

殷建军, 许琦, SIRIPORNPIBUL Chaiporn, 等. 泰国南部石笋记录的晚全新世早期水文气候变化研究[J]. 中国岩溶, 2023, 42(3): 573-581.

DOI: 10.11932/karst20230307

泰国南部石笋记录的晚全新世早期水文气候变化研究

殷建军¹, 许琦¹, SIRIPORNPIBUL Chaiporn², SIRIPATTARAPUREENON Russarint², 吴夏¹, 唐伟¹, 程海³, 宁有丰³, 秦正峰¹

(1. 自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/联合国教科文组织国际岩溶研究中心/中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004; 2. 泰国自然资源与环境部矿产资源厅, 泰国曼谷 10400; 3. 西安交通大学全球环境变化研究院, 陕西西安 712000)

摘要: 中晚全新世气候转型期(4.2 ka 事件)气候变化对全球多地古文明产生了重要影响, 但该事件是否为一次全球性的气候事件, 目前仍存在一定的争议。因此, 针对该事件有必要开展全球范围的研究工作。文章以泰国南部洞穴石笋为研究对象, 通过年代学研究、碳氧稳定同位素测试分析重建了该区域晚全新世早期水文气候变化历史。研究结果显示, 该区域水文气候响应亚洲夏季风变化, 晚全新世早期夏季风降水呈现逐渐减少的趋势。两次年代际干旱事件(距今3850–3840年和距今3805–3795年)主要受到太阳活动减弱和厄尔尼诺事件的影响。总体而言, 该区域水文气候变化受到热带辐合带(ITCZ)位置南北移动的控制。

关键词: 亚洲夏季风; 石笋; 水文气候; 晚全新世早期; 泰国南部

中图分类号: P532 文献标识码: A

文章编号: 1001–4810(2023)03–0573–09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

中晚全新世气候转型期(4.2ka 事件)对全球多地的古文明演化产生了重要的影响, 如两河流域的阿卡德帝国的崩溃与毁灭^[1]、印度河流域哈拉帕文明的衰落^[2]、中国良渚文明的衰亡^[3]等。但对于4.2 ka 事件目前仍存在一些争议, 焦点在于: ① 4.2 ka 事件是否是一次全球性事件, 其起止时间是何时? 形成机制是什么? ② 气候变化对古代文明社会的作用机制是什么? 因为人具有主观能动性, 灾害出现的时候, 可以通过迁徙来躲避灾害^[4]。研究问题②所涉及领

域太广, 影响因素也太多, 可能需要长期的、多学科综合研究才能取得更多的认识。而对于问题①却可以在高精度测年的基础上, 通过研究地质载体取得更好的认识。目前, 亚洲季风区大量地质记录均记录到4.2ka 事件期间发生区域干旱事件^[2,5-6], 但由于定年精度的不确定性, 仍很难确定各记录中的干旱事件是否为同一次干旱事件^[4]。如印度东北部 Mawmluh 洞两支高精度定年并相互验证的石笋显示: 4.2 ka 事件干旱的发生在大约距今4000年至3800年间^[7]。若以此为基准, 可以发现, 亚洲季风区大量地质记录的干旱事件均偏离此时段^[5-6], 因此, 有必要

资助项目: 中国地质调查局“一带一路”重点区岩溶地质调查与编图(DD20221808); 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2021002); 中国地质调查局“一带一路”重点区岩溶地质环境对比与编图(DD20190452)

第一作者简介: 殷建军(1985—), 男, 副研究员, 博士。主要从事岩溶环境与全球变化研究。E-mail: jianjunyin@foxmail.com。

通信作者: 许琦(1984—), 男, 高级工程师, 在读博士研究生。主要从事国际合作岩溶地质调查研究。E-mail: xuqi@mail.cgs.gov.cn。

收稿日期: 2022–07–08

在高精度定年基础上开展地质记录的水文气候变化研究。

泰国南部位于中南半岛伸入海洋的马来半岛中部。属于热带季风气候,其气候不仅受到热带辐合带(ITCZ)南北移动的影响^[8],还受到亚洲夏季风的影响^[9]。泰国南部位于印度洋和太平洋(南海)之间,是沟通亚欧大陆和澳洲的大陆桥,海平面的升降同样影响着该区域的气候和环境变化^[10]。特殊的地理位置也为当地古人类演化带来了多样性,作为文明交流的重要通道,兼具大陆文明和海洋文明的特征^[11]。2019年,笔者在泰国南部考察了多个岩溶洞穴,发现多个洞穴存在古文化遗迹,如甲米府 Pee Hua Toe 洞位于近河口支流汇入处,洞穴内有多处精美的岩画,时间大概是距今(距 1950 年,下同)5 000—2 000 年。虽然,河流的枝杈和红树林很好地消减了潮汐作用对洞穴的影响,但古人为什么选择该处洞穴居住?当时整个泰国南部的气候环境如何?这些问题深深地困扰着笔者。当地此时段高精度、高分辨率的气候记录相对较少,为此,笔者以泰国南部采集的

