



末次冰期以来东亚季风和海平面变化调控澎湖峡谷沉积记录

谢巍, 赵宏超, 刘志飞, 赵玉龙, ColinChristophe

East Asian monsoon and sea-level change regulated sediment records in the Penghu Canyon since the last glaciation

XIE Wei, ZHAO Hongchao, LIU Zhifei, ZHAO Yulong, and Colin Christophe

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2025053002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南海东北部末次冰盛期以来有机碳通量变化及驱动机制

Variation of organic carbon flux in the northeastern South China Sea since the Last Glacial Maximum and the driving mechanism
海洋地质与第四纪地质. 2025, 45(1): 68–78

西湖凹陷平湖斜坡带A气田沉积体系定量表征及海平面变化周期性探讨

Quantitative characterization of the depositional system in Gas field A, Pinghu slope belt, Xihu Sag and its bearing on periodicity of sea level changes

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(3): 12–21

末次冰期以来阿拉伯海底层水体氧含量变化及其驱动因素

Changes in bottom water oxygen level of the Arabian Sea and the driving factors since the Last Glacial Period

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(5): 189–201

东海嵎山岛末次冰期黄土有机碳同位素特征及其古环境意义

Characteristics of organic carbon isotope and the paleoenvironmental significances of loess in Shengshan Island during the Last Glacial Period

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(1): 159–169

近50 kaBP以来西菲律宾海盆沉积物风尘组分对东亚季风演化的响应

Response of terrigenous eolian dust sediment composition to the East Asian monsoon evolution in the West Philippine Basin since 50 kaBP

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(6): 74–85

末次盛冰期巽他陆架海平面和植被变化对陆表碳通量影响的数值模拟研究

Effects of Sunda Shelf exposure and vegetation changes on land-atmosphere carbon exchange during the Last Glacial Maximum

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(2): 110–118



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

谢巍, 赵宏超, 刘志飞, 等. 末次冰期以来东亚季风和海平面变化调控澎湖峡谷沉积记录 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(4): 17-25.

XIE Wei, ZHAO Hongchao, LIU Zhifei, et al. East Asian monsoon and sea-level change regulated sediment records in the Penghu Canyon since the last glaciation[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(4): 17-25.

末次冰期以来东亚季风和海平面变化调控澎湖峡谷沉积记录

谢巍¹, 赵宏超¹, 刘志飞¹, 赵玉龙¹, Colin Christophe²

1. 同济大学海洋地质全国重点实验室, 上海 200092

2. Université Paris-Saclay, GEOPS, CNRS, Orsay 91405, France

摘要:澎湖峡谷由于其独特的地理位置和沉积环境, 保存了高分辨率的沉积记录, 为研究古环境演变提供了珍贵材料。本研究对 2018 年中法合作 HydroSed 航次在南海东北部澎湖峡谷西侧堤岸的 MD18-3570 钻井岩芯开展了 1 cm 分辨率 X 射线荧光光谱岩芯元素扫描, 结合 ¹⁴C 测年, 研究了过去 54 ka 以来深海峡谷沉积记录演变及其受控机制。研究发现, Al、Si 与 K 元素在 12~30 cal.kaBP 期间呈现低值而在其他时期呈现高值, Zr 元素与上述 3 种元素的变化趋势相反。此外, 所有元素均呈现百年-千年尺度波动特征。本文选用 K/Al 比值反映陆源碎屑化学风化状态, Si/Al 与 Zr/Al 比值反映陆源碎屑粒度变化。K/Al 比值变化与董哥洞-葫芦洞石笋氧同位素记录变化相似, 且在冷气候事件期间 (新仙女木事件和海因里希事件 H1-H5) 呈现异常高值, 表明东亚季风降水调控深海沉积物的化学风化状态。东亚季风降雨减弱, 可能导致台湾流域化学风化减弱、物理剥蚀增强, 体现为深海沉积记录的 K/Al 比值升高 (化学风化减弱), 季风降雨增强则诱发相反的沉积记录。粒度指标 Zr/Al 在低海平面时期 (12~30 cal.kaBP) 呈现高值, 这可能与陆源碎屑搬运距离缩短导致的粗粒沉积物输入增加有关。因此, 本研究认为海平面变化调控粗粒陆源碎屑输入, 而季风降雨变化调控深海沉积的化学风化强度。本研究首次提供了澎湖峡谷沉积环境演变的长时间、高分辨率沉积记录, 为深海峡谷沉积记录的演化机制提供新的见解。

关键词: XRF 岩芯元素扫描; 东亚季风; 海平面变化; 末次冰期; 澎湖峡谷

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: [10.16562/j.cnki.0256-1492.2025053002](https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2025053002)

East Asian monsoon and sea-level change regulated sediment records in the Penghu Canyon since the last glaciation

XIE Wei¹, ZHAO Hongchao¹, LIU Zhifei¹, ZHAO Yulong¹, Colin Christophe²

1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Université Paris-Saclay, GEOPS, CNRS, Orsay 91405, France

Abstract: The Penghu Canyon preserved high-resolution sedimentary records due to its unique deep-sea geographical location and depositional environment, and provided valuable materials for the study of paleoenvironmental evolution. We scanned a drilling core of Well MD18-3570 situated on the west bank of the Penghu Canyon in the northeast of the South China Sea (22°11.48'N, 119°38.68'E, water depth 1 572 m, during Sino-French HydroSed cooperation voyage in 2018) at 1-cm resolution using X-ray fluorescence, analyzed the scanning data, and combined with ¹⁴C dating data, from which sediment record evolution and its controlling mechanism since the last 54 ka. Results reveal that the contents of Al, Si, and K were low in the period of 12–30 cal.kaBP and high in other periods, while that of Zr showed the opposite trend to the above three elements. In addition, all the elements showed fluctuations on the centennial-millennial scale. We choose the K/Al ratio to reflect the chemical weathering state of terrigenous detritus, and Si/Al and Zr/Al ratios to reflect the grain-size changes of terrigenous inputs. The K/Al ratio variations were similar to the stalagmite oxygen isotope variations in the Dongge-Hulu Caves, and showed anomalously high values during cold climatic events (the Younger Dryas and Heinrich Events H1–H5), suggesting that the East Asian monsoon precipitation regulated the chemical weathering intensity of the deep-sea sediments. The weakened monsoon rainfall might lead to the reduced chemical weathering and the enhanced physical erosion in Taiwan drainage basin, which is reflected as the increased K/Al ratio (weakened chemical weathering) of the deep-sea sediment records. On the other hand, the enhanced monsoon rainfall induced the opposite sedimentary record. Grain size indicator Zr/Al

