

全新世早期弱夏季风事件的精确定位及机制探讨 ——以湖南莲花洞 LHD5 石笋为例

张华生^{1,2} 殷建军² 程海^{3,4} R Lawrence Edwards⁴ 林玉石² 唐伟²
杨会² 涂林玲² 王华² 潘谋成² 吴夏²

(1.西南大学地理科学学院 重庆 400715; 2.国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室 国际岩溶研究中心 中国地质科学院岩溶地质研究所 桂林 541004;
3.西安交通大学全球环境变化研究院 西安 710054; 4. Department of Earth Science, University of Minnesota Minneapolis 55455)

摘要 全新世早期是太阳辐射加强、全球温度上升,并伴随着冰盖消融的重要时期,而其间发生的冷事件以及亚洲季风区的弱夏季风事件的成因一直是全新世早期研究的重点。对亚洲季风—海洋—极地联系研究有着重要的意义。通过分析湖南莲花洞 LHD5 石笋 28 个 U/Th 年龄和 535 个氧同位素数据重建了全新世亚洲季风演化特征,其中全新世早期分辨率达 8 年。LHD5 石笋记录到 YD 结束时间为 11 748±30 a B.P.,全新世开始于 11 684±39 a B.P.,转换时间约为 64 年,与格陵兰 gicc05 记录在误差范围内一致。LHD5 石笋记录到全新世早期 6 次弱夏季风事件,事件年龄中心点分别为 11 461±34 a B.P.、10 354±36 a B.P.、9 957±25 a B.P.、9 062±36 a B.P.、8 744±23 a B.P.、8 144±24 a B.P.,其 $\delta^{18}\text{O}$ 值的波动幅度分别为 1.08‰、0.94‰、0.66‰、0.90‰、0.55‰、1.02‰,这些弱季风事件在亚洲季风区具有普遍的区域意义。除 8.2 ka 事件之外,10 ka B.P.之前的弱季风事件除了受到太阳活动的影响,还受到北大西洋 IRD 事件的影响,而之后更多地受到太阳活动和 ITCZ 南移的影响。

关键词 全新世早期 弱夏季风事件 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 莲花洞

第一作者简介 张华生 男 1988 年出生 硕士 石笋古气候研究 E-mail: peanutzhs@163.com

通讯作者 殷建军 男 助理研究员 E-mail: david1985_2005@163.com

中图分类号 P532 **文献标识码** A

0 引言

许多学者通过研究全新世早期各种地质记录,已经初步认识了全新世早期亚洲季风变化规律^[1-18]。全新世早期总体呈现季风增强或强季风期^[1-9],并认为全新世早期亚洲季风增强主要受岁差驱动的太阳辐射的影响^[10],全新世早期北半球太阳辐射增强推动热带辐合(ITCZ)北移,促使亚洲季风增强^[11-12]。然而,全新世早期亚洲季风在逐渐增强的趋势下存在弱季风期^[5,8,13-14],多数学者认为全新世早期千年尺度的气候振荡与北大西洋冰漂碎屑(IRD)有关^[5,11-12,14-15],将亚洲季风区千年尺度的季风变化与北半球高纬地区冰量变化联系起来,关于短时间尺度的气候波动则主要受太阳活动影响^[3,5,8,16-18]。前人的研究多是覆盖整个全新世的亚洲季风演变,利用高分辨率石笋记录讨论全新世早期季风演化的研究较

少,例如,杨琰等^[8]利用衙门洞 Y1 石笋讨论了全新世早期的季风变化并认为短时间尺度的季风变化受太阳活动影响。Cai *et al.*^[18]利用东石崖 DSY09 石笋讨论了中国北方全新世早期东亚季风弱季风事件,认为太阳活动与高纬冰量变化共同影响东亚季风演变。Zhang *et al.*^[12]利用莲花洞 LH2 石笋讨论了整个全新世的季风演化特征,但 LH2 石笋底部有暗色层可能存在沉积间断,导致全新世早期石笋分辨率较低,不足以揭示全新世早期亚洲季风演变的细节特征。另外,Wang *et al.*^[17]利用董哥洞 DA 石笋证实了全新世 9 ka B.P.以来百年—十年尺度亚洲季风受太阳活动的影响,但是却缺少 9 ka B.P.之前的全新世早期,那么全新世早期百年—十年尺度的亚洲季风变化与太阳活动又有怎样的关系?本文利用受东亚季风和印度季风共同控制的莲花洞 LHD5 石笋,讨论全新世早期亚洲季风演变特征。LHD5 石笋在全新世早期具

收稿日期: 2015-07-06; 收修改稿日期: 2015-08-03

基金项目: 中国地质科学院基本科研业务费项目(YWF201414); 岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2014025, 201319); 中国地质调查局地调项目(12120113006700) [Foundation: Fundamental Research Fund of Chinese Academy of Geological Science, No. YWF201414; Fundamental Research Fund of Institute of Karst Geology, China Geological Survey, No. 2014025, 201319; China Geological Survey Project, No. 12120113006700]

有平均8年的分辨率,能够更好地揭示全新世早期亚洲季风的细节特征,年代际尺度的弱季风事件有无区域意义以及弱季风事件的驱动机制,这些都是值得探讨的。

1 研究区概况

本文利用 LHD5 石笋重建古气候的样品,采自于湖南省龙山县莲花洞(109°32' E, 29°29' N, 图 1),该洞位于云贵高原和湖南盆地倾斜地带,其特点为多梯级喀斯特高原。莲花洞洞口海拔 455 m,洞长 580 m,高 10~20 m,宽 11~36 m,围岩主要为奥陶系上统(O₃)白质灰岩。洞穴沿断裂裂隙发育,组成北东、北西走向转折的洞穴系统,底板由钙华板组成^[19]。莲花洞所处地区属亚热带大陆性湿润季风气候,距离莲花洞约 30 km 洛塔镇现代气象资料记录,该地多年平均降雨 1 694 mm,多年平均气温 14.3℃。东亚季风和印度季风共同控制着当地的气候,每年4—9月

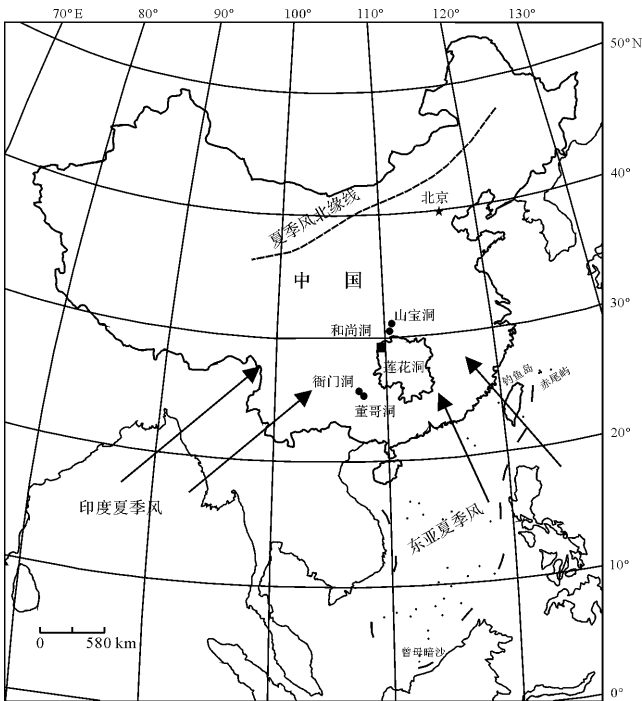


图 1 莲花洞位置图。实心正方形代表莲花洞(109°32' E, 29°29' N)位置,实心圆代表其他洞穴位置,箭头代表现代季风包括东亚夏季风和印度夏季风,虚线代表夏季风的北缘。

Fig.1 The location of Lianhua Cave. Solid square indicates the location of Lianhua Cave (109°32'E, 29°29'N), Solid circles indicate the location of other Caves. Arrows indicate generalized modern summer monsoonal winds including the East Asian and Indian summer monsoons. The dashed line represents the approximate summer monsoon limit at present.

