

# 湖北神农架年纹层石笋记录的 YD 与 8.2 ka 事件转型模式研究<sup>①</sup>

王 权 刘殿兵 汪永进 邓 朝

(南京师范大学地理科学学院 南京 210023)

**摘 要** 基于青天洞两支年纹层石笋 QT16 和 QT40 高分辨率  $\delta^{18}\text{O}$  序列,重建了 Younger Dryas (YD) 和 8.2 ka 期间季风突变细节过程。结果显示,亚洲季风强度在 YD 和 8.2 ka 事件内部并不稳定。在年层时标控制下,季风强度在 YD 早期最弱,随后缓慢上升,其间叠加三次百年尺度次级振荡;在 8.2 ka 期间,季风强度整体较弱,内部出现一次持续 40 a 左右的强季风事件,曲线形态类似“W”结构。运用“方差法”和“RAMPFIT”法分析显示,在两事件开始,季风衰减均表现出缓慢特征(转型时间占据事件整体历时的 40%~50%),但在结束期间季风迅速增强,相似变化模式得到了同区其他石笋记录的支持。与格陵兰冰芯记录对比发现,尽管高、低纬气候在两事件结束时段变化特征基本类似,但在两事件开始,亚洲季风衰减过程却显著长于北高纬气温变化。与低纬记录对比显示,热带水文变化在两事件开始阶段均表现出与亚洲季风基本一致的演化趋势,表明亚洲季风的突变过程可能具有鲜明的低纬特色。这些细节差异若得到更多高分辨率地质记录验证,将有利于进一步认识亚洲季风对突变事件的响应方式及其动力学机制。

**关键词** 年纹层石笋 亚洲季风 YD 事件 8.2 ka 事件 转型模式

**第一作者简介** 王 权 男 1991 年出生 硕士研究生 自然地理学 E-mail: wangpowerful@163.com

**通讯作者** 刘殿兵 男 讲师 E-mail: ldb9921@njnu.edu.cn

**中图分类号** P532 **文献标识码** A

## 0 引言

Younger Dryas (YD) 和 8.2 ka 事件是末次冰消期以来最受关注的两个气候突变事件,两者对比研究为认识百年—千年尺度气候突变细节过程提供了重要途径<sup>[1-2]</sup>。在格陵兰冰芯记录中,YD 和 8.2 ka 事件表现出很多相似之处,如冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  值、冰雪累积速率和甲烷浓度等指标均显著降低<sup>[2]</sup>,但 8.2 ka 期间上述指标变幅仅为 YD 事件的一半<sup>[1]</sup>。最近,高分辨率格陵兰冰芯多指标分析结果显示,8.2 ka 期间仅  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\text{CH}_4$  指标变化显著,其他指标如  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Cl}^-$  浓度变幅很小,表明大气环流对 8.2 ka 事件响应相对较弱<sup>[3]</sup>。Broecker 等<sup>[4]</sup>进一步指出格陵兰冰芯记录的 YD 和 8.2 ka 事件的转型模式存在显著差异,尽管格陵兰冰芯  $\delta\text{D}$  在 YD 开始变化极为迅速<sup>[5]</sup>,但其他指标显示该转型过程持续约 200~250 a<sup>[5-8]</sup>,与 8.2 ka 开始期间极地气候迅速变化显著不同<sup>[9]</sup>。

在低纬地区,亚洲季风在 YD 结束时迅速增强<sup>[10-12]</sup>,与极地气温变化相似。这些洞穴记录显示,

在 YD 开始季风衰减似乎比极地气温变化更为缓慢。来自中国东部及北部年纹层石笋记录的 Allerød/YD 转换比格陵兰冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录至少长 100 a<sup>[11-13]</sup>,这种转型模式差异也得到了同区多个石笋记录的支持<sup>[10,14-16]</sup>。与 YD 事件不同,8.2 ka 事件在北高纬地区异常显著,而在低纬季风区并不突出,仅表现为持续约 400~600 a 的气候异常,这种差异被认为与太阳活动周期性变化有关<sup>[17]</sup>。然而,最新高分辨率洞穴石笋研究表明,8.2 ka 事件在低纬季风记录中广泛存在<sup>[18-20]</sup>。在机制上,由于亚洲洞穴石笋揭示的 8.2 ka 事件与南美季风变化呈反相位关系<sup>[19]</sup>,并且在内部细节上与格陵兰冰芯记录一致<sup>[20]</sup>,因此该事件可能与北大西洋温盐环流变化有关。但是,Alley 等<sup>[2]</sup>指出阿曼洞石笋记录的 8.2 ka 事件转型方式与格陵兰冰芯存在显著差异,即阿曼洞石笋记录的该事件开始过程比格陵兰冰芯记录更为缓慢,而结束过程则更为迅速,可能反映显著的区域响应模式或驱动机制差异。

目前,由于高精度时标不足和高分辨率材料匮乏

<sup>①</sup>国家自然科学基金(批准号:41172148,41130210)、高等学校博士学科点专项科研基金(编号:20113207120012)、江苏高校优势学科建设工程与江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心联合资助  
收稿日期:2014-11-24;收修修改稿日期:2015-03-19

等原因, YD 和 8.2 ka 事件转型模式对比研究仍较为薄弱。这些研究的深入开展, 将有利于认识不同气候背景下的季风突变行为, 并理解其驱动机制。如 Broecker 等<sup>[4]</sup>已经注意到格陵兰冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录的 8.2 ka 事件比 YD 事件开始更为迅速, 可能暗示其具有不同的响应模式或驱动机制。然而, 已有研究主要集中于单一气候突变事件细节过程及驱动机制诊断, 本文依据湖北神农架青天洞的两支年纹层石笋, 建立了完整覆盖 YD 和 8.2 ka 事件的亚洲季风演化序列。基于这两支石笋的早期研究成果<sup>[12,21]</sup>, 本文对 8.2 ka 期间石笋数据进一步加密, 进而通过对比两事件转型模式, 以期重新认识末次冰消期以来亚洲季风百年—千年尺度突变事件的驱动机制。

