www.cagsbulletin.com

北部湾全新世气候与古生态环境演进特征及其 驱动因素

黄向青, 崔振昂, 林 海, 夏 真*, 张顺枝

自然资源部海底矿产资源重点实验室,广州海洋地质调查局,广州广东 510075

摘 要:北部湾地处南海西北端,区域广布硅酸盐和石灰岩类,迄今对其全新世气候、古生态环境演进过程 及其背景驱动因素等还有待加强了解。为此,在北部湾南部海盆钻取了全新统岩芯,进行了孢粉、粒度、 *δ*¹⁸O(氧同位素)等鉴定分析以及¹⁴C 测年等。分析显示,孢粉化石主要属种有木本松属、栲属等,蕨类为水 龙骨科、鳞盖蕨属,6.0 ka之后蕨类含量总体较高,含量均波动变化,以该界线点粉砂等为上升趋势以及分 选变好。常量元素 Al₂O₃等和微量元素总体升高,面 SiO₂、CaO、Sr 等为降低,优势矿物为石英等,风化矿 物含量较高。*δ*¹⁸O 总体下降了 21.20%呈降温趋势,其分布特征与中国全新世古气温变化可对应,并以全球 和区域气候变化重要节点 9.0 ka 等划分了气候阶段,中全新世气候格局转换且西风带南进之后,北部湾演 进成为夏季风和西风带前缘相互作用地带而使得降水增加,加强了化学风化以及重矿物赤铁矿水成效应。 地表受到热胀冷缩以及淋溶风化双重作用,大暖期鼎盛期亦为风化剧烈阶段,"4.2 ka 事件"造成化学风化 滞缓,约自 4.0 ka 之后 CIA 等指示的化学风化开始加强。中全新世以来植被多样性指数以节点经历了升-降-升三个基本阶段,总体为提高趋势,海洋古生产力指标变化与植被多样性指数旋回可对应,陆源输入增 加而使得前者呈增高趋向。研究得出如下认识:北部湾碎屑物质具有陆源性并对全球和区域气候变化响应 敏感,西风带推进对其先干后湿气候模式建立具有积极的机制效应,地表风化在太阳迫胁力周期运动和气 候调节之下有序旋回进行,古植被环境趋向总体改善,由于陆-海之间关系密切,北部湾亦成为南海北部海 洋生态系统的一个重要组成部分。

关键词:北部湾;全新世;古生态;古生产力 中图分类号: P534.631; P736.22 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2021.042501

The Driving Factors on Climatic and Palaeo-ecological Evolution of Beibu Gulf since Holocene

HUANG Xiang-qing, CUI Zhen-ang, LIN Hai, XIA Zhen*, ZHANG Shun-zhi

Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Natural Resources, Guangdong, Guangzhou 510075

Abstract: Located on northwestern South China Sea and the transition zone between continent and marine, less understanding on Beibu Gulf's background of Holocene palaeo-climatic & ecological evolution needs to further improve. We acquired Holocene sediments drilling core STAT22 in its southern basin and made the lab analysis on high resolution samples' sporopollen fossil, granularity, macro-& micro-geochemical elements, detrital

本文由中国地质调查局地质调查项目"海南岛东北部沿海地区综合地质调查"(编号:DD20190308)和地质科研项目"南海北部湾全新 世环境演变及人类活动影响研究"(编号:1212010914027)联合资助。

收稿日期: 2021-03-02; 改回日期: 2021-04-23; 网络首发日期: 2021-04-26。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介:黄向青,女,1964年生。硕士,高级工程师。主要从事地质环境研究。通讯地址:510075,广州市环市东路477号。 E-mail: eegs2007@163.com。

^{*}通讯作者:夏真,男,1963 年生。博士,教授级高级工程师。主要从事地质环境研究。通讯地址: 510075, 广州市环市东路 477 号。 E-mail: xia-zhen@163.com。

130

mineral and δ^{18} O and *Globigerinoides ruber* ¹⁴C aging. Comprehensive analysis and comparison showed that composition of Pinus sp., Castanopsis sp., Quercus sp., and Microlepia sp., Polypodaceae revealed historic tropical and sub-tropical climatic background, and fern spices' general growth trend from 6.2 ka and also indicated fluctuations from their distribution. From above time point, silt sand and clay also generally increased and the sorting improved. Indicating continent provenance, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO etc increased and SiO₂, CaO, MnO, Sr decreased instead, and main minerals were Quartz, Feldspar and weathering minerals. δ^{18} O temporal distritution could primarily correspond to Chinese Holocene temperature demonstrating a cooling trend from HTO with mean relative difference -21.20% in δ^{18} O, and the basic climatic phrases were classified based on 9.0 ka, 6.2 ka, 4.0 ka, 2.0 ka key timing points displayed in regional and also North Atlantic fluctuations. It also showed that Beibu Gulf had become the interaction zone of summer monsoon systems and cold air-mass frontier after westerly southward shift enhancing the regional precipitation and chemical weathering, which demonstrated in hydro-genesis of heavy mineral Hematite too. Regional litho-surface process included coupled heat expand & extraction and de-silicon & -calcitication to speed up weathering and geochemical elements's release forming soil horizon further. There were dramatic oscillations of above granularity and other elements during the end part of HTO also called deteriorating period showing a cooling as well as HTO termination trend in China. "4.2 ka Event" exerted significant impacts on sedimentation and since then the chemical weathering continued intensifying. Also the bio-diversity index of sporopollen fossil indicating the palaeo-vegetation's structure and optimization displayed an overall increase based on above cycling time nodes and thus marine palaeo-productivity benefited from climatically driving growth of runoff input. The summary could be reached that Beibu Gulf was sensitive to climatic change, westerly southward shift acted as a positive effect on precipitation mechanism through climatic mode's evolution constituting a transition zone between warm as well as humid and cold air masses, and the litho-surface processes were under the almost orderly regulation of solar radiation forcing and climatic change and there was a close relationship between regional continent and marine forming a complex and had become the fundamental of modern ecosystem and an important marine ecological component of northern SCS.

Key words: Beibu Gulf; Holocene; palaeo-ecology; palaeo-productivity

位于东亚低纬度季风区的北部湾属热带和亚 热带海洋性季风气候,海洋生物和矿产等资源丰富, 其三面环陆且海底呈扇形向南部陆架海洋敞开, 平 均水深 38 m,水深由北向南、自岸向中逐渐加深, 沿岸有大型河流红河等注入,区域降水丰沛,以北 有我国暴雨中心十万大山南麓的东兴。我国对北部 湾全新世进行了物源、气候等基本研究, 国外亦重 视对相邻东北部印度洋、印-太暖池水域古气候以及 古生产力重建(Piotrowski et al., 2009; 崔振昂等, 2017)。总体来看,北部湾全新世气候演进背景因 素、古生态环境演进特征等重要内容尚未开展。在 全新世中期以来我国陆区环境恶化、生产力下降形 势之下,及时开展上述工作对认识、预测和保护海 洋生态及价值具有积极意义。北部湾南部海盆沉积 环境稳定, 接纳入海河流输入物质。本文立足该海 盆 STAT22 全新统岩芯孢粉、地球化学要素等鉴定 测试结果, 探讨了全新世以来气候模式、地表响应、 古生态演变等及其背景驱动因素。

1 区域第四系地质概况

北部湾区域为印度夏季风、冷空气前缘、东亚 夏季风的相互作用地带,其气候要素年变率大,灾 害性天气频繁,山洪和泥石流频发。本区沿岸大小

入海河流众多,有红河、南流江、昌化江、马兰河 等。该湾于全新世海侵之前接受为风化剥蚀陆区, 系受到红河断裂、莺歌海盆地等影响而地势低下的 沉降形态低地体系,于全新世随着冰消期以来南海 海平面上升海侵而形成。围区为铝硅酸盐岩类及其 碎屑岩类以及钙镁碳酸盐岩类。北部为侏罗一白垩 系、白垩系-第三系的华力西期、印支期火成岩, 雷 州半岛为全新统并出露玄武质岩类,海南岛由北向 南为玄武质岩类、花岗斑岩类。第四系地层较为多 样和岩性松散, 围区沿海从北部至雷州半岛为中更 新统以来海积沉积物, 散布有玄武岩类等火山岩和 第四系洪积、坡洪积物等,北部第四系向陆侧还广 泛分布有第三纪甚至更早的前第四系。沿海地势较 为平坦, 向内陆则变得崎岖隆起, 尤其是北部分布 还有东北一西南向十万大山、六万大山等, 地表接 受风化剥蚀以及风、浪、流等外营力物质运移。

