

徐兆凯, 张骞月, 常凤鸣. 156 ka 以来西菲律宾海陆坡沉积物的定量源-汇过程及其碳循环效应[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(11): 18-27.
XU Zhaokai, ZHANG Qian Yue, CHANG Fengming. Quantitative source-to-sink processes and carbon cycling effect of sediment on the continental slope of the western Philippine Sea since 156 ka[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(11): 18-27.

156 ka 以来西菲律宾海陆坡沉积物的定量源-汇过程及其碳循环效应

徐兆凯^{1,2,3,4}, 张骞月^{1,5*}, 常凤鸣^{1,2,3}

(1 中国科学院海洋研究所, 海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071; 2 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061; 3 中国科学院海洋大科学研究中心, 青岛 266071; 4 中国科学院第四纪科学与全球变化卓越创新中心, 西安 710061; 5 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:通过对西菲律宾海大陆坡上 MD06-3052 岩芯沉积物中有机质稳定碳同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) 的分析, 结合该孔有机碳含量、总氮含量、沉积物不同组分通量以及陆源区风化剥蚀指标等数据, 探讨了 156 ka 以来冰期-间冰期旋回中研究区有机质的定量源-汇过程、主控因素及其碳循环效应。结果表明: $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值在 -27.4‰ ~ -18.6‰ 波动, 平均值为 -22.2‰ , 且呈现出冰期相对偏负而间冰期相对偏正的变化特征, 有机质的具体来源包括海洋生物和陆地 C3 植物, 在冰期和间冰期阶段分别以陆源 (平均约为 67%) 和海源 (平均约为 83%) 有机质的贡献为主。陆源有机碳含量和通量的变化趋势与总有机碳相应指标非常一致, 均具有冰期高而间冰期低的特征, 表明研究区冰期阶段有机碳通量增加的最主要原因是海平面下降所引起的大陆架出露及其上松散硅酸盐沉积物的强物理剥蚀作用。再结合热带西太平洋其他岩芯的相似记录, 认为当时热带广泛出露大陆架上的强硅酸盐风化剥蚀作用及其相伴的高海底有机碳埋藏通量在大气 CO_2 浓度降低和全球变冷中有着非常重要的贡献。

关键词:西菲律宾海; 有机质来源; 海平面变化; 冰期-间冰期; 碳循环

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.014

0 引言

全球变暖问题受到社会各界的普遍关注, 罪魁祸首之一就是大气中温室气体 CO_2 浓度的显著升高, 自工业革命以来短短的数十年时间里其上升幅度高达约 100 ppmv ^[1], 这与第四纪冰期-间冰期时间尺度上的波动幅度相当^[2]。因此, 了解第四纪大

气 CO_2 浓度变化的具体过程、成因机制及其全球碳循环效应, 对人类更好地认识、分析和应对未来的全球气候变化有着非常重要的科学价值。低纬度地区的水循环和碳循环更是在地球气候中扮演着不可或缺的角色^[3], 值得深入研究。

当前对第四纪冰期阶段大气 CO_2 浓度降低的具体驱动机制仍争论不断, 涉及到诸多可能: 如铁假说、珊瑚礁假说、硅酸盐渗漏假说、呼吸碳假说和冰期热带陆架风化假说等^[4-9]。其中, 陆表硅酸盐的风化剥蚀作用很可能是全球碳循环中的一个重要的汇, 化学风化过程可以直接消耗大气中的 CO_2 , 而物理剥蚀作用产物的入海搬运则能将陆源有机质转移到海底埋藏下来^[10]。现代条件下热带地区的硅酸盐化学风化作用消耗大气 CO_2 的效率相对较高^[11], 同时冰期低海平面时期由海底出露而形成

收稿日期: 2022-01-18

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB42000000); 国家自然科学基金(41876034, 41676038, 41376064)

作者简介: 徐兆凯(1978—), 男, 博士, 研究员, 主要从事海洋地质学方面的研究工作。E-mail: zhaokaixu@qdio.ac.cn

* 通讯作者: 张骞月(1997—), 女, 在读硕士, 主要从事海洋地质学方面的研究工作。E-mail: zhangqian Yue@qdio.ac.cn

的新陆地也多位于该地区^[12], 因此, 可以推断当时热带地区出露陆架上松散硅酸盐沉积物强化学风化作用的介入很可能使其成为更加重要的碳汇。上述推论已经得到了大洋钻探计划(ODP) 1143 和 1144 站位沉积记录的证实, 进而产生了冰期热带陆架风化假说, 即第四纪冰期广泛出露的热带宽广型大陆架上松散硅酸盐沉积物的再次化学风化是当时 CO₂ 浓度降低的不可忽略的诱因, 这可能贡献了其降低量的约 9%^[9]。该假说也得到了南海以及西菲律宾海等其他热带西太平洋岩芯沉积记录的证实^[13-14]。尽管如此, 至今对于上述硅酸盐化学风化过程中的一些关键性细节问题仍认识不足, 比如陆源有机质的向海转移和埋藏^[15] 与其密切相关, 是另一种潜在的重要热带地区碳汇过程, 但后者在全球冰期碳循环中的作用尚不清楚。

海洋沉积物中有机碳的埋藏是重要碳汇, 现代海洋中约 80% 的有机碳储存在仅占海洋总面积约 8% 的边缘海区域^[16-18], 陆源有机碳的输入在其中起着决定性的作用。MIS 6 期(190 ka)以来, 全球海洋沉积物中有机碳的埋藏通量呈现出明显的冰期-间冰期旋回特征, 无论是末次冰期还是 MIS 6 阶段, 其有机碳埋藏通量均高于紧随其后的间冰期阶段约 50%^[19]。对于冰期阶段有机碳埋藏通量普遍性增加的具体机制迄今为止科研界仍没有清晰的认知。在南海以及巴布亚湾的研究也表明, 末次冰期阶段较高的有机碳埋藏量很可能受控于海平面下降所引起的陆源有机质输入量的增加^[20-21]。综上所述, 对于第四纪冰期旋回中热带大陆边缘有机碳埋藏量的具体变化过程及其控制因素的研究仍有待加强。