## 1 研究区域、材料与方法

QT16 和 QT40 两支石笋采自湖北神农架青天洞 (110°22' E, 31°20' N), 洞口海拔约 1 630 m。该区域平均年降水量在 1 500~2 000 mm 之间, 80% 的降水集中在 6~9 月, 平均年气温约为 7.4℃。青天洞长约 50 m, 上覆 60~90 m 厚的二叠系灰岩。由于洞口狭窄, 洞内空气与外界空气交流不畅, 洞内相对湿度接近 100%。

石笋 QT16 和 QT40 分别高 242 mm 和 179 mm, 沿生长轴切开并抛光, 用直径为 0.9 mm 的牙钻共采集 17 个样品用于  $^{230}\text{Th}$  定年。该测试在美国明尼苏达大学地质与地球物理系同位素实验室完成, 测试仪器为 ICP-MS, 流程见 Shen 等<sup>[22]</sup> 的描述, 年龄误差为  $\pm 2\sigma$ 。

稳定同位素样品采集采用刀削法, 分别获取了 881 组 (QT16) 和 521 组 (QT40) 氧、碳同位素数据。测试工作在南京师范大学地理科学学院同位素实验室完成, VPDB 标准, 采用碳酸盐自动进样装置与 Finnigan MAT-253 联机测试, 每 9 个样加测一个标样 (NBS-19) 进行监控,  $\delta^{18}\text{O}$  分析误差优于  $\pm 0.06\text{‰}$ 。

在两支石笋剖面上可见垂直于生长轴的水平纹层, 由透明纹层与暗色纹层构成季节沉积旋回。微层统计在 Olympus 岩相显微镜下进行, 通过 CCD 与计算机系统联机统计。QT16 的纹层总数为  $2\,388 \pm 82$  条, QT40 为  $890 \pm 14$  条, 统计误差可能由透明纹层与暗色纹层边界不清以及纹层在石笋边缘产生弯曲造成。

样品细节及测试结果见 Liu 等<sup>[12]</sup> 和邓朝等<sup>[21]</sup> 的描述。为提高 8.2 ka 事件分辨率, 本文对 QT40 进一步

加密, 其平均分辨率达 2 年。YD 数据见 Liu 等<sup>[12]</sup>。

## 2 结果

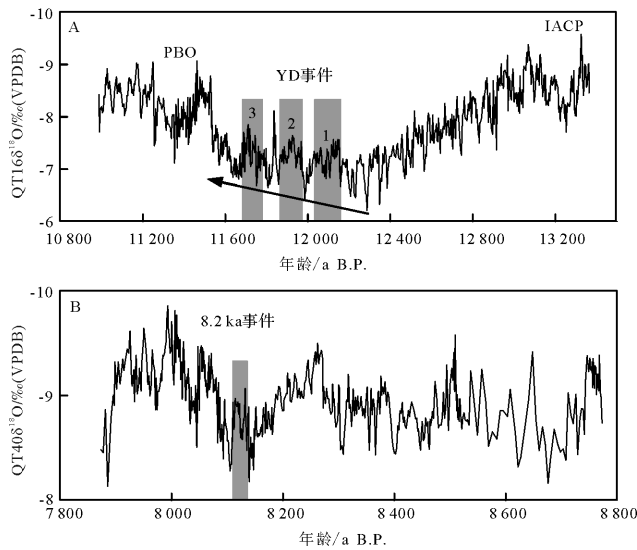
### 2.1 年层时标的建立

实测年龄显示, QT16 发育于 13 420~10 850 a B.P. 期间, QT40 发育于 8 840~7 960 a B.P. 期间, 测试误差最大为 85 a, 最小为 30 a。纹层统计获取的累计速率曲线与  $^{230}\text{Th}$  实测年龄确立的累计速率曲线基本一致<sup>[12,21]</sup>。因此, 可将独立定年和纹层计数获取的累积速率曲线进行最大相关性匹配 (相关系数  $r=0.99$ ), 从而获得两支石笋的年层时标。考虑到测年样平均跨 1~2 mm 宽度, QT16 年层时标的最大误差约为 110 a, QT40 最大误差约为 115 a, 其误差评估包括测年误差和年层统计误差。尽管两支石笋的年层时标误差均超过 100 a, 但通过纹层计数确定的相对年龄误差较小, 可以用来精确诊断 YD 和 8.2 ka 事件内部细节以及转型过程。年层时标研建细节参见 Liu 等<sup>[12]</sup> 和邓朝等<sup>[21]</sup>。

### 2.2 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列

石笋 QT16 生长于 Allerød 暖期至早全新世阶段 (图 1A), 完整覆盖 YD 事件。在石笋发育期间,  $\delta^{18}\text{O}$  在  $-9.6\text{‰}$ ~ $-6.2\text{‰}$  之间波动, 平均分辨率约为 3 a。其中,  $\delta^{18}\text{O}$  序列显示了三次显著偏正时期, 分别对应于 Allerød 冷阶 (IACP, 约 13 250 a B.P.)、新仙女木事件 (YD, 约 12 970~11 530 a B.P.) 和前北方期涛动 (PBO, 约 11 340 a B.P.)。IACP 和 PBO 的振幅均超过 1‰, 而 YD 的振幅则超过 2.5‰。YD 开始时,  $\delta^{18}\text{O}$  缓慢偏正, 在约 12 290 a B.P. 达到最大值, 然后呈现逐渐负偏趋势 (图 1A 中黑色箭头所示), 其间叠加三次持续约 200 a 的次级振荡 (图 1A 灰色区域和数字所示), 振幅均超过 0.8‰, 接近 YD 事件振幅的 1/3。在约 11 540 a B.P.,  $\delta^{18}\text{O}$  迅速偏负, 呈突变结束。