2 研究方法

2009 年 7—9 月在北部湾南部海盆进行了 STAT22 岩芯重力取样(图 1),其长度为 310 cm,底 部 295 cm存在风化剥蚀不整合界面,自下往上分别 属于晚更新统和全新统,主要为深灰色黏土质粉砂, 夹杂有砂质粉砂薄层,且岩性连续无间断。对全新 统岩芯按照5 cm间距原则进行较高分辨率分样,将 共取得的52个样品进行了孢粉、粒度、化学元素、 碎屑矿物鉴定测试。孢粉鉴定:每个样品取样 20g, 经盐酸处理去钙、氢氟酸去硅质后,用比重为 2.1~2.2 的重液浮选分离法使孢粉富集供制片,每个 样品在 Zeiss Axioskop 40 显微镜下平均放大 300 倍 观察统计 20 mm×20 mm 盖玻片下孢粉数量, 并换算 为 20 g 干样孢粉数量作为该化石丰度; 粒度测试依 据 GB/T 12763.8.6.3-200+7, 主要仪器为 Mastersizer 2000 型激光衍射粒度分析仪; SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、 MgO 等 10 种常量元素以及 Co、Cu、Ni、Zr、Ba 等 10 种微量元素测试根据 GB/T20260.8-2006, 主 要仪器为 ICP-OES 4300DV 型等离子体发射光谱仪; 碎屑矿物鉴定依照 GB/T12763.8-2007, 采用 LEICA M165C 显微镜, 分析粒级为 0.063~0.25 mm; 浮游 有孔虫 Globigerinoides ruber 的 δ^{18} O 测试参照同济 大学海洋地质开放研究实验室测试方法, 以上均由 广州海洋地质调查局实验测试所完成。依深度挑选 壳体完整浮游有孔虫 G. ruber, 对其进行碳酸钙碳 同位素 AMS¹⁴C 测年,由北京大学核物理与核技术 国家重点实验室以及 Beta 实验室完成, 使用 Calib 7.0.1 软件对所获得¹⁴C 年龄进行日历年龄校正,海 洋碳库效应校正选取西沙群岛 3 个已知点平均值, 得到了 7 个样品测年数据, 全新世年龄分布为 830~11 110 a, σ平均值为±134.50 a, 并通过线性插值 法建立了年代框架(表 1, 图 1)。还收集了本岩芯前 期研究的硅藻、有孔虫数据以供进行综合对比分析, 其测试方法见上。

3 分析结果

3.1 要素分布特征

3.1.1 孢粉

以上全新统底界年龄 11.1 ka 与我国热带和亚 热带地区全新统下限一致。共鉴定出 16 属种孢粉化 石,以热带和亚热带木本和蕨类为主,与广西第四 系全新统地层孢粉主要属种基本相符。木本主要为 裸子植物针叶 Pinus sp.(松属)、常绿阔叶落叶 Castanopsis sp.(栲属)和 Quercus sp.(栎属),还有少 量 Dacrydium sp.(陆均松属),零星见有 Podocarpus(罗汉松)、Tsuga sp.(铁杉属)。约于 6.0 ka 之前木本含量最高而蕨类偏低,总体上属种较为单 一, Castanopsis sp.间断出现而 Quercus sp.尚为缺 失。6.0 ka 之后植被种类增加, Quercus sp.尚为缺 失。6.0 ka 之后植被种类增加, Quercus sp.出现并约 于 2.0 ka 达到峰值,但木本总体是下降的(图 2a, b, c, d, e);蕨类约于 6.0 ka 开始增加并于较高值区间波 动,较耐干 Cibotium barometz(金毛狗)、Microlepia sp.(鳞盖蕨属)自 6.0 ka 之后总体下降,而更喜阴湿 Polypodaceae(水龙骨科)却波动上升(图 2f, g, h), 次 要属种 Pteris sp.(凤尾蕨属)、Cyathea sp.(挱椤属)、 Lygodium sp.(海金沙属)亦于 6.0 ka 之后有所出现并 波动变化, Sellaginella sp.(卷柏属)零散出现(图 2i, j, k, 1), 偶见喜阴湿的 Ophioglossum sp.(一叶草属)。 还可见到,或许是由于"4.2 ka 事件"干旱影响,对 湿度条件敏感的蕨类优势属种降低而形成一个"V" 或者"U"形态;木本和蕨类含量之和(图 2a 蓝色曲 线)曲线约于9.0 ka之前基本维持,9.0~6.0 ka 为上升 阶段,6.0 ka 首次出现明显波动,约至 5.2 ka 有所增 加,5.2~4.0 ka 较为平缓,4.0 ka 之后再次波动增加, 但在 2.0 ka 前后明显下降之后再次总体上升,Cyathea sp.于 4.0~2.0 ka 出现阶段性缺失,应是由于阶 段性气候偏干。总体上早期植被种类偏少,中全新 世增加而达到兴盛,但由于气候变化而波动明显。

3.1.2 粒度

粒度、化学元素、碎屑矿物亦是反映地表物源 和气候变化等的基本指标。本岩芯主要沉积物类型 为黏土质粉砂,分析可见和粒度参数于 9.0 ka 出现 了一个转折变化。但总体上在中全新世 6.0 ka 之前 基本维持稳定,之后开始较为明显波动变化,再于 4.0 ka开始呈现连续小幅波动变化。砂、粉砂、黏 土含量为 12.09%~61.64%, 以上述转折点 6.0 ka 为 界,砂含量先高后低即总体下降,而粉砂、黏土则 相反,为先低后高即总体上升(图 3a, b, c);平均粒 径为 5.52~6.60 φ, 分选系数为 1.97~ 2.58 φ, 偏态 为-0.10~0.18, 峰态为 0.77~1.03, 平均粒径自 6.0 ka 同样为总体上升即颗粒趋细, 但分选系数、 偏态却有所降低, 而峰值达到较高区间之后维持波 动,显示分选趋好,频率曲线移向细颗粒,颗粒结 构趋向均衡, 峰形进一步减缓(图 3d, e, f, g); 根据 以上深度-年代关系得出沉积速率曲线,其在 6.0 ka 之前为最低的 0.04 mm/a, 6.0~5.2 ka 明显升高至 0.50~0.58 mm/a, 5.2~4.2 ka 再次出现沉积速率低值 为 0.06 mm/a, 这可能与全球性 "4.2 ka 事件" 干旱 效应有关, 尔后于 4.1 ka 再次跃升, 总体上沉积速 率是升高的(图 3h)。再对比红河三角洲前缘调查

表1 STAT22 岩芯有孔虫 G. ruber 的 AMS¹⁴C 测年结果 Table 1 Globigerinoides ruber aging data at different depth of sediments core STAT22

沉积物岩性	样品深度/cm	校正/(cal. a)	范围(2σ)/(cal. a)
	70~75	830	722~919
	205~210	4 190	4 055~4 362
今 新弦	210~215	5 040	4 874~5 225
王初51	240~245	5 550	5 451~5 644
	275~280	6 230	6 109~6 320
	290~295	11 110	10 959~11 222
晚更新统	305~310	17 990	17 817~18 178



图 1 STAT22 岩芯位置(A)以及全新统深度-年龄关系(B) Fig. 1 Position of sediments drilling core STAT22 (A) and the relation frame of depth-age (B)



图 2 STAT22 岩芯主要孢粉化石含量(%)分布 Fig. 2 Sporopollen fossil concentration (%) of sediments core STAT22



图 3 STAT22 岩芯粒度以及沉积速率分布 Fig. 3 Composition, granularity and sedimentation rate of sediments core STAT22

研究(Li et al., 2006), 5.0 ka之前为低沉积速率段, 自 5.0 ka之后明显加速,深度-年龄框架曲线斜率 上扬。以上均表明中全新世以来物源总体增加。

3.1.3 化学元素

常量元素含量总体上 SiO₂>Al₂O₃ >Ca>Fe₂O₃>K₂O>MgO>Na₂O>TiO₂>P₂O₅>MnO,与 区域广布富硅含铝、铁、钾、钠、镁等硅酸盐岩类 以及镁钙碳酸盐岩类有关并可对应,表明其来源具 有陆源性。元素同样于 9.0 ka 出现一定的转折变化, 但总体分布较为平稳, 6.0 ka 亦同为重要转折变化 点而出现大幅波动,自 4.0 ka 之后呈现小幅但升降 趋向明显的变化, 总体上以 6.0 ka 为界出现明显升 降变化的不同阶段。SiO₂ 含量为 55.96%~61.79%, 在转折点前后达到峰值之后呈缓慢下降趋势(图 4a), Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO 等含量为 0.065%~14.38%, 在 转折点之前偏低且基本稳定, 但之后呈现波动上升 趋势(图 4b-h)。CaO、MnO 依次为 5.26%~9.35%、 0.070%~0.085%且总体下降(图 4i, j); 微量元素与以 上常量元素具有同样变化特征。Ni 含量为 26.7×10⁻⁶~33.1×10⁻⁶(图 4k), 其余各项元素 Co、Cr、 Zn、Zr、Sc、V、Ga、Ba 含量为 9.1×10⁻⁶~79.8×10⁻⁶, Ba 含量最高, 为 282×10⁻⁶~371×10⁻⁶, 除了 Ni 基本 维持波动变化之外,其余同样是在上述转折点之前 变化不大,但之后呈现明显上升趋势,而 Sr 含量为 202×10⁻⁶~320×10⁻⁶,与上述 CaO 等同为波动下降并 维持(图 41-t)。

3.1.4 碎屑矿物

轻、重矿物种类较为丰富共有 22 种,优势矿物 为石英、长石以及风化矿物,其平均含量依次为 65.22%、5.60%、14.25%,风化矿物较高显示温度 和湿度相适宜。以上又以石英为绝对优势矿物。其 它矿物主要为云母,以及含铁类矿物赤铁矿、磁铁 矿、黄铁矿,另外还有锆石、角闪石和辉石,含量 为 0.001%~1.679%,平均为 0.001%~0.721%,海洋 自生矿物海绿石较高。碎屑矿物四分位为 0.001%~67.10%,偏态正负值均有,峰值以负值略 多,石英和长石变异系数最低,其分布较为稳定, 而其它矿物为 0.16~2.18,尤其是磁铁矿、锆石、角 闪石变异系数超过 1.00,其分布的变化性最大(表 2)。零星出现的还有绿帘石、电气石、锐钛矿、白 钛石、尖晶石、铬尖晶石等。对比北部湾北部近岸 碎屑矿物调查结果(夏真等,2019),两者在种类上相 似,指示源于花岗岩、砂岩和变质岩等的风化解离 和河流输入,并在潮流作用下向海进一步运移,再 次表明了沉积物和碎屑颗粒之陆源性,亦与前人利 用稀土元素、黏土矿物分析结果相一致(崔振昂等, 2017)。

