., *et al.* Super ENSO and global climate oscillations at millennial time scales. *Science*, 2002, 297: 222~ 226
 - 25 Chesner C. A., Rose W. I., Deino A., Drake R., Westgate J. A. Eruptive history of Earth's largest Quaternary caldera (Toba, Indonesia) clarified. *Geology*, 1991, 19: 200~ 203
 - 26 Bühring C., Samthein M. Toba ash layers in the South China Sea: Evidence of contrasting wind directions during eruption ca. 74 ka. *Geology*, 2000, 28: 275~ 278
 - 27 Rose W. I., Chesner C. A. Worldwide dispersal of ash and gases from earth's largest known eruption: Toba, Sumatra, 75 ka. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 1990, 89: 269~ 275
 - 28 Zielinski G. A., Mayewski P. A., Meeker L. D., *et al.* Potential atmospheric impact of the Toba mega-eruption, 71,000 years ago. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23: 837~ 840
 - 29 Dansgaard W., Clausen H. B., Gundestrup N., *et al.* A new Greenland deep ice core. *Science*, 1982, 218: 1273~ 1277
 - 30 程海, 艾思本, 王先锋, 等. 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 Hai, Edwards R. L., Wang Xianfeng, *et al.* Oxygen isotope records of stalagmites from southern China. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2): 157~ 163]
 - 31 Porter S. and An Z. S. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature*, 1995, 375: 305~ 305
 - 32 姚檀栋. 末次冰期青藏高原的气候突变—古里雅冰芯与格陵兰 GRIP 冰芯对比研究. *中国科学 (D 辑)*, 1999, 29(2): 175~ 184 [Yao Tandong. Abrupt changes on the Tibetan Plateau during the Last Ice Age—Comparative study of the Guliya ice core with the Greenland GRIP ice core. *Science in China*, 1999, 42(4): 358~ 368]
 - 33 汪永进, 吴江滢, 吴金全, 等. 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*, 2000, 30(5): 533~ 539 [Wang Yongjin, Wu Jiangying, Wu Jinquan, *et al.* Correlation between high-resolution climate records from a Nanjing stalagmite and GRIP ice core during the last glaciation. *Science in China*, 2001, 44(1): 14~ 23]
 - 34 丁仲礼, 任剑璋, 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. *中国科学 (D 辑)*, 1996, 26(5): 385~ 391 [Ding Zhongli, Ren Jianzhang, Liu Dongsheng, *et al.* Irregularly millennial-scale variations and the mechanism of monsoon-desert system during Late Pleistocene. *Science in China (Series D)*, 1996, 26(5): 385~ 391]
 - 35 Peristykh A. N., Danon P. E. Persistence of the Gleisberg 88-year solar cycle over the last ~ 12,000 years: Evidence from cosmogenic isotopes. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108: 1003, doi: 10.1029/2002JA009390
 - 36 Stuiver M., and Braziunas T. F. ^{14}C Ages of Marine Samples to 10,000 BC. *Radiocarbon*, 1993, 35(1): 137~ 189
 - 37 Bar-Matthews M., Ayalon A., Matthews A., *et al.* Carbon and oxygen isotope study of the active water-carbonate system in a karstic cave: implications for paleoclimate research in semiarid regions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60: 337~ 347
 - 38 Lea D. W., Pak D. K., Spemann H. J. Climate impact of Late Quaternary equatorial Pacific sea surface temperature variations. *Science*, 2000, 289: 1719~ 1724
 - 39 Hendy I. L., Kennet J. P. Latest Quaternary North Pacific surface-water responses imply atmosphere-driven climate instability. *Geology*, 1999, 27(4): 291~ 294
 - 40 Hu F. S., Kaufmann D., Yoneji S., *et al.* Cyclical variation and solar forcing of Holocene climate in the Alaskan subarctic. *Science*, 2003, 301: 1890~ 1893

DO Events During 76~ 58 kaB. P. from a Stalagmite in Tian' e Cave, Shennongjia Area

LU Dian-bing WANG Yong-jin CHEN Shi-tao

(College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097)

Abstract An oxygen-isotope record of a thorium-uranium-dated stalagmite from Tian' e Cave at Shennongjia reflects variation of the East Asian monsoon during the period from 76 to 58 kaB. P. The high-resolution (40-yr) $\delta^{18}\text{O}$ record displays a centennial-scale variability of the monsoonal precipitation during MIS4. Comparison between stalagmite SW 12, Tian' e Cave, stalagmite MSL, Hulu Cave and NGRIP ice core shows that moisture intensity of Tian' e Cave DO18 event reaches that during MIS3, with an amplitude similar to the counterpart in polar record. The initiation timing of DO18 event, Tian' e Cave is consistent with that in Hulu Cave within the dating error, and further confirmed the age of polar DO18 event. Such a strong peak reveals a period of strengthened summer monsoon under a decrease in global temperature during MIS4. Before 70 kaB. P., DO19 event in ice core is older than the counterpart in Asian monsoon at least by 950 years, which is far beyond ^{230}Th dating error of about 700 years. During 69.3~ 64.4 kaB. P. (DO19'-18), centennial oscillations in ice core are an analogy to those of stalagmite SW 12, suggesting an interaction of tropical sea and North Atlantic thermohaline.

Key words DO event; oxygen isotope; stalagmite; Shennongjia