

文章编号:1000-0550(2019)02-0301-08

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2018.123

石笋初始 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 值的冰量周期特征及其环境意义 ——以湖北三宝洞为例

崔田丰¹, 段福才¹, 张伟宏¹, 董进国², 朱丽东¹

1. 浙江师范大学地理与环境科学学院, 浙江金华 321004

2. 南通大学地理科学学院, 江苏南通 226007

摘要 石笋氧同位素记录具有明显的2万年周期,其他记录中广泛存在的10万年周期是否在石笋中有所表现目前还鲜有报道。通过对湖北三宝洞20支石笋的铀同位素数据的分析研究发现,石笋初始 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 值在序列连续性较好的640.3~299.6 ka B.P.时间段有强烈的10万年周期特征。在间冰期和冰期时,初始 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 值分别呈增大和减小状态。初始 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 值的10万年周期与全球冰量、黄土磁化率、黄土平均粒度和大气 CO_2 变化有良好的对应关系。这些对应关系表明全球冰量、大气 CO_2 对喀斯特区地球化学元素富集和迁移作用有重要影响。石笋氧同位素的显著岁差周期独立于石笋微量元素、高纬冰量和全球温室气体变化,暗示了太阳辐射变化对低纬水汽环流的直接影响。石笋初始 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 与氧同位素、太阳辐射在冰消期时的对应变化支持北半球太阳辐射能量变化对冰期—间冰期旋回的调控作用。

关键词 石笋; 初始 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$; 周期; 古气候; 三宝洞

第一作者简介 崔田丰,男,1992年出生,硕士研究生,自然地理学,E-mail:cuitianfeng001@163.com

通信作者 段福才,男,讲师,E-mail:feduan@foxmail.com

中图分类号 P532 **文献标志码** A

0 引言

米兰科维奇理论指出地球轨道参数偏心率、斜率和岁差变化引起的北高纬夏季太阳辐射能量的周期性变化是全球气候变化的主要驱动力^[1]。10万年周期的偏心率信号是晚第四纪气候系统的主要组成部分,偏心率引起的太阳辐射能量变化被认为是10万年冰量旋回的主要原因^[2-6]。北高纬冰量变化对全球气候有重要影响,中国黄土高原黄土—古土壤磁化率和粒度等环境替代指标指示了全球冰量变化对东亚季风的驱动作用^[7]。高北纬冰量变化可能影响蒙古—西伯利亚高压来驱动东亚夏季风和冬季风的变化,形成了中国黄土磁化率和粒度的10万年的主导周期成分。但是,洞穴石笋记录呈现出不同的气候变化信号。中国石笋氧同位素记录主要继承了大气降水同位素的变化信息,指示了中低纬水汽循环的变化过程^[8-12]。过去640 ka跨越了七个冰期旋回的中国中东部石笋氧同位素记录显示了明显的岁差周期,10万年的偏心率周期较弱,说明中低纬水汽变化主要受太阳辐射能量变化控制,在很大程度上独立于北高纬

冰量变化^[12]。此高精度铀钍年代的640 ka的石笋氧同位素记录还显示出,约100 ka周期的冰期旋回对应于整数个岁差旋回。该结果表明太阳辐射量变化是全球气候变化的直接因素。与中国中东部石笋记录稍有不同的是,中国西南地区小白龙洞穴石笋氧同位素记录除了记录有与三宝洞等洞穴记录一样有显著岁差周期外,还表现出明显的冰期旋回^[13]。此经向上的信号差异可能归因于中国西南和中东部在气候边界条件改变时空气环流和水汽输送路径的改变引起同位素信号的改变。在纬向上,黄土高原与南方石笋气候主导周期方面的差异可能与季风系统的南北移动有关。在冰期时,亚欧大陆冰盖增大和海平面降低促使中国北部受夏季风影响较小,而受高北纬冰量影响较大,但在间冰期时夏季风北移导致影响力增大,因此北方的夏季风记录主要呈现出10万年周期旋回,而南方石笋从冰期到间冰期一直都主要受夏季风影响,因而呈现为受太阳辐射控制的岁差旋回^[14]。云南大理鹤庆盆地沉积物记录显示了季风变化具有明显的10万年主导周期,证实了我国西南地区10万年周期信号的存在,而岁差信号较弱^[15]。较为复杂

收稿日期:2018-02-02; 收修改稿日期:2018-03-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41602181, 41602350, 41572345) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41602181, 41602350, 41572345]

的是,鹤庆盆地记录的印度季风 10 万年周期信号与全球冰量变化具有明显的相位关系,印度季风降水增强提前全球冰量消融期约 14~35 ka。因此,地球轨道周期信号在中国大陆的时空分布还不够清晰,明确亚洲季风区地球轨道周期信号的分布有助于理解米兰科维奇理论和季风系统的动力学机制。