3.1.5 δ¹⁸O(氧同位素)

浮游有孔虫表层种 G. ruber 化石 δ¹⁸O 可指示海 面水温和气温,其范围介于-1.83‰ ~ -3.46‰,平 均为-2.83‰,约 4.6 ka 进入负距平区域并于 4.0 ka 基本稳定于负距平区域,4.0 ka 以来比之前平均下 降了 21.20%,显示是总体降温的,2.0 ka 前后达到 全新世最低(图 5a)。该曲线变化特征与中国全新世 集成温度曲线可对应:即 9.5~9.0 ka 之后均为上升 趋势,8.0~7.5 ka 到达阶段性峰值,均至 6.0 ka 首现 下降波动,经恢复但再次出现频繁波动,约 6.0~ 4.5 ka 维持正距平,这是由于暖性天气系统仍然具



图 4 STAT22 岩芯常量元素含量(×10⁻²)和微量元素含量(×10⁻⁶)分布 Fig. 4 Macro-, micro-geochemical elements concentration of sediments core STAT22

表	2 STA	T22 岩芯 :	主要碎屑矿	物含量	统计	
Detwitel	minonal	aanaantra	tion statist	ing of god	limonta	

	Table 2 Detrital minerals concentration statistics of sediments core STAT22														
统计项目	石英	长石	风化矿物	海绿石	白云母	黑云母	赤铁矿	磁铁矿	黄铁矿	锆石	角闪石	辉石			
最低/%	57.67	4.26	9.46	0.322	0.130	0.165	0.030	0.011	0.002	0.001	0.015	0.012			
最高/%	70.27	6.79	18.18	1.679	0.631	1.469	0.252	0.019	0.019	0.006	0.026	0.034			
平均/%	65.22	5.60	14.25	0.721	0.306	0.491	0.130	0.004	0.006	0.001	0.007	0.020			
四分位/%	67.10	5.89	15.72	0.827	0.412	0.671	0.161	0.013	0.009	0.001	0.018	0.030			
偏态	-0.50	-0.12	-0.88	1.530	0.620	1.150	-0.240	1.120	0.630	2.770	0.820	-0.660			
峰值	-0.34	-0.39	-0.08	2.210	-0.770	0.580	-0.230	-0.710	0.860	7.970	-1.230	-0.800			
变异系数	0.04	0.10	0.16	0.430	0.470	0.630	0.380	1.680	0.610	2.180	1.440	0.580			

超星·期刊

134



图 5 STAT22 岩芯 δ¹⁸O 含量(V-PDB, ‰)和中国气温、GIRP 冰芯温度的积温(℃)分布 Fig. 5 *G. ruber* δ¹⁸O of sediments core STAT22 and accumulative anomalies of Chinese air temperature and GIRP ice core temperature (℃) during Holocene

有一定阶段性强度,但随着北方西风带进一步推进 和维持,均再次下跌至 4.0 ka 出现明显"V形"低谷 才基本稳定,尔后基本上维持在负距平区间波动。

3.2 气候指示意义

对比北部湾以北桂林地区中全新世以来古气 候重建(周建超等, 2015), 该地区同样分布为亚热带 植被,并随海拔变化依次为常绿落叶阔叶、常绿落 叶阔叶和针叶混交林、针叶林等,冷暖干湿波动, 晚全新世还发育有泥沼,其响水洞石笋 δ^{18} O 和 $\delta^{13}C(碳同位素)同期总体偏冷湿(偏负), 全新世植被$ 经历了早期贫乏、中期和晚期前段兴盛、晚期后段 有所下降的三个旋回(覃嘉铭等, 2000)。古湖沼在 6.4~4.8 ka 由于降水快速增加使得水位处于高值区 间, 4.8~3.0 ka 继水位降低之后再次恢复上涨, 经历 了湿-干-湿波动过程(汪良奇等, 2014)。东北部雷州 半岛夏季风于与上述 6.0 ka 相近时间的 6.1 ka 迅速 减弱并进入降温阶段,西北部红河三角洲自 5.3 ka 以来出现了三次小冷期波动, 以东海南岛双池玛珥 湖约 2.7 ka 之后降雨增加并叠加降温信号(李珍等, 2005; 罗攀等, 2006; 吴旭东等, 2016)。以上各地受 到局地因素影响的气候转折起点略有差异, 但均表 明中全新世以来冷空气活跃并频繁扰动而导致降水 增加和湿度改善。可视为地温的积温表示气温实时 曲线的累积性,根据上述全新世中国古气温和北大 西洋格陵兰 GIRP 冰芯古温度(侯光良和方修琦, 2011; Briner et al., 2016), 其积温(累计距平)较实时 温度曲线具有明显周期性, 近似于不规则正弦曲线, 且在全新世基本完成了一个变化周期(图 5b, c)。

4 讨论

4.1 北部湾气候背景

自前可见各要素具有阶段性波动变化、主要要 素具有变化总体趋向明显的特征,这是由于气候波 动和格局转变所致,而北部湾沿岸众多河流向海输 入陆区风化剥蚀产出物质,海盆继而成为气候变化 之记录者。自上述可见北部湾与我国古气温曲线两 者变化可对应,而后者又与北大西洋气候波动序列 相对应(候光良和方修琦,2011),说明北部湾作为我 国季风区的一部分,受到全球和中国区域环流和气 候形势逐级调控。其中,以9.0~8.0 ka、4.0 ka谷值 和峰值为基本变化转折点,两者亦依次为早、中、 晚全新世过渡转折节点,在这两个主节点基础上再 以前述 6.0 ka、2.0 ka等重要亚节点进行次阶段波动 变化,前者为中国积温阶段性次峰值,后者为GRIP 冰芯积温一个阶段性谷点,两者依次为中全新世前 后段、晚全新世前后段过渡衔接点,不仅如此,孢 粉、化学元素等亦基本具有如此旋回特征,现据此 做如下气候划分。

4.1.1 气候阶段划分

气候是驱动要素变化的重要外营力, 而要素变 化是对气候变化的响应,两者之间为表里。依据 δ^{18} O 并参照中国气温及其累计距平曲线,结合以上 所讨论要素分布特征,划分了全新世北部湾基本气 候阶段(表 3), 其中是以 9.0~8.0 ka、4.0 ka 为基本变 化转折点,但综合考虑到时间序列更长的植被、粒 度和化学元素是以 9.0 ka 为转折点, 其亦基本可代 表 9.0~8.0 ka 阶段, 亚节点同样为 6.0 ka、2.0 ka。 δ^{18} O 等显示 5.2~4.0 ka 有明显降温趋向, 亦为我国 热带地区冰期 II(张伟强等, 2002), 4.0~2.0 ka 降温亦 是对晚全新世新冰期的响应。1.0 ka 为北部湾气候 演进的一个现代时间点,此时 δ^{18} O 出现快速降温, 粉砂以及陆源元素 Al₂O₃、Fe₂O₃、TiO₂以及 Ba 等 再次发生明显变化,总体上为小幅跃升,主要木 本、蕨类等出现下降等转折变化, 该降温早于一般 小冰期起点,可归属于前小冰期阶段(表 3),前小冰 期在世界一些地区亦有出现(Fernandez-Fernandez et al., 2019)。上述 9.0 ka(9.0~8.0 ka)、6.0 ka、4.0 ka、 2.0 ka 节点的转折性和阶段变化性在孢粉化石丰 度、主要属种含量均有所体现,在喜暖湿的 Cyathea sp.表现为高(出现)-低(几乎消失)-高(再次出现)的波 动旋回变化,平均粒径、偏态、峰态以及化学元素 亦在上述单个或者多个节点出现转折或者阶段性变 化。

4.1.2 北部湾区域气候演进模式

自上可见,北部湾以中全新世以 6.0 ka 为界总体上具有前暖后冷、先干后湿演进模式,结合前人研究结果,认为这与依次维持东亚夏季风、印度夏季风的副热带高压、印度低压的进退有关。从气候