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“南海南部深海沉积搬运过程及其对海洋碳循环影响的锚系观测研究”(42130407)

作者简介: 谢巍 (1998—), 男, 硕士研究生, 海洋地质专业, E-mail: wxie@tongji.edu.cn

通讯作者: 赵宏超 (1993—), 男, 博士后, 主要从事海洋沉积研究, E-mail: hongchao_zhao@tongji.edu.cn

收稿日期: 2025-05-30; 改回日期: 2025-06-21. 周立君编辑

show high values during the sea-level lowstands (12–30 cal.kBP), which might be related to the increased coarse-grained input due to shorter transport distances of terrigenous sediments. Therefore, we suggested that sea-level changes regulated coarse-grained terrigenous detritus input, and monsoon rainfall changes regulated the chemical weathering intensity of deep-sea sediments. This study provided the first long-term, high-resolution sedimentary record of the Penghu Canyon, and provided new insights into the evolutionary mechanism of the canyon sedimentary record.

Key words: XRF core scanning; East Asian monsoon; sea level change; last glaciation; Penghu Canyon

南海是西太平洋最大的半封闭边缘海, 每年接收约 7 万吨的陆源碎屑输入^[1-2]。大量陆源碎屑供给与半封闭沉积环境使南海具有高分辨率且连续保存的沉积记录, 这些沉积记录是研究古环境演变的重要材料^[3-5]。然而, 准确解译南海沉积记录的古环境信息极具挑战, 因为南海沉积记录的受控因素较多且地质演化复杂^[6-7]。南海东北部特有的地质背景进一步增加了古环境解译的复杂性。上新世以来吕宋岛弧与华南大陆碰撞, 导致台湾造山带持续隆升^[8], 形成了南海北部独特的地貌特征。台湾造山带构造剥蚀产生的陆源碎屑通过台湾西南部狭窄的高屏陆架(宽度小于 20 km)和台湾西部宽广的台湾海峡(宽度超过 200 km)向南输送^[9]。澎湖峡谷位于台湾海峡和南海北部华南陆架的交界处, 峡谷水道向南延伸约 180 km^[10], 其独特的地理位置使其成为台湾造山带与南海深海盆地之间陆源碎屑的主要输运通道和沉积汇集区域^[11]。末次冰期以来, 全球海平面和气候经历了多次显著波动^[12], 前人对台湾浊水溪河口岩芯的沉积记录研究表明, 海平面变化和季风降雨调控了来自台湾沉积物的组成^[13-14]。末次冰盛期低海平面时台湾海峡大面积暴露, 沉积物以粗颗粒砂质为主, 更多粗粒沉积物可能被搬运至海底峡谷^[13]。此外, 季风降雨变化调控了沉积物停留时间, 冰期弱降雨减少侵蚀, 延长沉积物停留时间, 促进化学风化; 全新世强季风降雨加剧侵蚀, 缩短停留时间, 抑制化学风化作用^[14]。然而, 以往的研究主要分析过去 2 万年来沉积环境演化^[13-14], 且分辨率较低, 缺乏更长时间尺度、高分辨率的深海峡谷记录, 这制约了对于深海峡谷沉积记录对海平面与季风降雨的响应机制的认识。

为了解决上述问题, 本研究选用澎湖峡谷西侧堤岸上 MD18-3570 深海岩芯, 开展高分辨率(1 cm)的 X 射线荧光光谱岩芯元素扫描, 结合¹⁴C 测年结果, 研究过去 5 万年来深海峡谷沉积记录演变及其受控机制。

1 区域地质背景

南海东北部地区的气候主要受东亚季风系统

控制, 呈现出显著的季风型气候特征。夏季西南季风携带大量来自赤道洋区的暖湿气流, 使该地区气温升高, 湿度增加, 整体呈现出高温多雨的气候特征^[15]。该区域年降水量的 90% 以上集中在夏季, 表现出极强的季节性分布规律^[16]。此外, 夏季台风活动频繁, 亦对降水过程产生叠加效应, 过去 60 年间, 平均每年约有 4 个台风直接登陆或经过台湾^[17], 对南海东北部尤其是台湾岛及其周边海域的水文气候环境造成显著影响。冬季东北季风增强, 导致南海东北部地区气温显著下降, 空气干燥, 降水显著减少, 表现为寒冷干燥的气候状态^[15]。整体而言, 南海东北部地区的气候明显受控于东亚季风系统的时空演变。

在环流方面, 南海东北部表层洋流受季风驱动与大洋边界流作用的双重影响。夏季, 在西南季风的驱动下, 南海北部表层洋流总体呈逆时针环流格局, 吕宋海峡北部存在西向流入, 而南部则为东向流出, 形成南海环流的重要分支^[18]。与此同时, 源自太平洋的黑潮在次表层通过吕宋海峡流入南海, 形成黑潮的南海分支^[19]。该分支沿南海东北部边缘流动, 对区域水体交换、热量与盐度输运发挥关键作用。冬季, 随着东北季风主导风场的建立, 吕宋海峡的流向发生反转, 北部区域表现为东向流出, 南部则为西向流入, 环流格局随之转为顺时针方向^[18]。

综上所述, 南海东北部地区的气候系统与表层环流特征均呈现出强烈的季节性变化, 受东亚季风主导作用显著。该区域不仅是连接热带西太平洋与南海的重要通道, 同时也是季风研究与海气相互作用研究的关键区域。

南海东北部位于东亚季风系统的交汇带, 是南海重要的沉积汇区之一, 其物源输入受控于构造背景、气候条件与地貌演化等多重因素, 具有显著的时空复杂性。其沉积物主要来自 3 个物源区, 即中国南部的珠江、台湾岛以及菲律宾的吕宋岛^[20]。尽管普遍认为三大源区均对本区沉积物有所贡献, 但已有研究通过黏土矿物组合和地球化学特征分析, 发现台湾岛是主要物源区^[1, 3, 21-22]。黏土矿物在搬运过程中具有较高的稳定性, 能够反映源区的母岩类