石笋的高精度 U/Th 绝对年龄和相对广阔的空间覆盖范围,有助于对准确地识别和验证地球轨道参数变化对亚洲季风气候的影响做出参考。早在 2008 年,杨琰等^[16]发现我国西南地区石笋初始²³⁴U/²³⁸U 值[(²³⁴U/²³⁸U)₀]的变化除了与 25°N 夏季太阳辐射能量变化曲线相似外,还与深海氧同位素的长期变化有一定的对应性。本文选用湖北神农架三宝洞的 20 支石笋,着重分析了在冰期—间冰期尺度上石笋生长速率和铀元素含量及其同位素的变化,发现(²³⁴U/²³⁸U)₀具有明显的 10 万年旋回,并与全球冰量^[17]、黄土磁化率^[18]、黄土平均粒度^[18]、大气 CO₂浓度^[19]的变化步调基本一致,此记录提供了东亚季风区 10 万年周期的岩溶地球化学元素证据。

1 研究区域、材料与方法

湖北神农架自然保护区的三宝洞(110°26'E, 31°40'N;海拔 1 902 m)位于长江中下游红坪镇境内,地处亚热带湿润区,其独特的地形和地势特点导致来自西南的暖湿气流难以到达该区域,常年盛行东南风,属于东亚冬夏季风环流交汇的控制区^[9]。该地区降雨多集中于夏季(6—8月),年降水量在 1 500~2 000 mm 之间,年均温 7℃~8℃,洞内相对湿度达 95%以上。洞穴上覆石灰岩层和土壤层较厚,并有乔木、灌木等天然植被的发育,石笋生长受外界干扰程度较小。

本文选用了来自湖北神农架三宝洞的 20 支石笋,编号分别是 SB3、SB10、SB11、SB14、SB22、SB23、SB24、SB25-1(SB25-2)、SB26、SB27、SB32、SB34、SB41、SB42、SB43、SB44、SB46、SB49、SB60、SB61,通过拼接获得了覆盖连续时段为 640~317 ka B.P.和 283~0 ka B.P.的年龄数据。其中跨越时段较长的石笋有 4 支:SB14 发育时段最长,为 622.8~299.6 ka B.P.,SB32 生长在 640.3~513.3 ka B.P.;SB61 石笋生长在 384~223 ka B.P.,但在 317~260 ka B.P.时段生长中断;SB11 生长于 224.4~129.3 ka B.P.,恰好与 SB61 生长时段相连接。其余的石笋均发育在 290~0 ka B.P.。这些样品通过²³⁰Th 测年技术进行测定^[12,20],年龄误差为±2σ 测量统计误差。石

笋同位素、²³⁸U 含量数据和计算(²³⁴U/²³⁸U)₀的原始数据均来自网络(<http://www.noaa.gov/>,注:δ²³⁴U=[(²³⁴U/²³⁸U)-1]×1000)。石笋的生长速率通过石笋两个测年点的深度差值除以其年龄差值计算得出。

2 结果和分析

2.1 石笋铀元素含量及其同位素的变化

三宝洞石笋²³⁸U 含量和(²³⁴U/²³⁸U)₀变化明显。生长于 200~0 ka 时段的石笋有 17 支,其²³⁸U 含量和(²³⁴U/²³⁸U)₀变化已在文献^[21]中进行了整理分析。生长于 640~200 ka 时段的石笋有 4 支,分别是 SB32、SB14、SB61 和 SB60。SB32 石笋²³⁸U 含量在 568~2 129 ng/g 间波动,平均值为 1 208 ng/g;(²³⁴U/²³⁸U)₀在 1.489 3~1.544 6 间波动,平均值为 1.515 8。SB14 石笋²³⁸U 含量在 170~1 379 ng/g 间波动,平均值为 718 ng/g;(²³⁴U/²³⁸U)₀在 1.522~1.611 间波动,平均值为 1.566 5。SB61 石笋²³⁸U 含量在 611~1 350 ng/g 之间,平均值为 906 ng/g;(²³⁴U/²³⁸U)₀在 1.646~1.79 间波动,平均值为 1.714 8,波动范围比较大。SB60 石笋²³⁸U 含量 1 031~1 383 ng/g 间波动,平均值为 1 182 ng/g。同一洞穴不同石笋中铀含量及其同位素的差异存在多方面的因素,例如岩溶滴水通道母岩性质的不同、岩溶水的渗透路径和滞留时间的长短等^[21]。其中石笋 SB60 和 SB61 生长年限跨度范围较小,不足以在 10 万年尺度讨论其(²³⁴U/²³⁸U)₀的变化。所以本研究选用生长于 625~300 ka 的石笋 SB14 和生长于 640~510 ka 的石笋 SB32,讨论其²³⁸U 浓度和(²³⁴U/²³⁸U)₀的周期变化。