石笋为例,试图对当时的气候环境进行重建,并探讨泰国南部过去气候环境变化,旨在为当地的考古研究建立自然背景。

1 研究区概况

本研究石笋 D008-05 采集自泰国南部甲米府 Phet 洞(8°23'36"N, 98°46'26"E, 海拔 54 m)(图 1),发育于二叠系灰色中厚层状白云质灰岩中。区域内洞穴发育受南北向和北东向区域地质构造控制,Phet 洞发育于东北向岩溶发育带的一孤峰中,为受区域地质构造控制的地下河式洞穴。Phet 洞穴规模较大,洞内可以看到 3 期明显的水平边槽,表明地下水的阶段性变化。洞内石笋、石钟乳、边石坝等十分发育,洞内石笋普遍不大,直径在 20 cm 以下居多,洞内卷曲石十分发育,反映洞穴相对封闭,洞内还可见月奶石及主相为氧化锰的风化壳层。另外还可见地下水改造残留的钥孔、悬吊岩。洞进口处有一断裂石钟乳,当地人介绍为 2004 年印度洋海啸地震震断。

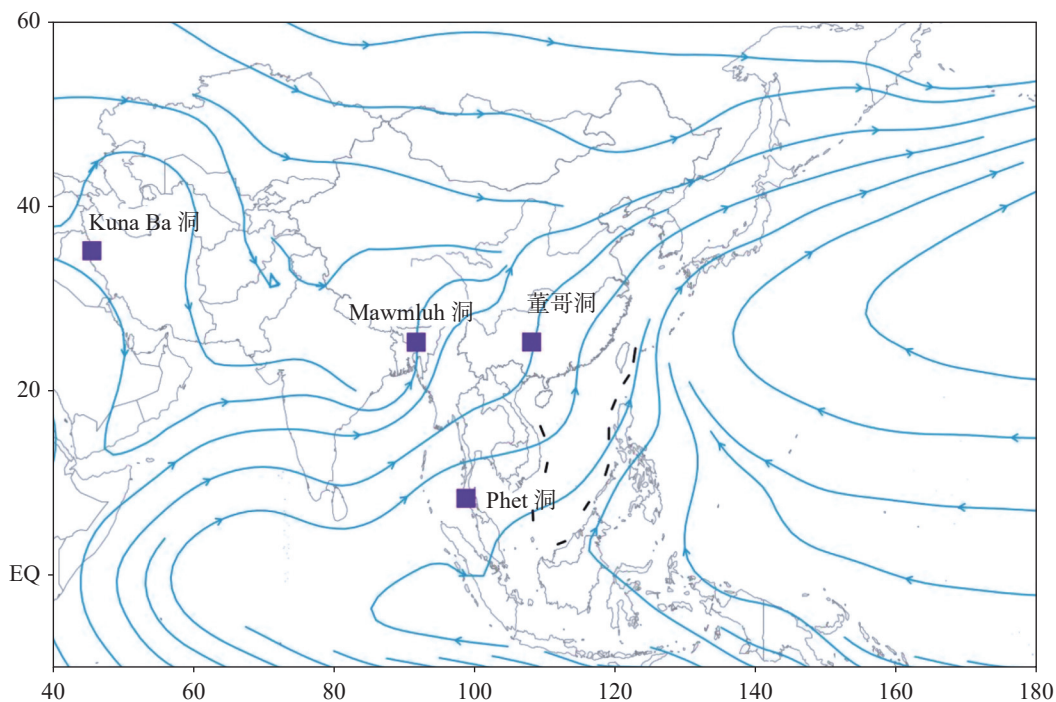


图 1 泰国 Phet 洞及相关洞穴分布(蓝色流场线为 1971-2010 年夏季整层水汽通量流场线)

Fig. 1 Location of Phet Cave and others in this study (The blue streamlines are integrated mean vapor flux from surface to 300 mb in June-July-August)

泰国南部(6°~10°N, 97°~102°E)为热带季风气候,年平均气温为 27.1 °C,最高月平均气温出现在 4 月,

为 28.3 °C;最低月平均气温出现在 12 月,为 26.1 °C。年平均降水量为 2 390 mm,年降水分为明显的雨、

旱季, 雨季开始于 5 月, 结束于 11 月; 旱季开始于 12 月, 结束于次年的 4 月。雨季降水占年降水量的 76%。洞穴顶部植被茂盛, 主要为次生林和灌丛。

2 材料和方法

D008-05 石笋长约 18 cm, 直径 5~6 cm, 为纯文石结构。D008-05 采集时已被人敲断, 表面黑黄, 已出现明显风化。沿生长轴切开, 石笋通体乳白色, 可见明显的放射状、针状文石晶体。由于生长速率较快, 石笋分布较多的晶间孔隙, 但石笋整体结构构造完整, 无明显的沉积间断。

沿生长轴自顶部向下采集²³⁰Th/U 系年龄粉末样品 10 个, 在西安交通大学全球变化研究院同位素实验室开展²³⁰Th/U 系年龄测试, 化学分析流程参考文献 [11] 和文献 [12], 通过分离出石笋中的铀 (²³⁴U、²³⁵U 和 ²³⁸U) 和钍 (²³⁰Th 和 ²³²Th) 两种元素及同位素, 并加入已知的稀释剂²²⁹Th-²³³U-²³⁶U, 来准确测量两种元素及同位素。测试仪器为美国热电公司生产的多接收电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS), 测试方法参见文献 [12]。沿生长轴自顶部向下以 1 mm 为间隔采集碳氧稳定同位素样品 160 个, 在中国地质科学院岩溶地质研究所分析测试室进行测试, 测试仪器为美国热电公司生产的 MAT 253 稳定同位素

质谱仪, 接前处理装置 Kiel IV 碳酸盐装置。测试方法采用磷酸法, 在 Kiel IV 碳酸盐装置 70 °C 恒温、真空环境下, 磷酸与碳酸钙生成 CO₂ 气体, 经过纯化, 在 MAT253 稳定同位素质谱仪中完成测试, 为每 10 个样品之间放置一个碳酸盐国家标准 GBW04405, 每 5 个样品设置一个重复样品, $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 测试标准偏差分别小于 0.05‰ 和 0.1‰。