印度夏季风和印度季风共同控制着当地的气候,每年4—9月

主要受湿热的夏季风控制,降雨丰沛,10月至次年3月主要受西伯利亚干冷冬季风控制,降水较少。

LHD5 石笋长 1 252 mm,呈圆锥形,底部直径 151 mm,顶部直径 75 mm,为文石石笋。

2 分析方法

从顶部向下沿 LHD5 石笋生长轴采集石笋年龄样品共 28 个(图 2)。年龄测试在美国明尼苏达大学地球科学系和西安交通大学同位素实验室完成,采用的仪器是 Thermo Finnigan Neptune 型多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICP-MS),采用的方法为²³⁰Th 铀系不平衡法测定。LHD5 石笋共采集 535 个碳氧同位素样品,1 252~900 mm 每 1 mm 取一个样品,900 mm 至顶部每 5 mm 取一个样品。同位素样品测试在中国地质科学院岩溶地质研究所岩溶地质与资源环境测试中心完成,实验仪器为 Thermo Finnigan MAT253 同位素比值质谱仪,外部连接 Kiel IV 碳酸盐自动进样装置,实验室标准控制样多次分析的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏差 $<0.1\text{‰}$,测试过程中每隔 9 个样品插入一个国标 GBW04405 进行检验,且每个国标后为 2 个平行样品,平行样 $\delta^{18}\text{O}$ 的差值 $<0.1\text{‰}$,数据相对 VPDB 给出。

3 结果

3.1 年代数据

表 1 及图 2 呈现了 LHD5 石笋的 U、Th 同位素含量和 28 个²³⁰Th 年龄结果,覆盖年龄时段为 11 918~85 a B.P.,其中 11 918~8 030 a B.P.时段有 13 个年龄控制点,时标精度较高。LHD5 石笋样品²³⁸U 含量高($1\ 464\sim6\ 610\times 10^{-9}/\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),²³²Th 含量低($0.2\sim2.0\times 10^{-9}/\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),因此测年精度高,测年误差为 2~48 年。

3.2 LHD5 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录

LHD5 石笋共采集 535 个氧同位素样品,采用线性内插法获取氧同位素年龄,平均分辨率为 22 年,其中 11 984~9 019 a B.P.时段分辨率为 8 年。图 3 中 LHD5 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为 $-7.82\text{‰}\sim-4.67\text{‰}$,变幅为 3.15‰,平均值为 -6.61‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值变化特征非常明显。12.0~11.75 ka B.P. $\delta^{18}\text{O}$ 值偏重,平均值为 -5.18‰ ,11.75~11.68 ka B.P. $\delta^{18}\text{O}$ 值从 -4.84‰ 迅速偏轻至 -6.69‰ ,波动幅度达 1.85‰。11.68~9.0 ka B.P. $\delta^{18}\text{O}$ 值持续偏轻,9.0~7.0 ka B.P. $\delta^{18}\text{O}$ 值达到最轻,平均值为 -7.26‰ 。11.68~8.0ka B.P. 氧同

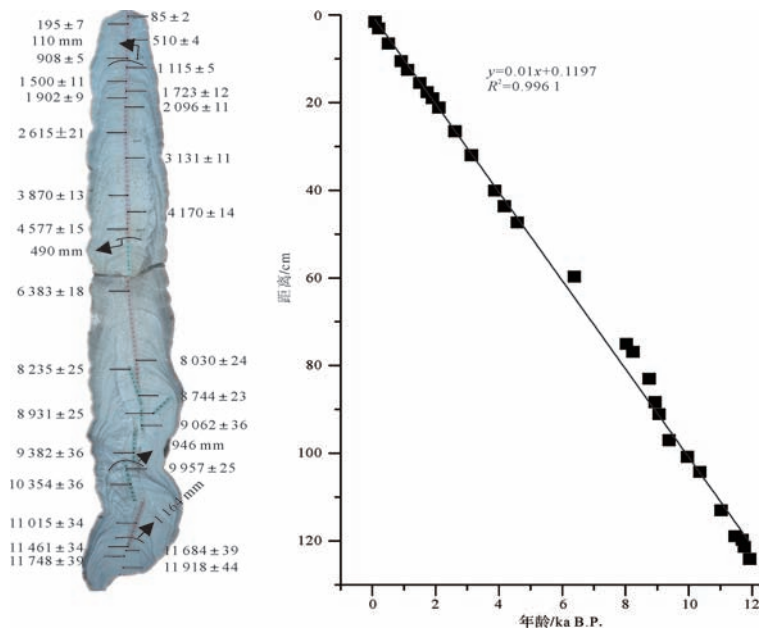


图 2 LHD5 ²³⁰Th 年龄(a B.P.), Hedy Test 取样点及生长速率

Fig.2 Simpling sites of ²³⁰Th dating and Hedy Test, right figure shows the almost constant growth rates of the whole LHD5

表 1 LHD5 石笋 U, Th 同位素组成和 ²³⁰Th 年龄

Table 1 Isotopic compositions of U, Th and ²³⁰Th dating results

深度 /cm	²³⁸ U × 10 ⁻⁹ /g · g ⁻¹	²³² Th × 10 ⁻¹² /g · g ⁻¹	²³⁰ Th/ ²³² Th (原子数比 × 10 ⁻⁶) (测量值)	δ ²³⁴ U	²³⁰ Th/ ²³⁸ U (活度比)	²³⁰ Th 年龄 (yr) (未校正值)	δ ²³⁴ U _{初始值} (校正值)	²³⁰ Th 年龄 (yr, B.P.) (校正值)
1.5	5 987±18	1 078±22	216±5	715±3	0.002 4±0.000 0	150±1	716±3	85±2
3.1	2 999±3	874±18	232±7	708±2	0.004 1±0.000 1	263±6	708±2	195±7
6.5	3 542±4	595±12	891±19	724±2	0.009 1±0.000 1	576±4	725±2	510±4
10.5	3 481±9	866±17	1 023±21	733±3	0.015 4±0.000 1	974±5	735±3	908±5
12.5	3 270±4	527±11	1 893±42	717±2	0.018 5±0.000 1	1 181±7	719±2	1 115±8
15.5	2 682±3	1 357±28	800±17	714±2	0.024 5±0.000 1	1 572±9	717±2	1 500±11
17.6	2 028±2	627±13	1 488±33	711±2	0.027 9±0.000 2	1 791±12	715±2	1 723±12
19	2 593±3	593±12	2 214±46	714±2	0.030 7±0.000 1	1 969±8	718±2	1 902±9
21.1	3 120±3	1 399±28	1 236±25	706±2	0.033 6±0.000 1	2 167±10	710±2	2 096±11
26.5	4 362±7	884±21	3 349±82	691±2	0.041 1±0.000 3	2 682±20	697±2	2 615±21
32	5 911±9	1 157±24	4 154±89	703±2	0.049 3±0.000 1	3 198±11	710±2	3 131±11
40	3 731±5	941±19	3 916±81	686±2	0.059 9±0.000 2	3 937±13	693±2	3 870±13
43.6	3 485±4	1 829±37	2 032±41	691±2	0.064 7±0.000 2	4 242±12	699±2	4 170±14
47.3	4 234±10	970±20	5 105±103	698±3	0.071±0.000 2	4 643±14	707±3	4 577±15
59.7	3 959±5	1 058±22	5 922±122	665±2	0.095 9±0.000 2	6 449±18	677±2	6 383±18
75	6 610±11	1 652±33	7 848±160	655±2	0.119±0.000 3	8 096±24	670±2	8 030±24
76.8	3 176±4	2 001±41	3 182±65	650±2	0.121 6±0.000 3	8 309±24	666±2	8 235±25
83	4 280±6	1 169±24	7 749±158	646±2	0.128 4±0.000 3	8 812±23	662±2	8 744±23
88.3	3 278±4	222±6	32 108±923	655±2	0.131 7±0.000 3	8 995±25	671±2	8 931±25
91.1	1 530±1	45±5	74 783±7 819	643±2	0.132 5±0.000 5	9 127±36	659±2	9 062±36
97	1 464±1	1 957±39	1 678±34	627±2	0.136±0.000 4	9 469±32	644±2	9 382±36
100.8	2 821±3	195±6	34 366±1 042	633±2	0.144 2±0.003	10 022±25	651±2	9 957±25
104.2	1 935±2	96±8	49 545±4 284	632±2	0.149 5±0.000 5	10 419±36	650±2	10 354±36
113	5 530±8	599±14	23 879±548	615±2	0.156 9±0.000 4	11 080±34	634±2	11 015±34
118.9	2 927±3	58±10	136 615±241 10	618±2	0.163 3±0.000 4	11 525±34	639±2	11 461±34
119.7	4 181±5	68±5	168 270±114 30	622±2	0.166 8±0.000 5	11 748±39	643±2	11 684±39
121.3	7 188±9	107±7	186 675±122 15	625±2	0.167 9±0.000 4	11 813±30	646±2	11 748±30
124.1	3 216±4	1 218±27	7 350±166	612±2	0.168 9±0.000 5	11 987±44	633±2	11 918±44
124.1	2 790±3	1 122±24	6 912±150	608±2	0.168 6±0.000 6	11 995±48	629±2	11 926±48

