论文

末次冰消期亚洲季风突变事件的精确定年: 以贵州衙门洞石笋为例

杨琰^{①②*}, 袁道先^{①②}, 程海^③, 张美良^②, 覃嘉铭^②, 林玉石^②, 朱晓燕^②,
R. Lawrence EDWARDS^③

① 西南大学地理科学学院, 重庆 400715;

② 中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004;

③ Department of Geology and Geophysics, University of Minnesota, MN 55455, USA

* E-mail: yy2954@gmail.com

收稿日期: 2009-02-16; 接受日期: 2009-10-27

国家自然科学基金(批准号: 40231008, 40902053, 90511004, 40672165, 40772216)、美国国家自然科学基金(批准号: 052535)、西南大学科技基金(编号: SWUB-2008047)、国土资源部岩溶动力学重点实验室开放基金(编号: 2006-05)和国土资源部地质调查项目(编号: 1212010634805)资助

摘要 通过贵州衙门洞 Y1 石笋 33 个 U/Th 年龄和 1020 个氧同位素数据的分析, 重建了西南地区末次冰消期至全新世早期(16.2~7.3 ka BP)平均分辨率达 9 a 的亚洲夏季风演化特征. 该时段发生的气候突变事件, 在 Y1 石笋记录中得到明显揭示, 类似格陵兰冰芯记录的 GI-1e~GI-1a 事件(GIS)可以定义末次冰消期亚洲季风突变事件的中国基准(CIS)为 A.1e~A.1a, Y1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值记录这些事件的开始时限分别为: (14750 ± 50) , (14100 ± 60) , (13870 ± 80) , (13370 ± 80) 和 (12990 ± 80) a BP; A.1a 结束进入 YD 事件为 (12850 ± 50) a BP, YD 结束进入全新世为 (11500 ± 40) a BP, 其中 BA 转换(A.1e 开始)和 YD 转换前后 $\delta^{18}\text{O}$ 值有 3‰ 的变幅. Y1 记录区域对比表明亚洲季风在早全新世期间总体增强的趋势在各地并没有显著的相位差异, 因而不支持东亚和印度季风在轨道尺度上的反相位关系. Y1 记录支持近 10 年来石笋研究的结果, 即亚洲季风气候变化的驱动机制除了主导的太阳辐射、大西洋径向环流(MOC)及热带辐合带(ITCZ) 运移外, 短尺度上的季风变化和太阳活动密切相关.

关键词石笋
亚洲季风
末次冰消期
全新世
铀系法定年
衙门洞

理解全球气候变化的关键之一就是充分地掌握过去全球气候变化的规律. 各种地质记录研究表明在第四纪时期存在众多气候变化事件, 包括许多时间尺度在百年至十年间突变事件^[1~5]. 尤其是 10 万年周期性的冰期向间冰期的转变, 即冰期终止点前后的气候变化规律, 受到广泛的关注^[3]. 近几十年来, 学者们利用海洋沉积^[6~18]、冰芯^[19~28]、黄土^[4,29~30]、湖

泊沉积^[31~37]、树轮^[38]、洞穴沉积^[5,39~60]等地质记录在距今最近的冰期终止点 I 前后的古气候研究领域取得很多成果, 特别是近年来在利用洞穴石笋记录研究古季风演化方面有了实质的进展^[39~41,44,49,55~59]. 但具有连续的高分辨 (<10 a) 和高精度定年(数十年际尺度)的气候记录尚不多, 对于冰期终止点 I 前后的气候事件记录的特征以及触发机制也还存在争议. 此

引用格式: Yang Y, Yuan D X, Cheng H, et al. Precise dating of abrupt shifts in the Asian Monsoon during the last deglaciation based on stalagmite data from Yamen Cave, Guizhou Province, China. *Sci China Earth Sci*, 2010, doi: 10.1007/s11430-010-0025-z

外, 东亚季风在早全新世的变化是否存在空间上的相位不同^[4,35]? 其数十年际的气候事件是否有区域意义? 进一步东亚季风与印度季风有无相位上的差异^[34]? 也有待深入探讨. 本文基于受东亚季风和西南季风双重影响地区中的黔南衙门洞 Y1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的对比分析, 重建 16.2~7.3 ka BP 连续的平均分辨率达 9 年的亚洲夏季风气候演化特征, 并且在精确 ^{230}Th 定年的基础上, 着重讨论上述时段内古气候的两次重要转换(BA 转换和 YD 转换)和早全新世的季风变化特征和事件时间. 由于衙门洞 Y1 记录具有高精度年代尺标和高分辨率的特点, 其对于在这一重要时段中全球气候变化的精确对比, 以及由此探讨高或低纬度驱动机制^[11,14,18]和南北半球对比^[55,56]等重要科学问题都将有潜在意义.

1 材料和方法

本文进行古气候重建的 Y1 石笋样品采集于贵州省荔波县衙门洞(107°54'E, 25°29'N), 该洞位于荔波县董歌洞 (108°5'E, 25°17'N) 西北约 30 km, 董歌洞石笋记录研究已取得令人瞩目的成果^[44~49,58], 两个洞穴同时期生长的石笋样品可以进行平行对比. 研究区位于云贵高原台地斜坡地带黔南茂兰自然保护区, 该地区受亚洲季风两个子系统东亚季风和西南印度季风的双重影响, 衙门洞石笋高分辨率记录可以起到揭示东亚季风和西南印度季风演化上有何异同的桥梁作用.