型、风化及气候条件^[6]。研究区各潜在物源区的黏土矿物组成存在明显差异。华南地块为构造稳定的克拉通区, 母岩以古生代—中生代的沉积岩和花岗质酸性侵入岩为主。在强烈的东亚夏季风降水作用下, 该地区长期经历深层次的化学风化过程, 导致大量黏土矿物形成^[6, 20]。珠江作为主要输出河流, 携带的黏土矿物组合以高岭石(约 46%)和伊利石(约 35%)为主, 绿泥石含量相对较低(约 18%), 而蒙脱石几乎缺失(约 1%), 这一组合反映了典型的湿热气候条件下深度化学风化所形成的矿物特征^[1]。吕宋岛则以新生代火山岩(如玄武岩、安山岩)为主, 属于环太平洋火山岛弧体系, 其岩石多为洋壳俯冲作用下形成的岛弧火山产物^[23]。在热带季风气候条件下, 该地区岩石经历强烈的化学风化作用。其河流搬运的黏土矿物组合中, 蒙脱石占据主导地位(约 87%), 其余矿物如高岭石、绿泥石和伊利石含量分别约为 5%、7% 和 1%, 呈现出火山物源的显著特征。与之形成鲜明对比的是, 台湾岛地处活跃造山带, 构造抬升速率高, 地形破碎, 母岩主要为变质岩与沉积岩。此外, 台湾地区降水量丰富, 年均侵蚀速率极高, 可达 2000 mm/ka^[24], 远高于珠江(约 50~100 mm/ka)及吕宋地区的平均剥蚀水平, 以物理风化为主的强烈剥蚀过程主导着物质搬运, 其输出的黏土矿物组合中, 伊利石(约 56%)和绿泥石(约 36%)含量显著高于其他来源区, 而高岭石与蒙脱石含量较低。这种特征在南海东北部岩

芯和表层沉积物中普遍存在, 说明台湾为该区域主要沉积物来源^[1, 21]。

2 样品处理方法

本文选取 2018 年中法合作 HydroSed 航次在南海东北部澎湖峡谷西侧堤岸上钻探的 MD18-3570 岩芯(22°11.48'N、119°38.68'E, 水深 1572 m)作为研究材料(图 1), 该岩芯总长 21.95 m, 岩性为均质深灰色黏土, 富含有孔虫, 未见明显浊流沉积层。

2.1 XRF 岩芯元素扫描

XRF 岩芯元素扫描在同济大学海洋地质全国重点实验室利用 Avaatech 公司生产的 XRF 岩芯扫描仪完成。测试前将岩芯样品表面处理平整, 消除岩芯表面的缝隙、孔洞、凹凸不平等, 并在表面覆盖一层聚丙烯薄膜(厚约 4 μm)。再将覆膜岩芯放入 XRF 岩芯扫描仪内开展 1 cm 分辨率的元素扫描。岩芯扫描仪运行参数为 30 s 曝光时间, 且针对不同元素设置 3 种电压和电流测试条件: 对¹³Al-²⁶Fe 元素的测试电压和电流分别为 10 kV 和 0.2 mA; 对²⁷Co-⁴²Mo 元素, 测试电压和电流分别为 30 kV 和 0.8 mA; 针对⁴³Tc-⁹²U 元素, 测试电压和电流分别为 50 kV 和 0.2 mA。XRF 岩芯元素扫描的测试结果为测试时间中元素的总计数强度/扫描时间, 其深度变化可以反映全岩元素含量的连续变化。在原始数

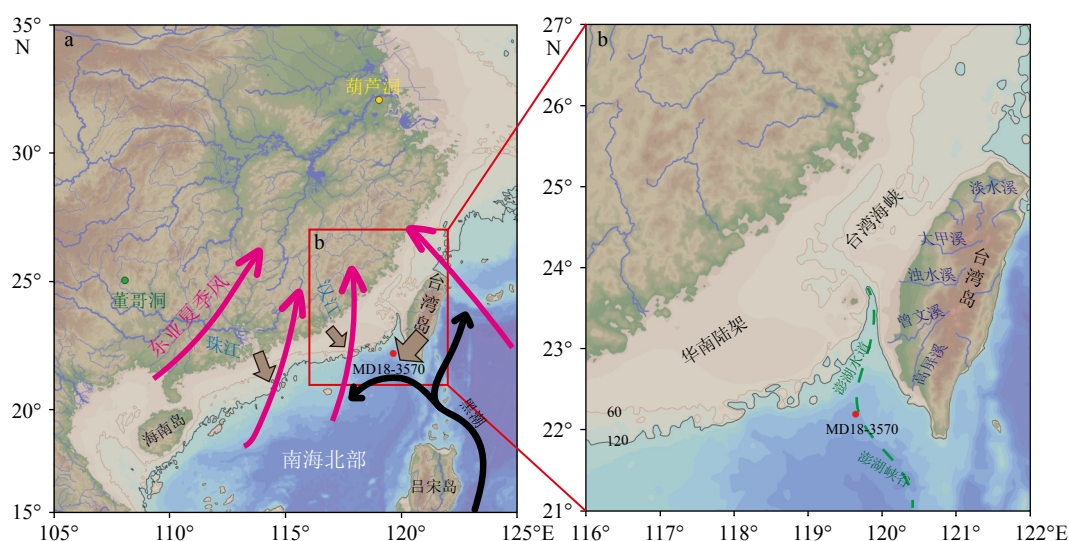


图 1 南海北部及台湾海峡地形图

红色圆点表示 MD18-3570 岩芯采样位置; 红色箭头表示东亚夏季风路径^[25], 黑色箭头表示黑潮路径^[26], 图 b 中等深线间距为 60 m。

Fig.1 Bathymetric maps of the Northern South China Sea and Taiwan Strait

The red dot indicates the site of core MD18-3570, red arrows indicate the East Asian summer monsoon pathway^[25], and black arrows indicate the Kuroshio route^[26]; contour interval is 60 m in Fig.b