本文中泰国南部气象数据来源于 KNMI Climate Explorer: <http://climexp.knmi.nl/>。

3 结果与分析

3.1 年龄及年代模式

DOO8-05 石笋测年结果显示, 石笋铀含量很高, 达到 18×10^{-6} 以上, ²³²Th 含量在 $1 \times 10^{-9} \sim 24 \times 10^{-9}$ 之间, 样品虽然有点脏, 但总体测年误差较小, 测年误差普遍在 20~45 年之间 (表 1)。由于石笋生长较快, 测试结果存在部分年龄倒序的情况, 但整个石笋总体年龄序列正常。基于 10 个测试年龄结果, 利用 StalAge 年代模式 [13], 建立起 D008-05 石笋的年代模型, 整个石笋生长区间为距今 3 738 年至距今 3 906 年 (图 2)。石笋平均生长速率为 $0.95 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。相对较快的生长速率为开展晚全新世早期高分辨率气候变化研究奠定了基础。

表 1 泰国南部 Phet 洞 D008-05 石笋²³⁰Th/U 系定年结果表

Table 1 ²³⁰Th/U series dating results of stalagmite D008-05 from Phet Cave, Southern Thailand

样品 编号	采样深度 距顶/mm	²³⁸ U / $\times 10^{-9}$	²³² Th / $\times 10^{-12}$	²³⁰ Th/ ²³² Th /原子比 $\times 10^{-6}$	$\delta^{234}\text{U}^*$ (测量值)	²³⁰ Th/ ²³⁸ U (活度比)	²³⁰ Th 年龄(年) (未校正)	²³⁰ Th 年龄 (年, 距1950年) (已校正)	$\delta^{234}\text{U}_{\text{初始值}}$ (校正值)
D008-05-9	1	31 983±84	6 066±130	3 451±78	158.2±2.3	0.039 7±0.000 3	3 800±32	3 723±32	160±2
D008-05-1	4	26 679±263	7 053±163	2 484±58	158.2±4.4	0.039 8±0.000 4	3 813±44	3 735±44	160±4
D008-05-10	10	18 621±66	10 433±222	1 195±28	159.4±2.7	0.040 6±0.000 4	3 886±43	3 800±44	161±3
D008-05-2	21	23 685±114	4 669±138	3 405±110	159.5±2.6	0.040 7±0.000 6	3 894±58	3 817±58	161±3
D008-05-3	30	24 715±80	2 914±61	5 703±119	161.7±2.4	0.040 8±0.000 2	3 895±17	3 821±17	163±2
D008-05-4	53	26 429±129	6 989±177	2 529±75	157.9±2.7	0.040 6±0.000 6	3 885±64	3 807±64	160±3
D008-05-5	91	23 751±71	24 290±492	674±14	157.4±2.0	0.041 8±0.000 1	4 008±16	3 912±24	159±2
D008-05-6	97	34 097±86	1 339±39	17 095±501	158.3±2.2	0.040 7±0.000 2	3 900±21	3 827±21	160±2
D008-05-7	127	27 956±120	13 042±283	1 406±39	156.5±2.7	0.039 8±0.000 7	3 813±70	3 729±70	158±3
D008-05-11	158	27 320±81	1 449±66	12 739±583	155.3±1.8	0.041 0±0.000 3	3 934±31	3 861±31	157±2

注: 衰变常数采用 $\lambda_{238} = 1.551 25 \times 10^{-10}$ [14], $\lambda_{234} = 2.822 06 \times 10^{-6}$ [12] 和 $\lambda_{230} = 9.170 5 \times 10^{-6}$ [12]。 $\delta^{234}\text{U} = ([^{234}\text{U}/^{238}\text{U}]_{\text{活度}} - 1) \times 10^3$ 。 $\delta^{234}\text{U}_{\text{初始值}}$ 的校正采用公式 $\delta^{234}\text{U}_{\text{初始值}} = \delta^{234}\text{U}_{\text{测量值}} \times e^{-\lambda_{234} \times T}$, 其中 T 为测试结果年龄。 ²³⁰Th 年龄校正采用 ²³⁰Th/²³²Th 初始值为 $4.4 \pm 2.2 \times 10^{-6}$ 。

Note: The value of the decay constant is $\lambda_{238} = 1.55125 \times 10^{-10}$ [14], $\lambda_{234} = 2.82206 \times 10^{-6}$ [12] and $\lambda_{230} = 9.1705 \times 10^{-6}$ [12]. $\delta^{234}\text{U} = ([^{234}\text{U}/^{238}\text{U}]_{\text{activity}} - 1) \times 10^3$, the correction of $\delta^{234}\text{U}$ initial value is based on $\delta^{234}\text{U}_{\text{initial value}} = \delta^{234}\text{U}_{\text{measured value}} \times e^{-\lambda_{234} \times T}$, in which T is the test result age. ²³⁰Th age adjustment was based on ²³⁰Th/²³²Th with the initial value of $4.4 \pm 2.2 \times 10^{-6}$.