Y1 石笋长度为 310 cm, 本文主要讨论该石笋生长最快的距顶部 1040 mm 以来的区段, 关于洞穴特征以及该样品更详尽的岩性、沉积旋回及生长速率的分析可参考文献[5, 61]. 本研究采用的铀系定年仪器为 Finnigan Element 型单接收电感耦合等离子体质谱(SC-ICP-MS)和 Finnigan Neptune 型多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICP-MS), U-Th 化学处理在美国明尼苏达大学地质与地球物理系地球化学超静实验室中完成, 具体操作方法及仪器特征见文献[61~63]. 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 分析在两个同位素实验室完成, 均采用磷酸法生成 CO_2 后输入质谱分析, 第一次在中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室用 MAT-252 型质谱(带碳酸盐自动进样装置, Kiel III 型)初步测试 104 个样品, 第二次在西南大学地球化学与同位素实验室用 Delta-V-Plus 型质谱(带碳酸盐自动进样

装置, Kiel IV 型), 0.5 或 1.0 mm 间隔牙钻加密采样, 测试 1006 个样品, 两次相同位置重复采样的测试结果一致, 两实验室的标准控制样的多次分析的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏差<0.1‰, 石笋平行样品的分析<0.2‰ (2 σ), 结果均相对于 VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite)标准.

2 结果

表 1 列出了 Y1 石笋的 ^{230}Th 测年数据(文中 BP 表示距公元 1950 年以前), 图 1 为石笋生长高度与年代的关系, 研究区段共 33 个数据(表 1), 其中 Y1B-1~Y1B-17 为 2009 年 2 月补充的 17 个样品, 采用 Neptune 型 MC-ICP-MS 测试, 年龄的计算采用新的明尼苏达大学(2009)年代标准及半衰期系数; 其余 16 个样品于 2005 年采用 Element 型 SC-ICP-MS 仪器测试, 这些年龄的计算采用老的明尼苏达大学(2000)年代标准及半衰期系数^[63]. 每个年龄数据采集按沉积旋回特征选取, 除 Y1-31 样品测试误差较大其余数据都按石笋由老到新的正常沉积特征变化, 不存在年龄倒序问题; 但鉴于 2009 年补测样品测试精度较高, 所以年代标尺建立主要采用新的 17 个结果并结合 Y10*, Y1-34 和 Y1-23 结果共设置 20 个年龄控制点, 通过线性内插方法建立 Y1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的时间变化序列(图 2).

图 2 为 Y1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(16.2~7.3 ka BP)与 25°N 夏季(6~8 月)太阳辐射曲线的对比, $\delta^{18}\text{O}$ 曲线的变化趋势与太阳辐射强度呈总体上的正相关关系, 并且迭加了许多千年到数十年际尺度的气候事件. Y1 记录比较完整地记录了发生在末次冰消期至全新世早期的重要气候转换和多次气候突变事件(H1, BA, YD). 衙门洞 Y1 石笋研究区段为 16.2~7.3 ka BP (图 2), 持续~8900 年, Y1 记录由 1020 个氧同位素数据构成, 平均分辨率为 9 a; $\delta^{18}\text{O}$ 值在 -5.3‰~-10.0‰间波动, 相差 4.7‰, 平均值为-8.2‰. 在 Y1 记录中, H1 冷事件发生于~16.0 ka BP. 记录中的波令-阿勒罗德事件(Bølling-Allerød 事件, 简称 BA 事件)及其转换(transition into the BA, 简称 t-BA) (14750~12850 a BP)具有 2~8 a 分辨率(平均 5.5 a); $\delta^{18}\text{O}$ 值在-6.7‰~-9.1‰间波动, 平均值为-8.1‰. 记录中的新仙女木事件(Younger Dryas 事件, 简称 YD 事件)及其转换(12850~11500 a BP)具有 3~10 a 分辨率(平均 6 a); $\delta^{18}\text{O}$ 值在-6.4‰~-8.8‰间波动, 平均值为-7.5‰.

图1 Y1 石笋生长高度与年代关系图

图2 16.2~7.3 ka BP Y1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与 25°N 夏季太阳辐射曲线对比