据处理过程中,已将各岩芯段顶底位置出现的异常值剔除。

2.2 ¹⁴C 测年

对 MD18-3570 岩芯选取 6 个样品开展浮游有孔虫壳体的¹⁴C 测年。筛选岩芯样品中 150~355 μm 粗组分,从粗组分中挑选干净且完整的 *Globigerinoides ruber* 和 *Globigerinoides sacculifer* 浮游有孔虫壳体,每个测年样品至少包含 8 mg(约 800 个)有孔虫壳体。将测试样品送至美国 Beta 实验室完成分析测试。本研究选用研究站位附近 30 个已报道的碳储库年龄^[27-30] 的平均值(206±93 a)作为南海东北部区域碳库值,使用 Calib 8.2 软件将¹⁴C 放射年龄校正为日历年龄^[31]。

3 结果

3.1 年龄模型

6 个测年结果显示随着深度的增加,年龄逐渐由 1.2 cal.kaBP 增加至 44.4 cal.kaBP(表 1),没有出现年龄倒转,说明岩芯记录整体沉积环境稳定。尽管不能完全排除潜在的沉积间断,但结合岩性特征(均质深灰色黏土)及未见明显的浊流沉积层,推测岩芯记录具有较好的沉积连续性。因此将这 6 个年龄结果全部作为年龄控制点。利用 Clam 年龄模式对岩芯年龄控制点进行平滑插值^[32],建立岩芯的年龄模型(图 2),年龄模型显示 MD18-3570 岩芯记录了 1.9~54.0 cal.kaBP 的连续沉积信息。

3.2 XRF 岩芯元素扫描结果

总体上,Al、Si、K、Ti 与 Fe 元素呈现相似的变化,与 Zr 元素的变化趋势相反,而 Ca 元素的变化相对独立(图 3)。具体地,Al、Si、K、Ti 与 Fe 元素在 12~30 cal.kaBP 呈现较低值而在其余时间段内呈现较高值,Zr 元素在 12~30 cal.kaBP 呈现较高值而在其余时间段内呈现较低值,Ca 元素整体稳定,不存在明显的阶段性变化(图 3)。此外,所有元素呈现出百千年尺度的峰值波动。

4 讨论

沉积物元素含量变化可以反映沉积组成变化,而沉积组成变化受物源供给、海平面变化与季风降雨影响^[1, 33-34]。前人研究表明,末次冰期以来澎湖峡

表 1 MD18-3570 岩芯浮游有孔虫¹⁴C 测年结果
Table 1 ¹⁴C dating results of planktonic foraminifera from core MD18-3570

序号	深度/cm	¹⁴ C放射年龄/aBP	日历年龄/cal.aBP	误差/a, 1σ
1	11.5	1 590	1 188	113
2	311.5	9 830	10 922	163
3	591.5	22 260	25 828	131
4	861.5	27 590	31 053	130
5	1 161	36 590	40 763	303
6	1 461.5	42 340	44 449	583

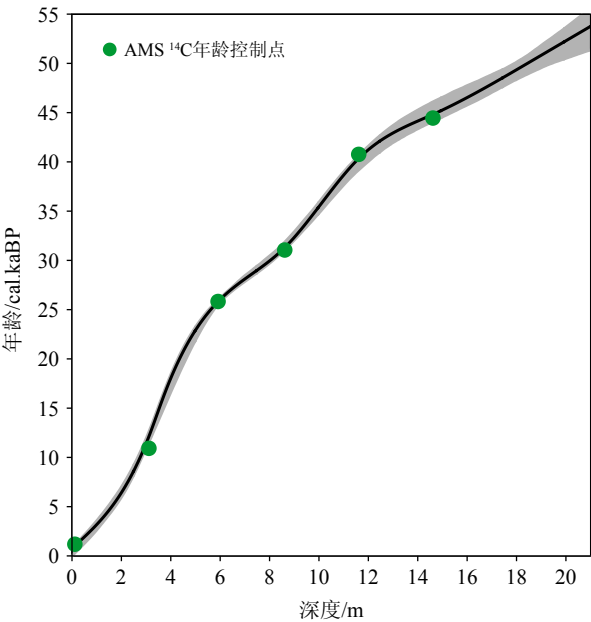


图 2 MD18-3570 岩芯年龄模型
灰色阴影代表 95% 误差范围,黑色实线代表最佳年龄结果。

Fig.2 The age model of core MD18-3570

The grey shadow indicates the level of 95% confidence and the black thick line presents the best modelling result.

谷沉积物主要源自台湾流域,没有明显的物源转变^[9,35-40]。考虑到峡谷沉积物来源较为稳定,认为 MD18-3570 岩芯的元素含量变化与物源变化无关。总体上,Zr 与 Al 变化趋势相反(图 3),二者的相关性也呈现出负相关(图 4),较弱的相关系数可能与岩芯中 Zr 元素含量较少有关。Si、K、Ti、Fe 与 Al 元素之间具有明显的正相关性(图 4),说明这些元素可能来源于相似的陆源物质,与 Zr 元素可以一同反映陆源碎屑输入变化。而 Ca 元素变化相对独立,且在整个记录中波动较小,可能指示其主要来源于生源碳酸钙,故此不作为陆源碎屑变化指标。