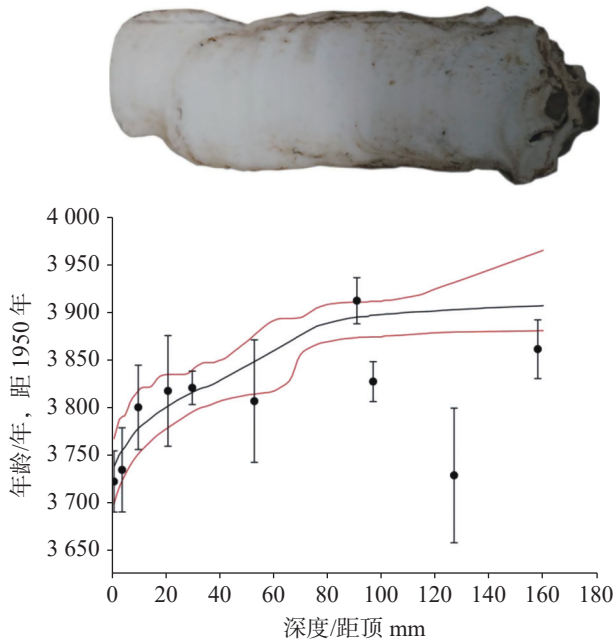


图2 D008-05 石笋剖面及年代模式(年代模式基于 StalAge 年代模式建立)

Fig. 2 Polished profile (upper panel) and Age model (lower panel) of stalagmite D008-05 (The age model was constructed based on StalAge)

3.2 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$

根据所建立的年代模型,计算出整个石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 平均分辨率约为 1 年。 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 -4.70% 到 -6.36% 之间波动,平均值为 -5.62% ; $\delta^{13}\text{C}$ 值变化从 -8.38% 到 -10.93% ,平均值为 -10.05% 。整个石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 呈现显著正相关 ($r = 0.682$, $n = 160$, $p < 0.01$),可能受到共同的气候环境因素制约。总体而言, $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 自距今 3 906 年至距今 3 800 年左右呈现一致的变正的趋势,之后呈现缓慢变负的趋势。 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 在两个时段呈现一致的变正变化,分别为距今 3 850—3 840 年和距今 3 805—3 795 年。

4 讨论

4.1 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的气候环境指示意义

$\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 同步变化可能反映了一致的气候信息。对于泰国南部石笋 $\delta^{18}\text{O}$,前人研究发现,泰国南部雨季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 水汽主要来自孟加拉湾的近源水汽,主要受源区到泰国南部对流活动和当地的降雨量控制,因此,泰国南部雨季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 能够反映当地的降水量变化^[15]。虽然作者没有开展洞穴温湿度的长期

监测,但是洞内丰富的卷曲石,说明该洞穴非常湿润且封闭,因此,Phet 洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 受到洞穴环境变化的影响较小,主要反映大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化,即当地降水量的变化。另一方面,Phet 洞 D008-05 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与亚洲季风区其他石笋记录在变化上表现出相对的一致性(图 3),说明石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 不仅反映了当地降水,还响应了区域大尺度的气候环境信息。即使洞内可能存在动力分馏作用的影响,但其仍主要响应了当地降水量的变化。石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 虽然影响因素较多,不同洞穴存在较大的差异。对于热带、亚热带季风区而言,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 主要受到两个方面的影响:(1)洞穴上覆土壤 CO_2 浓度及 $\delta^{13}\text{C}$ 值,在没有人破坏的情况下,主要受控于当地的温度和降水;(2)上覆岩土界面及含水层中水文过程,这主要受控于当地有效降水。泰国南部为热带季风气候,雨热同期,因此,可以推导出以下认识:(1)雨季/气候湿润期:降水量大,土壤 CO_2 浓度高, $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负,含水层中无碳酸钙优先沉积发生,滴水/石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负;(2)旱季/气候干旱期:降水量小,土壤 CO_2 浓度低, $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正,含水层中发生碳酸钙优先沉积,脱气时间延长,滴水/石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 偏正。因此,Phet 洞 D008-05 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的同步变化主要受控于当地雨季降水量的变化。石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负/偏正,当地降水量偏多/偏少。

4.2 晚全新世早期泰国南部水文气候变化特征

基于 D008-05 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化,可以重建泰国南部晚全新世早期的水文气候演化历史。首先,从整个全新世的角度看,晚全新世早期发生在全新世中晚期亚洲夏季风逐渐减弱的大背景下,因此,整个 D008-05 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 记录呈现总体逐渐偏正的变化趋势(图 3)。然后,D008-05 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 在距今 3 800 年左右达到整个石笋的最正值,即降水量最少/最干旱。之后, $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 在波动中逐渐偏负,说明当地降水逐渐增加。再次,D008-05 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 在距今 3 850-3 840 年和距今 3 805-3 795 年两个时间段明显偏正,指示这两个时期降水相对偏少/相对干旱。