石笋 QT40 生长于早全新世阶段 (图 1B),  $\delta^{18}\text{O}$  在  $-9.9\text{‰}$ ~ $-8.1\text{‰}$  之间波动, 平均分辨率约为 2 a。在序列早期,  $\delta^{18}\text{O}$  呈现高频振荡。在约 8 250~8 050 a B.P.,  $\delta^{18}\text{O}$  显著偏正, 振幅达到了 1.3‰, 反映亚洲季风对 8.2 ka 事件的响应。在事件开始时,  $\delta^{18}\text{O}$  总体呈现缓慢偏正特点。在 8.2 ka 事件内部,  $\delta^{18}\text{O}$  值在 8 160~8 140 a B.P. 和 8 100~8 080 a B.P. 期间显著增大, 而在 8 140~8 100 a B.P. 期间相对减小, 曲线总体特征表现为两谷一峰, 类似“W”型结构。在约 8 080 a B.P.,  $\delta^{18}\text{O}$  突然偏负, 标志 8.2 ka 事件结束。

图1 QT16和QT40石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列

IACP、YD和PBO分别指 Allerød 冷阶、新仙女木事件和前北方期涛动；灰色区域表示YD和8.2 ka事件内部夏季风增强时段。

Fig.1  $\delta^{18}\text{O}$  records of Samples QT16 and QT40

### 2.3 YD与8.2 ka事件的起止时间和转型特征

气候突变表现为两种显著不同气候态之间的转换,如果该过程是线性的,那么,可依据转换前后气候变率的不同,确定突变事件的起止时间。基于该假设建立的“RAMPFIT”法在古气候研究中已得到广泛应用<sup>[23]</sup>,如 Fleitmann 等<sup>[18]</sup>运用此方法证明阿曼 Qunf 洞石笋记录的早全新世印度季风降水与格陵兰气温同步变化。姜修洋等<sup>[24]</sup>用此方法证明了全新世适宜期结束时间在亚洲季风区的不等时性。本文使用该方法分别对石笋 QT16 和 QT40 的 $\delta^{18}\text{O}$ 序列进行分析,分析结果见表1和图2。结果显示,QT16石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列在约13 059 a B.P.发生突变,暗示YD事件开始。随后, $\delta^{18}\text{O}$ 缓慢正偏,在约12 353 a B.P.进入相对稳定时期(即 mid-YD)。mid-YD结束后, $\delta^{18}\text{O}$ 在约11 568 a B.P.快速负偏,并在11 526 a B.P.完成转换,指示YD事件结束。对于石笋QT40, $\delta^{18}\text{O}$ 在约8 262 a B.P.发生突变,指示8.2 ka事件开始。随后, $\delta^{18}\text{O}$ 缓慢正偏,在约8 147 a B.P.进入相对稳定时期,

一直持续到8 089 a B.P.。此后, $\delta^{18}\text{O}$ 迅速负偏,并在8 073 a B.P.完成转换。

当气候突变发生时,各地质记录的数据同时表现为不同程度的偏离背景值,这种偏离程度也可以作为判定突变发生的依据。Thomas 等<sup>[3]</sup>在分析8.2 ka事件时,将四支冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 数据合成,以 GRIP 冰芯8 300~9 300 a B.P.期间 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值为基准,将偏离该背景值时段作为8.2 ka事件。Liu Y 等<sup>[20]</sup>在利用和尚洞 HS-4 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 分析8.2 ka事件时,计算了5 000~9 000 a B.P.期间该石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值和标准差,将超过1倍标准差的时期作为整个8.2 ka事件的发育时段,并且发现与 Thomas 等<sup>[3]</sup>的分析结果十分吻合。这类“方差法”的运用可进一步检验“RAMPFIT”法分析结果,从而实现两种方法优势互补。对QT16和QT40石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列进行“方差法”分析,分析结果见表2和图2。结果显示,YD跨越的时段约为12 750~11 530 a B.P.,8.2 ka事件跨越的时段约为8 200~8 080 a B.P.。

表1 “RAMPFIT”法分析结果

Table 1 The results of “RAMPFIT” analysis

转换	分析时段/a B.P.	$t_1$ /a B.P.	$t_2$ /a B.P.	$x_1$ /(‰, VPDB)	$x_2$ /(‰, VPDB)
YD 开始	11 683~13 364	13 059	12 353	-8.627	-7.138
YD 结束	10 978~12 152	11 568	11 526	-7.212	-8.267
8.2 ka 事件开始	8 088~8 272	8 262	8 147	-9.294	-8.647
8.2 ka 事件结束	7 898~8 147	8 089	8 073	-8.652	-9.217

注: $t_1$ 和 $t_2$ 分别表示转换的开始和结束时间, $x_1$ 和 $x_2$ 分别表示转换之前和之后 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均水平。