注: λ₂₃₈ = 1.551 25 × 10⁻¹⁰ yr⁻¹ [20], λ₂₃₀ = 9.170 55 × 10⁻⁶ yr⁻¹ [21], λ₂₃₄ = 2.822 03 × 10⁻⁶ yr⁻¹ [21], δ²³⁴U = ([²³⁴U/²³⁸U]_{活度比} - 1) × 1 000; δ²³⁴U_{初始值} 是根据 ²³⁰Th 年龄获得, 即 δ²³⁴U_{初始值} = δ²³⁴U_{测量值} × e^{λ₂₃₄ × T}. 校正 ²³⁰Th 年龄 B.P. 是相对公元 1950 年日期; 假设初始的 ²³⁰Th/²³²Th 原子比为 4.4 ± 2.2 × 10⁻⁶.

位素持续变轻的时段内,存在6个氧同位素偏重阶段。7.0~2.8 ka B.P. 氧同位素值持续偏重,2.8~0.05 ka B.P. 氧同位素波动较小且偏重,平均值为-5.79‰。

3.3 Hendy Test 及重现性检验

影响石笋氧同位素值的因素,包括气候因素(温度,降水)和非气候因素(动力分馏,蒸发)。Hendy^[22] 提出在同位素平衡分馏的情况下,石笋同位

素受温度和降雨的影响,即受气候因素的影响。并提出检验石笋同位素平衡分馏的两个准则:①同一生长层 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对稳定,向外无富集现象。②同一生长层的 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 不相关。LHD5 石笋选取4个不同的生长层,每层7个样点进行分析(图2)。从图4中看出氧同位素值比较恒定,碳同位素波动较大,碳氧的相关性不明显,表明 LHD5 石笋在整个全新世达到

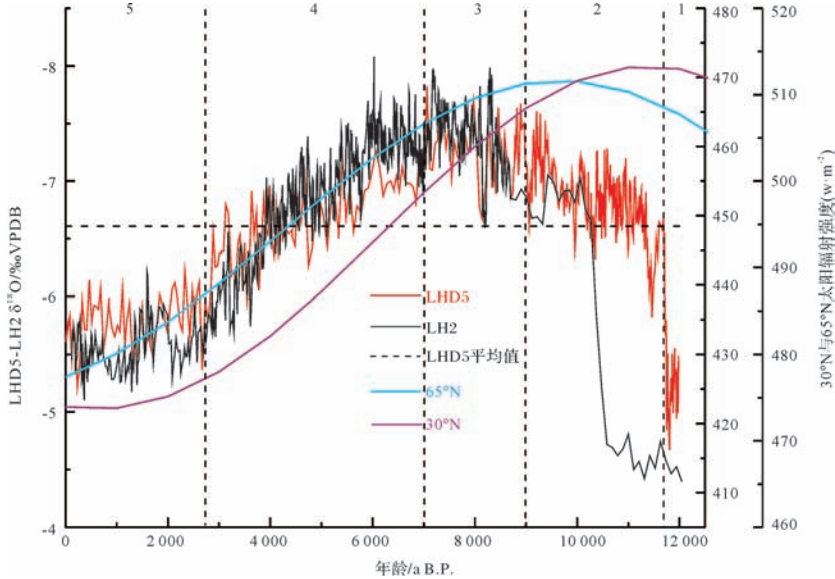


图3 莲花洞 LHD5, LH2 石笋^[12] $\delta^{18}\text{O}$ 值,与 65°N 与 30°N 太阳辐射对比图
1,2,3,4,5 分别代表 YD 事件,季风增强期,强季风期,季风减弱期,弱季风期

Fig.3 A comparison of the LHD5 and LH2^[12] $\delta^{18}\text{O}$ record to the summer insolation for 65°N and 30°N

1,2,3,4,5 represent Younger Dryas event, Strengthening monsoon period, Strong monsoon period, Weakening monsoon period, Weak monsoon period.

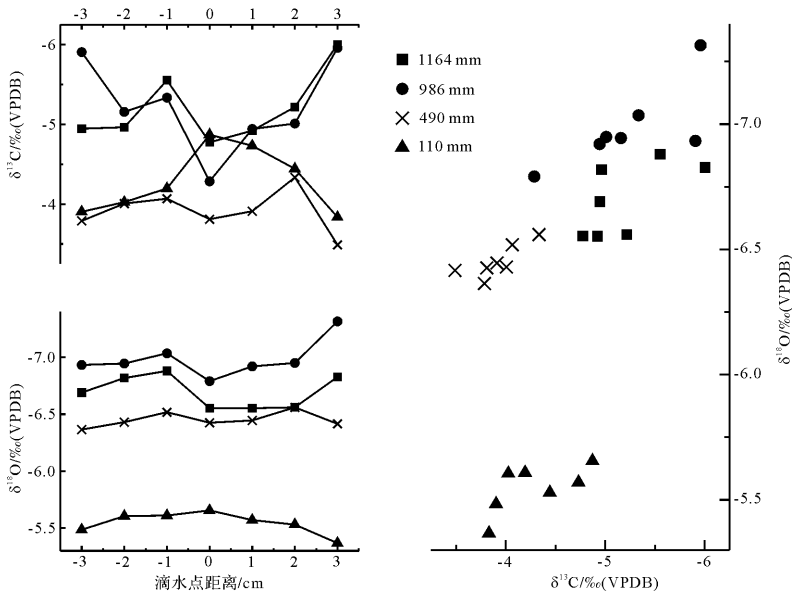


图4 LHD5 石笋 Hendy 检验结果

4 个生长层分别是 1 164 mm(实心正方形), 986 mm(实心圆), 490 mm(叉号), 110 mm(实心三角形)

Fig.4 LHD5 stalagmite Hendy Test results

four laminae at depth of 1 164 mm (solid squares), 986 mm (solid circles), 490 mm (Cross), 110 mm (solid triangles) were analyzed.