4.3 晚全新世早期的区域水文气候对比及变化机制

纵观整个亚洲季风区,水文气候变化表现出一致性变化趋势。虽然伊拉克 Kuna Ba 洞降水主要受到西风的影响,但也表现出与亚洲季风区降水的一

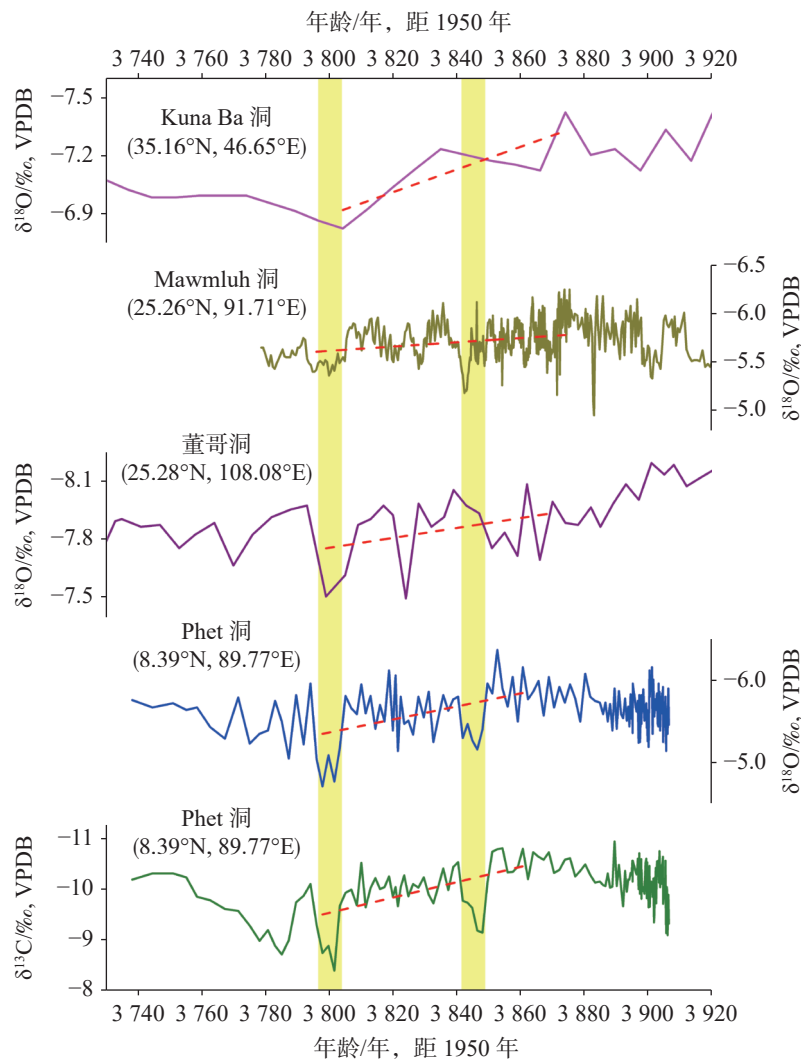


图 3 泰国南部 Phet 洞 D008-05 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 与伊拉克 Kuna Ba 洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ ^[16]、印度 Mawmluh 洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ ^[7] 及中国董哥洞 DA 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ ^[17] 对比(红色虚线为各石笋记录 $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$ 变化趋势线;黄色条带突出两个夏季风减弱时段)

Fig. 3 Comparison of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records of stalagmite D008-05 from Phet Cave, Southern Thailand, $\delta^{18}\text{O}$ records from Kuna Ba Cave, Iraq, Mawmluh Cave, India and Dongge Cave, China (Red dash lines represent the variation trend of $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$ of stalagmite records; yellow bars highlight the weakening period of summer monsoon)

致性变化趋势,说明北半球中低纬水文气候变化可能响应了全球气候系统的变化。对比伊拉克石笋、亚洲季风区石笋记录,发现距今 3 800 年左右发生的干旱事件有着显著的区域一致性(图 3)^[7,16-17]。因此,对于 4.2 ka 事件,至少在亚洲季风区表现为夏季风晚期变化及结束时间的一致性。但是,由于降水的复杂性,亚洲季风区降水的变化可能存在一定的区域差异。

周期分析结果显示,泰国南部 D008-05 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 均存在显著的 11 年太阳黑子周期和 5 年左右的厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)周期。这与现代泰国南部(6°~10°N, 97°~102°E)降雨主要为 2-7 年厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)周期存在一定的差异,

说明晚全新世早期水文气候除受到厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)的影响,还明显受到太阳活动的影响。总体而言,从图 4 可知,泰国南部水文气候变化受到热带辐合带(ITCZ)南北移动的控制,随着热带辐合带的南移,泰国南部降水减少。当然,加勒比海 Cariaco 盆地 Ti 含量的变化还受到厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)的影响,如距今 3 800 年左右 Ti 含量的升高就受到强厄尔尼诺事件的影响^[18]。另外,在距今 3 850-3 840 年间,太阳活动显著减弱,造成了亚洲夏季风的显著减弱^[17,19]。