2.2 石笋铀元素与生长速率同步变化

在 400~0 ka B.P.时段,石笋的²³⁸U 浓度和平均速率变化在间冰期呈现出高值,而在冰期明显降低。湖北三宝洞石笋²³⁸U 浓度和生长速率在间冰期比冰期大,从冰期向间冰期过度的冰消期,二者也出现及时响应(图 1)。在 MIS10 向 MIS9 转型时,石笋 SB61 的平均²³⁸U 浓度从 705 ng/g 增长到 984 ng/g,增幅为 40%,平均生长速率从 8.74 μm/a 增长到 19.36 μm/a,增幅为 122%。MIS8 向 MIS7 转型的时,石笋 SB61 的平均²³⁸U 浓度从 978 ng/g 增长到 1 020 ng/g,增幅为 4.3%,平均生长速率从 15.22 μm/a 增长到 19.11 μm/a,增幅为 26%;石笋 SB60 的平均²³⁸U 浓度平均值在 1 181 ng/g 上下波动,增长不明显,平均生长速率从 16.73 μm/a 增长到 25.94 μm/a,增幅为 55%。在大约 130 ka,即 MIS6 向末次间冰期转型期

间,石笋 ^{238}U 浓度平均值从412 ng/g增长到616 ng/g,增幅为49.73%。从末次冰期(70~11.5 ka B.P.)向全新世(11.5~0 ka B.P.)转型时, ^{238}U 浓度平均值从444 ng/g增长到898 ng/g。此外,从冰期向间冰期石笋的平均生长速率明显增大(图1)。以上结果表明在轨道尺度上温暖潮湿的间冰期气候条件下有利于石笋的生长和 ^{238}U 的富集^[21-22]。

在640~400 ka B.P.时段,石笋的 ^{238}U 浓度和生长速率也呈现出对应的冷暖旋回特征(图2,3)。SB14石笋在MIS15其 ^{238}U 浓度平均值为991 ng/g,平均生长速率为8.41 $\mu\text{m}/\text{a}$,明显高于其他阶段。SB14石笋的 ^{238}U 浓度和生长速率变化大致为暖期呈现高值、冷期呈现低值的特点。在每次冰期向间冰期转型期间, ^{238}U 浓度和生长速率均表现出上升趋势。SB32石笋在MIS15其 ^{238}U 浓度平均值为1350 ng/g,平均生长速率为20.87 $\mu\text{m}/\text{a}$ 。而进入MIS14,石笋的 ^{238}U 浓度平均值下降到803 ng/g,平均生长速率也下降到了3.89 $\mu\text{m}/\text{a}$ 。综上所述,整体上三宝洞石笋 ^{238}U 浓度和生长速率变化与全球冷暖波动的对应关系明显,可作为有效的古气候变化指标。

3 讨论

3.1 石笋初始 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 值的环境意义

过去研究表明石笋($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀值变化可指示气候和环境变化^[23-27]。石笋($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀值的波动主要直接受铀来源(主要是土壤和围岩)和水岩相互作用

过程影响。在U元素来源方面,一般认为围岩的U元素组成不变,土壤的贡献主要由土壤的风化程度和氧化还原条件决定^[26]。在土壤风化过程中,除了溶解作用外, α 反冲作用和相关的晶格损伤容易导致 ^{234}U 原子进入到溶液当中^[28]。另一方面,U元素的活性与地表氧化还原条件密切相关。U元素的天然矿物一般以正四和正六价存在,但是 U^{4+} 一般与其他元素呈类质同象置换存在,溶于水后易形成沉淀,而 U^{6+} 容易形成易溶的铀酰离子(UO_2)²⁺,活性较大,U元素易被黏土矿物、胶体物质和有机质吸附。在氧化条件下,一方面,土壤易于风化析出U元素;另一方面, U^{4+} 容易被氧化成活性的(UO_2)²⁺,伴随着土壤水和吸附物质进入到石笋沉积当中。岩溶水对围岩的溶解程度会改变围岩($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀在洞穴滴水中的相对贡献量。在冰期时,减少的大气降水因溶质饱和和作用会减弱对围岩的溶解而使土壤U元素的相对贡献增大。因此,石笋($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀的变化可能主要由地表土壤的风化程度和氧化还原条件决定,间接指示了地表的气候环境变化状况^[29]。石笋($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀可能主要反映了古降水量的变化^[16]。

石笋($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀值与 ^{238}U 含量和生长速率的对应变化关系证实了($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀变化对气候环境变化的响应。在间冰期,高的($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀值对应于较高的 ^{238}U 含量和较快生长速率(图2,3),暗示了暖湿的气候环境促使地表植被增多,土壤微生物活动增强,促使表生土壤进一步风化和较高土壤 CO_2 浓度溶解