台湾地区处于强构造活动带,降雨量较大,河

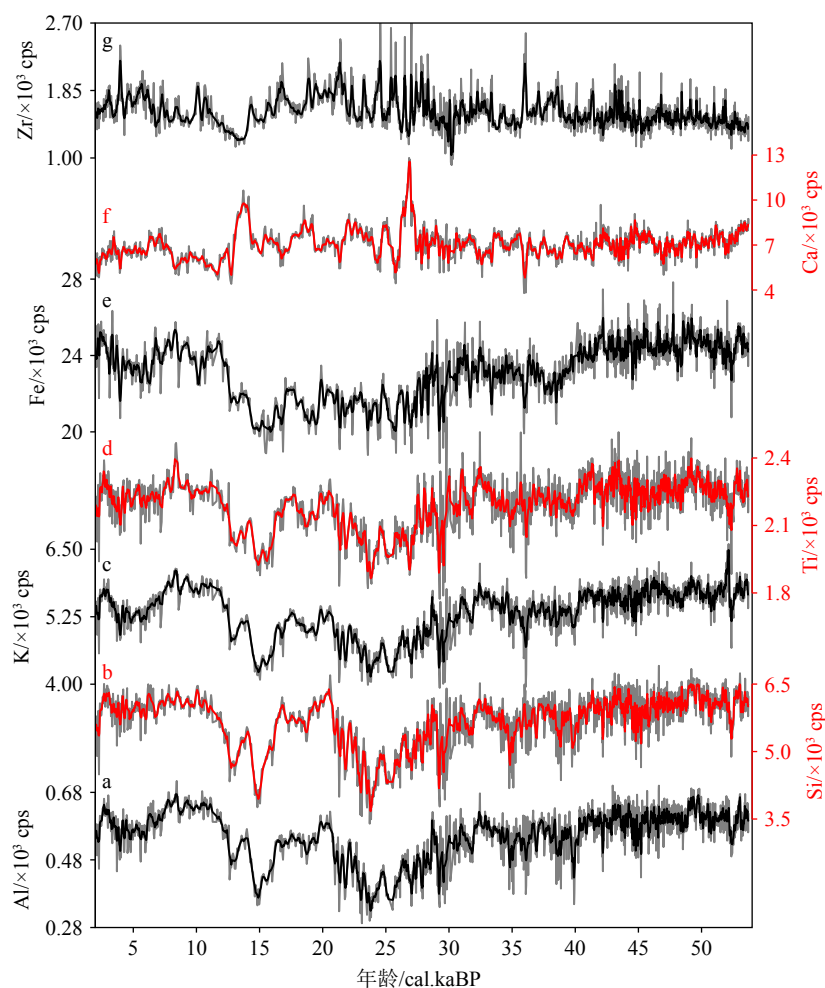


图 3 MD18-3570 岩芯 XRF 元素扫描结果的时间演化

Fig.3 Temporal evolution of the XRF core scanning results from core MD18-3570

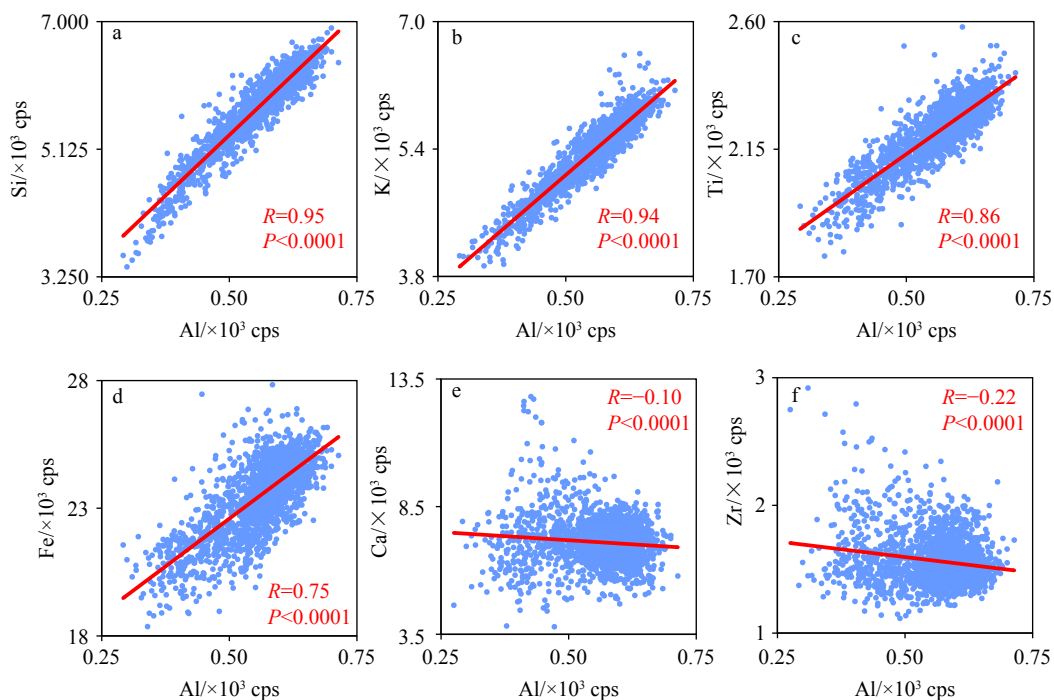


图 4 MD18-3570 岩芯的元素相关性分析

Fig.4 Correlation analysis of elements in core MD18-3570

流沉积物经历快速搬运,停留时间较短^[4],因此沉积物的元素组成可能反映了源区原始风化特征。深海岩芯中 K 元素主要赋存于钾长石^[41-42],而 Al 元素主要赋存于黏土矿物^[33]。因此, K/Al 比值可以反映陆源碎屑化学风化状态,即高比值代表弱化学风化状态下钾长石富集,而低比值代表强化学风化状态下钾长石淋蚀^[3]。由于 Si 和 Zr 元素主要富集在粗颗粒矿物中(例如石英和锆石)^[33],选用 Si/Al 比值和 Zr/Al 比值反映沉积组分的粒度变化,即高比值代表陆源碎屑粒度增加,而低比值代表相反的情况。因此,本研究选用 Si/Al、Zr/Al 和 K/Al 比值研究深海峡谷沉积粒度与化学风化变化特征及其受控因素。

MD18-3570 岩芯 Si/Al 和 Zr/Al 比值变化趋势与海平面变化相对应,体现海平面变化调控深海峡谷

中陆源碎屑粒度变化(图 5)。具体地,粒度指标 Zr/Al 在冰期低海平面时期(12~30 cal.kaBP 期间,海平面低于-60 m)呈现高值,这可能与低海平面时期峡谷海岸线向海迁移导致的陆源碎屑由陆地至深海的搬运距离缩短有关^[43-44]。现代地貌特征^[45]表明,台湾海峡平均水深 60 m(图 1)。末次冰盛期(LGM)全球海平面显著下降^[46-47],当海平面下降超过 60 m 时,澎湖峡谷海岸线迅速向海迁移(图 1),导致陆源粗粒沉积物更容易被搬运至深海。这种现象也广泛存在于其他深海区域^[33, 48-51]。尽管海平面变化与 Si/Al 和 Zr/Al 比值在大尺度趋势上较一致,但在 20 ka 以来的细节变化上存在偏差,可能是海平面在末次冰消期快速上升,粒度指标响应不够敏感。