1 研究区地质概况

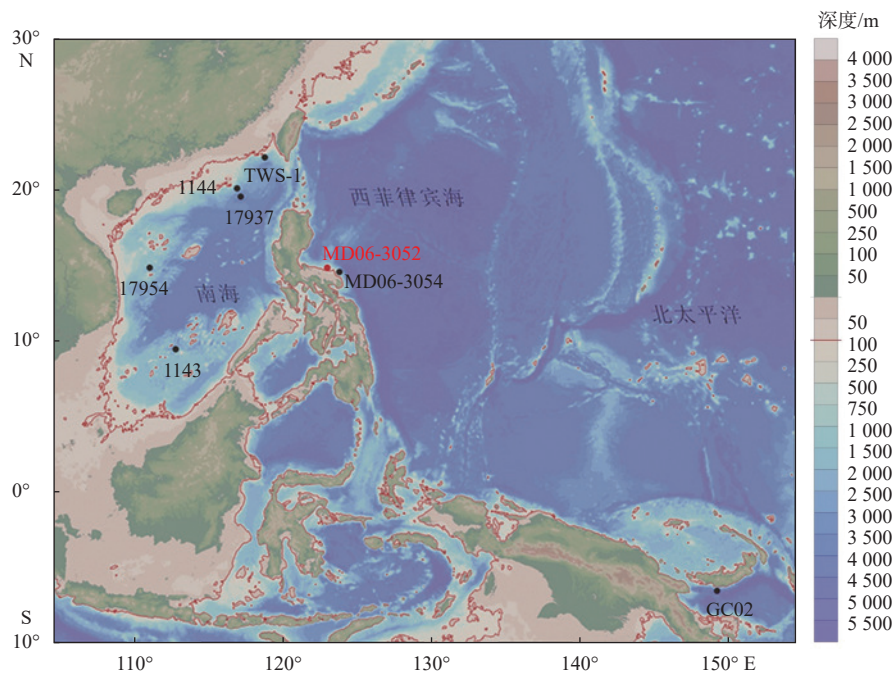
西菲律宾海位于西太平洋暖池边缘, 是西太平洋最重要的北向暖流系统——黑潮的发源地, 这里海陆相互作用强烈, 是能量和物质交换的关键区域。西菲律宾海临近菲律宾群岛, 吕宋岛是该海域中陆源物质的最主要贡献者^[22-26]。吕宋岛位于菲律宾群岛北部, 处于板块碰撞带, 火山地震活动频发, 岛上以白垩纪—第四纪沉积岩和喷出岩以及新生代侵入岩为主, 沉积岩中通常含有安山-玄武岩、火山碎屑岩和熔岩。吕宋岛属于热带高山岛屿, 全年气温在 23~34 °C, 且降水具有季节性特征, 多集中在 5—

10 月份。其上发育短小河流, 且由于气温高、降水充沛和植被茂盛, 具有较高的陆表物理剥蚀和化学风化速率, 进而向西菲律宾海输送了较大数量的陆源碎屑、营养物质和有机质^[27-30]。现代条件下吕宋岛上河流沉积物的分析结果表明: 该岛火山岩的化学风化作用强, 且对大气 CO₂ 的消耗效率非常高^[30]。第四纪时期西菲律宾海中陆源碎屑物质的风化剥蚀记录则显示: 冰期阶段较间冰期阶段的陆表物理侵蚀和化学风化作用增强, 应该主要得益于当时低海平面条件下吕宋岛东部大陆架的广泛出露及其上松散硅酸盐沉积物的再次风化剥蚀作用, 而与之相伴生的大气 CO₂ 的直接消耗则对当时的全球碳循环有着重要影响^[13]。由此可见, 西菲律宾海是研究第四纪冰期阶段热带陆架硅酸盐风化剥蚀作用及其伴随的陆源有机碳深海埋藏的理想区域。目前关于该区域陆源有机碳源-汇过程的研究工作仍较少, 虽然已经发现了第四纪冰期阶段西菲律宾海大陆坡沉积物中有机碳含量和通量增加的现象^[26,31], 但是对其具体成因机制仍缺乏清晰的认识, 尤其是在定量评估层面。

2006 年, 国际海洋全球变化研究计划中法合作航次(XIV-MD155-Marco Polo 2)在西菲律宾海大陆坡上采集到 MD06-3052 岩芯, 本研究基于该岩芯 160 个沉积物样品的有机质稳定碳同位素组成($\delta^{13}C_{org}$), 并结合该孔已发表的有机碳(TOC)含量、总氮(TN)含量、有机碳/氮比值(TOC/TN)以及总有机碳通量等相关数据, 重建了 156 ka 以来冰期-间冰期旋回中研究区有机碳的定量源-汇过程, 并探讨了其主要控制因素和在全球碳循环中的作用, 而这也正是该国际合作研究航次所关注的核心科学问题之一。

2 材料与方法

MD06-3052 岩芯由西菲律宾海西部吕宋岛岸外 200 km 的大陆坡上(14°48.60'N, 123°29.40'E)采集而来, 水深为 732 m(图 1), 取样站位位于西太平洋暖池边缘, 现代年平均海水表层温度为 28.4 °C^[32]。研究区地处黑潮源区, 表层洋流主要是北赤道洋流, 其自东向西流动并在到达菲律宾群岛后分成向北流动的黑潮和向南流动的棉兰老流。岩芯总长为 19.48 m, 岩性以橄榄灰-灰色粉砂质黏土和黏土质粉砂为主(图 2)。本次研究取样间隔为 12 cm, 共



红色圆点为本次研究站位; 黑色圆点为参考站位: MD06-3054^[26]、GC02^[20]、17954^[33]、17937^[34]、TWS-1^[21]、1143和1144^[9]。
 红色线指示-100 m 等深线(即冰期时古海岸线的大致位置)

图1 西菲律宾海 MD06-3052 孔和主要参考站位分布图

Fig.1 Distribution of site MD06-3052 in the western Philippine Sea and the main reference sites