表 1 Y1 石笋 ^{230}Th 年龄结果一览表^{a)}

样品号	距石笋顶 (mm)	^{238}U ($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$)	^{232}Th ($\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$\delta^{234}\text{U}$ (测量值)	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ (放射性比)	^{230}Th 校正年龄 (a BP)
Y10	0	61.8 ± 0.2	1020 ± 20	1785 ± 7	0.1836 ± 0.0032	7230 ± 160
Y1-36	3	47.5 ± 0.1	290 ± 10	1776 ± 6	0.1894 ± 0.0027	7600 ± 120
Y1B-1	20	63.4 ± 0.1	172 ± 3	1770 ± 2	0.2272 ± 0.0005	9160 ± 30
Y1B-2	50	87.8 ± 0.1	160 ± 3	1772 ± 3	0.2344 ± 0.0005	9470 ± 30
Y1B-3	80	72.1 ± 0.1	137 ± 3	1767 ± 3	0.2362 ± 0.0006	9570 ± 30
Y1B-4	100	109.5 ± 0.1	316 ± 6	1763 ± 3	0.2392 ± 0.0005	9690 ± 40
Y1B-5	130	102.6 ± 0.1	166 ± 3	1761 ± 3	0.2416 ± 0.0005	9820 ± 30
Y1-35	165	80.1 ± 0.2	880 ± 10	1748 ± 6	0.2428 ± 0.0052	9900 ± 230
Y1-34	182	66.1 ± 0.1	360 ± 10	1743 ± 6	0.2449 ± 0.0032	10060 ± 140
Y1B-6	240	58.5 ± 0.1	520 ± 10	1753 ± 2	0.2563 ± 0.0006	10400 ± 70
Y1-33	305	118.0 ± 0.3	855 ± 9	1742 ± 6	0.2583 ± 0.0033	10620 ± 150
Y1B-7	315	70.9 ± 0.1	380 ± 8	1755 ± 3	0.2636 ± 0.0006	10740 ± 50
Y1B-8	325	59.3 ± 0.1	119 ± 2	1746 ± 3	0.2769 ± 0.0010	11390 ± 50
Y1-32	330	76.5 ± 0.1	103 ± 9	1741 ± 5	0.2748 ± 0.0032	11400 ± 140
Y1B-9	390	94.2 ± 0.1	84 ± 2	1745 ± 3	0.2887 ± 0.0005	11920 ± 30
Y1B-10	430	62.5 ± 0.1	124 ± 3	1750 ± 3	0.2944 ± 0.0007	12130 ± 40
Y1-31	450	41.2 ± 0.1	230 ± 10	1746 ± 7	0.2919 ± 0.0077	12080 ± 340
Y1B-11	460	60.4 ± 0.1	176 ± 4	1748 ± 3	0.3012 ± 0.0007	12420 ± 40
Y1-30	475	76.3 ± 0.2	210 ± 10	1743 ± 9	0.3037 ± 0.0035	12640 ± 160
Y1B-12	535	45.8 ± 0.1	292 ± 6	1743 ± 3	0.3114 ± 0.0007	12860 ± 60
Y1-29	583	59.9 ± 0.1	241 ± 9	1731 ± 6	0.3113 ± 0.0055	13010 ± 250
Y1B-13	595	66.3 ± 0.1	880 ± 20	1737 ± 3	0.3237 ± 0.0007	13360 ± 110
Y1-28	605	89.6 ± 0.2	420 ± 10	1726 ± 5	0.3204 ± 0.0031	13430 ± 150
Y1-27	661	89.5 ± 0.2	297 ± 9	1736 ± 7	0.3257 ± 0.0033	13630 ± 160
Y1-26	675	78.6 ± 0.1	350 ± 10	1716 ± 5	0.3263 ± 0.0050	13750 ± 230
Y1B-14	730	77.2 ± 0.1	346 ± 7	1738 ± 3	0.3364 ± 0.0006	14000 ± 50
Y1B-15	780	99.3 ± 0.1	920 ± 20	1735 ± 3	0.3419 ± 0.0006	14210 ± 80
Y1-25	842	65.1 ± 0.1	450 ± 10	1720 ± 5	0.3397 ± 0.0039	14300 ± 180
Y1B-16	855	99.7 ± 0.1	147 ± 3	1735 ± 3	0.3530 ± 0.0006	14790 ± 40
Y1-24	867	43.7 ± 0.1	75 ± 8	1733 ± 6	0.3532 ± 0.0043	14880 ± 200
Y1B-17	920	82.5 ± 0.1	640 ± 10	1741 ± 3	0.3659 ± 0.0007	15260 ± 70
Y6	968	44.8 ± 0.1	1330 ± 10	1730 ± 6	0.3766 ± 0.0033	15660 ± 220
Y1-23	1020	42.7 ± 0.1	708 ± 9	1727 ± 6	0.3799 ± 0.0068	15960 ± 320

a) 数据误差均为 2σ 。初始 ^{230}Th 年龄校正采用地壳 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 平均比值: $4.4 \times 10^{-6} \pm 2.2 \times 10^{-6}$ 。Y1B-1~Y1B-17 于 2009 年完成测试, 采用 Neptune 型 MC-ICP-MS, 其余样品于 2005 年完成测试, 采用 Element 型 ICP-MS

全新世早期记录(11500~9160 a BP)分辨率为 2~33 a (平均 7 a); $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-7.3\text{‰} \sim -10.0\text{‰}$ 间波动, 平均值为 -9.1‰ 。

3 讨论

3.1 BA转换及YD事件的区域对比

可用于古气候重建研究的洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化主要受大气降水的同位素组成和洞穴地表年均温度变化的影响^[5,48], 而中国岩溶发育具有季风气候水热配

套的重要特点^[64], 据中国南方岩溶作用形成的多个洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录表明, 总体上 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏轻指示亚洲夏季风增强, 气候温暖湿润, 反之, 则代表夏季风减弱, 气候冷干^[39,44~52,57~60,64]。

本文以 t-BA 作为亚洲季风终止点 I 的界限(图 3), 衙门洞 Y1 石笋 t-BA 开始年龄为 14750 a BP, $\delta^{18}\text{O}$ 值在 35 年中变低 1.4‰(8 个 $\delta^{18}\text{O}$ 值); Y1 石笋 YD 事件开始年龄为 12850 a BP, $\delta^{18}\text{O}$ 值在 30 年中升高 0.9‰(6 个 $\delta^{18}\text{O}$ 值); YD 结束(进入全新世)年龄为 11500 a BP, 在 10 年左右中 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低 0.8‰的变化,

图 3 15.5~11.0 ka BP Y1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与其他地质记录对比