MD18-3570 岩芯 K/Al 比值变化趋势与董哥洞/葫

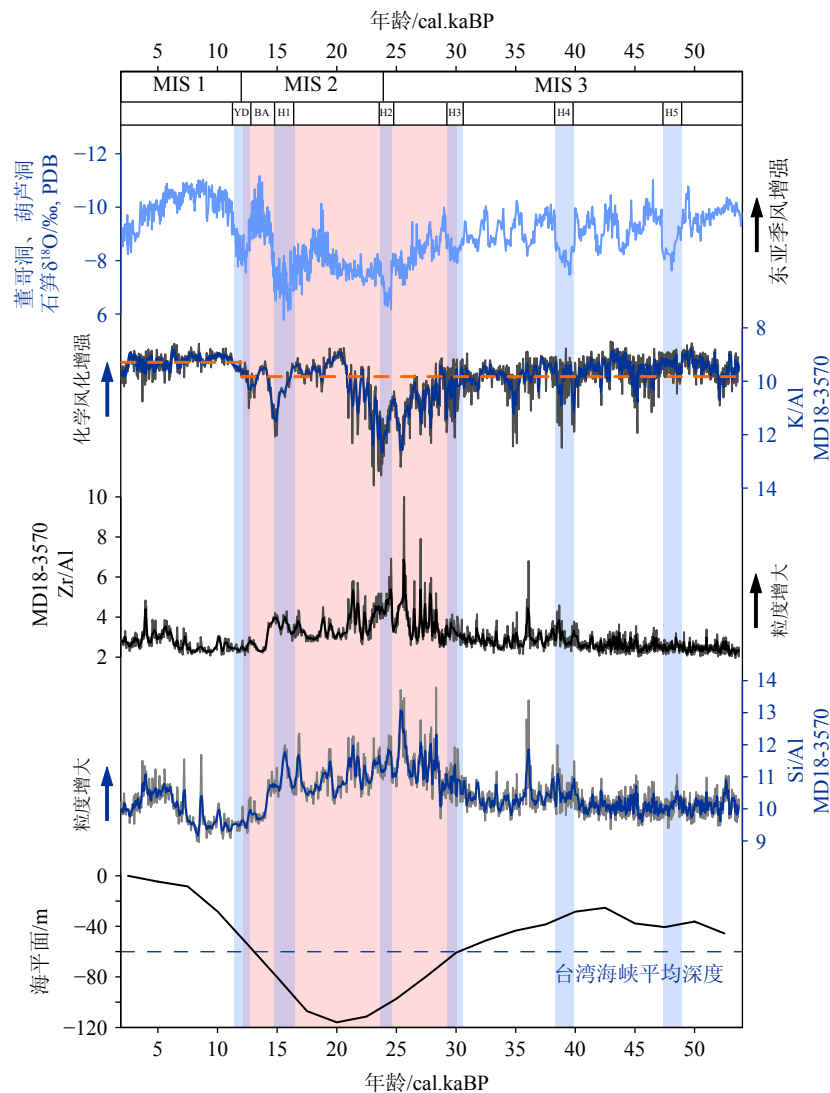


图 5 MD18-3570 岩芯元素比值及其与海平面^[12]和董哥洞、葫芦洞氧同位素数据^[52]对比

Fig.5 Temporal evolution of the elemental ratios from core MD18-3570 and their comparison with sea level^[12] and oxygen isotope data from Dongge/Hulu cave^[52]

芦洞石笋氧同位素变化^[36]相对应,体现了东亚季风降雨调控深海峡谷中陆源碎屑化学风化的程度(图 5)。董哥洞/葫芦洞的石笋氧同位素记录被看作是东亚夏季风强度的有效指标,其变化主要反映了降水量变化,负值表示夏季风降雨增强,正值反映夏季风降雨减弱^[52],这种变化受控于大气环流模式、海温分布与冰期-间冰期气候机制的调控,具有较好的区域代表性^[52]。在冰期-间冰期尺度上,全新世时期 K/Al 比值的平均值低于末次冰期(MIS2—3),与全新世更强的东亚季风指标相对应(图 5)。在百千年尺度上, K/Al 比值在较弱的东亚季风指标、冷气候事件(新仙女木事件和海因里希事件 H1-H5)期间呈现更高的峰值(图 5)。以上特征均说明东亚季风降雨调控深海峡谷中陆源碎屑化学风化程度。推测在冷干气候条件下台湾流域以物理剥蚀为主,化学风化较弱,导致更多粗颗粒、弱风化(高 K/Al 比值)的陆源碎屑被搬运至深海峡谷,而暖湿气候条件下台湾流域以化学风化为主,导致钾长石淋滤增强,更多的细粒高风化产物(低 K/Al 比值)被搬运至深海峡谷,相似的风化特征也出现在南海南部^[18]等地区。此外,本研究发现在低海平面时期深海沉积物化学风化减弱(图 5),出露陆架先存沉积物再风化作用不明显,而且,岩芯的连续测年结果也证实先存沉积物再搬运作用不明显(图 2)。基于 K/Al 比值,我们发现约 34 ka 时期源区也经历了较强的、百千年尺度的化学风化减弱(图 5),这可能记录了额外的冷气候事件。总之,澎湖峡谷深海岩芯化学风化记录变化显示台湾流域化学风化状态受同时期的东亚季风演变调控。

综上所述,本研究提出过去 54 ka 以来澎湖峡谷深海沉积记录变化受海平面与东亚季风降雨调控。具体表现为海平面低于-60 m 的冰期低海平面时期,陆源碎屑由陆地至深海的搬运距离大幅缩短,导致更多粗粒陆源碎屑被搬运至深海(图 5)。东亚季风降雨减弱,导致台湾流域化学风化减弱、物理剥蚀增强,深海峡谷沉积记录的化学风化相应减弱(图 5)。本研究首次提供了澎湖峡谷沉积环境长时间的高分辨率沉积记录,为深海峡谷沉积记录的演化机制提供新的认识。

5 结论

(1) Al、Si、K、Ti 与 Fe 元素呈现相似的变化,与 Zr 元素的变化趋势相反,而 Ca 元素变化相对独立。Al、Si、K、Ti 与 Fe 元素在末次冰期海平面低