对比发现(表 2、图 2),两种方法获得的 YD 和 8.2 ka 事件的结束时间几乎一致,仅相差 4 a 和 7 a。然而,两种方法获得的事件开始时间分歧较大。对于 YD 事件,“RAMPFIT”分析结果比“方差法”结果早 309 a;而对于 8.2 ka 事件,“RAMPFIT”分析结果比“方差法”结果早 62 a。为了客观评估 YD 和 8.2 ka 事件的开始时间,本文对两种分析结果取平均值(表 2、图 2)。结果显示,YD 所跨的时段约为 12 905~11 528 a B.P.,8.2 ka 事件所跨的时段约为 8 231~8 077 a B.P.。据此,本文评估的 8.2 ka 事件开始及结束时间与 Thomas 等<sup>[3]</sup>和 Liu 等<sup>[20]</sup>结果基本吻合。QT40 记录的 8.2 ka 事件持续时间为 155 a,与两者的分析结果几乎一致(格陵兰冰芯显示 8.2 ka 事件持续了 160.5 a<sup>[3]</sup>,而和尚洞石笋显示为 150 a<sup>[20]</sup>),表明“RAMPFIT”法和“方差法”可以可靠地判断突发事件的起止时间。

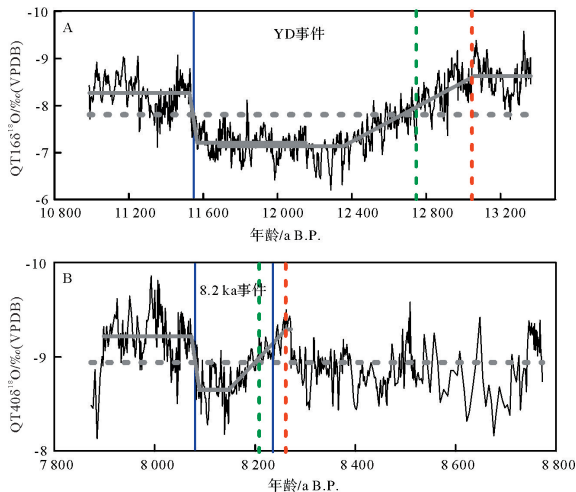


图 2 青天洞石笋 QT16 和 QT40 记录的 YD 与 8.2 ka 事件转型模式对比

灰色实线表示“RAMPFIT”方法分析结果;红色点线表示“RAMPFIT”方法给出的事件开始时间;灰色点线表示  $\delta^{18}\text{O}$  序列平均值;绿色点线表示“方差法”给出的事件开始时间;蓝色实线表示两种方法的均值。

Fig.2 Comparison of the transitional pattern of the YD and 8.2 ka event recorded by Samples QT16 and QT40

表 2 YD 和 8.2 ka 事件转型过程两种方法对比(a B.P.)

Table 2 Comparison of the onseting and ending time of YD and 8.2 ka event

方法	YD 开始	YD 结束	8.2 ka 事件	
			开始	结束
“RAMPFIT”法	13 059	11 526	8 262	8 073
“方差法”	12 750	11 530	8 200	8 080
两种方法的均值	12 904.5	11 528	8 231	8 076.5

基于上述分析,YD 开始转型过程持续约 550 a,占事件整体历时的 40%,而 8.2 ka 事件开始季风衰减历时约为 84 年,占事件整体历时的 50%。尽管 YD 和 8.2 ka 事件是不同时间尺度的气候突变事件,但是其开始过程却均表现出缓变趋势,几乎占据了事件总历时的一半。然而,在两事件结束期间,石笋  $\delta^{18}\text{O}$  却均表现为“跳跃式”变化(图 2),即两支石笋记录的 YD 和 8.2 ka 事件均表现出相似的开始缓慢而结束迅速特征。考虑到 QT16 和 QT40 石笋  $\delta^{18}\text{O}$  序列均基于年层时标,其相对年龄可靠,这种转型模式可能是对真实气候信号的响应。

### 3 讨论

#### 3.1 区域对比

已有的亚洲季风区石笋研究显示,YD 结束时间在数十年误差范围内几乎一致,主要集中于 11 500 a B.P.(图 3)。而在 YD 开始阶段,由于年龄模式、记录分辨率及缺乏显著突变等原因,使得其开始时间难以界定。目前,石笋记录的 YD 开始时间主要集中于 13 000~12 900 a B.P.。8.2 ka 事件在不同石笋记录中持续约 150~170 a,由于采样分辨率等原因,其起止时间及内部振荡存在显著差异。青天洞记录的 YD 和 8.2 ka 事件起止时间分别约为 12 900~11 530 a B.P.和 8 230~8 080 a B.P.,在测年误差范围内与同区石笋记录一致(图 3),说明青天洞 QT16 和 QT40 石笋的年层时标及本文分析方法基本可靠。

通过与亚洲季风区其他石笋记录对比发现(图 3),青天洞石笋 QT16、葫芦洞石笋 H82、衙门洞石笋 Y1 和苦栗树洞石笋 BW-1 记录的 YD 事件振幅均在 2.5‰~3‰之间<sup>[10-11,16]</sup>。在 8.2 ka 事件期间,和尚洞石笋 HS-4 最新研究结果显示,该事件振幅约为 1.7‰<sup>[20]</sup>,而青天洞石笋 QT40、董哥洞石笋 D4 和 DA 记录的该事件振幅约为 1‰<sup>[19]</sup>。由此可知不同洞穴石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录的 YD 和 8.2 ka 事件振幅仍存在 0.5‰~0.7‰ 的差异,这可能由分辨率、测年误差和不同洞穴岩溶系统差异等造成。相比而言,在同一洞穴中,石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录的 8.2 ka 事件振幅约为 YD 的 1/3~1/2,与格陵兰冰芯对比结果类似<sup>[1]</sup>。