(a) 格陵兰 NGRIP 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[27,28](GICC05 b2k 时间序列校正为距公元 1950 年以来); (b) 热带 Cariaco 海洋沉积钛含量记录^[10]; (c) 南京葫芦洞 H82 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[39, 44]; (d) 葫芦洞 YT 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[39, 44]; (e) 也门 Moomi 洞 M1-5 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[54]; (f) 神农架天鹅洞 SL 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[60]; (g) 贵州董歌洞 D4 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[44-47]; (h) 衡门洞 Y1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录

再经过约 80 年进一步降低 0.7‰ 的变化, YD 事件持续时间约 1350 a. Y1 石笋氧同位素记录和北半球其他地质记录在末次冰消期至全新世早期的两次重要气候转换的界限在误差范围内是一致的(图 3), 格陵兰 NGRIP 冰芯 BA 开始时间为 (14642±186) a BP(GICC05 b2k 时间序列校正为距公元 1950 年来)^[28], GRIP 冰芯 t-BA 开始时间为 (14700±186) a BP(ss08c b2k 时间序列校正为距公元 1950 年来)^[28], 两者全新世

开始的时限分别为: (11653±99)和(11500±99) a BP, 与 Y1 记录在误差范围内也是一致的(图 3). 南京葫芦洞 3 根石笋(H82, YT, PD)并采用 H82 石笋数层的方式确定 t-BA 界限为(14645±60) a BP^[39], YD 事件开始年龄为(12820±60) a BP, YD 结束年龄为(11470±100) a BP, 葫芦洞石笋记录的 t-BA 界限以及 YD 事件持续时间((1350±120) a)和 Y1 石笋记录在误差范围内也都一致(图 3).

衙门洞 Y1 石笋在 15.0 ka BP 左右有一次明显的季风减弱事件, 如图 2 所示该事件是 H1 冷事件后的又一次显著冷事件. Y1 石笋记录的 H1 事件分辨率虽然不高, 但冷谷出现的时间为 16.0 ka BP, 在误差范围内和葫芦洞 YT 石笋以及董歌洞 D4 石笋出现的时间是一致的. 也门 Moomi 洞 M1-5 石笋的印度季风 $\delta^{18}\text{O}$ 记录也同样显著记录 15.0 ka BP 的冷事件发生(图 3)^[54]. 董歌洞 D4 石笋也有该事件的记录^[47], 只是可能由于其生长慢和记录的分辨率低而不很显著. 东亚季风区的南京葫芦洞石笋对该事件记录不是很明确, 只是具有相对平缓的转换趋势, 这种差异是否可能反映了东亚和印度季风的差异尚有待进一步工作. 在 15.0 ka BP 冷事件之后, 于 t-BA 转换界限前, 还有另一次季风减弱事件(~14.8 ka BP), 这在葫芦、董歌和格陵兰记录中都有反映(图 3). t-BA 转换在 Y1 记录中是一明显的突变事件, 与格陵兰 NGRIP 冰芯和也门 Moomi 洞 M1-5 石笋记录相似. 而南京葫芦洞 H82 和 YT 石笋记录的变化振幅较小, 且转换过程相对平缓. 这一差异是否也反映了东亚和印度季风的差异, 值得进一步研究.

格陵兰 NGRIP 冰芯在末次冰消期有 7 次气候事件(图 3), 两次冰阶 GS2a 和 GS1 即对应北欧孢粉记录的老仙女木(Oldest Dryas)和新仙女木事件(YD); 间冰阶 GI1 内有 5 次气候事件: GI-1e, GI-1d, GI-1c, GI-1b 和 GI-1a, 分别对应于孢粉记录的波令暖期(Bølling)、中仙女木事件(Older Dryas)、早阿勒罗德暖期(early Allerød)、阿勒罗德间的冷期(Inter Allerød Cold Period, 简称 IACP)和晚阿勒罗德暖期(late Allerød). 以上气候事件在 Y1 石笋中都有较明显的记录, 类似格陵兰冰芯记录的 GIS 事件据 Cheng 等^[59]和 Wang 等^[57]研究的基础上定义末次冰消期亚洲季风突变事件的中国基准(CIS)为: A.1e~A.1a, Y1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值记录这些事件的开始时限分别为(14750±50), (14100±60), (13870±80), (13370±80)和(12990±80) a BP; A.1a 结束进入 YD 事件为(12850±50) a BP, $\delta^{18}\text{O}$ 值都有近 1‰的变幅(图 3). NGRIP 冰芯记录的温度变化(Warm)与其他地质记录反映的湿度变化(Wet)在波令暖期转化趋势有一定差异, 冰芯 t-BA 后是一个快速到达最暖然后又回冷的过程; 而石笋记录的季风强度变化虽然有地区上的差异, 但都总体上与 Y1 记录相似, 呈现一个波动(三峰两谷, A.1e~A.1a)变强的