于-60 m 的低海平面时期呈现较低值,而在其余时间段内呈现较高值;Zr 元素的变化趋势与上述特征相反;Ca 元素整体稳定,不存在明显的阶段性变化。选用 Si/Al、Zr/Al 和 K/Al 比值研究深海峡谷沉积粒度与化学风化变化特征及其受控因素。

(2) 末次冰期以来澎湖峡谷深海沉积记录的粒度变化受海平面变化调控。海平面低于-60 m 的冰期低海平面时期,陆源碎屑由陆地至深海的搬运距离大幅缩短,导致更多粗粒陆源碎屑被搬运至深海,体现为深海沉积记录的 Si/Al 和 Zr/Al 比值升高,其他时期的深海峡谷沉积粒度相对较细。

(3) 末次冰期以来澎湖峡谷深海沉积记录的化学风化程度受东亚季风演化调控。东亚季风降雨减弱,导致台湾流域化学风化减弱,物理剥蚀增强,深海峡谷沉积记录的化学风化相应减弱,体现为深海沉积记录的 K/Al 比值升高;季风降雨增强则导致深海沉积记录的 K/Al 比值降低。

致谢: 感谢中法合作 HydroSed 航次的资助,以及航次全体成员在岩芯采集过程中的辛勤付出。感谢同济大学海洋地质全国重点实验室徐小芳在 XRF 岩芯元素扫描测试中提供的帮助。

参考文献 (References)

- [1] Liu Z F, Zhao Y L, Colin C, et al. Source-to-sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 238-273.
- [2] Milliman J D, Farnsworth K L. River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 1-394.
- [3] Clift P D, Wan S M, Blusztajn J. Reconstructing chemical weathering, physical erosion and monsoon intensity since 25Ma in the northern South China Sea: a review of competing proxies[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 130: 86-102.
- [4] Wan S M, Tian J, Steinke S, et al. Evolution and variability of the East Asian summer monsoon during the Pliocene: evidence from clay mineral records of the South China Sea[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 293(1-2): 237-247.
- [5] Zhong Y, Wilson D J, Liu J B, et al. Contrasting sensitivity of weathering proxies to quaternary climate and sea-level fluctuations on the southern slope of the South China Sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(24): e2021GL096433.
- [6] Wan S M, Li A C, Clift P D, et al. Development of the East Asian monsoon: mineralogical and sedimentologic records in the northern South China Sea since 20 Ma[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 254(3-4): 561-582.
- [7] Steinke S, Kienast M, Hanebuth T. On the significance of sea-level

- variations and shelf paleo-morphology in governing sedimentation in the southern South China Sea during the last deglaciation[J]. *Marine Geology*, 2003, 201(1-3): 179-206.
- [8] Ho C S. An Introduction to the Geology of Taiwan: Explanatory Text of the Geologic Map of Taiwan[M]. 2nd ed. Central Geological Survey, Ministry of Economic Affairs, 1988.
- [9] Chiang C S, Yu H S. Controls of submarine canyons connected to shore during the LGM sea-level rise: examples from Taiwan[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(4): 494.
- [10] Yu H S, Hong E. Shifting submarine canyons and development of a foreland basin in SW Taiwan: controls of foreland sedimentation and longitudinal sediment transport[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 27(6): 922-932.
- [11] 刘丛舒, 丁巍伟, 殷绍如, 等. 南海北部陆坡区海底峡谷地貌、沉积特征及控制因素[J]. *海洋学研究*, 2019, 37(2): 28-43. [LIU Congshu, DING Weiwei, YIN Shaoru, et al. Geomorphology, sedimentary characteristics and controlling factors of submarine canyons in the northern continental slope of the South China Sea[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2019, 37(2): 28-43.]
- [12] Hanebuth T, Stattegger K, Grootes P M. Rapid flooding of the Sunda shelf: a late-glacial sea-level record[J]. *Science*, 2000, 288(5468): 1033-1035.
- [13] Zhang S, Jian X, Liu J T, et al. Climate-driven drainage reorganization of small mountainous rivers in Taiwan (East Asia) since the last glaciation: the Zhuoshui River example[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 586: 110759.
- [14] Zhao Y, Yang S Y, Liu J T, et al. Reconstruction of silicate weathering intensity and paleoenvironmental change during the late Quaternary in the Zhuoshui River catchment in Taiwan[J]. *Quaternary International*, 2017, 452: 43-53.
- [15] Chen C S, Chen Y L. The rainfall characteristics of Taiwan[J]. *Monthly Weather Review*, 2003, 131(7): 1323-1341.
- [16] Chang C P, Wang Z, McBride J, et al. Annual cycle of Southeast Asia—Maritime Continent rainfall and the asymmetric monsoon transition[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(2): 287-301.
- [17] Tu J Y, Chou C. Changes in precipitation frequency and intensity in the vicinity of Taiwan: Typhoon versus non-typhoon events[J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(1): 014023.
- [18] Xu D Y, Malanotte-Rizzoli P. The seasonal variation of the upper layers of the South China Sea (SCS) circulation and the Indonesian through flow (ITF): an ocean model study[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2013, 63: 103-130.
- [19] Xue H J, Chai F, Pettigrew N, et al. Kuroshio intrusion and the circulation in the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C2): C02017.
- [20] Liu Z F, Colin C, Li X J, et al. Clay mineral distribution in surface sediments of the northeastern South China Sea and surrounding fluvial drainage basins: source and transport[J]. *Marine Geology*, 2010, 277(1-4): 48-60.
- [21] Huang J, Wan S M, Xiong Z F, et al. Geochemical records of Taiwan-sourced sediments in the South China Sea linked to Holocene climate changes[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 441: 871-881.
- [22] Liu Z F, Tuo S T, Colin C, et al. Detrital fine-grained sediment contribution from Taiwan to the northern South China Sea and its relation to regional ocean circulation[J]. *Marine Geology*, 2008, 255(3-4): 149-155.
- [23] Defant M J, Jackson T E, Drummond M S, et al. The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: an overview[J]. *Journal of the Geological Society*, 1992, 149(4): 569-579.
- [24] Dadson S J, Hovius N, Chen H, et al. Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen[J]. *Nature*, 2003, 426(6967): 648-651.
- [25] Wang B, Lin H, Zhang Y S, et al. Definition of South China Sea monsoon onset and commencement of the East Asia summer monsoon[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(4): 699-710.
- [26] Chen G X, Hu P, Hou Y J, et al. Intrusion of the Kuroshio into the South China Sea, in September 2008[J]. *Journal of Oceanography*, 2011, 67(4): 439-448.
- [27] Yoneda M, Uno H, Shibata Y, et al. Radiocarbon marine reservoir ages in the western Pacific estimated by pre-bomb molluscan shells[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2007, 259(1): 432-437.
- [28] Hirabayashi S, Yokoyama Y, Suzuki A, et al. Local marine reservoir age variability at Luzon Strait in the South China Sea during the Holocene[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2019, 455: 171-177.
- [29] Hideshima S, Matsumoto E, Abe O, et al. Northwest Pacific marine reservoir correction estimated from annually banded coral from Ishigaki Island, Southern Japan[J]. *Radiocarbon*, 2001, 43(2A): 473-476.
- [30] Southon J, Kashgarian M, Fontugne M, et al. Marine reservoir corrections for the Indian Ocean and Southeast Asia[J]. *Radiocarbon*, 2002, 44(1): 167-180.
- [31] Stuiver M, Reimer P J. Extended ^{14}C data base and revised CALIB 3.0 ^{14}C age calibration program[J]. *Radiocarbon*, 1993, 35(1): 215-230.
- [32] Blaauw M. Methods and code for 'classical' age-modelling of radiocarbon sequences[J]. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5(5): 512-518.
- [33] Zhao H C, Liu Z F, Zhao Y L, et al. Lunar nodal tidal cycle influences on the input of coarse sediments during the last glaciation in the deep South China Sea[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2023, 310: 108114.
- [34] Zhao H C, Liu Z F, Zhao Y L. Sea level and East Asian monsoon influenced chemical weathering records in the southern South China Sea over the past 21 ka[J]. *Global and Planetary Change*, 2024, 232: 104324.
- [35] Chen J, Ma J Q, Xu K H, et al. Provenance discrimination of the clay sediment in the western Taiwan Strait and its implication for coastal current variability during the late-Holocene[J]. *The Holocene*, 2017, 27(1): 110-121.
- [36] Hu S Y, Zeng Z G, Fang X, et al. Increasing terrigenous sediment supply from Taiwan to the southern Okinawa Trough over the last 3000 years evidenced by Sr Nd isotopes and geochemistry[J]. *Sedi-*