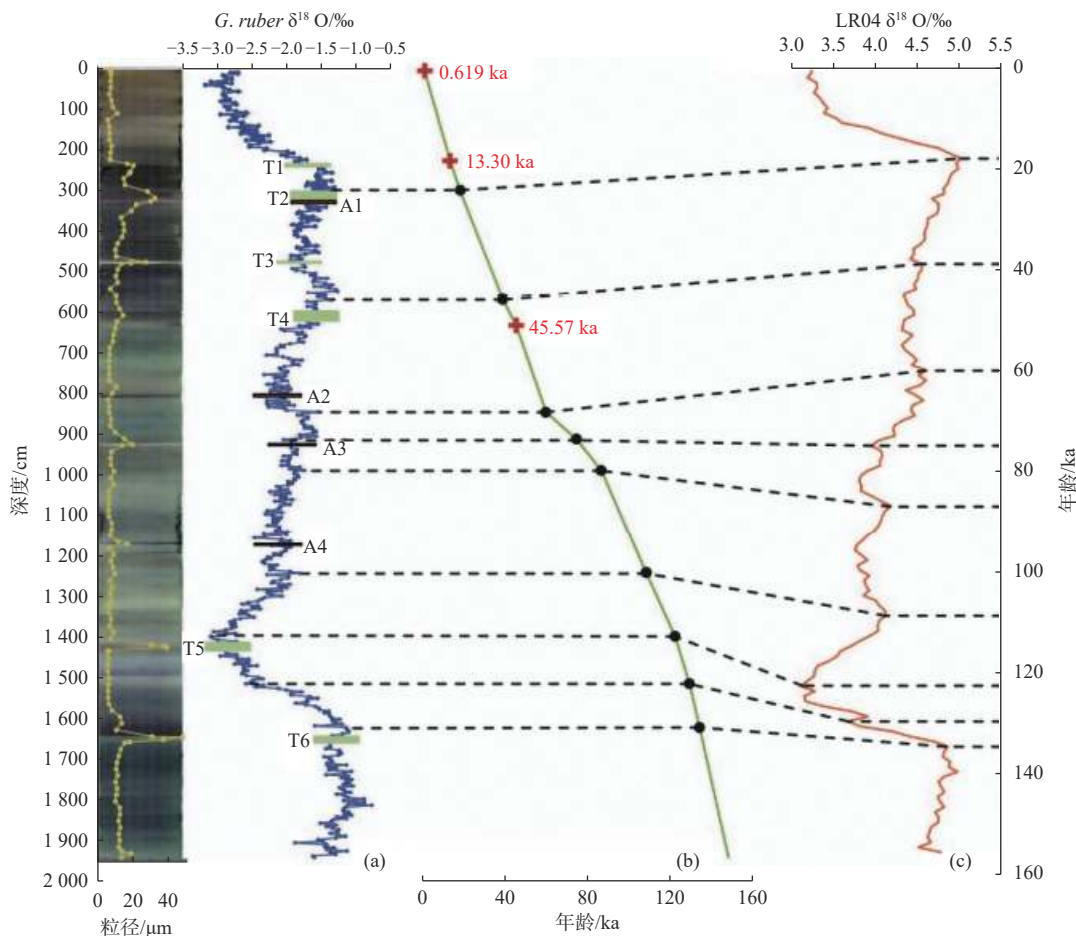


图2 MD06-3052 孔的岩芯照片、平均粒径变化和年龄框架^[35]

Fig.2 Photo, mean grain size, and chronological framework of core MD06-3052^[35]

获得了 160 个沉积物样品, 其平均时间分辨率约为 1 kyr。上部岩芯样品的 3 个 AMS¹⁴C 年龄在美国伍兹霍尔海洋研究所 AMS 测试中心测得, 下部岩芯样品年龄通过 484 个有孔虫(*G. ruber*)氧同位素数据^[32]和标准曲线间的对比来获得年龄控制点, 用线性内插和外延法计算得到所研究岩芯的年龄框架, 据此可知其最大年龄为 156 ka(图 2)。

$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 分析的实验步骤如下: ①取适量的沉积物样品, 将其低温(50 °C)烘干后, 用玛瑙研钵研磨至约 200 目并混合均匀; ②称取 0.5 g 左右的研磨后样品放置于 10 mL 离心管中, 并加入过量的 1 mol/L 盐酸反应 24 h, 期间超声震荡 4 次来使其充分反应; ③对上述反应产物进行多次离心清洗、烘干和再次研磨混匀, 称取 1~2 mg 酸化后的粉末样品装入锡杯中包好。测试分析工作在中国科学院烟台海岸带研究所内进行, 所使用的仪器设备为 EA 元素分析仪和 MAT253 稳定同位素质谱仪, 上述测试中使用的标样为 UREA、SEDIMENT 和 IAEA-

CH-6, 其标准偏差为 $\pm 0.2\%$ 。

3 结果

MD06-3052 岩芯 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的剖面变化情况如图 3a 所示。156 ka 以来, 该指标的总变化范围为 -27.4% ~ -18.6% , 平均值为 -22.2% , 呈现出明显的冰期-间冰期旋回特征。其中, 在 MIS 6(156~130 ka)和 MIS 3 后期至 MIS 2(40~14 ka)阶段, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值较低, 平均值为 -26.2% ; 而在剩余时间段(130~40、14~0 ka) $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值则明显偏高, 平均值为 -20.82% 。该岩芯的其他有机地球化学指标如图 3b~3e 也具有与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值类似的冰期-间冰期旋回特征^[31]: 冰期阶段偏低的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值对应着较高的 TOC 含量、TOC/TN 比值和有机碳通量以及较低的 TN 含量, 而在剩余时间段内则呈现出相反的变化趋势。

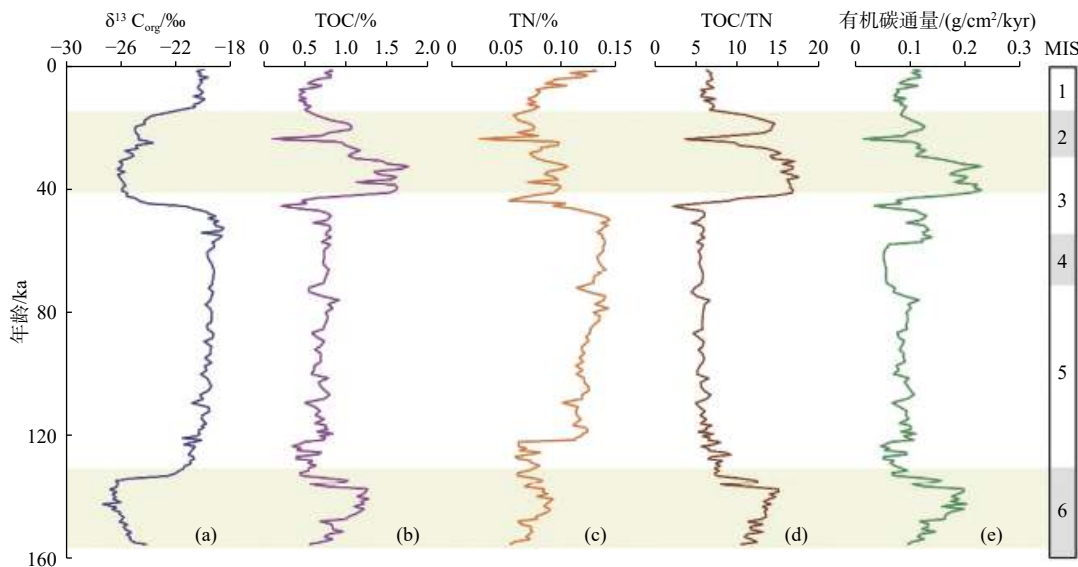


图 3 MD06-3052 岩芯 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 和 TOC 含量、TN 含量及有机碳通量^[31] 的剖面变化