“RAMPFIT”分析结果显示(图 2),在 YD 和 8.2 ka 事件开始,QT16 和 QT40 石笋记录的季风强度变化均呈现出缓慢衰减特征,而在两事件的结束呈现快速增强特征。这种变化模式在同区其他石笋记录中也均有体现。图 3 显示,葫芦洞 H82 石笋、苦栗树洞

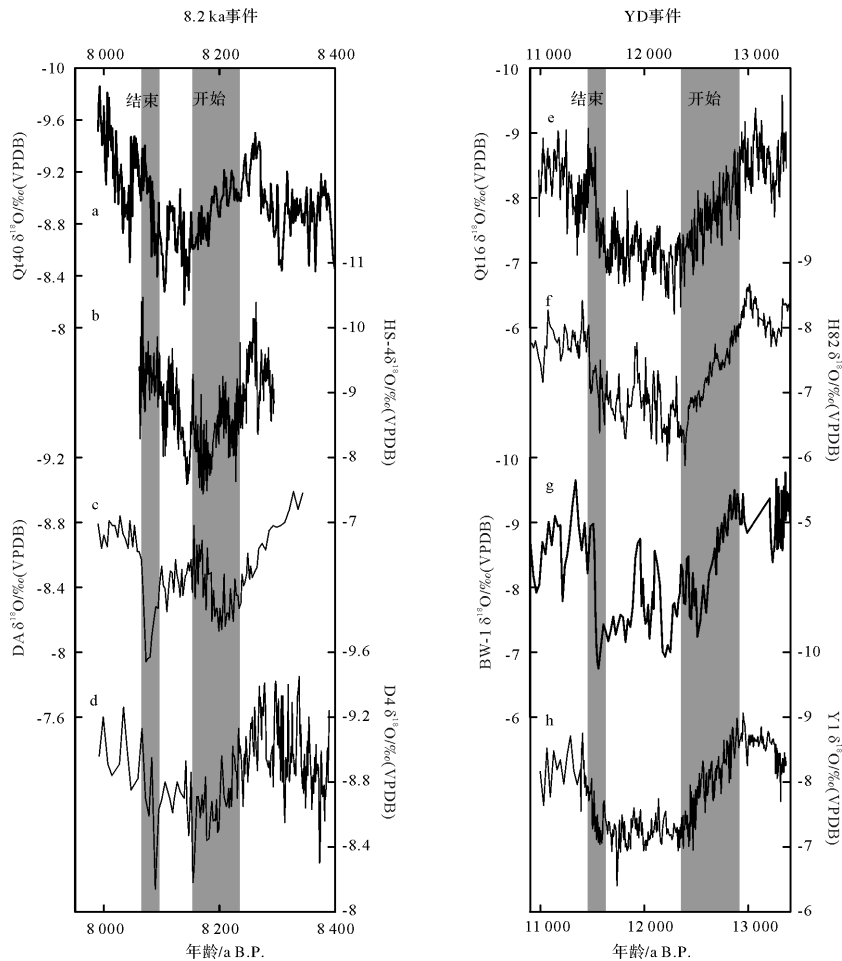


图3 亚洲季风区石笋记录的YD和8.2 ka事件

a.湖北青天洞 QT40; b.湖北和尚洞 HS-4<sup>[20]</sup>; c, d.贵州董哥洞 DA 和 D4<sup>[19]</sup>; e.湖北青天洞 QT16; f.南京葫芦洞 H82<sup>[10]</sup>; g.北京苦栗树洞 BW-1<sup>[11]</sup>; h.贵州衙门洞 Y1<sup>[16]</sup>

Fig.3 YD and 8.2 ka event from speleothem  $\delta^{18}\text{O}$  records in Asian monsoon area

BW-1 石笋和衙门洞 Y1 石笋在 YD 开始转型过程均超过 300 a<sup>[10-11,16]</sup>。其他石笋如青天洞 QT 石笋和董哥洞 D4 石笋对该过程的评估将近 400 a<sup>[13-14]</sup>。最近两支年纹层石笋显示, YD 结束期间, 季风突变完成最长不超过 20 a<sup>[11-12]</sup>。同样, 石笋 QT40 记录的季风 8.2 ka 事件“开始缓慢减弱, 结束迅速增强”的特点也可以在同区其他石笋记录中得到证实, 如来自和尚洞石笋 HS-4 以及董哥洞两支石笋 DA 和 D4 均显示了与 QT40 相类似的转型方式<sup>[19-20]</sup>(图 3b, c, d)。这些对比说明, 亚洲石笋记录的 YD 和 8.2 ka “开始缓慢减弱, 结束迅速增强”的转型模式具有区域普遍性。

### 3.2 高、低纬记录对比及季风突变驱动机制

Allerød/YD 转换在格陵兰冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  中表现为 200~250 a<sup>[5-8]</sup>, 但是, 在 YD 结束时, 冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  显示格陵兰地区在仅仅 60 a 内升温超过 10°C<sup>[5]</sup>, 其结束

之快速在早期冰芯记录中已经得到证实<sup>[25-26]</sup>。与 YD 不同, 8.2 ka 事件的开始在格陵兰地区非常迅速, 如 GISP2 冰芯记录显示, 格陵兰气温在不到 20 a 内降低了  $(3.3 \pm 1.1)^\circ\text{C}$ <sup>[9]</sup>。将亚洲季风区石笋记录(图 4c, f)与格陵兰冰芯记录(图 4a, d)对比发现, 两地记录的 YD 和 8.2 ka 事件在转型模式上表现出如下差异: 冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录的 YD 开始转型过程显著慢于 8.2 ka 期间变化, 尽管如此, 与季风 YD 开始相比, 低纬气候在 YD 开始变化显得更为缓慢。其次, 在 8.2 ka 开始, 极地气温表现为快速突变, 而同期季风衰减表现出缓慢特征, 且相对历时与 YD 开始季风变化具有极强的可比性。