过程, 这一特征与热带低纬度的 Cariaco 海洋沉积在进入波令暖期后的变化趋势也基本相似. 这种差异应该是在此时段亚洲季风和低纬度降水变化在轨道尺度上主要受北半球夏季太阳辐射及其有关的热带辐合带(ITCZ)位置移动控制^[48,55-56,59]而呈现上升趋势有关. 从晚阿勒罗德暖期到 YD 事件的转换过程的格陵兰冰芯记录的温度变化和石笋记录的亚洲季风变化的差异相当明显. 从年代上看, NGRIP 冰芯记录的降温和 Y1 记录的季风减弱的开始具有同时性(~12.85 ka BP)(图 3), 而格陵兰降温结束时季风减弱只达半程(图 3). 这种差异似支持北半球高纬度的气候事件驱动机制^[14], 而以低纬度或赤道驱动机制^[11,18]来解释则相对困难些; 另一种考量则是低纬度季风可能受来自南半球穿越赤道的气流影响^[51]或所谓南大洋的“热库”的影响^[12]; 此外, 北半球夏季太阳辐射的轨道尺度上的对亚洲季风的相反驱动亦可能是造成此季风减弱事件较为缓慢的因素. 由石笋记录的亚洲季风的 YD 事件的结束时间与格陵兰冰芯记录的升温时间在误差范围内是一致的, 但是与进入 YD 相反, 此时亚洲季风的增强和格陵兰升温都是突变形式(图 3). 同样, 这种季风突变也可能与轨道尺度上太阳辐射的和高纬度对亚洲季风相同驱动有关. 此外, 与格陵兰温度变化相似, 在 YD 事件期间亚洲季风变化均以许多十年至百年际的波动为特征.

3.2 早全新世亚洲季风的增强趋势

全新世 Y1 石笋记录的季风变化总体上呈现一个波动增强的趋势, 并在~9.6 ka BP 后趋于相对平稳(图 4). 这与山宝洞石笋和阿曼 Hoti 和 Qunf 石笋记录相似(图 4), 可能表明亚洲季风在早全新世期间总体增强的趋势在各地区并没有显著的相位差异, 因而不支持东亚和印度季风在轨道尺度上的反相位关系^[34]. 但是, 这种 $\delta^{18}\text{O}$ 变化指示的是总体季风增强的趋势, 其不同地区是相对地, 具体表现可能不尽相同, 尤其是不能简单地等同于局部地区的绝对降水量. 所以与地域上的由其他记录(如孢粉记录)所体现的“穿时性”^[4,35]并不矛盾.

与其他石笋记录相似, 早全新世季风变化总体增强趋势上迭加了一些数十年际尺度的弱季风事件. 格陵兰冰芯记录在早全新世中的降温事件主要有 11.35, 10.85 和 9.26 ka BP 事件^[26-28]. 阿曼石笋则记录了包括 10.2 和 9.2 事件在内的弱印度季风事件^[41].

图 4 12.0~9.0 ka BP Y1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与其他地质记录对比

(a) 格陵兰 NGRIP 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[27,28] (GICC05 b2k 时间序列校为距公元 1950 年以来); (b) 热带 Cariaco 海洋沉积钛含量记录^[10]; (c) 湖北神农架山宝洞 SB10 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[50, 57]; (d) 阿曼 Hoti 洞 H5 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[41,42]; (e) 阿曼 Kahf Defore 洞 S4 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[41]; (f) 阿曼 Qunf 洞 Q5 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[40,41]; (g) 贵州董歌洞 D4 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[44-47]; (h) 贵州衙门洞 Y1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录

相应地, Y1 石笋记录中也记录了可能在年代误差范围内可以对应的事件, 其开始时限分别为 $\sim(11390\pm 50)$, $\sim(11060\pm 50)$, $\sim(10210\pm 110)$ 和 $\sim(9290\pm 30)$ a BP, 这些事件的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变幅均有近 1‰ (图 4)。这些事件被认为与冰盖融水进入北大西洋事件有关, 并可能具有大区域的响应^[41,47]。然而, 类似的区域对比尚具有很大的不确定性的, 主要的困难在于同时具有高精度年代和高分辨率的记录尚不多。而 Y1 记录则正是迈向解决此一问题的一步。

3.3 末次冰消期西南地区季风演化与太阳活动的关系

采用 REDFIT 37 功率谱分析软件^[65]对衙门洞 Y1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 数据进行了分析, 根据气候转换特征分 4 部分来讨论, 如图 5(a)~(d)所示, 在 90%置信度水平下通过红噪声检验的周期分别有: 507, 187, 186, 101, 86, 29, 18, 16, 14, 13, 12 和 11 a.

图5(a)为Y1石笋主要研究区段(末次冰消期至全新世早期: 15.2~9.2 ka BP)的 $\delta^{18}\text{O}$ 数据的功率谱图,

图5 衙门洞 Y1 石笋谱分析结果对比

检出周期为 507, 18, 16, 14 和 12 a; 507 a 周期反映 BA 转换及 BA 事件中以及 YD 转换中冰阶及间冰阶的转变周期; 18 和 16 a 周期接近太阳活动的 22 a 双海尔周期^[66], 14 和 12 a 反映太阳黑子周期^[66], 表明不仅整个衙门洞 Y1 石笋记录的季风变化长尺度受控于太阳辐射变化, 数十年尺度亦明显受太阳活动影响. Cai 等^[53]在研究河南栾川县东石崖洞 DSY09 石笋也发现有较强的 14 a 周期. 由于 507 a 周期的强峰可能影响其他气候事件的检出, 所以类似于 Dykoski 等^[47]和 Kelly 等^[58]对同地区董歌洞 D3 和 D4 石笋的功率谱分析也进行了分段研究.