Fig.3 Downcore variations of $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, contents of TOC and TN, and organic carbon flux^[31] in core MD06-3052

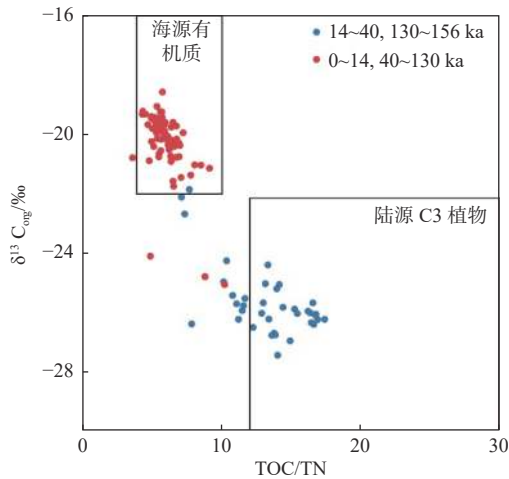
4 讨论

4.1 沉积有机碳来源的定量判别

不同来源的有机质往往会因源区环境的影响而具有明显不同的物质组成特征, 因此, 有机质的 TOC/TN 比值和稳定碳同位素组成是判别其来源的有效指标^[36-39]。海洋沉积物中的有机质主要来源

于海洋和陆地, 虽然不同来源有机质沉降到海底后可能会遭受到早期成岩作用的影响, 但其 TOC/TN 比值和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化幅度往往不大^[40]。大多数情况下, 陆源有机质较海源有机质贫氮, 故其 TOC/TN 比值一般 > 12 ; 而海源有机质的 TOC/TN 比值为 $4\sim 10$ 。在稳定碳同位素组成上, 海洋浮游植物与陆地植物光合作用所利用的碳源不同, 其中陆地 C3 植物(如热带雨林)利用大气 CO_2 ($\delta^{13}\text{C}$ 约为 -7%)产生的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值偏负, 一般为 -30% ~ -22% ; 陆地

C4植物(如高原草原)的光合作用过程与C3植物有所不同,其产生的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值更偏正,对应范围为 $-16\text{‰}\sim-12\text{‰}$;海源的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值为 $-22\text{‰}\sim-18\text{‰}$,因为海洋中浮游植物利用的海水中溶解 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值约为 0 ^[36,40]。基于MD06-3052岩芯沉积物中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值和TOC/TN比值的特征,可以判断研究区有机质主要来源于海洋生物和陆地C3植物(图4)。具体来讲,在冰期阶段(156~130、40~14 ka), $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值的变化范围为 $-27.4\text{‰}\sim-21.5\text{‰}$,且TOC/TN比值较高,更接近于陆源C3植物的物质组成特征,表明此时有机质主要来自于陆地C3植物;130~40、14~0 ka的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值为 $-25.6\text{‰}\sim-18.6\text{‰}$,且TOC/TN比值较低,说明海源有机质的贡献明显增加。



海源有机质和陆源C3植物的相关数据来自文献^[41]

图4 MD06-3052岩芯有机质来源判别图

Fig.4 Provenance discrimination of organic matter in core MD06-3052

对于研究区有机质中不同来源的定量贡献比例,可以通过 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的两端元混合模型来进行估算^[20]。其中的关键在于有效确定潜在物源端元及其特征 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值。陆源有机质的向海输送主要受控于河流和风尘,前人对附近海洋沉积物中陆源碎屑物质的粒度、黏土矿物和Sr-Nd同位素组成的分析结果表明,这些沉积物主要来源于吕宋岛的河流物质输入和亚洲内陆的风尘物质输入^[22,24-25,42]。研究区地处黑潮源区,受自南向北流向的黑潮影响,台湾及亚洲东部的陆源有机质也很难通过洋流输送至该孔^[31]。MD06-3052站位沉积物中陆源碎屑组分的定量估算结果指示吕宋岛河流为其主要来源(约68%~100%),亚洲风尘输入的贡献较小^[13,35]。因此,推断MD06-3052岩芯中的陆源有机质应该

主要来自于吕宋岛的河流输入。吕宋岛现代河流中有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值平均为 -24.9‰ ,且该有机质主要来源于陆地C3植物(约80%)^[43]。吕宋岛现代居民砍伐森林来种植甘蔗,C3植物被C4植物大量取代,现代河流中的有机质明显受到了人类活动的影响。由于缺少吕宋岛上C3植物的直接 $\delta^{13}\text{C}$ 数据,故选取该岛附近、菲律宾群岛中部C3植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 数据 -29‰ ^[44]作为潜在陆源有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 端元值。而海源有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 端元值则选取为 -18.5‰ ^[41]。通过 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值的两端元模型计算了MD06-3052岩芯中海洋和陆地来源有机碳的定量贡献比例^[20],公式如下:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{M}} \times F_{\text{M}} + \delta^{13}\text{C}_{\text{T}} \times F_{\text{T}} \quad (1)$$

$$F_{\text{M}} + F_{\text{T}} = 1 \quad (2)$$

式中: $\delta^{13}\text{C}_{\text{M}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{T}}$ 分别为海洋和陆地来源有机质的稳定碳同位素端元值;

F_{M} 和 F_{T} 分别为海洋和陆地来源有机碳的定量贡献比例。

再结合该孔已发表的TOC含量和通量^[31]即可计算出研究样品中海洋和陆地来源有机碳的含量和通量(图5)。

海洋和陆地来源有机碳的贡献比例变化呈现出明显的冰期-间冰期旋回特征:在冰期阶段(156~130、40~14 ka),陆源有机碳的贡献比例相对较高,平均值为67%;其他时期以海源有机碳为主,占比约83%。此外,陆源有机碳的含量和通量也表现出冰期高、间冰期低的变化趋势,且冰期-间冰期之间的波动幅度较大:冰期阶段陆源有机碳的平均含量为0.72%,通量平均值为 $0.1 \text{ g/cm}^2/\text{ka}$;而海源有机碳含量和通量的变化趋势与陆源有机碳相反,且波动幅度相对较小。

4.2 有机碳埋藏变化的主控因素

海洋沉积物中有机碳的埋藏受到了陆源有机质输入、海洋初级生产力和海底氧化-还原条件等多种因素的综合影响^[19,31]。在中-晚第四纪冰期-间冰期时间尺度上,MD06-3052岩芯沉积物中陆源有机碳的含量与通量和总有机碳含量及通量的变化趋势基本一致,且与海源有机碳相关指标的变化趋势截然相反(图3、5),说明陆源有机碳的输入是引起沉积物中总有机碳物质组成变化的最主要原因^[31]。