总体而言,距今 3 906-3 738 年间,泰国南部水文气候主要受到热带辐合带(ITCZ)南北移动的影响,热带辐合带(ITCZ)的南北移动影响了亚洲夏季风的

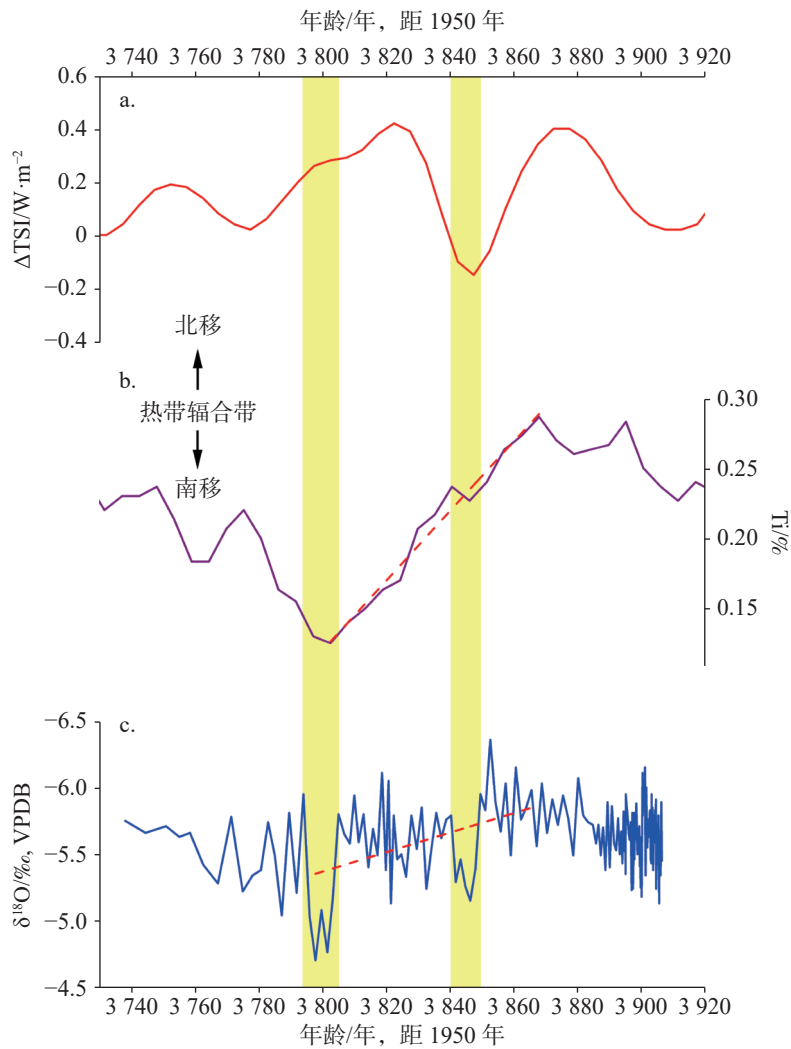


图4 泰国南部 D008-05 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录 (c) 与太阳活动^[19](a)、加勒比海 Cariaco 盆地 Ti 元素^[18](b) 对比
(红色虚线为各石笋记录 $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$ 变化趋势线; 黄色条带突出两个夏季风减弱时段)

Fig. 4 Comparison of $\delta^{18}\text{O}$ record of stalagmite D008-05(c), solar activities^[19](a) and Ti from Cariaco basin^[18](b) (Red dash lines represent the variation trend of $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$ of stalagmite records; yellow bars highlight the weakening period of summer monsoon)

强弱变化,进而影响到当地的水文气候变化。而厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)和太阳活动则在年际、年代际尺度对当地水文气候产生影响。如太阳活动增强/减弱造成当地降水增加/减少;拉尼娜(La Niña)/厄尔尼诺(El Niño)态造成当地降水增加/减少。

4.4 晚全新世早期水文气候变化对东南亚人类文明的潜在影响

中全新世向晚全新世过渡阶段,随着亚洲夏季风的逐渐减弱,泰国南部出现干旱化趋势。气候的干旱化一定程度导致植被类型的变化及野火发生概率的增加,也可能一定程度导致了古人类由洞穴/岩厦居住,寻求向开阔地居住^[10]。另外,马来半岛海平

面在距今 5 000 年左右达到阶段性最高点之后,出现了持续缓慢的下降过程,距今 3 800 年左右海平面比距今 5 000 年左右的海平面下降了 1 m 多^[20]。海平面下降导致河口三角洲、河岸和海岸带出露面积增加,为水稻种植提供了更多可耕种的土地^[21]。因此,在此阶段,东南亚文化出现了生产方式的明显转变,由狩猎-采集转变为养殖、种植等^[10]。当然,生产方式转变的其中一个重要因素是长江流域稻作种植的传入^[10,21],生产工具也发生了更新,如出现了青铜器^[22]。气候干旱化加上生产方式的转变,特别是大规模用火,导致东南亚森林植被被破坏,农业用地增加^[23],这些因素都促进了当地文明发生交流和转化。

当然,中全新世向晚全新世过渡阶段,由于整个亚洲季风区夏季风降水的减少,气候干旱化,可能导致了中国大陆人口的向南迁移^[10],人口的迁移,不仅带来了文化的交流,也将先进的生产方式和工具引入当地,促进了当地生产方式的革新和文化的繁荣^[24]。

5 结 论

通过对采集自泰国南部洞穴石笋开展年代学、碳氧稳定同位素分析测试,建立了晚全新世早期泰国南部水文气候序列。晚全新世早期,当地水文气候变化响应亚洲夏季风减弱变化趋势,夏季风降水变化与亚洲季风区降水表现出一致性。总体而言,泰国南部水文气候主要受到热带辐合带(ITCZ)位置移动的控制,但在年际、年代际尺度上,当地水文气候主要受到太阳活动和厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)的影响。

致谢: 本研究工作得到泰国矿产资源厅的 TEER-ARUNGSIKUL Naramase、BOONKANPAI Norarat、AKKRAWINTAWONG Krittapob、SAETIAN Pannipa、KRAWCHAN Vorakit、SUKSRIBOONAMPAI Kajornphat、PANYAMANG Pimphan、PRAHAT Sumran、CHANNARONG Pantarak、KHAMBOONRUANG Jakrapun、CHAROENMIT Jirasak 和 MITMARK Sathaporn 等陪同野外考察并提供指导,在此表示感谢。中国地质科学院岩溶地质研究所于爽和李强等参加了野外调查工作,西安交通大学全球变化研究院贾雪雪老师进行了年龄测试,在此一并感谢。