超星·期刊

heles	-	14++
		нн
- 55-1		-0-11
	_	· / Y _

		Table 3 Pi	rimary	表 3 regional o	北部湾区 limatic p	」 域气候 hrases i	的段划分 n Beibu G	及其特征 ulf based on sediments co	ore STAT22	
基本	时间	划分/ka	全		氧同位詞	素(δ ¹⁸ O)			气作	侯特征
^{巫平} 阶段	基本	亚阶段	- 新 世	基本 阶段	亚阶段	气温	亚阶段	要素变化	降水	环流模式
1	11.1~9.0		早 上升 11.1~9.0 期 偏正		恢复期		Pinus sp. 和 Polypodaceae 开始增 加,砂有降低趋向,颗 粒趋细,海洋沉积效 应仍然微弱,沉积速 率低下,可指示石英 的SiO ₂ 明显下降,但陆 源Al ₂ O ₃ 等和海相元素 CaO、Sr上升,海洋和 河口交互开始显现。	偏 暖 干, 以暖 至 系 性 、 为 主, 范 国 较 小。	副高位置偏 北且强大, 以其西缘影 响为主,印 度低压位置 偏西。	
		9.0~6.0			高值		大暖期	随着降水增加,较耐		
		6.0~5.2	_	进 入 最 高	<u>区</u> 间 高值 波动 维持	前期 干的 Pinus sp. 降低 Polypodaceae 先降 鼎盛期 升, Microlepia sp.总位 上升, Pteris sp.、	十的 Pinus sp. 降低, Polypodaceae 先降后 升, Microlepia sp.总体 上升, Pteris sp.、	前期延续	自后移退压成度高互式。6.0 ka前南缩低形印冷交模	
2	9.0~4.0	中 期 5.2~4.0	值间期动降成降期区后波下完升周	波下 更 偏	升期大期结和一般并	新冰 Ⅱ(大 馬 度 下 降 阶 段)	Cyathea sp.等后期开 始出现,显示气候总 体湿润。由于河流输入 增加,砂含量先升后 降,使得平均粒径总 体上升,分选趋好,沉 积速率提高,海洋沉 积效应增强。Al ₂ O ₃ 、 MgO等以及Zn等总体 上波动增加,CaO、Sr 为降低趋势。	峻候降加和气水合。- 「「「「」」。 - 「「」」。 - 「「」」。 - 「」」。 - 「」」。 - 「」」。 - 「」」。 - 「」」。 - 「」」。 - 「」」。 - 「」」。 - 「」」。 - 「」 - 「」」。 - 「」」。 - 「」」。 - 「」」。 - 「」、 - 」、 - 」、 - 」、 - 」、 - 」、 - 」、 - 」、 -		
		4.0~2.0			低值区 间波动 并有下 降趋势		新冰期 III(我国 晚全新 世冰期)	经"4.2 ka 事件"干旱 效应之后气候波动恢		
3	4.0~0.2	2 2.0~1.0 晚 低值 有上升 週期 近回 自 1.0 ka自 再次 放动 下降,和冰 出现阶 期 投冷期 基本维 持于低 1.0 ~0.2 间,出 现阶段		气 上 升 势 前 小 冰 期 (pre- LIA) 初 期 (LIA)	复。Polypodaceae 为上 升趋势, Microlepia sp. 维持波动, Cibotium barometz 有所出现, Cyathea sp.总体增加, 砂进一步减少, 黏土 为增加趋势,平均粒 径趋细,偏态左偏即 移向细颗粒,沉积速 率总体上升。Al ₂ O ₃ 、 TiO ₂ 等上升趋势明确, CaO、Sr等维持于低值 区间。	冷暖干湿 波动, 水 性 生 型。	西风带维持, 波动延续上 述三者交互 模式。			

模型输出南亚高压分布来看,早全新世南亚高压强 大,闭合特征线范围广阔,根据其与副高两者"相 向而行"特征,副高加强了西伸并对西风带南推产 生阻挡作用,其脊线位置偏北而使得夏季风深入我 国内陆(张肖剑和靳立亚,2018),而同期印度低压位 置偏西,其降雨带集中于伊朗高原、阿拉伯半岛至 印度半岛北部以及青藏高原西部等,而北部湾处于 两者之间的过渡带鞍形场,甚至出现补偿性下沉气 流而缺少系统化的降水机制。中全新世南亚高压明显收缩并促使西风带南进,东亚和印度夏季风指数自中全新世6.5~6.0 ka以来为降低趋势,并自4.0 ka以来基本稳定并维持波动,而同时南亚高压自晚全新世有所增强东延,位置偏南的副高脊线可频繁西伸影响北部湾,北部湾演进成为印度夏季风、东亚夏季风、冷空气前缘三者交绥地带,从而加强了暖湿水汽与冷空气交汇等重要降水条件。

136

4.2 中全新世以来北部湾陆-海体系响应

4.2.1 环境演进意义

由前孢粉分析亦可见植被种类含量随时间改 变具有一定连续性,但由于适应气候波动而变化, 并且非优势属种相间出现,木本以及蕨类优势属种 为连贯出现,形成了围绕这类优势植被衰荣变化的 热带和亚热带山地森林生境。沉积物粒度和化学元 素同样呈现连贯但波动性的变化。优势矿种石英、 长石、风化矿物还有云母同样为连续出现,而非优 势矿种同样视气候和风化条件而相间出现。以上指 示了现代地表环境源于历史持续演进,而这些变化 是依托地表内在物理、化学过程。岩石圈地表具有 空间概念,植物根植于地表土壤,而地表不仅指与 空气接触表面,还具有向下厚度与层序。

4.2.2 地表热胀冷缩效应

如前所述北部湾区域广泛分布硅酸盐及其碎 屑岩类,亦是我国乃至世界典型喀斯特地貌区和碳 酸盐岩类区,气温呈现阶段性的波动和小尺度波动, 而且自中全新世以来波动增多,形成的温度差可对 地表反复进行热胀冷缩过程,前述δ¹⁸O的最高值、 最低值分别出现于中全新世和晚全新世,其极差具 有千年尺度,而短暂冷暖事件造成的温差亦较大并 具有百年尺度。区域碳酸盐和硅酸盐岩类作为火成 岩和沉积岩具有结晶性和固结性,松散沉积物则具 有一定孔隙结构,温差可使得硅酸盐岩石类花岗岩 产生裂隙、剥离和裂解等(董荣,2016)。因此,热胀 冷缩效应可加快碎屑生成和水流渗入并增大接触面 积,进而加快岩石化学溶解反应以及内部亲水黏土 矿物进一步膨胀致裂等,对实现化学物质迁移和再 分配起着重要物理基础作用。

4.2.3 地表风化退硅、退钙过程

如前所述北部湾为全新世海侵而形成,通过河 流连通而形成北部湾陆-海体系。现采用各项要素比 值来表示风化相对分离程度和风化过程(邵菁清和 杨守业,2012;毛沛妮等,2017)。分析可见与之前要 素变化等相似,各类比值同样以9.0 ka、4.0 ka 为基 本变化节点,再以6.0 ka、2.0 ka 为亚节点出现转折 的阶段性基本变化趋势。(粉砂+黏土)/砂比值自 6.0 ka 以来以波动方式总体上升,表明风化加强和 细颗粒的增加(图 6a);硅/铁(SiO₂/Fe₂O₃)比值自该 点下降趋势明显,硅/碱比值(SiO₂/(Na₂O+K₂O))总 体降低,显示区域含钠钾硅酸盐长石的离解加强。 钠/钾比值(NaO₂/K₂O)围绕平均值线有所波动,显示 总体稳定,两者溶解基本同步。化学蚀变指数 CIA(Al₂O₃/(Al₂O₃+CaO^{*}+Na₂O+K₂O),其中 CaO^{*}扣 除了碳酸钙)呈现稳步上升,而淋溶系数 ((Na₂O+K₂O+CaO)/Al₂O₃)为稳步下降趋势, 表示高 钠、高钾的铝硅酸盐岩类的钠、钾、钙长石分解加 快以及这类元素的溶解转移, 残积系数 ((Al₂O₃+Fe₂O₃)/(CaO+MgO+Na₂O))总体上升,表明 含铁铝硅酸盐岩类所含主要元素钙、镁、钠分离加 强以及钙长石和钠长石的持续离解(图 6b-g); 由前 可见 CaO 总体呈现下降趋势, 而 MgO 和 P2O5则为 相反,一定程度上指示区域钙镁碳酸盐岩类和含磷 石灰石分离,钙元素淋溶流失,这亦使得钙/镁 (CaO/MgO)比值总体维持降低趋势, 4.0 ka之后基本 保持小幅波动,显示两者基本达到平衡状态,而钙/ 磷比值(CaO/P2O5)稳定降低表明磷元素进一步析出 (图 6h-i)。∑比值(微量元素之和/平均值),其无单位 线性化处理不改变其变化特征,可见其为稳定上升 的富集趋向,除了硅酸盐岩类,岩溶区石灰石和夹 杂的硅酸盐岩类亦含有微量元素 Ba、Zn、Pb 等, 其 分解、迁移和成壤对微量元素增加亦有贡献。Sr 在 碳酸盐岩类具有一定含量并为气候变化敏感元素, 其与∑(微量元素之和)比值降低亦指示了其溶解转 移特征(图 6j, k)。碎屑矿物之中偶见磷灰石,亦能 说明碳酸盐岩类的风化及其残留。以上指示出在降 水增加的气候模式作用之下岩石风化序列进程,即 硅酸盐岩类和碳酸盐岩类原有固结的元素脱钙退硅 的淋溶、转移以及富集过程。以上与前人研究结果 基本一致, 岩溶地区随着降水和湿润度增加而岩溶 效应增强(汪良奇等, 2014)。