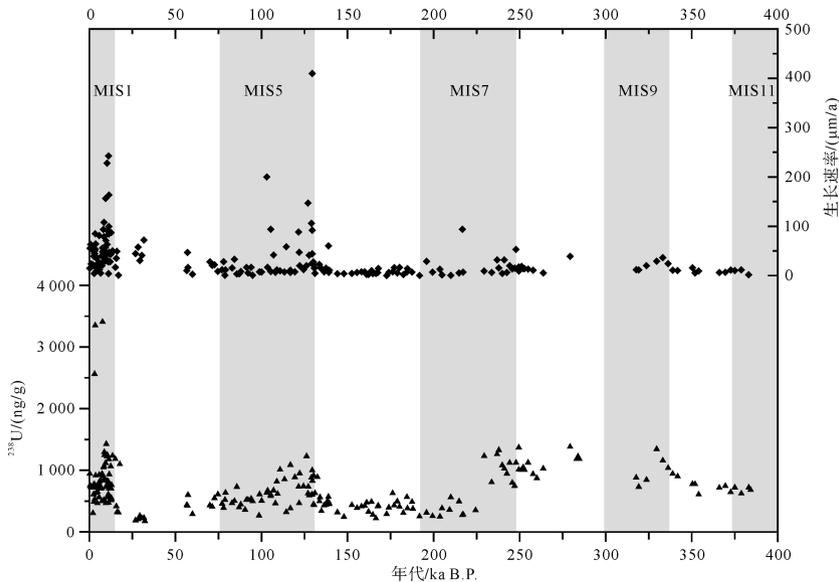


图1 湖北三宝洞石笋 ^{238}U 含量(三角)以及平均生长速率(方块)(灰色阴影代表间冰期)

Fig.1 Correlation between ^{238}U concentration and average growth rate of stalagmites (grey bars represents interglacial periods)

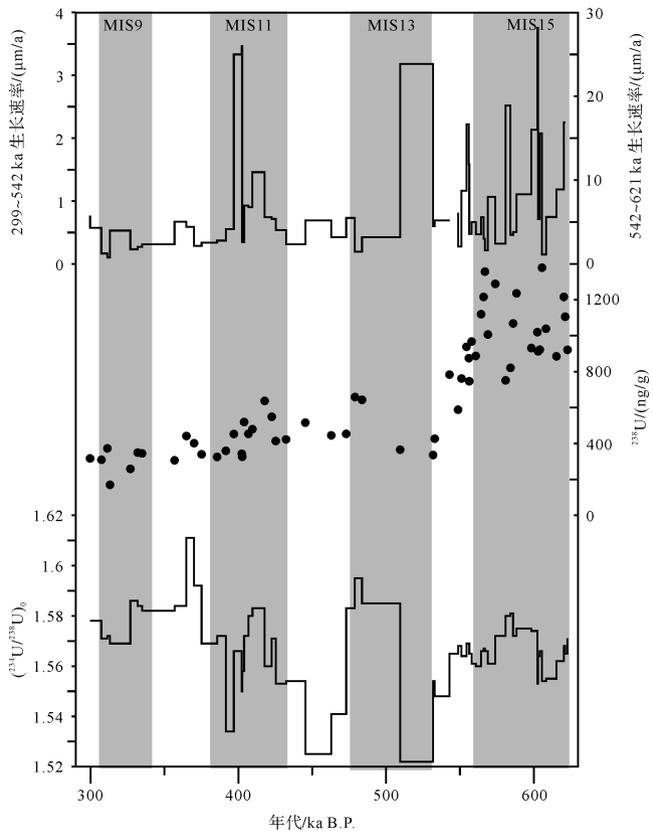


图2 湖北三宝洞石笋 SB14 的 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ 、 ^{238}U 含量(实心圆)及平均生长速率变化(299~542 ka 左上, 542~621 ka 右上, 灰色阴影代表间冰期)

Fig.2 Correlation between (SB14), $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$, ^{238}U concentration and average growth rate of stalagmite (grey bars represents interglacial periods)

更多的石笋组成元素^[21-22]。在冰期, 低的 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ 值对应于较低的 ^{238}U 含量和较慢的生长速率(图 2, 3), 指示了冷干的气候环境促使地表生产力降低, 土壤微生物活动减弱, 引起表生土壤风化能力减弱和溶解围岩的能力降低。此外, 石笋 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ 值与黄土磁化率等其他全球性气候指标的对应关系(图 4), 表明了石笋 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ 值的区域气候意义。尽管影响石笋 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ 值的因素较为复杂, 一般认为石笋 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ 值反映了古降水量的变化^[16]。这里三宝洞石笋 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ 与生长速率和 ^{238}U 含量的对应关系, 加强了石笋 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ 可能主要反映了与古降水量相关的洞穴水文循环变化的认识。东亚季风区三宝洞石笋 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ 与西太平洋海表温度变化的对应性^[21], 暗示了三宝洞石笋 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ 对季风降水变化的印记。尽管石笋 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ 和石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化都与季风降水变化相关, 但是石笋