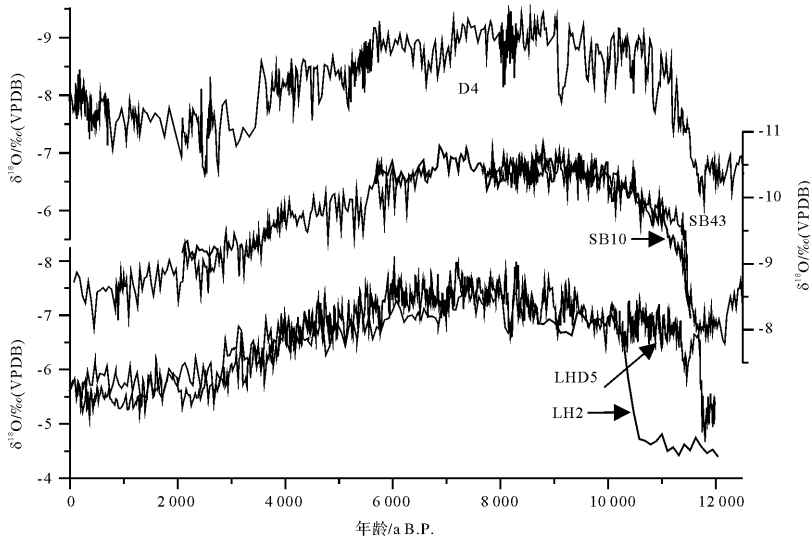


图5 LHD5 $\delta^{18}\text{O}$ 与 LH2^[12], 山宝洞 SB43 和 SB10^[7], 董哥洞 D4^[5] $\delta^{18}\text{O}$ 值重现性检验

Fig.5 The replication test of $\delta^{18}\text{O}$ record from stalagmite LHD5 and stalagmite LH2, SB43, SB10 from Shanbao Cave and D4 from Dongge cave

了同位素平衡分馏。此外,本文又利用近年来较为普遍的氧同位素重现性检验方法^[23],排除非气候因子的影响。利用 LHD5 与同一洞穴 LH2 石笋作重现性检验,由于 LH2 石笋在全新世早期分辨率较低,本文又利用山宝洞 SB10、SB34 石笋及董哥洞 D4 石笋作检验,从图 5 中可以看出 5 组氧同位素曲线对应良好,可以确认 LHD5 氧同位素代表气候信号。

4 讨论

4.1 12.0 ka B.P.以来季风演变

亚洲季风区大量的方解石石笋记录表明,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值反映了夏季风的强弱变化, $\delta^{18}\text{O}$ 值偏轻代表夏季风增强,气候温暖湿润, $\delta^{18}\text{O}$ 值偏重代表夏季风减弱,气候干旱^[3,8,10,17-18,24-26]。前人对于莲花洞文石石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值的研究也已经证实百年尺度上石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值代表亚洲季风强度^[12,19,27],在年代际及以下尺度则反映区域降水量的变化,指示区域旱涝程度的变化^[19]。

LHD5 $\delta^{18}\text{O}$ 值记录了 12.0 ka B.P.以来亚洲季风强度变化(图 3)。LHD5 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化趋势总体上与北半球太阳辐射一致,与 65°N 太阳辐射的吻合程度强于 30°N,主要体现在 LHD5 $\delta^{18}\text{O}$ 峰值与 65°N 太阳辐射峰值的年代差较小,尤其是 7 ka B.P.以后 LHD5 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化几乎与 65°N 太阳辐射一致。另外,LHD5 $\delta^{18}\text{O}$ 值与亚洲季风区其他石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化基本一致^[3,5,7,11-12,18,28]。LHD5 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值所反映的亚

季风可以分为 5 个阶段:12.0~11.75 ka B.P.为 YD 事件;11.75~9.0 ka B.P.季风增强期;9.0~7.0 ka B.P.强季风期;7.0~2.8 ka B.P.季风减弱期;2.8~0.05 ka B.P.弱季风期。同时,在季风总体演化趋势上叠加了多次弱季风事件。同一洞穴 LH2 石笋讨论了 12.5 ka B.P.以来全新世亚洲季风演变,由于 LH2 石笋在全新世早期可能存在沉积间断不足以揭示季风演变的细节特征,所以本文重点讨论全新世早期(12~8.0 ka B.P.)亚洲季风演变。

4.2 全新世早期(12~8.0 ka B.P.)亚洲季风演变

LHD5 石笋在 12~8.0 ka B.P.期间反映的亚洲季风呈逐渐增强趋势,具体又可分为 3 个阶段:12.0~11.75 ka B.P.为 YD 事件结束期;11.75~11.68 ka B.P.为季风快速增强期;11.68~8.0 ka B.P.为季风缓慢增强期。LHD5 石笋只记录到 YD 事件的结束时间标定在 11.75 ka B.P.,本文不对 12.0~11.75 ka B.P.时段进行详细的讨论。

4.2.1 季风快速增强期(11.75~11.68 ka B.P.)

11.75~11.68 ka B.P.时段,LHD5 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值从 -4.84‰ 迅速偏轻至 -6.69‰,波动幅度为 1.85‰,为季风快速增强期,或 YD 事件向全新世转换期。多数地质记录把 11.5 ka B.P.视为全新世起始点^[5,8,18,24],而具有 8 年分辨率的 LHD5 石笋记录到 YD 结束时间为 11 748±30 a B.P.,全新世开始于 11 684±39 a B.P.,转换时间约为 64 年,与 NGRIP 冰芯(11 653±99 a B.P.)极为一致(图 6),与 GRIP 冰芯(11 500±

99 a B.P.)略有差异^[29-30],这也充分说明全新世起始点的标定受测年误差、气候代用指标或局地环境等影响^[24]。另外,董哥洞(108°5' E, 25°17' N)、衙门洞(107°5' E, 25°29' N)石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值增强的趋势不及LHD5石笋、NGRIP冰芯明显,这种趋势与纬度位置有关或受其他因素影响还有待进一步讨论。

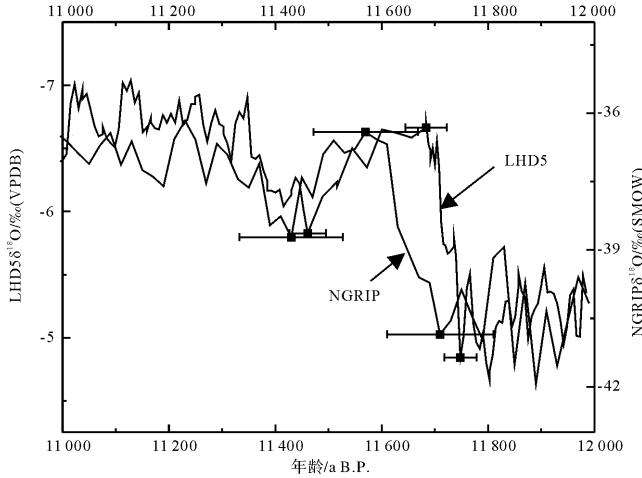


图6 YD-全新世转换期 LHD5 石笋与格陵兰 NGRIP 冰芯的一致变化

Fig.6 Synchronous variation of $\delta^{18}\text{O}$ record of NGRIP ice core and stalagmite LHD5 from YD to Early Holocene

4.2.2 季风缓慢增强期(11.68~8.0 ka B.P.)