首先,冰期-间冰期旋回中全球海平面的高度^[45]和MD06-3052岩芯沉积物中陆源有机碳的通量之

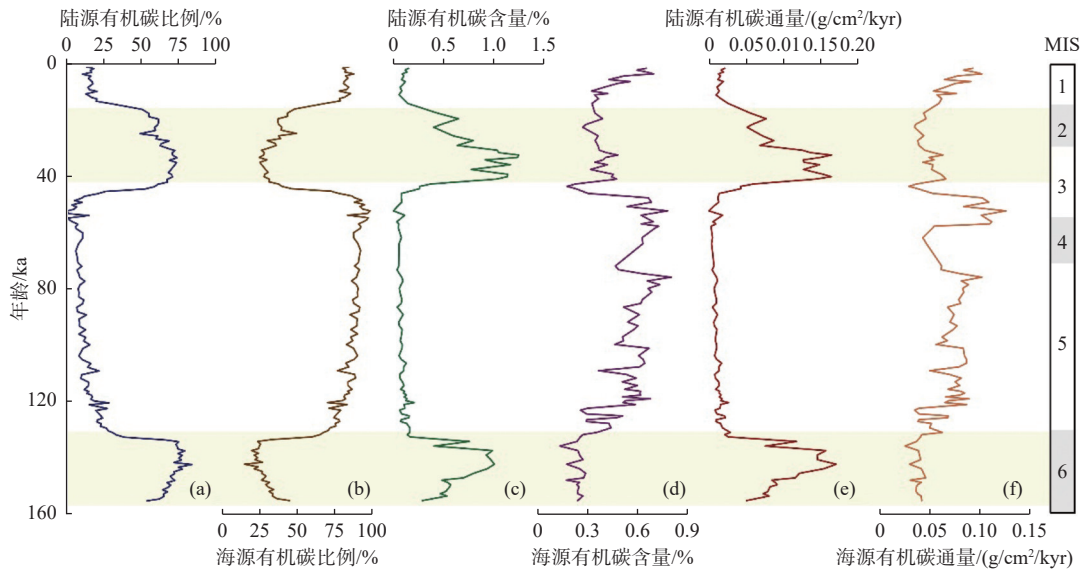


图 5 MD06-3052 岩芯海洋和陆地来源有机碳的贡献比例、含量和通量的剖面变化

Fig.5 Downcore variations of contribution ratio, content, and flux of marine- and terrestrial-derived organic carbon in core MD06-3052

间具有很好的相关性(图 6): 冰期阶段(156~130、40~14 ka)海平面的高度与现今相比下降了约 70~120 m^[45], 此时对应较高的陆源有机碳通量, 而其余时间段内的变化趋势相反, 表明海平面高度是导致上述冰期-间冰期旋回中研究区内有机碳埋藏变化的主要控制因素^[31]。研究站位和吕宋岛之间的大

陆架较为平缓, 冰期阶段海平面的明显下降所形成的新陆地(出露的大陆架)和站位间的距离明显缩短, 且当时的研究区很可能由现在的大陆坡海洋环境转变成了以陆源淡水注入为主导的海岸环境^[32], 致使吕宋岛和出露大陆架上的陆源有机质更容易被搬运到研究区而埋藏下来^[46]。

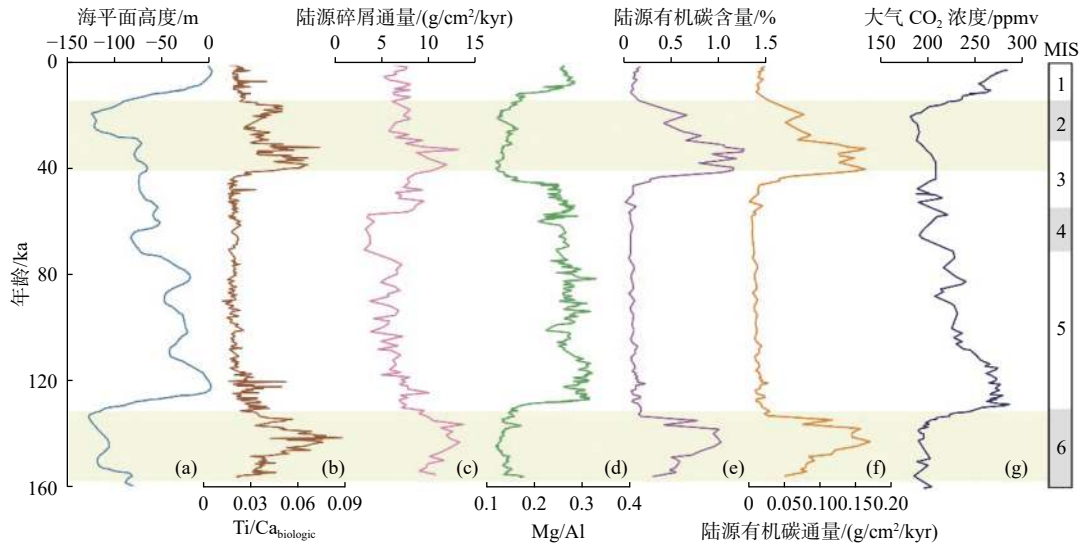


图 6 MD06-3052 岩芯 $Ti/Ca_{biologic}$ 比值、陆源碎屑物质通量和 Mg/Al 比值^[13]、陆源有机碳含量、陆源有机碳通量的剖面变化与海平面高度^[45] 和大气 CO_2 浓度^[2] 波动间对比

Fig.6 Comparison of $Ti/Ca_{biologic}$ ratio, terrigenous clastic material flux, Mg/Al ratio^[13], terrestrial organic carbon content, and terrestrial organic carbon flux in core MD06-3052 with sea level height^[45] and atmospheric CO_2 concentration^[2]

再者, 即便是冰期阶段, 地处低纬度地区的研究区的温度和湿度等客观条件仍满足陆表松散硅酸盐发生再次风化剥蚀的需求。例如, MIS 6 时期

研究区的海水表层温度依然高达 25~28 °C, 与间冰期相比并没有明显的下降^[32]。此外, 相关研究工作也认为第四纪冰期低海平面时期热带西太平洋

地区出露的大陆架上植被茂盛,且主要发育热带雨林等 C3 植被,表明当时的气候依然温暖湿润并可为周边海域提供大量的陆源有机质^[47]。

冰期低海平面阶段,陆源碎屑物质的输入通量和风化剥蚀程度均明显较间冰期阶段为高^[13]。岩芯沉积物中陆源有机碳的输入通量与陆源区地表物理剥蚀作用指标(Ti/Ca_{biologic} 比值和陆源碎屑物质通量)和化学风化作用指标(Mg/Al 比值)间具有很好的耦合关系(图 6),表明研究区内有机质埋藏的主控因素是海平面下降导致的出露大陆架上松散硅酸盐沉积物的再次风化剥蚀。邻近的 MD06-3054 岩芯中 Ti/Ca_{biologic} 比值、TOC/TN 比值和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值的变化也揭示出末次冰期阶段陆源碎屑物质和有机质的输入要高于间冰期阶段^[26]。在热带西太平洋的其他区域比如巴布亚湾和南海北部,相关研究工作中也发现了类似的由于冰期阶段海平面下降所导致的陆源有机碳入海通量增多的现象^[20-21]。