图 5(b)为 Y1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 数据 15.2~12.8 ka BP 的功率谱图, 为老仙女木(Oldest Dryas)时期到 BA 暖期的时段, 最高分辨率为 2.1 a (13356~13397 a BP, 44 个数据), 检出最强周期为 187, 18, 16, 14, 12 和 11 a; 187 a 周期反映 BA 事件冰阶及间冰阶内部的百年尺

度转变周期, 187 a 周期接近树轮记录的 ^{14}C 活动周期, Dykoski 等^[47]和 Kelly 等^[58]研究董歌洞石笋记录也发现这种周期, 主要反映太阳活动的周期; 18, 16, 14, 12 和 11 a 反映太阳活动周期^[66]. Y1 石笋在此时段的时间分辨率较高, 谱分析结果也比较明显地反映了太阳活动对数十年尺度上的亚洲夏季风强度的影响.

图 5(c)为 Y1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 数据 12.8~11.5 ka BP 的功率谱图, 为新仙女木事件(YD)发生的时段, 该时段功率谱强度波动最强烈, 也反映了 YD 事件发生时亚洲季风气候的不稳定性; 最高分辨率为 2.9 a (12424~12511 a BP, 30 个数据), YD 事件检出周期为 86, 29, 16, 13 和 12 a; 86 和 29 a 周期接近树轮记录的 ^{14}C 活动周期. Cai 等^[53]对 DSY09 石笋以及 Dykoski 等^[47]和 Kelly 等^[58]对 D4 石笋的研究也发现 86 a 周期. 13 和 12 a 周期也反映了太阳活动周期.

图 5(d)为 Y1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 数据 11.5~9.2 ka BP 的功

率谱图, 为 Y1 石笋记录的全新世早期的季风气候变化, 较高分辨率为 1.6 a (9478~9504 a BP, 17 个数据)、2.3 a (10696~10741 a BP, 20 个数据) 和 3.1 a (9472~9566 a BP, 38 个数据); 功率谱图所示的强周期为 186, 101, 16 和 14 a; 186 a 周期类似图 5(b) 检出的 187 a 周期以及和 101 a 周期都接近树轮记录的 ^{14}C 活动周期^[47,58], 主要反映太阳活动的周期; 16 和 14 a 周期亦反映太阳活动周期. 对于该研究区全新世部分时段更高时间分辨率和更详尽的谱分析可以参考 Dykoski 等^[47]和 Wang 等^[49]对于董歌洞石笋的研究资料, 他们的研究成果都表明短尺度亚洲夏季风强度变化都受到太阳活动的影响.

近年来许多研究也都同样表明印度季风在百年和十年际尺度上受到太阳活动的影响^[13,40~43,67,68]. 这与上述对中国东南部亚洲季风的研究结果是一致的. 衙门洞 Y1 记录支持近 10 年来石笋研究的结果, 即亚洲季风气候变化的驱动机制除了主导的太阳辐射、大西洋径向环流 (Atlantic Meridional Overturning Circulation (MOC)) 及热带辐合带 (ITCZ) 运移外, 短尺度上的季风变化和太阳活动密切相关, 太阳活动可能在短尺度上影响海气耦合模式从而放大并影响到亚洲季风活动的强度.

4 结论

贵州衙门洞 Y1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 完整记录了末次冰消

期至全新世早期亚洲季风的两次重要转换: BA 转换和 YD 转换, $\delta^{18}\text{O}$ 值都有 3‰ 的变幅; Y1 石笋氧同位素记录和北半球其他地质记录对这两次重要气候转换的界限在误差范围内是一致的. 末次冰消期亚洲季风突变事件的中国基准 (CIS) 可以定义为 A.1e~A.1a, Y1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值记录这些事件的开始时限分别为: 14750, 14100, 13870, 13370 和 12990 a BP; A.1a 结束进入 YD 事件为 12850 a BP, YD 结束进入全新世为 11500 a BP. NGRIP 冰芯记录的温度变化 (Warm) 与其他地质记录反映的湿度变化 (Wet) 在波令暖期转化趋势以及从晚阿勒罗德暖期到 YD 事件的转换过程都有一定差异, 而石笋记录的季风强度变化虽然有地区上的差异, 但都总体上与 Y1 记录相似. Y1 石笋记录对比表明亚洲季风在早全新世期间总体增强的趋势在各地区并没有显著的相位差异, 因而不支持东亚和印度季风在轨道尺度上的反相位关系. 另外, Y1 石笋也记录了早全新世在年代误差范围内与其他地质记录对应的季风减弱事件, 其开始时限分别为: ~11390, 11060, 10210 和 9290 a BP. 衙门洞 Y1 记录支持近 10 年来石笋研究的结果, 即亚洲季风气候变化的驱动机制除了主导的太阳辐射、大西洋径向环流 (MOC) 及热带辐合带 (ITCZ) 运移外, 短尺度上的季风变化和太阳活动密切相关, 太阳活动可能在短尺度上影响海气耦合模式从而放大并影响到亚洲季风活动的强度.

致谢 在石笋年龄样品的测试过程中, 美国明尼苏达大学地质与地球物理系王先锋博士、Dykoski 女士提供了大量帮助; 中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室安芷生院士、刘卫国研究员、文启彬研究员和李祥忠博士在同位素测试中给予了帮助和指导; 国家级茂兰喀斯特森林自然保护区冉景丞和陈会明等同志协助采样和洞穴监测工作; 西南大学地球化学与同位素实验室李红春教授、李廷勇博士、杨勋林博士和刘子琦博士对同位素测试提供指导和有益讨论, 两位匿名审稿专家提出宝贵意见对本文修改有非常大的帮助, 在此向他们致以深深的谢意.