从洞穴石笋同位素机理来看, 石笋  $\delta^{18}\text{O}$  信号对雨水同位素组成具有继承性。洞穴岩溶带和上覆土壤可能对雨水具有调蓄作用, 因此, “库效应”可能对

洞穴滴水  $\delta^{18}\text{O}$  信号起到平滑作用<sup>[27]</sup>,从而导致不同洞穴的洞内滴水对大气降水的响应时间可能不同。亚洲季风区已有洞穴观测显示,不同滴水点对大气降水的响应时间很短,约为 0~40 天<sup>[28]</sup>。罗维均等<sup>[29]</sup>对贵州荔波凉风洞的观测表明,洞穴上覆土壤可能会削弱洞穴滴水  $\delta^{18}\text{O}$  值变化幅度,但两者之间存在大致协调同步的季节变化。尽管本文缺乏连续野外观测研究支撑,但距离青天洞约 100 km 的和尚洞滴水  $\delta^{18}\text{O}$  监测结果表明,洞穴滴水  $\delta^{18}\text{O}$  变化滞后大气降水约 1 个月,且两者均呈现出明显的季节旋回<sup>[30]</sup>。因此,洞穴“库效应”应该不是导致石笋记录的 YD 和 8.2 ka 事件开始过程缓变的主要原因。其次,本文对于两事件转型时间的评估是基于年层时标,其年层统计误差分别为 $\pm 82$ 年(QT16)和 $\pm 14$ 年(QT40),对缓慢转型评估结果贡献很小。第三,从数十年尺度突变事件看,尽管图 3 中各支石笋记录存在细节差异,但 IACP、PBO 及 8.2 ka 内部季风增强等事件在青天洞两支石笋中均有体现,说明本文采用的两支石笋信/噪比较高,可精细捕捉季风突变细节过程。

已有研究表明,亚洲季风与北高纬气候在末次冰期千年尺度突变事件依然存在类似差异。云南小白龙洞石笋  $\delta^{18}\text{O}$  与格陵兰冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  对比发现,中国间冰段 12 的开始过程比格陵兰气温变化显著缓慢,并认为南半球气候,特别是低纬越赤道气流起到了重要作用<sup>[31]</sup>。Liu 等<sup>[12-13]</sup>认为南半球越赤道气流以及热带水文重组可能是亚洲季风 YD 事件开始过程缓慢的原因,而 Ma 等<sup>[11]</sup>认为 YD 缓慢的开始过程可能与此时北半球太阳辐射增强有关。

高、低纬记录对比显示(图 4),苏禄海  $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$  反映的热带大洋表层海水盐度上升过程在 YD 开始极为缓慢<sup>[32]</sup>(图 4e)。中美季风区哥斯达黎加 Venado 洞的石笋  $\delta^{18}\text{O}$  指示当地季风降水,在 8.2 ka 开始同样呈现缓慢衰减特征<sup>[33]</sup>(图 4b)。尽管两记录已有的时标精度难以满足精细尺度气候变化研究,但这些低纬水文记录的变化过程与 QT16 和 QT40 石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录极为类似,而与高纬气温变化存在显著差异(图 4)。低纬海洋作为亚洲季风降水的重要水汽来源,其水文状况的变化可能引起大气环流的改变,继而对比

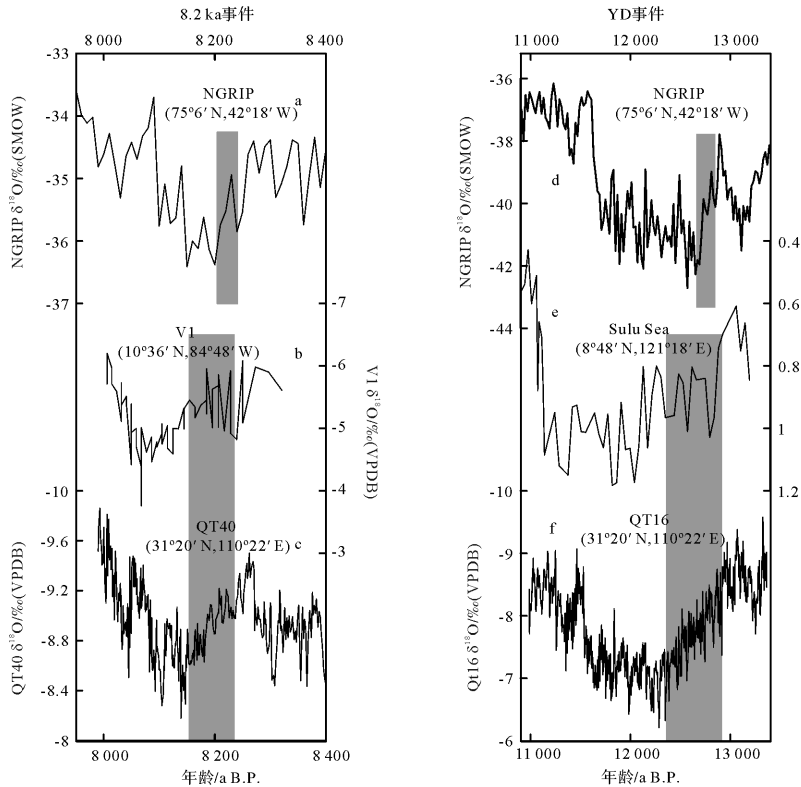


图 4 YD 和 8.2 ka 事件的高、低纬记录对比

a. 格陵兰冰芯 NGRIP<sup>[34]</sup>; b. 哥斯达黎加 Venado 洞石笋 V1<sup>[33]</sup>; c. 湖北青天洞 QT40; d. 格陵兰冰芯 NGRIP<sup>[8]</sup>; e. 苏禄海钻孔记录<sup>[32]</sup>; f. 青天洞 QT16; 灰色区域表示 YD 和 8.2 ka 事件的开始过程。