4.2.4 碎屑矿物对风化的进一步指示

长石/石英总体可见围绕平均值波动, 4.0 ka之 后出现较明显下降趋势,说明化学风化有所加快。 北部湾陆区总体上是贫铁区,赤铁矿可来自水铁矿 →类磁铁矿→赤铁矿水成过程,较为频繁降水而致 的湿润环境是促成地表土赤铁矿的重要因素(李家 熙和吴功建, 1999; 江兆霞和刘青松, 2016), 高镁铁 硅酸盐岩石在水流冲蚀作用下亦应是赤铁矿来源, 这类来自陆区的外源性重矿物经径流携带入海,同 时以稳定性云母为主的轻矿物的减少表明其它矿物 增加, 重/轻矿物为气候恶化阶段 6.0~5.0 ka 和 2.0 ka之后两段峰值区分布(图 61-o)。风化矿物与碎 屑矿物总量比值自 6.0 ka 气候恶化阶段开始明显上 升,并形成一个平台式的高值区间波动形态(图 6p), 根据海盆相邻 SO-31 岩芯的黏土矿物分布(崔振昂 等, 2017), 指示湿润气候的高岭石约自 8.7~3.4 ka 呈现第一个上升阶段,短暂下降之后再次呈现上升 趋势至今,同时由于水解减弱了伊利石结晶程度, 所以变化趋势相反而为下降, 黏土矿物的形成亦使 得风化矿物碎屑增加,该比值上升趋势表明了在总

第二期



图 6 STAT22 岩芯风化指标分布 Fig. 6 Regional weathering indicators' distribution of sediments core STAT22

体湿润和温度调控之下岩石化学风化和成壤加强。

4.2.5 植被多样性

生物多样性反映了其组分结构性以及系统稳 定性。前面指出约于 6.0 ka 转折点之后植被孢粉化 石种类上升,其香农(Shannon-Wiener)生物多样性 指数 H'同样在全新世早中期偏低, 平均为 0.65, 自 上述转折点之后明显上升, 平均为 1.24, 较前者提 高了 91.70%。虽然总体上自转折点上升于高值区间 波动变化, 但进一步来看其还存在阶段性变化特征, 即自 4.2 ka有所波动下降至 2.0 ka 达到阶段性低点, 尔后虽然波动幅度较大,但仍然可见以 6.0 ka、 4.0 ka、2.0 ka 三个基本节点, 经历了升-降-升三个主 要旋回,但 2.0 ka 之后又存在两个亚阶段,即 2.0 ka 有所下降至 1.0 ka 阶段性低点, 尔后再次波动上升 (图 6q)。以上表明植被演进是趋向系统性改善的, 林下蕨类茂盛的生境在平面上具有较大密度和扩展 性, 而垂向空间上以低矮植被和有所收缩为主, 可 适应晚三叠世和更新世以来构造运动造成的岩石隆 起的突兀地形和山地崎岖地形,以及碳酸盐、硅酸 盐岩类及其沉积物松散、元素流失等原因较为贫瘠 的养分。

4.3 地表重要响应阶段

Table 4

4.3.1 大暖期鼎盛期的强烈风化

从以上可见风化分解程度于 6.0~5.2 ka 波动性

极强, 表现为振幅大且频繁, 但总体平均值维持较 高,该阶段亦为即将结束转折降温的大暖期鼎盛, 亦对应施雅风等指出的中国全新世气候恶化转折阶 段。实际上其波动性还具有全球特征, Bond 周期于 6.0~5.0 ka之间出现4号事件,其振幅达到全新世最 大,全球还出现了古风暴、强烈风沙、滑坡等,显 示大气环流转换和地表强烈运动。在我国出现了特 大古洪水等(王兆夺等, 2018)。以上述阶段和全新世 的标准差相对变化来表示其波动情况,可见该阶段 大部分要素振幅较大:沉积物组分为 45.65%~96.99%, 粒度参数除了偏态为 14.00%, 其 余均超过 30.00%, 为 34.99%~135.63%, 显示其灵 敏响应性(表 4)。常量元素 SiO₂、K₂O、Na₂O 变化 幅度低且略微降低之外,余下大部分元素 Al₂O₃、 Fe₂O₃、CaO 等均振幅较大,为 22.60%~57.93%,表 示陆源碎屑的保守性元素 TiO2 达到了 22.60%。微 量元素除了 Ba 和氧化还原性活跃的 Cr 受到亚环境 影响变化低微之外,其余大部分变化明显,为 25.58%~57.30%(表 4)。同时由于径流加强和向海输 入加大,前述沉积速率明显增加,海洋沉积效应显 著。

4.3.2 "4.2 ka 事件"影响探讨

经过以上风化强烈期之后可见, 沉积速率于

表 4 STAT22 岩芯 6.0~5.2 ka 气候转折阶段粒度等的变化幅度 Granularity and others' variability during climatic transition 6.0~5.2 ka of sediments core STAT22

		0	ity and oth		sing aaring			012 ma 01 50			
約再	指标	砂	粉砂	泥	平均粒径	分选系数	偏态	峰态			
型反	幅度	96.99	108.96	45.65	88.19	135.63	14.00	34.99			
常量元素	指标	SiO ₂	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na ₂ O	MnO	P_2O_5	TiO ₂
/%	幅度	-1.98	49.14	57.93	39.02	49.75	-4.40	-1.60	37.53	43.24	22.60
微量元素	指标	Co	Ni	Cr	Zn	Zr	Sc	V	Ga	Ba	
/%	幅度	25.58	30.21	0.21	57.30	25.88	51.35	26.90	52.88	0.46	

表 5 STAT22 岩芯要素自 4.0 ka 以来变化斜率(1/ka) Table 5 Linear trend slopes of granularity and others from 4.0 ka of sediments core STAT22 (1/ka)

									()	
粒度	粉砂	黏土	平均粒径	峰值	砂	分选系数	偏态			
相对斜率	0.002	0.01	0.50	1.76	-0.007	-0.30	-140.90			
常量元素	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	P_2O_5	TiO ₂	Na ₂ O	MgO	SiO ₂	CaO	K ₂ O	MnO
相对斜率	0.12	0.86	1 235.70	21.07	0.16	-0.48	-0.01	-0.18	-2.21	-2 711.60
微量元素	Ni	Cr	Zn	Zr	Sc	V	Со	Ga	Ba	Sr
相对斜率	0.01	0.002	0.002	0.002	0.13	0.003	0.01	0.05	0.000 1	-0.000 2

5.2~4.2 ka 大幅降低至全新世次低, 仅略高于早期 气候恢复期, 对比相邻海盆中心 SO-31 岩芯(崔振昂 等, 2017), 亦在相近期间同样出现明显低值, 北部 湾以北山地孢粉组合分析可辨识出具有干冷效应的 "4.2 ka 事件"(Li et al., 2019)。从以上分析亦可见 (粉砂+黏土)/砂、硅碱比值、CIA、Cr 元素等于 5.0~4.0 ka 出现较为明显下降, 尤其是碎屑矿物比 值约于 5.0~4.0 ka 形成明显一个降低的凹形分布, 说明该时期干冷气候导致不稳定长石、轻矿物和重 矿物等离解停滞, 这应与"4.2 ka 事件"有关。该事 件虽然短暂, 但为全新世重大古气候灾害事件, 在

全球造成降温和中低纬度广泛干旱。由于北部湾区 域向海径流大幅萎缩, 沉积速率低微至 0.06 mm/a, 海洋沉积效应滞缓。

4.3.3 晚全新世化学风化再次加强

随着气候环流经调整恢复之后, 前述各项要素 和指标随即约自前述大暖期鼎盛期结束点 4.0 ka 开 始,多以小幅波动呈现增加或降低的较为稳步和明 确变化趋势。采用要素线性趋势拟合斜率相对于自 身平均值的无量纲斜率表示变化程度,结果显示, 细颗粒粉砂和黏土、平均粒径以及峰值斜率处于正 值区间, 而砂、分选系数处于负值区间, 表明颗粒 趋细、分选变好,偏态降低是因为频率曲线移向细 颗粒序列。主要陆源常量元素 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 P_2O_5 、 TiO₂、Na₂O 斜率处于正值区间,为上升趋势,陆源 碎屑稳定成分 TiO₂为 21.07/ka, 而 MgO、CaO、K₂O、 MnO为减少,显示在淋溶作用下前一类元素析出富 集,而后一类元素流失迁移(表 5)。可指示区域广泛 分布的稳定性石英矿物的 SiO₂同样为下降, 其斜率 处于负值区间。Sr 同为转移流失, 其它陆源微量元 素均为上升和富集(表 5)。可见,经过以上大暖期鼎 盛期的强烈风化,并受到短暂的"4.2 ka 事件"影响 有所滞缓之后,再次进入了较为稳定的化学风化阶 段,即降水、风化程度增加与降温变化趋势呈反相。 同样,相邻东孟加拉湾Cuddalore近岸岩芯表明,约 于 4.0 ka 降水开始增强趋势, 砂沉积物增加, CaCO3 降低,河流侵蚀和输入增加,是由于西南和东北季 风交汇加强而使得降水增加(Keshav and Achyuthan, 2015).