综上,通过陆源有机碳的含量和通量与全球海平面高度^[45]、研究站位陆源碎屑物质输入和风化指标^[13]以及大气 CO₂ 浓度^[2]等潜在关键气候环境影响因子间的系统对比(图 6),认为中—晚第四纪冰期-间冰期旋回中,研究区乃至整个热带西太平洋地区入海有机碳通量变化的主要原因是海平面波动影响下的大陆架出露及其上松散硅酸盐的风化剥蚀作用^[9,13,20-21,31]。在冰期低海平面阶段,研究区的大陆架广泛出露,出露大陆架上松散硅酸盐沉积物的再次风化剥蚀作用导致了陆源碎屑物质入海通量的增加,同时也伴随着更多陆源有机质的海底

埋藏。

4.3 冰期热带西太平洋的碳循环效应

冰期阶段大气 CO₂ 的浓度与间冰期阶段相比降低了大约 80 ppmv,但其主要成因机制仍然存在着诸多疑问和争论^[2,6]。上述研究结果表明:156 ka 以来 MD06-3052 岩芯中总有机碳的通量和陆源有机碳的通量均表现出相似的冰期阶段高而间冰期阶段低的旋回特征,两者的变化幅度可以分别高达 60% 和 465%,可见控制上述变化的主要因素为陆源有机碳的通量变化,且其与大气 CO₂ 浓度波动间具有很好的一致性(图 7)。此外,热带西太平洋其他区域的陆源有机碳埋藏变化记录也呈现出类似的波动特征:末次冰期阶段西菲律宾海 MD06-3054 岩芯中表现出较随后的间冰期阶段偏高的陆源有机碳埋藏通量^[26],同期南海的 17937 岩芯和巴布亚湾的 GC02 岩芯也具有较高的有机碳含量和线性沉积速率^[20,34],17954 岩芯中二十九烷的沉积记录也揭示出 MIS 6 期以来冰期阶段陆源有机碳的含量明显高于间冰期阶段^[33]。这都表明低海平面阶段热带西太平洋地区海底沉积物中陆源有机碳埋藏通量的增加很可能是当时碳循环中的一个重要的汇,对冰期时大气 CO₂ 浓度的降低和全球变冷有着重要的促进作用^[20]。

前人根据南海深部 ODP 1143 和 1144 岩芯的沉积记录提出了冰期热带陆架风化假说,随后在西菲律宾海大陆坡上 MD06-3052 岩芯中也发现了与之相符的沉积记录,进而认为冰期低海平面阶段热

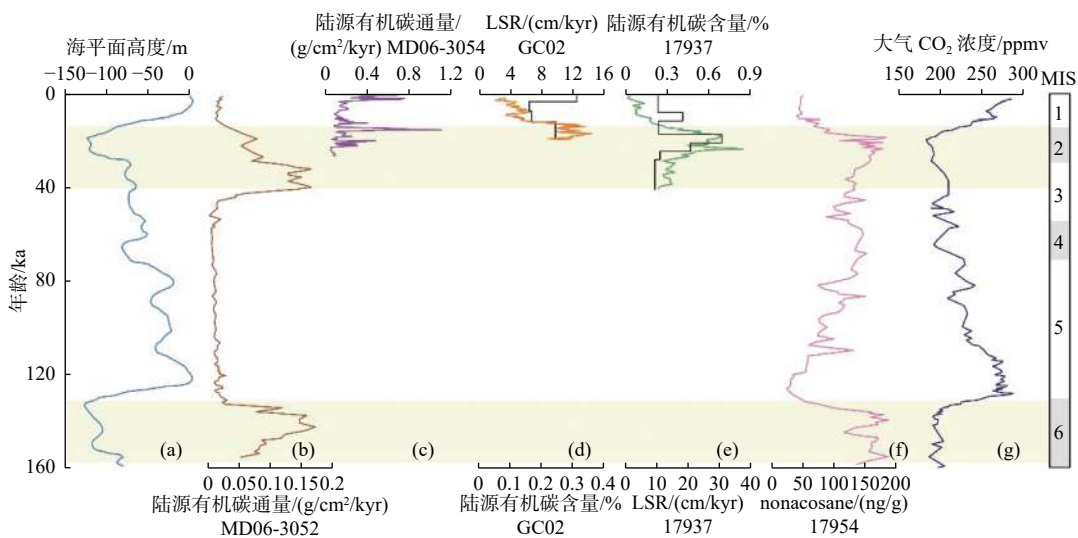


图 7 热带西太平洋典型岩芯的陆源有机碳输入变化^[20,26,33-34]与海平面高度^[45]和大气 CO₂ 浓度^[2]波动间对比

Fig.7 Comparison of changes for terrestrial organic carbon input in typical cores^[20,26,33-34] from the tropical Western Pacific with sea level height^[45] and atmospheric CO₂ concentration^[2]

带大陆架的广泛出露及其上松散硅酸盐沉积物的强化学风化作用所消耗的大量 CO_2 对当时的全球变冷有着不可忽略的贡献^[9,13]。热带大陆架出露硅酸盐沉积物的再次化学风化作用过程中往往也伴随着增强的硅酸盐物理剥蚀作用^[9,13], 进而可以携带大量的陆源有机质入海埋藏下来。这一点不仅得到了本次研究工作的有效证实——156 ka 以来冰期阶段 MD06-3052 岩芯中硅酸盐物理剥蚀作用和化学风化作用以及陆源有机碳和总有机碳埋藏通量的同步增加, 同时也体现在热带西太平洋地区其他沉积记录中类似的陆源有机碳通量与海平面间的同步变化上(图 7), 即中一晚第四纪低海平面阶段热带西太平洋大陆架的广泛出露及其上松散硅酸盐沉积物的再次强风化剥蚀作用和与之相伴生的海底有机碳大量埋藏现象很可能是广泛存在的。这也进一步表明了中一晚第四纪冰期阶段热带大陆架硅酸盐风化剥蚀作用在全球碳循环中的重要汇作用: 它不仅可以通过出露大陆架上松散硅酸盐沉积物的强化学风化作用而直接消耗大气 CO_2 (占到了其降低量的约 19%^[9,13]), 同时硅酸盐的强物理剥蚀作用过程中还往往伴随着大量陆源有机质的入海埋藏。尽管迄今为止对后者的定量估算工作仍未开展, 但基本可以肯定的是, 第四纪冰期阶段的热带大陆架地区在全球碳循环的作用很可能被低估了, 其贡献比例应该要大于之前仅仅基于硅酸盐化学风化作用而得出的约 19% 的估算值^[9,13]。