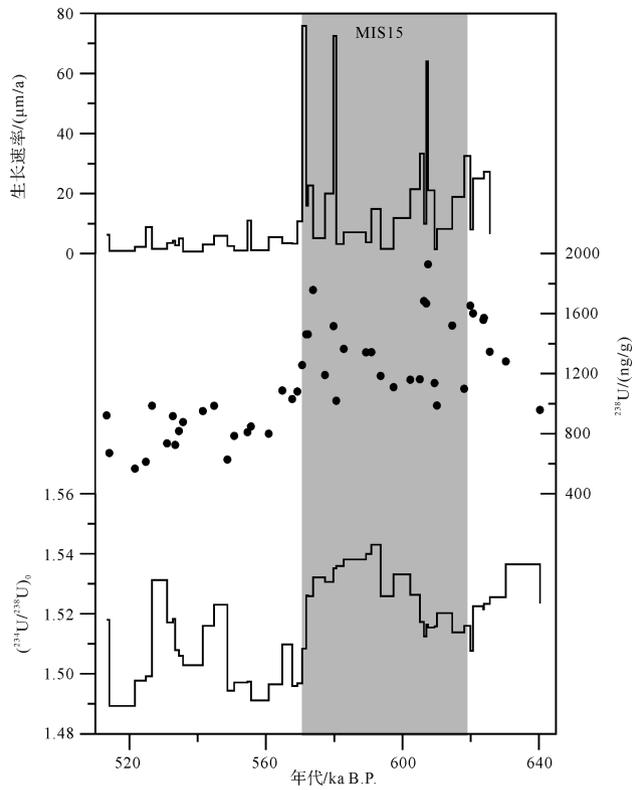


图3 湖北三宝洞石笋 SB32 的 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ 、 ^{238}U 含量(实心圆)以及平均生长速率变化(灰色阴影代表间冰期)

Fig.3 Correlation of (SB32), $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$, ^{238}U concentration and the average growth rate of stalagmite (grey bar represents interglacial periods)

$(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ 主要反映的是降水量多少, 而与季风水汽源区^[31] 的变化无关。

3.2 石笋初始 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 值的 10 万年周期旋回

洞穴石笋因岩溶通道的差异会导致同时段不同石笋含有绝对值不相同的 U 元素组成^[26]。三宝洞石笋 SB14 和 SB32 分别覆盖约 3 和 1.5 个冰期旋回(图 4, 曲线 d 和 c), 对讨论石笋 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ 值记录的气候环境变化过程具有积极意义。石笋 SB14 和 SB32 的 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ 值分别在 1.52~1.62 和 1.48~1.56 之间波动, 呈现出明显的 ~10 万年偏心率周期变化(图 5), 不同于石笋氧同位素的 ~2 万年岁差旋回^[12](图 4, 曲线 b)。石笋 SB14 和 SB32 的 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ 值的重现性(图 4, 曲线 c 和 d), 一方面证实了 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ 响应气候环境变化的可靠性, 另一方面证实了石笋 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ 值的 10 万年周期变化。此外, 石笋 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ 值的整体变化与黄土磁化率、黄土平均粒度、大气 CO_2 浓度和全球冰量变化相吻合(图 4)。高的石笋 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ 值指示的间冰期对应