参考文献

- 1 Alley R B, Marotzke J, Nordhaus W D, et al. Abrupt climate change. *Science*, 2003, 299: 2005—2010
- 2 Broecker W S. Does the trigger for abrupt climate change reside in the ocean or in the atmosphere? *Science*, 2003, 300: 1519—1522
- 3 程海. 全球气候突变研究: 争论还是行动? *科学通报*, 2004, 49: 1339—1344
- 4 An Z S. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate. *Quat Sci Rev*, 2000, 19: 171—187
- 5 袁道先, 刘再华, 蒋忠诚, 等. 碳循环与岩溶地质环境. 北京: 科学出版社, 2003. 95—177
- 6 Martinson D G, Pisias N J, Hays J D. Age dating and the orbital theory of ice ages: Development of a high-resolution 1 to 300000 years chronostratigraphy. *Quat Res*, 1987, 27: 1—29

- 7 Lehman S J, Keigwin L D. Sudden changes in North Atlantic circulation during the last deglaciation. *Nature*, 1992, 356: 757—762
- 8 汪品先, 卞云华, 李保华, 等. 西太平洋边缘海的新仙女木事件. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1996, 26: 452—460
- 9 Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 1997, 278: 1257—1266
- 10 Haug G H, Hughen K A, Sigman D M, et al. Southward migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene. *Science*, 2001, 293: 1304—1308
- 11 Stott L D, Poulsen C, Lund S, et al. Super ENSO and global climate oscillations at millennial time scales. *Science*, 2002, 297: 222—226
- 12 Stocker T F, Johnsen S J. A minimum thermodynamic model for the bipolar seesaw. *Paleoceanography*, 2003, 18: 1087—1095
- 13 Gupta A K, Anderson D M, Overpeck J T. Abrupt changes in the Asian southwest monsoon during the Holocene and their links to the North Atlantic Ocean. *Nature*, 2003, 421: 354—356
- 14 Broecker W S. Musings about the connection between thermohaline circulation and climate. *Amer Geophys Union Monogr*, 2007, 173: 265—278
- 15 Lamy F, Kaiser J, Arz H W, et al. Modulation of the bipolar seesaw in the Southeast Pacific during Termination 1. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 259: 400—413
- 16 Anderson R F, Ali S, Bradtmiller L I, et al. Wind-driven upwelling in the Southern Ocean and the deglacial rise in atmospheric CO₂. *Science*, 2009, 323: 1443—1448
- 17 Barker S, Diz P, Vautravers M J, et al. Interhemispheric Atlantic seesaw response during the last deglaciation. *Nature*, 2009, 457: 1097—1103
- 18 汪品先. 全球季风的地质演变. *科学通报*, 2009, 54: 535—556
- 19 Dansgaard W, White J W C, Johnsen S J. The abrupt termination of the Younger Dryas climate event. *Nature*, 1989, 339: 532—534
- 20 Stuiver M, Grootes P M, Braziunas T F. The GISP2 $\delta^{18}\text{O}$ climate record of the past 16,500 years and the role of the sun, ocean, and volcanoes. *Quat Res*, 1995, 44: 341—354
- 21 Taylor K C, Mayewski P A, Alley R B, et al. The Holocene-Younger Dryas Transition recorded at Summit, Greenland. *Science*, 1997, 278: 825—827
- 22 Meese D A, Gow A J, Alley R B, et al. The Greenland ice sheet project 2 depth-age scale: Methods and results. *J Geophys Res*, 1997, 102: 26411—26423
- 23 GISP2. The Greenland Summit Ice Cores. Boulder Colorado: National Snow and Ice Data Center, University of Colorado at Boulder, and the World Data Center-A for Paleoclimatology, National Geophysical Data Center, 1997
- 24 Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and Atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctic. *Nature*, 1999, 399: 429—436
- 25 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: 地球科学*, 1999, 29: 175—184
- 26 Johnsen S, Dahl-Jensen D, Gundestrup N S, et al. Oxygen isotope and palaeotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp century, Dye-3, GRIP, GISP2, Renland and NorthGRIP. *J Quat Sci*, 2001, 16: 299—307
- 27 North Greenland Ice Core Project (NGRIP) Members. High-resolution record of Northern hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, 2004, 431: 147—151
- 28 Lowe J J, Rasmussen S O, Björck J, et al. Synchronisation of palaeoenvironmental events in the North Atlantic region during the Last Termination: A revised protocol recommended by the INTIMATE group. *Quat Sci Rev*, 2008, 27: 6—17
- 29 Ding Z L, Liu T S, Rutter N W, et al. Ice-volume forcing of East Asian winter monsoon variation the past 800,000 years. *Quat Res*, 1995, 44: 149—159
- 30 Zhou W J, Head M J, An Z S, et al. Terrestrial evidence for a spatial structure of tropical-polar interconnections during the Younger Dryas episode. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 191: 231—239
- 31 Björck S, Kromer B, Johnsen S, et al. Synchronized terrestrial-atmospheric deglacial records from around the North Atlantic *Science*, 1996, 274: 1155—1160
- 32 刘兴起, 沈吉, 王苏民. 青海湖 16 ka 以来的花粉记录及其古气候古环境演化. *科学通报*, 2002, 47: 1351—1355
- 33 Hong Y T, Hong B, Lin Q H, et al. Correlation between Indian Ocean summer monsoon and North Atlantic climate during the Holocene. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 211: 371—380
- 34 Hong Y T, Hong B, Lin Q H, et al. Inverse phase oscillations between the East Asian and Indian Ocean summer monsoons during the last 12000 years and paleo-EI Niño. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 231: 331—346