11.68~8.0 ka B.P.时段,LHD5石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值的波动范围为 $-5.83\text{‰} \sim -7.67\text{‰}$,为季风缓慢增强期。LHD5石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值在9.3 ka B.P.开始达到峰值,与亚洲季风区其他石笋记录一致。利用石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值作为季风强度指标的亚洲季风最适宜期并未表现出穿时性,这与An的研究结论有所差异^[31],可能的原因是气候代用指标及其指标建立的基础不同。该时段LHD5石笋在季风增强的趋势上叠加了6次弱季风事件,事件中心年龄分别为 $11\,461\pm 34$ a B.P., $10\,354\pm 36$ a B.P., $9\,957\pm 25$ a B.P., $9\,062\pm 36$ a B.P., $8\,744\pm 23$ a B.P., $8\,144\pm 24$ a B.P.。其中 $11\,461\pm 34$ a B.P.和 $8\,144\pm 24$ a B.P.波动幅度超过 1‰ ,其余弱季风事件波动幅度介于 $0.5\text{‰} \sim 1\text{‰}$ 之间。

LHD5石笋记录的 $11\,461\pm 34$ a B.P.弱季风事件是全新世早期波动最大的弱季风事件,其波动幅度为 1.08‰ ,与其记录的 $8\,144\pm 24$ a B.P.弱季风事件的波动幅度(1.02‰)相当。 $11\,461\pm 34$ a B.P.弱季风事件与NGRIP冰芯记录的降温事件($11\,440\pm 97$ a B.P.)具有一致性(图7b),同时该时段HGS浓度增加(表

示存在冰漂碎屑事件)^[32](图7c),太阳黑子数量减少(代表弱的太阳活动)^[33](图7a)。亚洲季风区衙门洞Y1石笋(图7f)、东石崖DSY09石笋^[18]的弱季风事件分别记录在11.35 ka B.P.、11.3 ka B.P.,在时间上存在100年的偏差。亚洲季风区其他地质记录则不存在该弱季风事件,这就需要高分辨率地质记录进行详实的讨论。LHD5石笋记录的 $10\,354\pm 36$ a B.P.弱季风事件, $\delta^{18}\text{O}$ 值波动幅度为 0.94‰ ,特点为快速进入波动退出,事件持续事件约100年。该时段内太阳黑子数量明显减少(图7a),北大西洋在10.3 ka B.P.记录了一次冰漂碎屑事件(图7c)。亚洲季风区山宝洞石笋在这期间记录了2次连续弱季风事件(图7g),衙门洞^[8]、东石崖^[18]、老母洞^[34]、Qunf洞^[3]的弱季风事件分别记录在10.2 ka B.P.、10.3 ka B.P.、10.2 ka B.P.、10.2 ka B.P.,这说明在10.2 ka B.P.左右亚洲季风区普遍存在弱季风事件。

LHD5石笋记录的 $9\,957\pm 25$ a B.P.弱季风事件,其 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动幅度为 0.66‰ ,事件持续时长约100年。图7中该时段太阳活动有一次较小的减弱期,NGRIP冰芯在9.84 ka B.P.存在一次较小的降温事件,东石崖DSY09石笋在9.9 ka B.P.存在一次明显的弱季风事件^[18],其他地质记录的代用指标波动较小或不存在该事件。LHD5石笋记录的 $9\,062\pm 36$ a B.P.弱季风事件 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动幅度为 0.9‰ ,是一次比较强烈的弱季风事件,图7中该时段太阳黑子数量减少,NGRIP冰芯在 $9\,040\pm 64$ a B.P.也存在一次波动较小的降温事件,其显著降温事件发生在 $9\,260\pm 30$ a B.P.,时间偏差较大。Rasmussen *et al.*^[35]通过分析格陵兰DYE-3,GRIP,NGRIP冰芯,得到9.35~9.24 ka B.P.降温事件。Bond *et al.*^[36]证实北大西洋在9.4 ka B.P.存在冰漂碎屑事件,王宁练在古里雅冰芯中也发现9.4 ka B.P.冷事件^[37]。亚洲季风区董哥洞^[5]、衙门洞^[8]、山宝洞^[7]、东石崖^[18]、Qunf洞^[3]都在9.3~9.2 ka B.P.存在弱季风事件,足以说明在9.3~9.2 ka B.P.期间冷干事件发生区域是大范围的。且董哥洞D4石笋和Qunf洞Q5石笋的9.3 ka B.P.弱季风事件强度大于其8.2 ka B.P.事件^[3,5],并认为9.3 ka B.P.弱季风事件受北大西洋冰漂碎屑事件的影响。LHD5石笋在该时段没有记录到明显的弱季风事件,原因可能是受测年误差或局地气候的影响。LHD5石笋记录的 $8\,744\pm 23$ a B.P.弱季风事件 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动幅度为 0.55‰ ,与NGRIP冰芯降温事件,弱的太阳活动具有一致性,只是各种指标的波动较小。

Cariaco 盆地在这期间记录到一次较强的降水减少事件。亚洲季风区山宝洞石笋及湖光岩玛珉湖记录到 8.6 ka B.P.弱季风事件^[14,38],其他地质记录在该时间段内不存在弱季风事件。

LHD5 石笋记录的 8.2 ka B.P.弱季风事件突变为 $8\ 144\pm\ 24\ a\ B.P.$,波动幅度为 1.02‰ 。该时段正好处于弱的太阳活动期(图 7a),NGRIP 冰芯降温事件记录在 $8\ 200\pm\ 30\ a\ B.P.$ (图 7b),亚洲季风区大多数地质记录也识别到 8.2 ka 弱季风事件^[3-5,8,12-14]。关于 8.2 ka B.P.事件起止时间,内部结构特征的讨论已有一定的认识,Cheng^[39]利用亚洲季风区和南美季风区高分辨率的石笋记录及格陵兰冰芯记录证实 8.2 ka B.P.事件发生具有同步性,8.2 ka B.P.事件由 8.21ka B.P.(持续时间 70 年)和 8.06 ka B.P.(持续时间 20 年)事件构成,且 8.2 ka B.P.事件时亚洲季风表现为弱季风而南美季风为强季风。LHD5 石笋 $\delta^{18}O$ 波动幅度为 1.02‰ ,与亚洲季风区的 Qunf 洞 Q5 石笋^[3],董哥洞 DA、D4 石笋记录一致^[5,17],但小于和尚洞 HS4 石笋及老母洞 LM2 石笋的波动幅度^[28,34,40]。

以上讨论得出,全新世早期 LHD5 石笋记录的弱季风事件与 NGRIP 冰芯记录的降温事件一一对应,整个演变趋势也极为一致,与弱的太阳活动也基本对应。LHD5 石笋记录的弱季风事件在亚洲季风区其他记录中基本都存在,说明其记录的弱季风事件具有区域意义。另外,这些弱季风(降温)事件在年龄或指标波动幅度上存在差异,例如,图 3 中 LHD5 石笋在全新世早期记录的 6 次弱夏季风事件显示的 $\delta^{18}O$ 值均比现今气候环境记录的 $\delta^{18}O$ 值 ($-5.8\text{‰}\sim-6.2\text{‰}$) 偏轻 0.4‰ 左右;而图 5 中,董哥洞 D4 石笋在全新世早期记录的弱夏季风事件所显示的 $\delta^{18}O$ 值均比现今气候环境记录的 $\delta^{18}O$ 值偏重 $0.2\text{‰}\sim 0.4\text{‰}$ 。原因可能是莲花洞现今气候受太平洋近源水影响较大导致 $\delta^{18}O$ 值偏重^[41],而董哥洞在整个全新世受印度洋水汽影响^[42]。另外,通过分析亚洲季风区所报道的石笋记录^[3,7,12,14] 只有董哥洞 D4 石笋在全新世早期记录的弱夏季风事件的 $\delta^{18}O$ 值比现今气候环境记录的 $\delta^{18}O$ 值偏重,其原因则可能是受局地气候或其他因素影响。

5 全新世早期亚洲季风机制讨论

全新世早期 LHD5 石笋记录的亚洲季风呈逐渐增强的趋势,与北半球太阳辐射一致,两者的关系也得到前人的证实^[4-5,10,17,24-25]。然而,LHD5 石笋记录