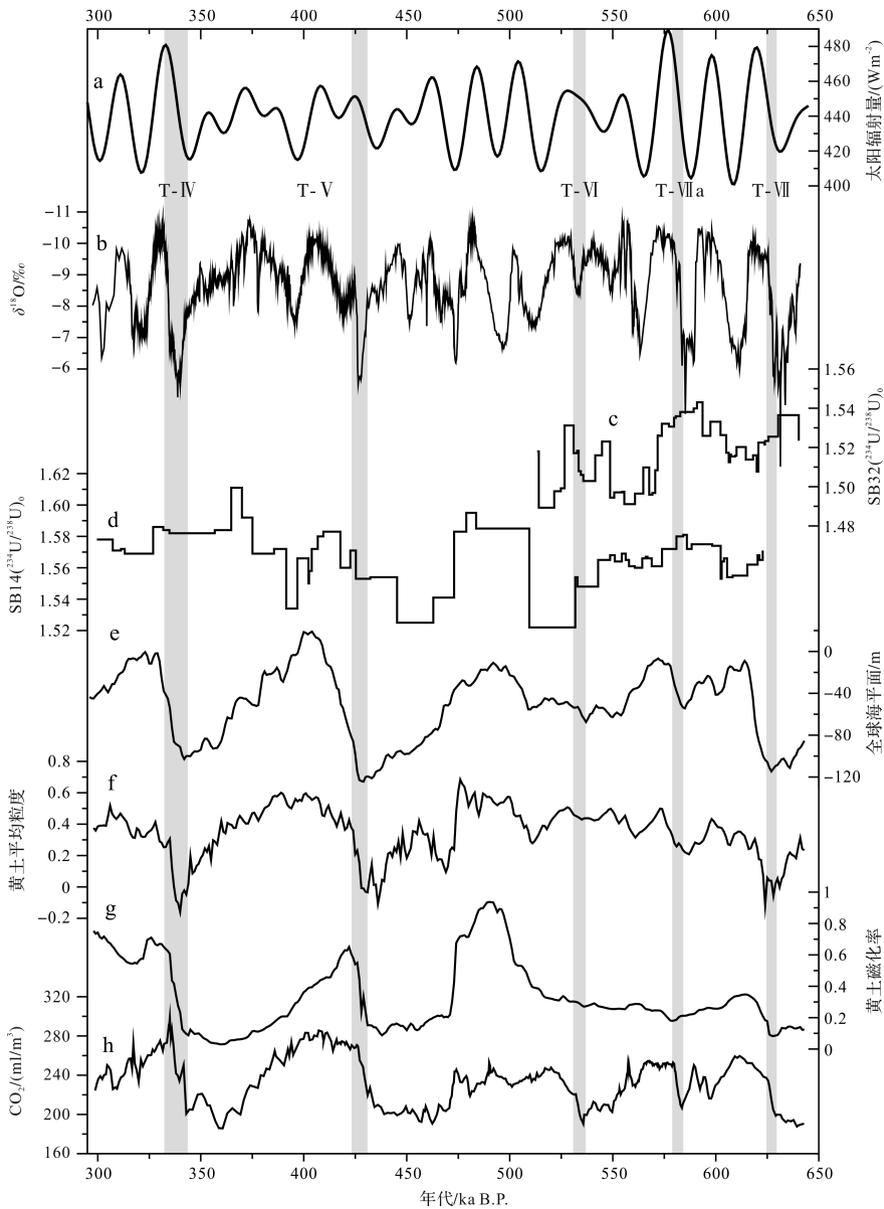


图4 a.北半球高纬夏季太阳辐射量^[30]; b.湖北三宝洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB, ‰)值^[12]; c.石笋 SB32 ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀值;
d.石笋 SB14 ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀值; e.全球冰量^[17]; f.黄土平均粒度^[18]; g.黄土磁化率^[18]; h.大气 CO₂ 含量^[19];
(灰色阴影区代表冰消期(Termination, 简称 T))

Fig.4 a. 21 July insolation at 65°N^[30]; b. composite AM $\delta^{18}\text{O}$ ^[12] record; c. ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀[SB32]; d. ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀[SB14];
e. composite sea level^[17]; f. stacked mean grain size^[18]; g. stacked magnetic susceptibility^[18]; h. CO₂ concentration^[19].
(grey bars represents terminations(T))

于黄土磁化率指示的强夏季风降水时期、黄土平均粒度指示的弱冬季风时期、全球冰量较少时期和全球 CO₂ 浓度升高时期,反之亦然。在冰消期(Termination, 简称 T)时段,尽管石笋 SB14 的 ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀ 值的分辨率较低,但较高分辨率的石笋 SB32 似乎呈现出与各记录类似的冰消期的快速变化过程。

石笋 ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀ 值和氧同位素的不同周期旋回

暗示了东亚季风区气候的不同驱动力。中国石笋氧同位素与北半球夏季太阳辐射和大气中氧气的同位素组成具有很好的对应性,并且具有相同的 2 万年周期旋回^[9]。这种对应关系表明了太阳辐射对低纬水汽循环的主导作用和这些水循环对植物生产力的影响。石笋 ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀ 值的 10 万年周期旋回可能主要反映了来自高北纬冰量变化的影响。高北纬冰量

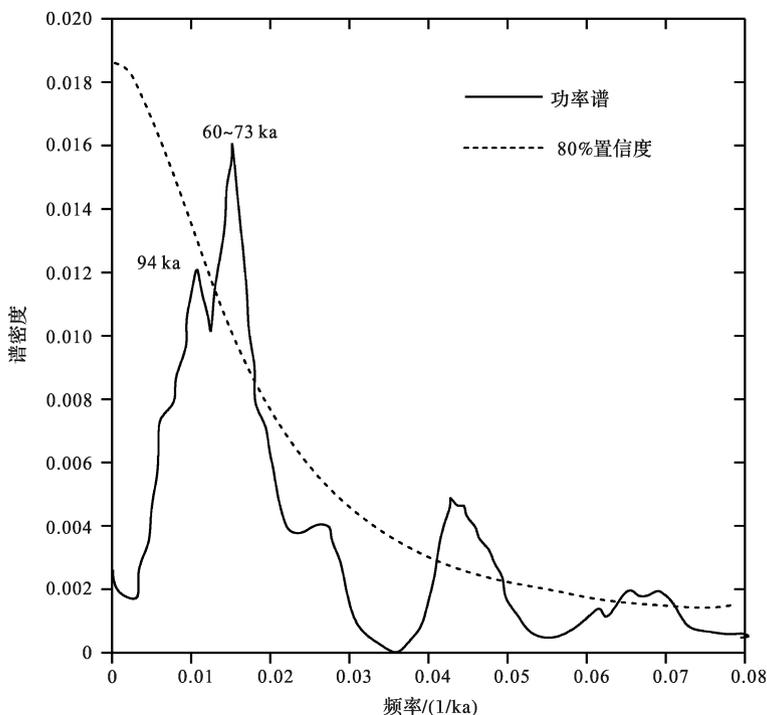


图5 三宝洞石笋 SB14 样品($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀谱分析结果(虚线代表 80%置信度水平)