Fig.4 Comparison between high- and low-latitude records surrounding the YD and 8.2 ka event

亚洲季风产生重要影响<sup>[35-37]</sup>。如果青天洞记录与这些低纬记录的相似性得到更多记录的支持,那么,在 YD 或 8.2 ka 事件早期,青天洞记录的季风缓变行为可能具有广泛的区域意义,从而说明低纬气候突变事件可能具有其区域特殊性。

本文利用同一洞穴石笋材料进行两事件对比研究显示,亚洲季风 YD 与 8.2 ka 事件的转型过程具有相似特征,事件开始季风强度均呈现缓慢衰减,而结束却共同表现为迅速增强。末次冰期以来亚洲季风突变事件的时频特征可能受北半球高纬控制<sup>[10,14]</sup>,但青天洞石笋记录的 YD 与 8.2 ka 事件对比表明,亚洲季风的突变过程具有鲜明的低纬特色。在此期间,全球大陆冰量开始消退,北半球夏季太阳辐射开始增强,但气候总体上尚处于高纬控制状态。如果青天洞记录揭示的季风缓变行为在冰期典型突变事件中得以证实,那么,石笋  $\delta^{18}\text{O}$  信号对高、低纬,甚至南北半球气候信号可能均有继承性。

## 4 结论

(1) 青天洞两支年纹层石笋 QT16 和 QT40 高分辨率  $\delta^{18}\text{O}$  序列显示亚洲季风强度在 YD 和 8.2 ka 内部并不稳定。其中,季风强度在 YD 内部逐渐增强,并叠加三次百年尺度次级振荡;在 8.2 ka 事件内部则表现为一次 40 a 左右强季风段和两次 20 a 左右弱季风段,类似“W”型结构。

(2) 数理分析研究发现,亚洲季风强度在 YD 和 8.2 ka 事件开始均表现为缓慢减弱,而在结束迅速增强,这与格陵兰冰芯记录差异明显,却与低纬水文记录具有相似性。因此,低纬水文变化可能对其产生重要影响。末次冰期以来亚洲季风突变事件的时频特征可能受北半球高纬控制,但青天洞石笋记录的 YD 与 8.2 ka 事件对比表明,亚洲季风的突变过程具有鲜明的低纬特色。

致谢 感谢南京师范大学地理科学学院孔兴功老师为本文测试大量 U 系年龄,感谢编辑部老师和审稿专家提出的宝贵意见。

## 参考文献 (References)

- Alley R B, Mayewski P A, Sowers T, et al. Holocene climatic instability: A prominent, widespread event 8200 yr ago [J]. *Geology*, 1997, 25(6): 483-486.
- Alley R B, Ágústssdóttir A M. The 8k event: cause and consequences of a major Holocene abrupt climate change [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(10/11): 1123-1149.

- Thomas E R, Wolff E W, Mulvaney R, et al. The 8.2 ka event from Greenland ice cores [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(1/2): 70-81.
- Broecker W S, Denton G H, Edwards R L, et al. Putting the Younger Dryas cold event into context [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(9/10): 1078-1081.
- Steffensen J P, Andersen K K, Bigler M, et al. High-resolution Greenland ice core data show abrupt climate change happens in few years [J]. *Science*, 2008, 321(5889): 680-684.
- Meese D A, Gow A J, Alley R B, et al. The Greenland Ice Sheet Project 2 depth-age scale: Methods and results [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C12): 26411-26423.
- Johnsen S J, Dahl-Jensen D, Gundestrup N, et al. Oxygen isotope and palaeotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye-3, GRIP, GISP2, Renland and NorthGRIP [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2001, 16(4): 299-307.
- Rasmussen S O, Andersen K K, Svensson A M, et al. A new Greenland ice core chronology for the last glacial termination [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D6): D06102.
- Kobashi T, Severinghaus J P, Brook E J, et al. Precise timing and characterization of abrupt climate change 8200 years ago from air trapped in polar ice [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(9/10): 1212-1222.
- 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.
- Ma Z B, Cheng H, Tan M, et al. Timing and structure of the Younger Dryas event in northern China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 41: 83-93.
- Liu D B, Wang Y J, Cheng H, et al. Centennial-scale Asian monsoon variability during the mid-Younger Dryas from Qingtian Cave, central China [J]. *Quaternary Research*, 2013, 80(2): 199-206.
- 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 [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 272(3/4): 691-697.
- 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.
- Sinha A, Cannariato K G, Stott L D, et al. Variability of Southwest Indian summer monsoon precipitation during the Bølling-Ållerød [J]. *Geology*, 2005, 33(10): 813-816.
- 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 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(5): 633-641.
- Rohling E J, Pälike H. Centennial-scale climate cooling with a sudden cold event around 8,200 years ago [J]. *Nature*, 2005, 434(7036): 975-979.
- Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from southern Oman [J].