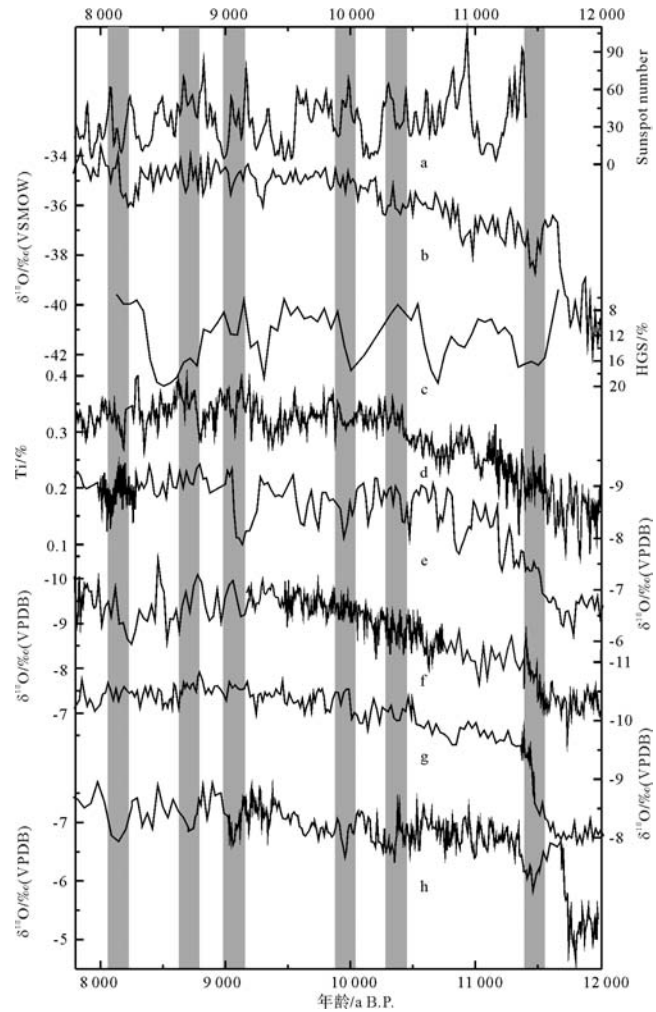


图 7 全新世早期 LHD5 石笋 $\delta^{18}O$ 记录与其他地质记录对比 a. 太阳黑子数量^[33]; b. 格陵兰 NGRIP 冰芯 $\delta^{18}O$ 记录^[29-30]; c. 北大西洋赤铁矿浓度(%)^[32]; d. Cariaco 盆地钛浓^[46]; e. 董哥洞 D4 $\delta^{18}O$ 记录^[5]; f. 衙门洞 Y1 与和尚洞 HS4 $\delta^{18}O$ 记录^[8,28]; g. 山宝洞 SB43 与 SB10 $\delta^{18}O$ 记录^[7,14]; h. LHD5 $\delta^{18}O$ 记录。

Fig.7 A comparison of the LHD5 record from Lianhua Cave and other record in Early Holocene

a. Sunspot number^[33]; b. Greenland NGRIP ice core $\delta^{18}O$ record^[29-30]; c. Hematite stained grains (%) from The North Atlantic Ocean^[32]; d. Titanium (%) data from Cariaco Basin^[46]; e. Dongge cave D4 stalagmite $\delta^{18}O$ records^[5]; f. Yamen cave Y1 stalagmite and Heshang cave HS4 $\delta^{18}O$ records^[8,28]; g. Shanbao cave SB43 and SB10 stalagmite $\delta^{18}O$ records^[7,14]; h. LHD5 stalagmite $\delta^{18}O$ records.

的季风最强盛期出现在 9~7 ka B.P.,滞后于太阳辐射峰值约 2 ka(图 3),7 ka B.P.以后二者则呈现一致性变化。另外,LHD5 石笋与 NGRIP 冰芯在全新世早期变化趋势一致,尤其是在 YD 事件向全新世转换期间,表明全新世早期高纬冰盖对亚洲季风变化的影响占主导地位,中晚全新世冰盖基本消融,太阳辐射对

亚洲季风的变化才开始起主导作用^[5]。

气候变化既要研究极地冰盖对地球表面冷热变化的影响,也要研究包括季风在内的热带过程,探索低纬的水文循环^[43]。通过遥感观测对季风的新认识:季风是热带辐合带(ITCZ)季节性迁移的表现^[44]。亚洲季风具有岁差尺度(19~23 ka)的周期变化^[10,41],那么季风的岁差周期也就表现为ITCZ的南北位移^[45]。委内瑞拉 Cariaco 盆地(10°43'N, 65°10'W)是研究 ITCZ 移动很好的地点, Huang^[46]在研究 Cariaco 盆地沉积物时发现 10.5~5.4 ka B.P.时段 Ti 和 Fe 的浓度最高,说明该时段降雨多。LHD5 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值与其 Ti 浓度变化一致性表明亚洲季风与 ITCZ 密切相关,即岁差使得全新世早期北半球太阳辐射增强,推动 ITCZ 北移,导致亚洲夏季风增强。Baker^[47]对秘鲁南部喀喀湖沉积物研究表明在 4.0~2.4 ka B.P.降水多,巴西南部 Botuverá 洞石笋记录表明全新世早期降水少,6 ka B.P.以后降水增加^[48], LHD5 石笋与巴西南部石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈“see-saw”关系,证明了在轨道尺度上南北半球低纬季风区共同受到热带辐合带(ITCZ)的影响^[7,48],这种关系也得到了亚洲季风区其他地质记录的证实^[5,7]。

全新世早期 LHD5 石笋与 NGRIP 冰芯不仅在总趋势上一致,在谷峰值的波动上也一一对应,说明 LHD5 石笋记录的弱季风事件在百年—十年尺度上受高纬冰量变化的影响。Teller *et al.*^[49]发现全新世早期 Agassiz 湖发生 10 次淡水爆发事件, LHD5 记录的 10 354±36 a B.P., 9 957±25 a B.P., 9 062±36 a B.P. 弱季风事件与其中的 3 次淡水爆发事件对应, LHD5 支持了全新世早期气候波动与淡水爆发有关^[50-51]。LHD5 记录的 8 144±24 a B.P.弱季风事件非常接近 8.2 ka B.P.事件,关于驱动 8.2 ka B.P.事件的机制有学者认为受太阳活动影响^[16-17],然而太阳活动并不能很好的解释亚洲季风与南美季风反相位的关系, Cheng^[39]认为 8.2 ka B.P.事件由 Agassiz 和 Ojibway 湖淡水释放造成,大量淡水通过哈德逊湾注入北大西洋导致北大西洋经向环流(AMOC)减弱,推动热带辐合带的南移,减弱亚洲季风强度^[48]。此外,由于 8.2 ka B.P.事件亦处于弱的太阳活动期(图 7a),本文认为 LHD5 石笋 8.2 ka B.P.事件受太阳活动和 Agassiz 和 Ojibway 湖淡水释放共同影响。然而, Rohling^[52]指出由于北大西洋淡水注入要早于亚洲季风区 8.2 ka B.P.事件,并不支持淡水注入是造成 8.2 ka B.P.事件的原因。Liu^[40]则指出亚洲季风区 8.2 ka B.P.事

件与北大西洋地区的遥相关关系,是由快速的大气传输造成的。Magny^[53]在研究全新世早期的气候波动时将太阳活动和淡水爆发结合起来进行讨论,为研究全新世早期的气候振荡提供了新思路。Solanki^[33]指出太阳黑子反映太阳活动强度,太阳黑子数量多,太阳活动强,反之亦然。图 7 中 LHD5 石笋在 10 354±36 a B.P., 9 062±36 a B.P., 8 144±24 a B.P.发生弱季风事件时都对应着太阳黑子的低值,即与弱的太阳活动相对应,说明全新早期 LHD5 石笋记录的弱季风事件在一定程度上受到太阳活动的影响。

为进一步分析太阳活动对亚洲季风的影响,采用 REDFIT38 软件对 LHD5 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值进行功率谱分析(图 8)。在 95%置信度水平下通过红噪声检验的周期主要有 88 a, 80 a, 59 a, 31 a, 27 a, 23 a, 20 a, 19 a, 17 a。88 a 周期为太阳活动的 Gleissberg 周期, LHD5 石笋检验出的 80 a 周期与董歌洞 D4 石笋的 81 a 周期非常接近^[5]。59 a 周期亦反映太阳活动周期^[3], Agnihotri *et al.*^[54]的研究表明,60 a 的太阳周期直接控制了印度夏季风强度的变化。31 a 周期接近树轮记录的¹⁴C 活动周期,在先前石笋研究中也发现^[8,17]。23 a, 20 a, 19 a, 17 a 周期接近太阳活动 22 a 的双海尔周期^[8,55], Cai *et al.*^[56]在研究九仙洞石笋也发现明显的 23 a 周期, Cai *et al.*对东石崖洞 DSY09 石笋^[18]及 Dykoski 对董歌洞 D4 石笋^[5]的研究中分别发现 20 a 和 19 a 周期。从以上分析可知 LHD5 石笋所反映的亚洲季风不仅在轨道尺度受太阳辐射控制,在百年—十年尺度也要受到太阳活动的影响。