Fig.5 Power spectral analysis of the SB14 stalagmite ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀ curve (broken line represents 80% confidence level)

变化通过影响大陆温度和季风水汽从热带大洋的输送能力来调节地表土壤的风化能力。此外,较高的大气 CO_2 浓度也会进一步加强土壤的风化力,而促使 ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀ 呈现 10 万年周期变化。明显的 10 万年的偏心率周期和 2 万年的岁差周期记录于同一洞穴石笋的两种不同指标中,表明东亚整体气候变化受高北纬冰量和低纬太阳辐射共同控制。由于分辨率原因,目前还不能准确确定冰消期时 ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀ 和氧同位素变化的相位关系,确定二者的关系有助于进一步理解季风的动力学机制和米兰科维奇理论。

4 结论

(1) 三宝洞石笋同位素变化受气候环境变化的影响, ^{238}U 浓度、平均生长速率和 ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀ 值与全球气候冷暖波动呈同步变化。石笋 ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀ 值变化在间冰期处于高值,在冰期处于低值,说明其与石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值指示一样可以作为古气候变化的指标。

(2) 在 640.3~299.6 ka B.P. 时间段石笋 ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀ 值有强烈的 10 万年周期旋回特征,这与全球冰量、黄土磁化率、黄土平均粒度和大气 CO_2 变化有良好的对应关系。这些对应关系表明,全球冰量和大气 CO_2 的变化对中低纬地区的化学元素富集和迁移

有重要作用。

(3) 三宝洞石笋氧同位素表现出的 2 万年周期响应于岁差控制的太阳辐射量变化,而 ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)₀ 值的 10 万年周期则响应于高北纬冰量变化,说明东亚季风区气候变化可能受这两种驱动力的共同影响。

参考文献 (References)

- [1] Milankovitch M M. Canon of insolation and the ice-age problem [M]. Belgrade: Serbian Academy Special Publication, 1941: 567.
- [2] Imbrie J, Hays J D, Martinson D G, et al. The orbital theory of pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record [M]//Berger AL, Imbrie J, Hays J, et al. Milankovitch and climate, Part 1. Dordrecht: Reidel Publishing, 1984.
- [3] Martinson D G, Pisias N G, Hays J D, et al. Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy [J]. Quaternary Research, 1987, 27(1): 1-29.
- [4] Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variations in the Earth's orbit: pacemaker of the ice ages [J]. Science, 1976, 194(4270): 1121-1132.
- [5] Winograd I J, Coplen T B, Landwehr J M, et al. Continuous 500,000-year climate record from vein calcite in Devils Hole, Nevada [J]. Science, 1992, 258(5080): 255-260.
- [6] Dahl-Jensen D, Mosegaard K, Gundestrup N, et al. Past temperatures directly from the Greenland ice sheet [J]. Science, 1998, 282