- mentary Geology, 2020, 406: 105725.
- [37] Huh C A, Chen W F, Hsu F H, et al. Modern (<100 years) sedimentation in the Taiwan Strait: rates and source-to-sink pathways elucidated from radionuclides and particle size distribution[J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(1): 47-63.
- [38] Liu F, Yang C P, Chang X H, et al. Provenance discrimination of the last glacial sediments from the northeastern South China Sea and its paleoenvironmental indications[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2018, 29(2): 131-148.
- [39] Liu J T, Hsu R T, Hung J J, et al. From the highest to the deepest: the Gaoping River-Gaoping Submarine Canyon dispersal system[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 274-300.
- [40] Wang Y Y, Fan D D, Liu J T, et al. Clay-mineral compositions of sediments in the Gaoping River-Sea system: implications for weathering, sedimentary routing and carbon cycling[J]. *Chemical Geology*, 2016, 447: 11-26.
- [41] Rothwell R G, Croudace I W. Twenty years of XRF core scanning marine sediments: what do geochemical proxies tell us?[M]//Croudace I W, Rothwell R G. *Micro-XRF Studies of Sediment Cores: Applications of A Non-Destructive Tool for the Environmental Sciences*. Dordrecht: Springer, 2015: 25-102.
- [42] Wei G J, Liu Y, Li X H, et al. Climatic impact on Al, K, Sc and Ti in marine sediments: evidence from ODP Site 1144, South China Sea[J]. *Geochemical Journal*, 2003, 37(5): 593-602.
- [43] 王树民, 陈泓君, 钟和贤. 南海东北部晚第四纪地层不整合的发现及其地质意义 [J]. 南海地质研究, 2001(13): 55-61. [WANG Shumin, CHEN Hongjun, ZHONG Hexian. The foundation of late Quaternary strata unconformity and their geological significance in the northeastern South China Sea[J]. *Research of Ecological South China Sea*, 2001(13): 55-61.]
- [44] Wang X X, Wang Y M, Tan M X, et al. Deep-water deposition in response to sea-level fluctuations in the past 30 kyr on the northern margin of the South China Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2020, 163: 103317.
- [45] Shen X T, Jian X, Li C, et al. Submarine topography-related spatial variability of the southern Taiwan Strait sands (East Asia)[J]. *Marine Geology*, 2021, 436: 106495.
- [46] Zachos J C, Dickens G R, Zeebe R E. An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics[J]. *Nature*, 2008, 451(7176): 279-283.
- [47] Syvitski J P M, Milliman J D. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean[J]. *The Journal of Geology*, 2007, 115(1): 1-19.
- [48] Li M K, Ouyang T P, Tian C J, et al. Sedimentary responses to the East Asian monsoon and sea level variations recorded in the northern South China Sea over the past 36 kyr[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 171: 213-224.
- [49] 董飞银, 徐元芹, 李萍, 等. 南海北部陆坡 DLW3101 孔 MIS5 期以来的古海洋学信息 [J]. 海洋科学进展, 2019, 37(3): 432-441. [DONG Feiyin, XU Yuanqin, LI Ping, et al. Paleocceanographic information of the core DIW3101 in the northern slope of the South China Sea since MIS5[J]. *Advances in Marine Science*, 2019, 37(3): 432-441.]
- [50] 齐昆. 第四纪晚期珠江陆缘洲扇源—汇系统对海平面变化的响应机制 [D]. 中国石油大学 (北京) 博士学位论文, 2023: 95-101. [QI Kun. The response mechanism of delta-to-fan source-to-sink systems to sea-level changes on the late-Quaternary Pearl River margin[D]. Doctor Dissertation of China University of Petroleum, Beijing, 2023: 95-101.]
- [51] 张军强. 黄东海陆架末次盛冰期以来海平面变化及沉积体系响应 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2008: 53-62. [ZHANG Junqiang. The Sea level changes and Response of sedimentary system on the ECS and YS shelf after the Last Glacial Maximum[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2008: 53-62.]
- [52] 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.