参考文献

- [1] Carolin S A, Walker R T, Day C C, Ersek V, Sloan R A, Dee M W, Talebian M, Henderson G M. Precise timing of abrupt increase in dust activity in the Middle East coincident with 4.2 ka social change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(1): 67-72.
- [2] Kathayat G, Cheng Hai, Sinha A, Yi Liang, Li Xianglei, Zhang Haiwei, Li Hanying, Ning Youfeng, Edwards R L. The Indian monsoon variability and civilization changes in the Indian subcontinent[J]. *Science Advances*, 2017, 3(12): e1701296.
- [3] He Keyang, Lu Houyuan, Sun Guoping, Ji Xiang, Wang Yonglei, Yan Kaikai, Zuo Xinxin, Zhang Jiangping, Liu Bin, Wang Ningyuan. Multi-proxy evidence of environmental change related to collapse of the Liangzhu Culture in the Yangtze Delta, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(6): 890-905.
- [4] Marshall M. Did a megadrought seed global chaos 4,200 years ago?[J]. *Nature*, 2022, 601: 498-501.
- [5] Scroton N, Burns S J, McGee D, Godfrey L R, Ranivoharimanana L, Faina P. Circum-Indian ocean hydroclimate at the mid to late Holocene transition: The double drought hypothesis and consequences for the Harappan[J]. *Climate of the Past Discussions*, 2020. <https://doi.org/10.5194/cp-2020-138>.
- [6] Scroton N, Burns S J, McGee D, Godfrey L R, Ranivoharimanana L, Faina P. Possible expression of the 4.2 kyr event in Madagascar and the South-east African monsoon[J]. *Climate of the Past Discussions*, 2020. <https://doi.org/10.5194/cp-2020-137>.
- [7] Kathayat G, Cheng Hai, Sinha A, Berkelhammer M, Zhang Haiwei, Duan Pengzhen, Li Hanying, Li Xianglei, Ning Youfeng, Edwards R L. Evaluating the timing and structure of the 4.2 ka event in the Indian summer monsoon domain from an annually resolved speleothem record from Northeast India[J]. *Climate of the Past*, 2018, 14(12): 1869-1879.
- [8] Chawchai S, Chabangborn A, Kylander M, Löwemark L, Mörth C-M, Blaauw M, Klubseang W, Reimer P J, Fritz S C, Wohlfarth B. Lake Kumphawapi—an archive of Holocene palaeoenvironmental and palaeoclimatic changes in Northeast Thailand[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 68: 59-75.
- [9] Chawchai S, Chabangborn A, Fritz S, Väiliranta M, Mörth C-M, Blaauw M, Reimer P J, Krusic P J, Löwemark L, Wohlfarth B. Hydroclimatic shifts in Northeast Thailand during the last two millennia: The record of Lake Pa Kho[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 111: 62-71.
- [10] White J C. Emergence of cultural diversity in mainland Southeast Asia: A view from prehistory[M]//Enfield N J (Eds.). *Dynamics of Human Diversity*, Pacific Linguistics, 2011, 9-46.
- [11] Edwards R L, Chen J H, Wasserburg G J. ²³⁸U-²³⁴U-²³⁰Th-²³²Th systematics and the precise measurement of time over the past 500,000 years[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, 81(2-3): 175-192.
- [12] Cheng Hai, Edwards R L, Shen Chuanchou, Polyak V J, Asmerom Y, Woodhead J, Hellstrom J, Wang Yongjin, Kong Xinggong, Spötl C. Improvements in ²³⁰Th dating, ²³⁰Th and ²³⁴U 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.
- [13] Scholz D, Hoffmann D L. StalAge-An algorithm designed for construction of speleothem age models[J]. *Quaternary Geochronology*, 2011, 6: 369-382.
- [14] Jaffey A H, Flynn K F, Glendenin L E, Bentley W T, Essling A M. Precision measurement of half-lives and specific activities of ²³⁵U and ²³⁸U[J]. *Physical Review C*, 1971, 4(5): 1889-1906.
- [15] Wei Zhongwang, Lee Xuhui, Liu Zhongfang, Seeboonruang U, Koike M, Yoshimura K. Influences of large-scale convection and moisture source on monthly precipitation isotope ratios observed in Thailand, Southeast Asia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 488: 181-192.
- [16] Sinha A, Kathayat G, Weiss H, Li Hanying, Cheng Hai, Reuter J, Schneider A W, Berkelhammer M, Adali S F, Stott L D,

- Edwards R L. Role of climate in the rise and fall of the Neo-Assyrian Empire[J]. *Science Advances*, 2019, 5: eaax6656.
- [17] Wang Yongjin, Cheng Hai, Edwards R L, He Yaoqi, Kong Xing-gong, An Zhisheng, Wu Jiangying, Kelly M J, Dykoski C A, Li Xiangdong. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic Climate[J]. *Science*, 2005, 308(5723): 854-857.
- [18] Haug G H, Hughen K A, Sigman D M, Peterson L C, Röhl U. Southward migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene[J]. *Science*, 2001, 293: 1304-1308.
- [19] Steinhilber F, Beer J, Fröhlich C. Total solar irradiance during the Holocene[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(19): L19704.
- [20] Zhang Yaze, Zong Yongqiang, Xiong Haixian, Li Tanghua, Fu Shuqing, Huang Guangqing, Zheng Zhuo. The middle-to-late Holocene relative sea-level history, highstand and levering effect on the east coast of Malay Peninsula[J]. *Global and Planetary Change*, 2021, 196: 103369.
- [21] Ma Ting, Rolett B V, Zheng Zhuo, Zong Yongqiang. Holocene coastal evolution preceded the expansion of paddy field rice farming[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(39): 24138-24143.
- [22] White J C. Dating early Bronze at Ban Chiang, Thailand[C]//Pauteau J P, Coupey A S, Zeitoun V, Rambault E (Eds.). From Homo erectus to the living traditions: Choice of papers from the 11th international conference of the European Association of Southeast Asian Archaeologists, Bougon: 2006, 91-104.
- [23] White J C, Penny D, Kealhofer L, Maloney B. Vegetation changes from the late Pleistocene through the Holocene from three areas of archaeological significance in Thailand[J]. *Quaternary International*, 2004, 113: 111-132.
- [24] 赵春光. 从泰国班考遗址看华南与大陆东南亚新石器时代文化的关系[J]. *江汉考古*, 2021, 172: 97-106.
- ZHAO Chunguang. Contacts of neolithic cultures in the Mainland Southeast Asia and South China: Evidence from the Ban Kao site in Thailand[J]. *Jiangnan Archaeology*, 2021, 172: 97-106.