5 结论

本文通过对西菲律宾海大陆坡上 MD06-3052 岩芯中 156 ka 以来 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的分析, 结合该岩芯其他相关指标(如 TOC/TN 比值、总有机碳通量和 Mg/Al 比值等)以及热带西太平洋的其他岩芯记录, 探讨了研究区有机碳的定量源-汇过程、控制因素及其在冰期-间冰期全球碳循环中的作用, 主要得到以下结论:

(1) MD06-3052 岩芯沉积物中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值的变化范围为 $-27.4\text{‰} \sim -18.6\text{‰}$, 平均值为 -22.2‰ 。研究区有机质来源于海洋生物和陆地 C3 植物的混合。通过 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的两端元模型计算得知: 冰期阶段(156~130、40~14 ka)以陆源有机质为主(约 67%), 其余时间段内则以海源有机质占主导(约 83%)。

(2) 第四纪冰期-间冰期旋回中陆源有机碳的

含量和通量与海平面变化、陆源碎屑物质输入及其风化剥蚀指标之间有很好的相关性。冰期阶段海平面的明显下降导致了出露大陆架上硅酸盐风化剥蚀作用增强, 与之相伴随的是大量陆源有机质的入海, 这是沉积物中总有机碳埋藏通量增加的主控因素。

(3) 第四纪冰期阶段吕宋岛乃至热带西太平洋大陆架上松散硅酸盐沉积物的再次风化剥蚀作用所伴随的海底有机碳埋藏量增加, 很可能是当时全球碳循环中的一个重要且普遍的过程, 需进一步的定量研究工作, 重新认识可能被低估的热带大陆架地区的碳汇效应。

参考文献:

- [1] MASSON-DELMOTTE V, ZHAI P, PIRANI A, et al. Climate Change 2021: the physical science basis, contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge University Press, 2021.
- [2] 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.
- [3] WANG P X. Low-latitude forcing: a new insight into paleo-climate changes[J]. *The Innovation*, 2021, 2(3): 100145.
- [4] MARTIN J H. Glacial-interglacial CO_2 change: the iron hypothesis[J]. *Paleoceanography*, 1990, 5(1): 1-13.
- [5] OPDYKE B N, WALKER J C G. Return of the coral-reef hypothesis: basin to shelf partitioning of CaCO_3 and its effect on atmospheric CO_2 [J]. *Geology*, 1992, 20(8): 733-736.
- [6] SIGMAN D M, BOYLE E A. Glacial/interglacial variations in atmospheric carbon dioxide[J]. *Nature*, 2000, 407(6806): 859-869.
- [7] SIGMAN D M, HAIN M P, HAUG G H. The polar ocean and glacial cycles in atmospheric CO_2 concentration[J]. *Nature*, 2010, 466(7302): 47-55.
- [8] JACCARD S L, GALBRAITH E D, SIGMAN D M, et al. Subarctic Pacific evidence for a glacial deepening of the oceanic respired carbon pool[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 277(1/2): 156-165.
- [9] WAN S M, CLIFT P D, ZHAO D B, et al. Enhanced silicate weathering of tropical shelf sediments exposed during glacial lowstands: a sink for atmospheric CO_2 [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 200: 123-144.
- [10] HILTON R G, WEST A J. Mountains, erosion and the carbon cycle[J]. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2020, 1(6): 284-299.
- [11] HARTMANN J, JANSEN N, DURR H H, et al. Global CO_2 -consumption by chemical weathering: what is the contribution of highly active weathering regions?[J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 69(4): 185-194.
- [12] LUDWIG W, AMIOTTE-SUCHET P, PROBST J L. Enhanced