4.4 气候模式对岩溶地区生态意义探讨

由前分析可见现代植被承接全新世历史植被 的演进,中全新世之后降水增加对岩溶地区环境具 有积极意义。在岩溶地区现代植被和降水频率变化 率偏相关系数高值区,暴雨对植被具有为明显促进 作用(李建国等, 2020)。岩溶山区的植被类型以低矮 灌丛占优(莫建飞等, 2019), 各类植被净生产力其变 异系数为 0.04, 生产力差异性较小, 较高植被覆盖 使得总碳等含量也较高(谭一波等, 2019)。变温两栖 动物对气候波动和陆-水交界带变化具有高度敏感 性(王波等, 2018), 包括广西的我国西南岩溶地区为 其物种丰度高值区和集中区,降水量为其最大影响 因子,可栖息岩溶、非岩溶地貌区两栖物种比例接 近 50.00%, 具有特异种较少、适应性较强特征以及 喜荫的演进习性,说明历史气候较为湿凉和降水区 带广阔。岩溶地区森林降水比非岩溶周边丰富,形 成水-碳耦合循环又再加强森林生长和岩石化学元 素溶蚀迁移(Kang et al., 2020)。对比西北部越南红 河三角洲喀斯特地区(O'Donnell et al., 2020), 红树 林以及适合石灰岩旱地植被自 5.5 ka 呈现增加趋势 并有所波动变化,总有机碳平均来看有所增加,土 壤含水率曲线上升到一个高值区间; 自晚三叠世、 中更新世中晚期至现代岩溶阶段即全新世以来至今, 区域正地貌侵蚀缩小降低, 负地貌等变宽加深, 地 表和地下流系进一步形成有序性和体系性,并形成 了高价值自然景观(韦跃龙等, 2018)。以上显示降水 等是岩溶区正向溶蚀的关键驱动因子,对植被和生 态系统形成及其生产力具有促进作用,亦是石漠化 逆过程之重要驱动因素。

4.5 海洋古生态响应

4.5.1 海洋古生产力变化趋势

利用前述收集的本岩芯硅藻和有孔虫数据,构 建了古生产力等指标。由于降水加快了淋溶、河流 下切和基岩侵蚀过程,海洋沉积速率自上述转换点 6.0 ka 以来上升了1406.60%,显示通过入海河流水 沙输入的加大。Sr/Ba 比值可指示古盐度,其总体为 降低趋势,尤其是气候格局转换之后于4.0 ka 开始 在全新世最低值区间小幅波动并维持,显示携带陆 源物质近岸水系向海扩展并基本稳定(图 7a),中南 半岛邻区的东孟加拉湾河流输入径流量可由趋负的

G. ruber 有孔虫 δ^{18} O 所指示(Devendra et al., 2019), 这同样表示在区域降温背景之下, 冷气团与南方暖 湿空气交汇扰动增加了降水。本岩芯的 G. ruber 的 δ^{18} O 于 6.0~4.0 ka 出现正距平明显的波动, 并随后 出现明显趋负,最后于 4.0 ka 在负距平区稳定并波 动维持,同具区域降水和径流增加的指示意义;络 合了磷酸根、硝酸根等营养盐的有机质等陆源物质 输入增加,加之有机质生物分解耗氧而使得氧化还 原曲线偏向还原,并促使海水偏酸性(图 7b, c)。对 比相邻前述 SO-31 岩芯, 自 5.0 ka 相近时间以来古 TOC和古pH值均进入了新发展阶段(阶段V),变化 趋势分别为上升和下降;陆源生源要素输入增加促 进了藻类等繁盛以及有孔虫种类增加, 浮游有孔虫 生产力种和古生产力指标 P/B 呈现增加趋势, 尤其 是自气候转折点 6.0 ka 出现快速增加并波动变化 (图 7d, e), 线性趋势相对斜率依次为 0.08/ka、 0.05/ka。浮游有孔虫、硅藻香农多样性指数 H'同样 为明显增加趋势(图 7f, g), 相对斜率依次是 0.07/ka、0.04/ka。北部湾东北部珊瑚礁的形成和维 持于中全新世以来,除了海平面因素之外的陆源养 分输入亦为重要原因,北部湾以南的爪哇海全新世 海洋古生产力提高与同样陆源输入有关, 而非末次 冰期那样与涌升流有关(刘苗苗等, 2011; Xu et al., 2017).

4.5.2 植被和海洋古生产力旋回关系

前述积温在全新世基本完成了一个整体变化 周期,区域地表岩石及其碎屑随着完成了热胀冷 缩、化学风化等的改善和演进。孢粉、浮游有孔虫、 硅藻化石的多样性指数为低值维持-升-降-升(总体) 旋回变化,上述生产力种、P/B 同样如此,即古植 物、古生物和古生产力三者是同步旋回的,由于植 被和微体生物对气候变化极为敏感, 2.0 ka 以来还 可按照 1.0 ka 再划分先降后升两个亚旋回。这应是 区域植被促进了有机质和生源营养要素生产,并通 过河流向海输送而引致海洋生物快速响应, 化学元 素方面虽然旋回相位有所不同,但总体结果仍然均 是化学风化、古生产力等总体改善。前人诸多研究 表明, 生产力-植被多样性存在无关、正相关、负相 关三种关系,以上可见北部湾陆区古植被多样性、 海洋(微体)古生物、海洋古生产力三者之间有正相 关关系。

4.5.3 陆-海体系生态响应旋回机制

促进地表过程基本条件的光、热源于太阳辐射 外营力,中全新世以来太阳辐射虽然降低但基本趋 于稳定,而降水为地表大气过程,结合以上δ¹⁸O、 植被、粒度、化学要素等可知,区域通过光、热、 湿基础条件的适宜配置,加上热胀冷缩效应而进一 步加快了岩石离解风化,最终实现物质迁移和再分



图 7 STAT22 岩芯海洋古生产力指标分布 Fig. 7 Marine palaeo-productivity indicators of sediments core STAT22

表 6 北部湾陆-海体系地表过程基本旋回发展	
------------------------	--

	Table o Frimary continent-marine complex's cycles in Beldu Gun based on sediments core STAT22												
韭木	与륝险	今 新冊	辐射和气温	降水	1		地表			海洋			
^{巫平} 阶段	段/ka	王新也· 阶段	光、热	气候	地温(积温)	热胀冷缩	化学 风化	植被	径流	古生产力			
1	11.0~9.0	早期	增强	偏干	逐步恢复	热胀为主, 冷缩为辅	恢复	恢复	低弱	总体低下			
2	9.0~4.0	中期	维持加强, 但后期减 弱	前期偏干, 后期增加 并波动维 持	持续恢复 并至峰值	热胀为主, 冷缩为辅	增加	持续恢复并 达到种类丰 富	先低 后增	波动增加			
			太阳辐射于	4.2 ka 前后降	低, "4.2 ka	事件"导致地	表过程短暂	「减弱、滞缓等	,并对地温	且有转向作用			
3	4.0~0.2	晚期	减弱, 但趋 向稳定	波动维持	逐步下降	冷缩为主, 热胀为辅	增加	波动维持, 先降后升	波动 维持	波动维持, 总 体上先降后升			

140

配并提高植被多样性和古生产力(表 6)。总体可见, 化学风化旋回为弱-强-弱("4.2 ka 事件"影响)-强, 还可见到植被多样性、海洋古生产力亦在上述基本 旋回框架之下(表 6)。以上旋回结果是化学风化和植 被等总体呈现加强和改善趋势,并且是在太阳外营 力周期运作和气候调节之下有序地进行。

4.5.4 北部湾与中国陆区古生产力对比

中国植被与大气相互作用模式得出陆区古生产 力于 6.0 ka 前后为高值(何勇等, 2005), 自中全新世 以来由于西风带推进,中国北方地区晚全新世沙漠 化进程较中全新世总体为扩大趋势(李智佩等, 2007),湖泊及周边经历了咸化和盐碱化,中国陆区 总体生态系统碳储量下降23.00%,北方季风边缘区 达理湖 TOC、TN 总体明显下降(遇蕾和任国玉, 2008; Fan et al., 2017)。由以上孢粉组合并结合前人分析 表明,北部湾区域分布了草地类、落叶阔叶林、混 交林、常绿和落叶针叶林、热带雨林, 而这类植被 净初级生产力介于 200~545 gC/m²·a 区间(何勇等, 2005; 夏真等, 2019), 总体上是具有较高生产力的, 而海洋古生产力亦同步提高。北半球湿度曲线自 5.0 ka 以来有下降趋势(Woods et al., 2019), 我国西 风带区和季风边缘区湖泊于早、中全新世达到湿度 峰值随即开始明显降低(郭超等, 2014), 而北部湾区 域由于前述气候模式演进而使得降水增加和植被改 善,从而北部湾陆-海体系对提高我国全新世乃至 现代生产力作出贡献。

4.5.5 北部湾与南海北部古生产力旋回关系

南海古生产力自中晚更新世以来显示为冰期 较高、间冰期较低的旋回特征(李鹤等, 2017),而北 部湾同样表现为早、中全新世期气候偏暖的间冰期 偏低,而中全新世降温进入新冰期以来升高,其相 似之处使得北部湾成为南海北部古生产力体系的一 个亚尺度子系统,这与地处热带和亚热带的南海北 部陆架作为海陆过渡界面和陆源物质输入带有关。 根据颗石藻 *Florisphaera profunda* 模型推算的全球 低 纬 度 海 域 全 新 世 净 初 级 生 产 力 分 布 (Hernandez-Almeida et al., 2019), 6.0 ka 以来南海及 以南的印-太海域其分布等级均偏低,而其它海域 出现较高等级,这是由于热带海洋南海以贫营养盐 和极微藻类结构为特征,但南海扩张而形成的北部 湾陆架浅海自中全新世以来古生产力是提高的。

5 结论

全新世北部湾物源具有陆源性,可划分出三个 基本气候阶段,其中约以 6.0 ka 为界的气候模式为 先干后湿,并逐步形成了印度和东亚夏季风与西风 带南缘交汇之处,从而使得系统化降水条件加强。 陆-海体系风化、植被、海洋古生产力等以气候阶段中的 9.0 ka、4.0 ka 作为基本节点,并结合 6.0 ka、2.0 ka 亚节点进行波动旋回,该四个节点亦为全新世全球和区域气候变化重要分界点。

气温波动变化首先是具有热胀冷缩物理效应, 为加快化学风化打下基础,降水增加使得化学风 化、淋溶增强和植被多样性提高,进一步驱动区域 硅酸盐和碳酸盐岩类退碱脱硅成壤进程,表现为 铝、铁、磷等富集而硅、钙等为流失转移。海洋古 生产力与植被旋回相对应,为低-高-低-高旋回, 总体上为增强和改善,亦表明海洋与陆区联系密切 和响应快速。北部湾成为南海北部古海洋生态体系 的一个重要组成部分,并为现代海洋生物资源丰富 奠定了基础。

以上地表过程是在太阳辐射迫胁力、气候模式 的共同调控之下有序地进行。全新世以来区域植被 经历了丰度、属种波动衰荣变化,而主要属种随时 间呈现连续变化特征,兆示频繁气候波动形成的环 境竞争条件下之进化,亦是维系北部湾区域生态环 境的基础属种。

致谢:感谢中国地质调查局"海南岛东北部沿海地 区综合地质调查"、"南海北部湾全新世环境演变 及人类活动影响研究"项目组提供了样品材料和分 析鉴定数据。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. 20190308 and 1212010914027).