- (5387): 268-271.
- [7] Ding Z L, Liu T S, Rutter N W, et al. Ice-volume forcing of East Asian winter monsoon variations in the past 800,000 years[J]. *Quaternary Research*, 1995, 44(2): 149-159.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Cheng H, Edwards R L, Broecker W S, et al. Ice age terminations [J]. *Science*, 2009, 326(5950): 248-252.
- [11] 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.
- [12] Cheng H, Edwards R L, Sinha A, et al. The Asian monsoon over the past 640,000 years and ice age terminations [J]. *Nature*, 2016, 534(7609): 640-646.
- [13] Cai Y J, Fung I Y, Edwards R L, et al. Variability of stalagmite-inferred Indian monsoon precipitation over the past 252,000 y[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(10): 2954-2959.
- [14] Ao H, Dekkers M J, Xiao G Q, et al. Different orbital rhythms in the Asian summer monsoon records from North and South China during the Pleistocene [J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 80-81: 51-60.
- [15] An Z S, Clemens S C, Shen J, et al. Glacial-interglacial Indian summer monsoon dynamics [J]. *Science*, 2011, 333(6043): 719-723.
- [16] 杨琰,袁道先,程海,等. 洞穴石笋初始 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 值变化的古气候记录意义[J]. *地质学报*, 2008, 82(5): 692-701. [Yang Yan, Yuan Daoxian, Cheng Hai, et al. Initial $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ variation of stalagmites: implications for paleoclimate reconstruction [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(5): 692-701.]
- [17] Spratt R M, Lisiecki L E. A Late Pleistocene sea level stack [J]. *Climate of the Past*, 2016, 12(4): 1079-1092.
- [18] Sun Y B, Clemens S C, An Z S, et al. Astronomical timescale and palaeoclimatic implication of stacked 3.6-Myr monsoon records from the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(1/2): 33-48.
- [19] Lüthi D, Le Floch M, Bereiter B, et al. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present [J]. *Nature*, 2008, 453(7193): 379-382.
- [20] 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.
- [21] 董进国,刁伟,孔兴功. 湖北三宝洞石笋 ^{238}U 值变化的古气候意义 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(1): 129-135. [Dong Jinguo, Diao Wei, Kong Xinggong. Variation in uranium isotopes of stalagmites from Sanbao Cave, Hubei province: implications for palaeoclimate [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(1): 129-135.]
- [22] 董进国. 湖北三宝洞石笋生长速率及其古气候意义 [J]. *第四纪研究*, 2013, 33(1): 146-154. [Dong Jinguo. The growth and the paleoclimatic significance of stalagmites in Sanbao Cave, Hubei [J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(1): 146-154.]
- [23] Kaufman A, Wasserburg G J, Porcelli D, et al. U-Th isotope systematics from the Soreq cave, Israel and climatic correlations [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 156(3/4): 141-155.
- [24] Hellstrom J C, McCulloch M T. Multi-proxy constraints on the climatic significance of trace element records from a New Zealand speleothem [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 179(2): 287-297.
- [25] Plagnes V, Causse C, Genty D, et al. A discontinuous climatic record from 187 to 74 ka from a speleothem of the Clamouse Cave (south of France) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 201(1): 87-103.
- [26] 况润元,汪永进,张向华,等. 石笋铀同位素组成对土壤环境变化的指示 [J]. *科学通报*, 2002, 47(13): 1022-1026. [Kuang Runyuan, Wang Yongjin, Zhang Xianghua, et al. Implications for soil environment from uranium isotopes of stalagmites [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(19): 1653-1658.]
- [27] Frumkin A, Stein M. The Sahara - East Mediterranean dust and climate connection revealed by strontium and uranium isotopes in a Jerusalem speleothem [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 217(3/4): 451-464.
- [28] Zhou J Z, Lundstrom C C, Fouke B, et al. Geochemistry of speleothem records from southern Illinois: development of (^{234}U)/(^{238}U) as a proxy for paleoprecipitation [J]. *Chemical Geology*, 2005, 221(1/2): 1-20.
- [29] 陈琼,陈琳,黄嘉仪,等. 岩溶洞穴次生碳酸盐沉积轴及其同位素组成古气候环境研究进展 [J]. *中国岩溶*, 2015, 34(5): 479-485. [Chen Qiong, Chen Lin, Huang Jiayi, et al. Progress in the study of paleoclimate reconstruction from speleothem uranium and its isotope [J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(5): 479-485.]
- [30] Berger A L. Long-term variations of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements [J]. *Quaternary Research*, 1978, 9(2): 139-167.
- [31] 谭明. 环流效应: 中国季风区石笋氧同位素短尺度变化的气候意义; 古气候记录与现代气候研究的一次对话 [J]. *第四纪研究*, 2009, 29(5): 851-862. [Tan Ming. Circulation effect: Climatic significance of the short term variability of the oxygen isotopes in stalagmites from monsoonal China—Dialogue between paleoclimate records and modern climate research [J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(5): 851-862.]

Ice Volume Cycle Characteristics and the Environmental Significance of the Initial $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ Ratio Inferred from Stalagmites: A case study from Sanbao Cave, Hubei

CUI TianFeng¹, DUAN FuCai¹, ZHANG WeiHong¹, DONG JinGuo², ZHU LiDong¹

1. College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China

2. School of Geographic Science, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226007, China

Abstract: Obvious 23 000-year-long cycles have been identified in stalagmite oxygen isotope records, but 100 000-year cycles are also widely recorded in other geological records. Based on the analysis of isotopic data for 20 stalagmites from Sanbao Cave, Hubei, it is found that the initial $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ratio has a strong cycle of 100 000 years in the period 640.3-299.6 ka B.P. The values of $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ increases during interglacial periods and decreases in glacial periods. The 100 000-year cycle of $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$ corresponds closely with changes in global ice volume, loess grain size and atmospheric CO_2 concentration. This coherence indicates that the changes of global ice volume and CO_2 concentration had important effects on the enrichment and migration of geochemical elements in karst areas. These observations indicate that the oxygen isotope record for the precession cycle in stalagmites is independent of the influences of high-northern-latitude ice volume and global greenhouse gases, suggesting a direct effect of solar radiation change on low-latitude water circulation. Corresponding changes of $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$, oxygen isotope and insolation in terminations support the hypothesis that the northern hemisphere summer insolation modulate the glacial to interglacial cycle.

Key words: stalagmite; initial $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$; cycle; paleoclimate; Sanbao Cave