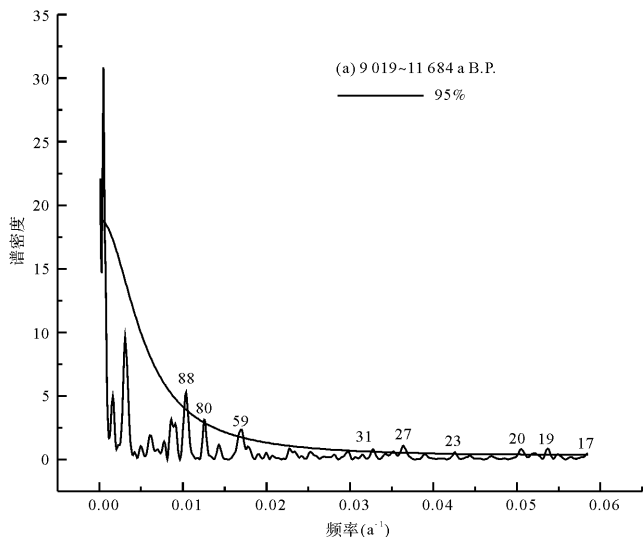


图 8 LHD5 石笋功率谱分析图

Fig.8 Power spectral analysis of LHD5 stalagmite

6 结论

通过分析湖南龙山县莲花洞 LHD5 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录得到以下结论:

(1) LHD5 石笋记录的全新世早期亚洲季风呈逐渐增强的趋势,对比研究表明亚洲季风在全新世早期相位具有一致性,主要受北半球太阳辐射的增强推动热带辐合带(ITCZ)北移影响。LHD5 石笋记录的 YD 结束时间为 $11\,748 \pm 30$ a B.P.,全新世开始于 $11\,684 \pm 39$ a B.P.,与亚洲季风区大多地质记录略有差异,转换时间约为 64 年,与格陵兰 gicc05 记录在误差范围内一致。全新世早期 LHD5 石笋记录的弱季风事件与 NGRIP 冰芯记录的降温事件一一对应,整个演变趋势也极为一致,表明亚洲季风与高纬气候变化密切相关。

(2) 全新世早期 LHD5 石笋记录的 6 次弱季风事件, $11\,461 \pm 34$ a B.P. (1.08‰) 弱季风事件 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动幅度与 $8\,144 \pm 24$ a B.P. (1.02‰) 弱季风事件相当, $10\,354 \pm 36$ a B.P.、 $9\,957 \pm 25$ a B.P.、 $9\,062 \pm 36$ a B.P. 弱季风事件时长约 100 年,且 $10\,354 \pm 36$ a B.P. 弱季风事件的特点为快速进入,波动退出。 $8\,744 \pm 23$ a B.P. 弱季风事件 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动幅度最小,且只有少数地质记录识别到该弱季风事件。通过对比发现这些弱季风事件在测年误差范围内具有区域意义,除 8.2 ka 事件之外,10 ka B.P. 之前的弱季风事件除了受到太阳活动的影响,还受到北大西洋 IRD 事件的影响,而之后更多地受到太阳活动和 ITCZ 南移的影响。

参考文献 (References)

- Overpeck J, Anderson D, Trumbore S, et al. The southwest Indian Monsoon over the last 18 000 years[J]. *Climate Dynamics*, 1996, 12(3): 213-225.
- 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[J]. *Nature*, 2003, 421(6921): 354-357.
- 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.
- Hong Y T, Hong B, Lin Q H, et al. Correlation between Indian Ocean summer monsoon and North Atlantic climate during the Holocene[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 211(3/4): 371-380.
- 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[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233(1/2): 71-86.
- Staubwasser M. An overview of Holocene South Asian monsoon records- Monsoon domains and regional contrasts[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2006, 68(3): 433-446.
- Dong J G, Wang Y J, Cheng H, et al. A high-resolution stalagmite record of the Holocene East Asian monsoon from Mt Shennongjia, central China[J]. *The Holocene*, 2010, 20(2): 257-264.
- 杨琰,袁道先,程海,等. 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[J]. *中国科学(D辑):地球科学*, 2010, 40(2): 199-210. [Yang Yan, Yuan Daoxian, Cheng Hai, 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(Seri. D): Earth Sciences*, 2010, 40(2): 199-210.]
- 吴江滢,汪永进,董进国. 全新世东亚夏季风演化的辽宁暖洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录[J]. *第四纪研究*, 2011, 31(6): 990-998. [Wu Jiangying, Wang Yongjin, Dong Jinguo. Change in East Asian summer monsoon during the Holocene recorded by stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records from Liaoning province[J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(6): 990-998.]
- 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.
- Fleitmann D, Burns S J, Mangini A, et al. Holocene ITCZ and Indian monsoon dynamics recorded in stalagmites from Oman and Yemen (Socotra)[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(1/2): 170-188.
- Zhang H L, Yu K F, Zhao J X, et al. East Asian Summer Monsoon variations in the past 12.5 ka: High-resolution $\delta^{18}\text{O}$ record from a precisely dated aragonite stalagmite in central China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 73: 162-175.
- 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[J]. *中国科学(D辑):地球科学*, 2004, 34(1): 69-74. [Qin Jiaming, Yuan Daoxian, Cheng Hai, et al. The Y. D. and climate abrupt events in the early and Middle Holocene: Stalagmite oxygen isotope record from Maolan, Guizhou, China[J]. *Science China(Seri. D): Earth Sciences*, 2004, 34(1): 69-74.]
- 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[J]. *科学通报*, 2006, 51(1): 80-86. [Shao Xiaohua, Wang Yongjin, Cheng Hai, et al. Long-term trend and abrupt events of the Holocene Asian monsoon inferred from a stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record from Shennongjia in central China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(1): 80-86.]
- Teller, J T, Leverington, D W. Glacial Lake Agassiz: a 5000 yr history of change and its relationship to the record of Greenland[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2004, 116(5): 729-742.
- Neff U, Burns S J, Mangini A, et al. Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6 kyr ago[J]. *Nature*, 2001, 411(6835): 290-293.
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate[J]. *Science*, 2005, 308(5723): 854-857.