参考文献:

- 崔振昂,夏真,林进清,石要红.2017. 南海北部湾全新世环境 演变及人类活动影响研究[M].北京:海洋出版社.
- 董荣. 2016. 花岗岩球状风化的形成机理新析[J]. 矿产与地质, 30(5): 842-845.
- 郭超,马玉贞,胡彩莉,伍永秋,鲁瑞洁.2014.中国内陆区湖 泊沉积所反映的全新世干湿变化[J].地理科学进展,33(6): 786-798.
- 何勇, 丹利, 董文杰, 季劲均, 秦大河. 2005. 末次冰盛期以来 中国陆地植被净初级生产力的模拟[J]. 科学通报, 50(11): 1119-1124.
- 侯光良,方修琦. 2011. 中国全新世气温变化特征[J]. 地理科学 进展, 30(9): 1075-1080.
- 江兆霞,刘青松. 2016. 赤铁矿的定量化及其气候意义[J]. 第四 纪研究, 36(3): 676-689.
- 李鹤, 黄宝琦, 王娜. 2017. 南海北部 MD12-3429 站位海水古生 产力和溶解氧含量特征[J]. 古生物学报, 56(2): 238-248.
- 李家熙, 吴功建. 1999. 中国生态环境地球化学图集[M]. 北京: 地质出版社.
- 李建国, 袁冯伟, 赵宴青, 刘丽丽. 2020. 中国东部沿海地区暴

雨对植被活动的影响[J]. 地理科学, 40(2): 324-334.

- 李珍, 臧家业, SAITO Yoshiki, 徐小薇, 王永吉, MATSUMOTO Eiji, 张志英. 2005. 越南红河三角洲近五千年来的几个降 温事件[J]. 海洋科学进展, 23(1): 43-53.
- 李智佩, 岳乐平, 郭莉, 刘淑英, 王岷, 聂浩刚, 杨利荣, 孙虎, 王飞跃. 2007. 全新世气候变化与中国北方沙漠化[J]. 西北 地质, 40(3): 1-29.
- 刘苗苗, 沈建伟, 王月, 杨红强. 2011. 雷州半岛徐闻西岸珊瑚 岸礁造礁珊瑚群落结构及其演变[J]. 海洋地质与第四纪地 质, 31(6): 37-45.
- 罗攀, 郑卓, 杨小强. 2006. 海南岛双池玛珥湖全新世磁化率及 其环境意义[J]. 热带地理, 26(3): 211-217.
- 毛沛妮, 庞奖励, 黄春长, 查小春, 周亚利, 郭永强, 胡慧, 刘 涛. 2017. 汉江上游黄土常量元素地球化学特征及区域对 比[J]. 地理学报, 72(2): 279-291.
- 莫建飞,莫伟华,陈燕丽. 2019. 基于净初级生产力的广西喀斯 特区生物多样性维护功能评价[J]. 科学技术与工程, 19(29): 371-377.
- 邵菁清,杨守业. 2012. 化学蚀变指数(CIA)反映长江流域的硅酸盐岩化学风化与季风气候?[J].科学通报,57(11):933-942.
- 覃嘉铭,林玉石,张美良,李红春.2000. 桂林全新世石笋高分
 辨率 δ¹³C 记录及其古生态意义[J]. 第四纪研究, 20(4):
 351-358.
- 谭一波,申文辉,付孜,郑威,欧芷阳,谭长强,彭玉华,庞世 龙,何琴飞,黄小荣,何峰.2019.环境因子对桂西南蚬木 林下植被物种多样性变异的解释[J].生物多样性,27(9): 970-983.
- 汪良奇, 张强, 萧良坚, 扈治安, 李红春, 谢运球. 2014. 基于湖 积物硅藻与地球化学记录的古环境变迁反演——以桂林会 仙岩溶湿地为例[J]. 中国岩溶, 33(2): 129-135.
- 王波, 黄勇, 李家堂, 戴强, 王跃招, 杨道德. 2018. 西南喀斯特 地貌区两栖动物丰富度分布格局与环境因子的关系[J]. 生 物多样性, 26(9): 941-950.
- 王兆夺,黄春长,李晓刚,周亚利,庞奖励,查小春.2018.淮河 上游全新世古洪水沉积学特征及古洪水事件气候背景[J]. 长江流域资源与环境,27(9):2122-2131.
- 韦跃龙,李成展,陈伟海,罗劬侃,朱德浩,潘天望.2018. 广西 岩溶景观特征及其形成演化分析[J]. 广西科学,25(5): 465-504.
- 吴旭东,刘国旭,沈吉. 2016. 湛江湖光岩玛珥湖全新世粒度变 化特征及古气候意义[J]. 湖泊科学, 28(5): 1115-1122.
- 夏真,林进清,郑志昌,梁开. 2019. 北部湾广西近岸海洋地质 环境综合研究[M]. 北京:海洋出版社.
- 遇蕾, 任国玉. 2008. 全新世中国陆地生态系统碳储量变化的估 算[J]. 气候变化研究进展, 4(1): 12-16.
- 张伟强,黄镇国,江璐明.2002.中国热带全新世冷波动事件[J]. 热带地理,22(4):375-381.
- 张肖剑, 靳立亚. 2018. 全新世南亚高压南北移动及其与亚洲夏 季风降水的关系[J]. 第四纪研究, 38(5): 1244-1254.
- 周建超, 覃军干, 张强, 张春来, 蒋仕清. 2015. 广西桂林岩溶 区中全新世以来的植被、气候及沉积环境变化[J]. 科学通

报,60(13):1197-1206.

References:

- BRINER J P, MCKAY N P, AXFORD Y, BENNIKE O, BRADLEY R S, VERNAL A, FISHER D, FRANCUS P, FRÉCHETTE B, GAJEWSKI K, JENNINGS A, KAUFMAN D S, MILLER G, ROUSTON C, WAGNER B. 2016. Holocene climate change in Arctic Canada and Greenland[J]. Quaternary Science Reviews, 147: 340-364.
- CUI Zhen-ang, XIA Zhen, LIN Jin-qing, SHI Yao-hong. 2017. Holocene environmental evolution and anthropogenic impact of Beibu Gulf, South China Sea[M]. Beijing: Ocean Press House(in Chinese).
- DEVENDRA D, XIANG R, ZHONG Fu-chang, YANG Yi-ping, TANG Ling-gang. 2019. Palaeoproductivity and associated changes in the north-eastern Indian Ocean since the last glacial: Evidence from benthic foraminifera and stable isotopes[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 181: 1-11.
- DONG Rong. 2016. A new analysis of the formation mechanism of granite spherical weathering process[J]. Mineral Resources and Geology, 30(5): 842-845(in Chinese with English abstract).
- FAN Jia-wei, XIAO Ju-le, WEN Rui-lin, ZHANG Sheng-rui, WANG Xu, CUI Lin-lin, YAMAGATA H. 2017. Carbon and nitrogen signatures of sedimentary organic matter from Dali Lake in Inner Mongolia: Implications for Holocene hydrological and ecological variations in the East Asian summer monsoon margin[J]. Quaternary International, 452: 65-78.
- FERNANDEZ-FERNANDEZ J M, PALACIOS D, ANDRES N, SCHIMMELPFENNING I, BRYJOLFSSON S, SANCHO L G, ZAMORANO J J, HEIOMARSSON S, SEMUNDSSON I, ASTER T. 2019. A multi-proxy approach to late Holocene fluctuation of Tungnahryggsjokull glacier in the Trollaskagi peninsula (northern Ireland)[J]. Science of the Total Environment, 664: 499-517.
- GUO Chao, MA Yu-zhen, HU Cai-li, WU Yong-qiu, LU Rui-jie. 2014. Holocene humidity changes in inland China inferred from lake sediments[J]. Progress in Geography, 33(6): 786-798(in Chinese with English abstract).
- HE Yong, DAN Li, DONG Wen-jie, JI Jin-jun, QIN Da-he. 2005. Modeling Chinese land net primary productivity from LGM[J]. Science Bulletin, 50(11): 1119-1124(in Chinese with English abstract).
- HERNANDEZ-ALMEIDA I, AUSIN B, SAAVEDRA-PELLITERO M, BAUMANN K H, STOLL H M. 2019. Quantitative reconstruction of primary productivity in low latitudes during the last glacial maximum and the mid-to-late Holocene from a global florisphaera profunda calibration dataset[J]. Quaternary Science Reviews, 205: 166-181.
- HOU Guang-liang, FANG Xiu-qi. 2011. Characteristics of Holocene temperature change in China[J]. Progress in Geography, 30(9): 1075-1080(in Chinese with English abstract).