- chemical weathering of rocks during the last glacial maximum: a sink for atmospheric CO₂?[J]. *Chemical Geology*, 1999, 159(1/4): 147-161.
- [13] XU Z K, LI T G, CLIFT P D, et al. Bathyal records of enhanced silicate erosion and weathering on the exposed Luzon shelf during glacial lowstands and their significance for atmospheric CO₂ sink[J]. *Chemical Geology*, 2018, 476: 302-315.
- [14] 万世明, 秦琳, 杨守业, 等. 南海冰期陆架风化与碳循环[J]. *第四纪研究*, 2020, 40(6): 1532-1549.
- [15] XU Z K, WAN S M, COLIN C, et al. Enhancements of Himalayan and Tibetan erosion and the produced organic carbon burial in distal tropical marginal seas during the Quaternary glacial periods: an integration of sedimentary records[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2021, 126(3): e2020JF005828.
- [16] BERNER R A. Biogeochemical cycles of carbon and sulfur and their effect on atmospheric oxygen over phanerozoic time[J]. *Global and Planetary Change*, 1989, 75(1/2): 97-122.
- [17] HEDGES J I, KEIL R G. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis[J]. *Marine Chemistry*, 1995, 49(2/3): 81-115.
- [18] BURDIGE D J. Burial of terrestrial organic matter in marine sediments: a re-assessment[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(4): GB4011.
- [19] CARTAPANIS O, BIANCHI D, JACCARD S L, et al. Global pulses of organic carbon burial in deep-sea sediments during glacial maxima[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10796.
- [20] CHEN L Y, LUO M, DALE A W, et al. Reconstructing organic matter sources and rain rates in the southern West Pacific Warm Pool during the transition from the deglaciation period to early Holocene[J]. *Chemical Geology*, 2019, 529: 119291.
- [21] 秦琳, 万世明. 末次冰期以来南海东北部陆源有机碳埋藏通量演变-海平面和季风驱动[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(4): 875-888.
- [22] WAN S M, YU Z J, CLIFT P D, et al. History of Asian eolian input to the West Philippine Sea over the last one million years[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 326-328: 152-159.
- [23] XU Z K, LI T G, WAN S M, et al. Evolution of East Asian monsoon: clay mineral evidence in the western Philippine Sea over the past 700 kyr[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 60: 188-196.
- [24] JIANG F Q, FRANK M, LI T G, et al. Asian dust input in the western Philippine Sea: evidence from radiogenic Sr and Nd isotopes[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(5): 1538-1551.
- [25] XU Z K, LI T G, CLIFT P D, et al. Quantitative estimates of Asian dust input to the western Philippine Sea in the mid-late Quaternary and its potential significance for paleoenvironment[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(9): 3182-3196.
- [26] XIONG Z F, LI T G, CHANG F M, et al. Rapid precipitation changes in the tropical West Pacific linked to North Atlantic climate forcing during the last deglaciation[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 197: 288-306.
- [27] MILLIMAN J D, SYVITSKI J P M. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers[J]. *The Journal of Geology*, 1992, 100(5): 525-544.
- [28] LYONS W B, NEZAT C A, CAREY A E, et al. Organic carbon fluxes to the ocean from high-standing islands[J]. *Geology*, 2002, 30(5): 443-446.
- [29] LIU Z F, ZHAO Y L, COLIN C, et al. Chemical weathering in Luzon, Philippines from clay mineralogy and major-element geochemistry of river sediments[J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24(11): 2195-2205.
- [30] SCHOPKA H H, DERRY L A, ARCILLA C A. Chemical weathering, river geochemistry and atmospheric carbon fluxes from volcanic and ultramafic regions on Luzon Island, the Philippines[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(4): 978-1002.
- [31] XU Z K, WAN S M, COLIN C, et al. Enhanced terrigenous organic matter input and productivity on the western margin of the Western Pacific Warm Pool during the Quaternary sea-level lowstands: forcing mechanisms and implications for the global carbon cycle[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 232: 106211.
- [32] QIU X H, LI T G, CHANG F M, et al. Sea surface temperature and salinity reconstruction based on stable isotopes and Mg/Ca of planktonic foraminifera in the western Pacific Warm Pool during the last 155 ka[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 32(1): 187-200.
- [33] PELEJERO C. Terrigenous *n*-alkane input in the South China Sea: high-resolution records and surface sediments[J]. *Chemical Geology*, 2003, 200(1/2): 89-103.
- [34] 李丽, 王慧, 罗布次仁, 等. 南海北部4万年以来有机碳和碳酸盐含量变化及古海洋学意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(6): 79-85.
- [35] ZHANG Z S, JIANG F Q, LI T G, et al. Sea-level changes controlled detrital sediment inputs to the Bicol Shelf in the western Philippine Sea since 150 ka[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2020, 38(4): 1153-1168.
- [36] HEDGES J I, KEIL R G, BENNER R. What happens to terrestrial organic matter in the ocean?[J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27(5/6): 195-212.
- [37] MEYERS P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes[J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27(5/6): 213-250.
- [38] BURDIGE D J. Preservation of organic matter in marine sediments: controls, mechanisms, and an imbalance in sediment organic carbon budgets?[J]. *Chemical Reviews*, 2007, 107(2): 467-485.
- [39] GONI M A, MONACCI N, GISEWHITE R, et al. Terrigenous organic matter in sediments from the Fly River delta-clinoform system (Papua New Guinea)[J]. *Journal of Geophysical Re-*

- search, 2008, 113: F01S10.
- [40] MEYERS P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter[J]. *Chemical Geology*, 1994, 114(3/4): 289-302.
- [41] LAMB A L, WILSON G P, LENG M J. A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios in organic material[J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 75(1/4): 29-57.
- [42] 于兆杰, 万世明, 孙晗杰, 等. 近百万年来亚洲风尘在西菲律宾海的沉积物粒度记录[J]. *地球环境学报*, 2012, 3(2): 792-800.
- [43] LIN B Z, LIU Z F, EGLINTON T I, et al. Organic matter compositions and loadings in river sediments from humid tropical volcanic Luzon Island of the Philippines[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126: e2020JG006192.
- [44] OGAWA Y, OKAMOTO Y, SADABA R B, et al. Sediment organic matter source estimation and ecological classification in the semi-enclosed Batan Bay Estuary, Philippines[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2021, 36(1): 110-119.
- [45] BINTANJA R, VAN DE WAL R S, OERLEMANS J. Modelled atmospheric temperatures and global sea levels over the past million years[J]. *Nature*, 2005, 437(7055): 125-128.
- [46] XU Z K, LI T G, CLIFT P D, et al. Sea-level, monsoonal, and anthropogenic impacts on the millennial-scale variability of siliclastic sediment input into the Western Philippine Sea since 27 ka[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 177: 250-262.
- [47] SUN X J, LI X, LUO Y L, et al. The vegetation and climate at the last glaciation on the emerged continental shelf of the South China Sea[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 160(3/4): 301-316.

Quantitative source-to-sink processes and carbon cycling effect of sediment on the continental slope of the western Philippine Sea since 156 ka

XU Zhaokai^{1,2,3,4}, ZHANG Qianyue^{1,5*}, CHANG Fengming^{1,2,3}

(1 Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

2 Laboratory for Marine Geology and Environment, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266061, China;

3 Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

4 CAS Center for Excellence in Quaternary Science and Global Change, Xi'an 710061, China;

5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: We analyzed the stable carbon isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) of organic matter in Core MD06-3052 retrieved from the continental slope of the western Philippine Sea. The new data, together with the published ones from the same core, including total organic carbon content, total nitrogen content, fluxes of different sediment components, and continental weathering and erosion proxies, were combined to constrain the quantitative source-to-sink processes, main controlling factors, and their carbon cycling effects of organic matter in the study area since 156 ka during glacial-interglacial cycles. Results show that the $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ values fluctuate between -27.4% and -18.6% on average of -22.2% , and are characterized by a variation characteristic of relatively negative values during the glacial periods and relatively positive values during the interglacial periods. The sources of organic matter included marine organisms and terrestrial C3 plants, dominated by terrestrial provenance (about 67% on average) and marine provenance (average 83%) during the glacial and interglacial periods, respectively. The variation trends of terrigenous organic carbon content and flux are very similar to those of the total organic carbon, and characterized by higher values during the glacial periods and lower values during the interglacial periods, indicating that the main reason for the increased organic carbon fluxes is continental shelf exposure during the glacial periods at sea level drop, and thus the strong weathering and erosion of loose silicate sediments. Combined with similar records of other cores in the tropical Western Pacific, we conclude that strong weathering and erosion of silicates on the widely exposed continental shelves and the associated high organic carbon burial flux in the sea during three stages could contribute greatly to the reduction of atmospheric carbon dioxide concentration, and consequent global cooling.

Key words: western Philippine Sea; organic matter source; sea level change; glacial-interglacial; carbon cycle