- 35 He Y, Theakstone W H, Zhang Z L, et al. Asynchronous Holocene climatic change across China. *Quat Res*, 2004, 61: 52—63
- 36 Garcin Y, Vincens A, Williamson D, et al. Abrupt resumption of the African monsoon at the Younger Dryas—Holocene climatic transition. *Quat Sci Rev*, 2007, 26: 690—704
- 37 Chen F H, Yu Z C, Yang M L, et al. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history. *Quat Sci Rev*, 2008, 27: 351—364
- 38 Schaub M, Buntgen U, Kaiser K F, et al. Lateglacial environmental variability from Swiss tree rings. *Quat Sci Rev*, 2008, 27: 29—41
- 39 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
- 40 Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. Holocene forcing of the Indian Monsoon recorded in a stalagmite from Southern Oman. *Science*, 2003, 300: 1737—1739
- 41 Fleitmann D, Burns S J, Mangini A, et al. Holocene ITCZ and Indian monsoon dynamics recorded in stalagmites from Oman and Yemen (Socotra). *Quat Sci Rev*, 2007, 26: 170—188
- 42 Neff U, Burns S J, Mangini A, et al. Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6 ka ago. *Nature*, 2001, 411: 290—293
- 43 Sinha A, Cannariato K G, Stott L D, et al. Variability of Southwest Indian summer monsoon precipitation during the Bølling-Allerød. *Geology*, 2005, 33: 813—816
- 44 Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, et al. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon. *Science*, 2004, 304: 575—578
- 45 覃嘉铭, 袁道先, 程海, 等. 新仙女木及全新世早中期气候突变事件: 贵州茂兰石笋氧同位素记录. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34: 69—74
- 46 张美良, 程海, 林玉石, 等. 贵州荔波 1.5 万年以来石笋高分辨率古气候环境记录. *地球化学*, 2004, 33: 65—74
- 47 Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H, et al. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 233: 71—86
- 48 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: 157—163
- 49 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and north atlantic climate. *Science*, 2005, 308: 854—857
- 50 邵晓华, 汪永进, 程海, 等. 全新世季风气候演化与干旱事件的湖北神农架石笋记录. *科学通报*, 2006, 51: 80—86
- 51 Liu D B, Wang Y J, Cheng H, et al. A detailed comparison of Asian Monsoon intensity and Greenland temperature during the Allerød and Younger Dryas events. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 272: 691—697
- 52 Hu C Y, Henderson G M, Huang J H, et al. Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave record. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 266: 221—232
- 53 Cai B G, Edwards R L, Cheng H, et al. A dry episode during the Younger Dryas and centennial-scale weak monsoon events during the early Holocene: A high-resolution stalagmite record from southeast of the Loess Plateau, China. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L02705
- 54 Shakun J D, Burns S J, Fleitmann D, et al. A high-resolution, absolute-dated deglacial speleothem record of Indian Ocean climate from Socotra Island, Yemen. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 259: 442—456
- 55 Wang X F, Auler A S, Edwards R L, et al. Interhemispheric anti-phasing of rainfall during the last glacial period. *Quat Sci Rev*, 2006, 25: 3391—3403
- 56 Wang X F, Auler A S, Edwards R L, et al. Millennial-scale precipitation changes in southern Brazil over the past 90,000 years. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L23701
- 57 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. *Nature*, 2008, 451: 1090—1093
- 58 Kelly M J, Edwards R L, Cheng H, et al. High resolution characterization of the Asian monsoon between 146,000 and 99,000 years B P. from Dongge Cave, China and global correlation of events surrounding Termination II. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 2006, 236: 20—38
- 59 Cheng H, Edwards R L, Wang Y J, et al. A penultimate glacial monsoon record from Hulu Cave and two-phase glacial terminations. *Geology*, 2006, 34: 217—220
- 60 陈仕涛, 汪永进, 孔兴功, 等. 倒数第三次冰消期亚洲季风气候可能的类 Younger Dryas 事件. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36: 445—452
- 61 杨琰, 袁道先, 程海. 高精度 ICP-MS ^{230}Th 测年新技术及其在贵州衙门洞 Y1 石笋测年研究中的应用. *中国岩溶*, 2006, 25: 89—94

- 62 Shen C C, Edwards R L, Cheng H, et al. Uranium and thorium isotopic and concentration measurements by magnetic sector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Chem Geol*, 2002, 185: 165—178
- 63 Cheng H, Edwards R L, Hoff J, et al. The half-lives of uranium-234 and thorium-230. *Chem Geol*, 2000, 169: 17—33
- 64 袁道先, 曹建华. 岩溶动力学的理论与实践. 北京: 科学出版社, 2008. 1—197
- 65 Schulz M, Mudelsee M. REDFIT: Estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series. *Comput Geosci*, 2002, 28: 421—426
- 66 吴江滢, 邵晓华, 孔兴功, 等. 盛冰期太阳活动在南京石笋年层序列中的印迹. *科学通报*, 2006, 51: 431—435
- 67 Agnihotri R, Dutta K, Bhushan R, et al. Evidence for solar forcing on the Indian monsoon during the last millennium. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 198: 521—527
- 68 Sinha A, Cannariato K G, Stott L D, et al. A 900-year (600 to 1500 A. D.) record of the Indian summer monsoon precipitation from the core monsoon zone of India. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L16707