Hydroclimate variability in early stage of late Holocene recorded by stalagmite from Southern Thailand

YIN Jianjun¹, XU Qi¹, SIRIPORNPIBUL Chaiporn², SIRIPATTARAPUREENON Russarint², WU Xia¹, TANG Wei¹, CHENG Hai³, NING Youfeng³, QIN Zhengfeng¹

(1. Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR/ International Research Centre on Karst under the Auspices of UNESCO/Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Department of Mineral Resources, Ministry of Natural Resources and Environment, Bangkok 10400, Thailand; 3. Institute of Global Environmental Change, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 712000, China)

Abstract The climate change during the transition of the middle-to-late Holocene (4.2 ka event) is linked to the collapse of many paleo-cultures worldwide. However, it is still controversial in the following two questions, Is the 4.2 ka event global, and what is the relationship between the climate change and its societal effect? Though it is difficult to identify the relationship, we can construct paleoclimate records from different places all over the world to identify whether the 4.2 ka event is global. In the karst survey in 2019, we found many ancient cultural remains in caves of Southern Thailand, and the time span of many remains covers the 4.2 ka event. However, there are relatively few records on the 4.2 ka event with high precision and high resolution that can reveal the climate and environment in this area. To better understand the 4.2 ka event, we choose the stalagmite record from Phet Cave in Southern Thailand to verify the event in a tropical area.

The climate in Southern Thailand is dominated by the tropical monsoon system. The mean values of annual temperature and precipitation are 27.1 °C and 2,390 mm, respectively. Precipitation in the rainy season from May to November accounts for 76% of the annual value. The Phet Cave (8°23'36"N, 98°46'26"E, 54 m a.s.l.) is a dry underground river cave developed along the local fault, and the cave environment is relatively stable. The stalagmite D008-05 is a pure aragonite stalagmite with a length of about 18 cm and a diameter of 5-6 cm. To determine the age of the stalagmite, 10 powder subsamples were collected for ²³⁰Th/U dating through the Neptune MC-ICP-MS in the Isotope Laboratory of Xi'an Jiaotong University. We got the dating results with relatively high precision-high uranium and low ²³²Th concentration. The age model was constructed through the StalAge. We confirm that the stalagmite grew in the early stage of the Late Holocene, from 3,738 a.B.P. to 3,906 a.B.P., and the mean growth rate was 0.95 mm·a⁻¹. We drilled the δ¹⁸O and δ¹³C samples from the top of the stalagmite with an interval of 1 mm, and a total of 160

samples were collected. Then we obtained an annual resolution for the high growth rate. The $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ were analyzed through a MAT 253 mass spectrometer equipped with a Kiel IV carbonate device at the Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences.

Previous studies suggest that the moisture source of precipitation in the rainy season of Southern Thailand is mainly from the Bay of Bengal, and the precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in this area is mainly influenced by the local convective activity and rainfall amount. Therefore, we suggest that the stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ can be used to reflect the rainfall amount in this area. The synchronous variation of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ also suggests that both the $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ can be used to reflect the hydroclimate change in Southern Thailand. The relationship between precipitation and stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ is shown as follows, heavy precipitation is correlated with lower $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation/stalagmite, and lower soil CO_2 $\delta^{13}\text{C}$, and no prior calcite deposition (PCP) occurs in the aquifer, and thus leading to higher stalagmite $\delta^{13}\text{C}$, and vice versa for low precipitation. The decreasing trend of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ of the overall stalagmite D008-05 is following the decline of Asian summer monsoon intensity, which is dominated by the decrease of north hemispheric summer insolation in the tropical area. Two decadal-scale drought events were identified between 3,850-3,840 a B.P. and 3,805-3,795 a B.P. The spatial comparison result indicates that these two events happened in many places in the Asian monsoon region. In addition, we found the hydroclimate change in Southern Thailand is dominated by the south-north movement of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ), and it is also influenced by the solar activities and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) state in the interannual-to-decadal timescales. Strong solar activities will produce more summer monsoon rainfall in Southern Thailand, whereas weak solar activities will induce less summer monsoon rainfall in Southern Thailand. Different from solar activities, the relationship between the ENSO state and summer monsoon rainfall is as follows: in the El Niño state, the summer monsoon rainfall is suppressed, and in the La Niña state, the summer monsoon rainfall is enhanced.

We found that the dry trend during the 4.2 ka event had a potential effect on the paleo-culture in Southeast Asia, which caused the change of subsistence pattern from hunting and gathering to crop cultivation and domesticating pigs. As the decrease of precipitation and sea level, more land was outcropped near the river, seacoast, and river delta, which provided more land for rice planting. Besides, the improvement of production tools by culture exchanges also led to life style change in Southeast Asia.

Key words Asian summer monsoon, stalagmite, hydroclimate, early stage of late Holocene, Southern Thailand.

(编辑 张玲)