- Science, 2003, 300(5626): 1737-1739.
- 19 Cheng H, Fleitmann D, Edwards R L, et al. Timing and structure of the 8.2 kyr B.P. event inferred from  $\delta^{18}\text{O}$  records of stalagmites from China, Oman, and Brazil [J]. *Geology*, 2009, 37(11): 1007-1010.
- 20 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.
- 21 邓朝,汪永进,刘殿兵,等. “8.2 ka”事件的湖北神农架高分辨率年纹层石笋记录[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(5): 945-953. [Deng Chao, Wang Yongjin, Liu Dianbing, et al. The Asian monsoon variability around 8.2 ka B.P. recorded by an annually-laminated stalagmite from Mt. Shennongjia, central China [J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(5): 945-953. ]
- 22 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 [J]. *Chemical Geology*, 2002, 185(3/4): 165-178.
- 23 Mudelsee M. Ramp function regression: a tool for quantifying climate transitions [J]. *Computers & Geosciences*, 2000, 26(3): 293-307.
- 24 姜修洋,何尧启,沈川洲,等. 全新世黔北降水特征的石笋记录及适宜期结束时间在亚洲季风区的不等时性[J]. *科学通报*, 2012, 57(1): 73-79. [Jiang Xiuyang, He Yaoqi, Shen Chuanzhou, et al. Stalagmite-inferred Holocene precipitation in northern Guizhou Province, China, and asynchronous termination of the climatic optimum in the Asian monsoon territory [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(1): 73-79. ]
- 25 Taylor K C, Lamorey G W, Doyle G A, et al. The ‘flickering switch’ of Late Pleistocene climate change [J]. *Nature*, 1993, 361(6411): 432-436.
- 26 Taylor K C, Mayewski P A, Alley R B, et al. The Holocene-Younger Dryas transition recorded at summit, Greenland [J]. *Science*, 1997, 278(5339): 825-827.
- 27 Vaks A, Bar-Matthews M, Ayalon A, et al. Paleoclimate reconstruction based on the timing of speleothem growth and oxygen and carbon isotope composition in a cave located in the rain shadow in Israel [J]. *Quaternary Research*, 2003, 59(2): 182-193.
- 28 周运超,王世杰,谢兴能,等. 贵州4个洞穴滴水对大气降雨响应的动力学及其意义[J]. *科学通报*, 2004, 49(21): 2220-2227. [Zhou Yunchao, Wang Shijie, Xie Xingneng, et al. Significance and dynamics of drip water responding to rainfall in four caves of Guizhou, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(21): 2220-2227. ]
- 29 罗维均,王世杰. 贵州凉风洞大气降水—土壤水—滴水的  $\delta^{18}\text{O}$  信号传递及其意义[J]. *科学通报*, 2008, 53(17): 2071-2076. [Luo Weijun, Wang Shijie. Transmission of oxygen isotope signals of precipitation-soil water-drip water and its implications in Liangfeng Cave of Guizhou, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(17): 2071-2076. ]
- 30 Johnson K R, Hu C Y, Belshaw N S, et al. Seasonal trace-element and stable-isotope variations in a Chinese speleothem: The potential for high-resolution paleomonsoon reconstruction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 244(1/2): 394-407.
- 31 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.
- 32 Rosenthal Y, Oppo D W, Linsley B K. The amplitude and phasing of climate change during the last deglaciation in the Sulu Sea, western equatorial Pacific [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(8): 1428.
- 33 Lachniet M S, Asmerom Y, Burns S J, et al. Tropical response to the 8200 yr B.P. cold event? Speleothem isotopes indicate a weakened Early Holocene monsoon in Costa Rica [J]. *Geology*, 2004, 32(11): 957-960.
- 34 Rasmussen S O, Vinther B M, Clausen H B, et al. Early Holocene climate oscillations recorded in three Greenland ice cores [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(15/16): 1907-1914.
- 35 Soman M K, Slingo J. Sensitivity of the Asian summer monsoon to aspects of sea-surface-temperature anomalies in the tropical Pacific ocean [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1997, 123(538): 309-336.
- 36 Webster P J, Magaña V O, Palmer T N, et al. Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C7): 14451-14510.
- 37 Wang P X, Clemens S, Beaufort L. et al. Evolution and variability of the Asian monsoon system: state of the art and outstanding issues [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(5/6): 595-629.



# Transitional Patterns of YD and 8.2 ka Event Recorded by Annually-laminated Stalagmites from Qingtian Cave, Mt. Shennongjia

WANG Quan LIU DianBing WANG YongJin DENG Chao

(College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023)

**Abstract:** High-resolution  $\delta^{18}\text{O}$  records from two annually-laminated stalagmites (QT16 and QT40) from Qingtian Cave, Mt. Shennongjia reveal a detailed Asian monsoon (AM) variability throughout the Younger Dryas (YD) and the 8.2 ka event. During the mid-YD, the AM variability exhibits three centennial oscillations, while the 8.2 ka event is characterized by two 20-year weak AM events separated by one 40-year AM strengthening event. The general pattern of AM variability in two time windows at this site agree well with other cave records from the AM area and the Greenland records. To quantitatively evaluate the structure of the YD and 8.2 ka event, two mathematical methods are applied. In these analyses, both climate events show an asymmetrical structure, i.e., a gradual transition into the event and an abrupt ending. These transitional patterns are further supported by previous stalagmite records in the AM area. However, the AM changes during these events are significantly different from the temperature changes over the Greenland. To some degree, the gradual AM decline at the onset is similarly reflected by low-latitude terrestrial or oceanic records regarding their onsets. This implicates that a forcing factor associated with hydrological circulations in the tropical ocean might modulate the AM evolution during these events.

**Key words:** annually-laminated stalagmites; Asian monsoon; Younger Dryas event; 8.2 ka event; transitional pattern