- JIANG Zhao-xia, LIU Qing-song. 2016. Quantification of hematite and its climatic significances[J]. Quaternary Sciences, 36(3): 676-689(in Chinese with English abstract).
- KANG Zhi-qiang, CHEN Jun, YUAN Dao-xian, HE Shi-yi, LI Yi-long, CHANG Yong, DENG Yan, CHEN Yang, LIU Yuan-yuan, JIANG Guang-hui, WANG Xin-yu, ZHANG Qin-yun. 2020. Promotion function of forest vegetation on the water & carbon coupling cycle in karst critical zone: Insight form karst groundwater system in south China[J]. Journal of Hydrology, 590: 1-10.
- KESHAV N, ACHYUTHAN H. 2015. Late Holocene continental shelf sediments, off Cuddalore, East coast, Bay of Bengal, India: Geochemical implications for source-area weathering and provenance[J]. Quaternary International, 371: 209-218.
- LI Chun-hai, YU Shi-yong, YAO Shu-chun, SHEN Ji, JI Ming, CHEN Rong, SUN Wei-wei, LING Chao-hao. 2019. Response of alpine vegetation to climate changes in the Nanling Mountains during the second half of the Holocene[J]. Quaternary International, 522: 12-22.
- LI He, HUANG Bao-qi, WANG Na. 2017. Changes of the palaeo-sea surface productivity and bottom water dissolved oxygen content at MD12-3429, northern South China Sea[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 56(2): 238-248(in Chinese with English abstract).
- LI Jian-guo, YUAN Feng-wei, ZHAO Yan-qing, LIU LI-li. 2020. Effect of rainstorms on vegetation activities in eastern coastal area of China[J]. Scientia Geographica Sinica, 40(2): 324-334(in Chinese with English abstract).
- LI Jia-xi, WU Jian-gong. 1999. Eco-environmental geochemistry atlas of China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- LI Zhen, SAITO Y, MATSUMOTO E, WANG Yong-ji, HARUYAMA S, HORI K, DOANH L Q. 2006. Climate change and human impact on the Song Hong (Red River) Delta, Vietnam, during the Holocene[J]. Quaternary International, 144: 4-28.
- LI Zhen, ZANG Jia-ye, SAITO Y, XU Xiao-wei, WANG Yong-ji, MATSUMOTO E, ZHANG Zhi-ying. 2005. Several cooling events over the Hong River Delta, Vietnam during the past 5,000 years[J]. Progress in Geography, 23(1): 43-53(in Chinese with English abstract).
- LI Zhi-pei, YUE Le-ping, GUO Li, LIU Shu-ying, WANG Min, NIE Hao-gang, YANG Li-rong, SUN Hu, WANG Fei-yue. 2007. Holocene climate change and desertification in northern China[J]. Northwestern Geology, 40(3): 1-29(in Chinese with English abstract).
- LIU Miao-miao, SHEN Jian-wei, WANG Yue, YANG Hong-qiang. 2011. Reef-building coral community and evolutionary characteristics of the fringing reefs on the west coast of Xuwen county, Leizhou Peninsula[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 31(6): 37-45(in Chinese with English abstract).

LUO Pan, ZHENG Zhuo, YANG Xiao-qiang. 2006. Holocene

magnetic susceptibility form Shuangchi Maar Lake Hainan Island and its environmental significance[J]. Tropical Geography, 26(3): 211-217(in Chinese with English abstract).

- MAO Pei-ni, PANG Jiang-li, HUANG Chun-chang, ZHA Xiao-chun, ZHOU Ya-li, GUO Yong-qiang, HU Hui, LIU Tao. 2017. Chemical weathering characteristics and regional comparative study of the loess deposits in the upper Hanjiang River[J]. Acta Geographica Sinica, 72(2): 279-291(in Chinese with English abstract).
- MO Jian-fei, MO Wei-hua, CHEN Yan-li. 2019. Evaluation of biodiversity maintenance function in karst area of Guangxi based on NPP[J]. Science Technology and Engineering, 19(29): 371-377(in Chinese with English abstract).
- O'DONNEL S, NGUYEN T M H, STIMPSOM C, HOLMES R, KAHLERT T, HILL E, VO T, RABETT R. 2020. Holocene development and human use of mangroves and limestone forest at an ancient hong lagoon in the Trang An karst, Ninh Binh, Vietnam[J]. Quaternary Science Reviews, 242: 1-22.
- PIOTROWSKI A M, BANAKAR V K, SCRINER A E, ELDERFIELD H, GALY A, DENNIS A. 2009. Indian Ocean circulation and productivity during the last glacial cycle[J]. Earth and Planetary Science Letters, 285(1-2): 179-189.
- QIN Jia-ming, LIN Yu-shi, ZHANG Mei-liang, LI Hong-chun. 2000. High resolution records of δ^{13} C and their palaeoecological significance from stalagmite formed in Holocene epoch in Guilin[J]. Quaternary Sciences, 20(4): 351-358(in Chinese with English abstract).
- SHAO Jing-qing, YANG Shou-ye. 2012. Does chemical index of alteration (CIA) reflect silicate weathering and monsoonal climate in the Changjiang River basin?[J]. Science Bulletin, 57(11): 933-942(in Chinese with English abstract).
- TAN Yi-bo, SHEN Wen-hui, FU Zi, ZHENG Wei, OU Zhi-yang, TAN Chang-qiang, PENG Yu-hua, PANG Shi-long, HE Qin-fei, HUANG Xiao-rong, HE Feng. 2019. Effect of environmental factors on understory species diversity in Southwest Guangxi *Excentrodendron tonkinense* forests[J]. Biodiversity Science, 27(9): 970-983(in Chinese with English abstract).
- WANG Bo, HUANG Yong, LI Jia-tang, DAI Qiang, WANG Yue-zhao, YANG Dao-de. 2018. Amphibian species richness patterns in karst regions in Southwest China and its environmental associations[J]. Biodiversity Science, 26(9): 941-950(in Chinese with English abstract).
- WANG Liang-qi, ZHANG Qiang, XIAO Liang-jian, HU Zhi-an, LI Hong-chun, XIE Yun-qiu. 2014. Palaeoenvironmental changes inferred from diatom and geochemistry records of lake deposits: A case study in Huixian karst wetland, Guilin[J]. Carsologica Sinica, 33(2): 129-135(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhao-duo, HUANG Chun-chang, LI Xiao-gang, ZHOU Ya-li, PANG Jiang-li, ZHA Xiao-chun. 2018. Climatic implications of the Holocene flood events recorded by sediments in

the upper Huaihe River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 27(9): 2122-2131(in Chinese with English abstract).

- WEI Yue-long, LI Cheng-zhan, CHEN Wei-hai, LUO Qu-kan, ZHU De-hao, PAN Tian-wang. 2018. Characteristics and formation and evolution analysis of the karst landscape of Guangxi[J]. Guangxi Sciences, 25(5): 465-504(in Chinese with English abstract).
- WOODS M A, WILKINSON I P, LENG M J, RIDING J B, VANE C H, SANTOS R A L, KENDER S, SCHEPPERD S D, HENNISSEN A I, WARD S L, GOWING C J B, WILBY P R, NICHOLS M D, ROCHELLE C A. 2019. Tracking Holocene palaeostratification and productivity changes in the Western Irish Sea: A multi-proxy record[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 532: 1-16.
- WU Xu-dong, LIU Guo-xu, SHEN Ji. 2016. Grain size variation and its environmental significance from Huguangyan Maar Lake, Zhanjiang since the Holocene[J]. Journal of Lake Science, 28(5): 1115-1122(in Chinese with English abstract).
- XIA Zhen, LIN Jin-qing, ZHENG Zhi-chang, LIANG Kai. 2019. Comprehensive study on Guangxi nearshore marine geological environment of Beibu Gulf[M]. Beijing: Ocean Press House(in Chinese).

- XU Yong-hang, WANG Liang, YIN Xi-jie, YE Xiang, LI Dong-yi, LIU Sheng-fa, SHI Xue-fa, TROA R A, ZURAIDA R, TRIARSO E, HENDRIZAN M. 2017. The influence of the Sunda Strait opening on paleoenvironmental changes in the eastern Indian Ocean[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 146: 402-411.
- YU Lei, REN Guo-yu. 2008. Changes in terrestrial carbon storage over China during the Holocene[J]. Advances in Climate Chang Research, 4(1): 12-16(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Wei-qiang, HUANG Zhen-guo, JIANG Lu-ming. 2002. The Cooling fluctuation events during Holocene in tropical China[J]. Tropical Geography, 22(4): 375-381(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xiao-jian, JIN Li-ya. 2018. Meridional migration of the South Asian High and its association with Asian summer monsoon precipitation during the Holocene[J]. Quaternary Sciences, 38(5): 1244-1254(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Jian-chao, QIN Jun-gan, ZHANG Qiang, ZHANG Chun-lai, JIANG Shi-qing. 2015. Vegetation, climate and depositional environment changes since the middle Holocene in the karst area of Guilin, Guangxi[J]. Science Bulletin, 60(13): 1197-1206(in Chinese with English abstract).