- 18 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 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(2): L02075, doi: 10.1029/2007GL030986.
- 19 殷建军. 湖南湘西龙山莲花洞近 2000 年来气候变化石笋记录研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2013. [Yin Jianjun. Climate change in the past 2000 years revealed by stalagmites from Lianhua Cave in Northwest Hunan, China [D]. Chongqing: Southwest University, 2013.]
- 20 Jaffey A H, Flynn K F, Glendenin L E, et al. Precision measurement of half-lives and specific activities of ^{235}U and ^{238}U [J]. *Physical Review C*, 1971, 4(5): 1889-1906.
- 21 Cheng H, Edwards R L, Shen C C, et al. Improvements in ^{230}Th dating, ^{230}Th and ^{234}U half-life values, and U-Th isotopic measurements by multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 371-372: 82-91.
- 22 Hendy C H. The isotopic geochemistry of speleothems—I. The calculation of the effects of different modes of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as palaeoclimatic indicators [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1971, 35(8): 801-824.
- 23 Dorale J A, Liu Z. Limitations of Hendy test criteria in judging the paleoclimatic suitability of speleothems and the need for replication [J]. *Journal of Cave and Karst Studies*, 2009, 71(1): 73-80.
- 24 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.
- 25 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 [J]. *Nature*, 2008, 451(7182): 1090-1093.
- 26 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 [J]. *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 [J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2): 157-163.]
- 27 Cosford J, Qing H R, Eglinton B, et al. East Asian monsoon variability since the Mid-Holocene recorded in a high-resolution, absolute-dated aragonite speleothem from eastern China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 275(3/4): 296-307.
- 28 Hu C Y, Henderson G M, Huang J H, et al. Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 266(3/4): 221-232.
- 29 Vinther B M, Clausen H B, Johnsen S J, et al. A synchronized dating of three Greenland ice cores throughout the Holocene [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D13): D13102, doi: 10.1029/2005JD006921.
- 30 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*, 2006, 111(D6): D06102, doi: 10.1029/2005JD006079.
- 31 An Z S, Porter S C, Kutzbach J E, et al. Asynchronous Holocene optimum of the East Asian monsoon [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(8): 743-762.
- 32 Bond G, Kromer B, Beer J, et al. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene [J]. *Science*, 2001, 294(5549): 2130-2136.
- 33 Solanki S K, Usoskin I G, Kromer B, et al. Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11, 000 years [J]. *Nature*, 2004, 431(7012): 1084-1087.
- 34 张银环, 杨琰, 杨勋林, 等. 早全新世季风演化的高分辨率石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录研究——以河南老母洞石笋为例 [J]. *沉积学报*, 2015, 33(1): 134-141. [Zhang Yinhuan, Yang Yan, Yang Xunlin, et al. Early Holocene monsoon evolution of high-resolution stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records: in Henan Laomu Cave [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(1): 134-141.]
- 35 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.
- 36 Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates [J]. *Science*, 1997, 278(5341): 1257-1266.
- 37 王宁练, 姚檀栋, Thompson L G, 等. 全新世早期强降温事件的古里雅冰芯记录证据 [J]. *科学通报*, 2002, 47(11): 818-823. [Wang Ninglian, Yao Tandong, Thompson L G, et al. Evidence for cold events in the Early Holocene from the Guliya Ice Core, Tibetan Plateau, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(11): 818-823.]
- 38 刘嘉麒, 吕厚远, Negendank J, 等. 湖光岩玛珥湖全新世气候波动的周期性 [J]. *科学通报*, 2000, 45(11): 1190-1195. [Liu Jiaqi, Lü Houyuan, Negendank J, et al. Periodicity of Holocene climatic variations in the Huguangyan Maar Lake [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(11): 1190-1195.]
- 39 Cheng H, Fleitmann D, Edwards R L, et al. Timing and structure of the 8.2kyr B.P. event inferred from $\delta^{18}\text{O}$ records of stalagmites from China, Oman, and Brazil [J]. *Geology*, 2009, 37(11): 1007-1010.
- 40 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.
- 41 Cheng H, Edwards R L, Broecker W S, et al. Ice age terminations [J]. *Science*, 2009, 326(5950): 248-252.
- 42 Yang X L, Liu J B, Liang F Y, et al. Holocene stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records in the East Asian monsoon region and their correlation with those in the Indian monsoon region [J]. *The Holocene*, 2014, 24(12): 1657-1664, doi: 10.1177/0959683614551222.
- 43 汪品先. 低纬过程的轨道驱动 [J]. *第四纪研究*, 2006, 26(5): 694-701. [Wang Pinxian. Orbital forcing of the low-latitude processes [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 694-701.]
- 44 Gadgil S. The Indian monsoon and its variability [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2003, 31(1): 429-467.
- 45 汪品先. 全球季风的地质演变 [J]. *科学通报*, 2009, 54(5): 535-556. [Wang Pinxian. Global monsoon in a geological perspective [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(5): 535-556.]

- 46 Haug G H, Hughen K A, Sigman D M, et al. Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene[J]. *Science*, 2001, 293(5533): 1304-1308.
- 47 Baker P A, Seltzer G O, Fritz S C, et al. The history of South American tropical precipitation for the past 25, 000 years[J]. *Science*, 2001, 291(5504): 640-643.
- 48 Wang X F, Auler A S, Edwards R L, et al. Millennial-scale precipitation changes in southern Brazil over the past 90, 000 years[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(23): L23701, doi: 10.1029/2007GL031149.
- 49 Teller J T, Leverington D W, Mann J D. Freshwater outbursts to the oceans from glacial Lake Agassiz and their role in climate change during the last deglaciation[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(8/9): 879-887.
- 50 Mayewski P A, Rohling E E, Stager J C, et al. Holocene climate variability[J]. *Quaternary Research*, 2004, 62(3): 243-255.
- 51 Hong Y T, Hong B, Lin Q H, et al. Synchronous climate anomalies in the western North Pacific and North Atlantic regions during the last 14, 000 years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(9/10): 840-849.
- 52 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.
- 53 Magny M, Vannière B, De Beaulieu J L, et al. Early-Holocene climatic oscillations recorded by lake-level fluctuations in west-central Europe and in central Italy[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(15/16): 1951-1964.
- 54 Mavromichalaki H, Belehaki A, Rafios X, et al. Hale-cycle effects in cosmic-ray intensity during the last four cycles[J]. *Astrophysics and Space Science*, 1996, 246(1): 7-14.
- 55 Agnihotri R, Dutta K, Bhushan R, et al. Evidence for solar forcing on the Indian monsoon during the last millennium[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 198(3/4): 521-527.
- 56 Cai Y J, Tan L C, Cheng H, et al. The variation of summer monsoon precipitation in central China since the last deglaciation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 291(1/2/3/4): 21-31.

Discussion about the Mechanism of the Weak Summer Monsoon Events during the Early Holocene: A case study of precisely dated stalagmite record from Lianhua Cave, Hunan province, China

ZHANG HuaSheng^{1,2} YIN JianJun² CHENG Hai^{3,4} R Lawrence Edwards⁴ LIN YuShi²
TANG Wei² YANG Hui² TU LinLing² WANG Hua² PAN MouCheng² WU Xia²

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Key Laboratory of Karst Dynamics, MLR & Guangxi; International Research Center on Karst; Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin 541004, China;

3. Institute of Global Environmental Change, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China;

4. Department of Earth Science, University of Minnesota, Minneapolis 55455, USA)

Abstract: The Early Holocene is an important period of Solar radiation strengthening, global warming and along with ice sheets melting. The cause of the colder events and the weaker summer monsoon in the Asian monsoon region during the Early Holocene has always been the focus of research. It has important significance for the study of the links among the Asian monsoon, ocean and polar regions. Based on 28 U/Th dates and 535 oxygen isotopic data of stalagmite LHD5 from Lianhua Cave, Hunan province, China, a Holocene Asian monsoon evolution record was reconstructed, and the average resolution is 8 year in the Early Holocene. From the LHD5 stalagmite record, the end of Younger Dryas was at 11 748±30 a B.P., the start of the Holocene was at 11 684±39 a B.P., and the conversion time is about 64 years, which is consistent with the records of the gicc05 ice core from Greenland in the error range. The central age of the six weak summer monsoon events were at 11 461±34 a B.P.(1.08‰), 10 354±36 a B.P.(0.94‰), 9 957±25 a B.P.(0.66‰), 9 062±36 a B.P.(0.90‰), 8 744±23 a B.P.(0.55‰) and 8 144±24 a B.P.(1.02‰) in the record of the stalagmite LHD5 during the Early Holocene, respectively. These weaker summer monsoon events in the Asian monsoon region have a common regional significance. In addition to the 8.2 ka event, the weaker summer monsoon events before 10 ka B.P. were not only affected by the summer insolation but also by the ice-rafted debris (IRD) events in the North Atlantic, but the following weak summer monsoon events were mostly influenced by solar activity and the southward migration of the mean position of the Inter-Tropical Convergence Zone.

Key words: Early Holocene; weak summer monsoon events; stalagmite; δ¹⁸O; Lianhua cave