

地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616,CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：福建三沙湾 MIS3 晚期以来黏土矿物特征及其对气候和海平面变化的响应

作者：王继龙，曾剑威，王凤，许乃岑，彭博，吴中海

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026031
投稿时间：2026-03-11
录用时间：2026-07-10
预出版时间：2026-11-12

《地质力学学报》预出版

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

福建三沙湾 MIS3 晚期以来黏土矿物特征及其对气候和海平面变化的响应

王继龙[1,2,3,4]，曾剑威[2]，王 凤[1,5]，许乃岑[2]，彭 博[2]，吴中海[3]

WANG Jilong[1,2,3,4]，ZENG Jianwei[2]，WANG feng[1,5]，XU Naicen[2]，PENG Bo[2]，WU Zhonghai[3]

1. 福建省海洋物理与地质过程重点实验室，福建 厦门 361005；

2. 中国地质调查局南京地质调查中心，江苏 南京 210016；

3. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；

4. 合肥工业大学资源与环境工程学院，安徽 合肥 230009

5. 自然资源部第三海洋研究所，福建 厦门 361005

1. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Physical and Geological Processes, Xiamen 361005*, Fujian, China;*

2. Nanjing Geological Survey Center, China Geological Survey, Nanjing 210016*, Jiangsu, China;*

3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081*, China;*

4. College of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009*, Anhui, China*

5. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen, Fujian 361005, China

Clay Mineral Characteristics in Fujian Sansha Bay Since the Late MIS3 and Their Response to Climate and Sea-Level Changes

Abstract: [Objective] Sedimentological evidence for the coupled control of sea-level change and the East Asian monsoon on sediment provenance shift in small coastal bays remains limited. **[Methods]** This study takes surface sediments from bay-inflowing rivers and core sediments from borehole NDQK5 in Sansha Bay, Fujian Province as research materials. Combined with previously published AMS ^{14}C dating and micropaleontological identification results, the chronostratigraphic framework and provenance evolution sequence of the study area since the late MIS3 are established through clay mineral assemblage analysis. **[Results]** The results show that from the late MIS3 to MIS2 (core depth: 27.6–22.7 m), a closed freshwater lake developed in response to global sea-level fall, accompanied by a decrease in smectite content from 11.5% to 0%. Combined with the absence of smectite in modern surface sediments from non-tidal river reaches, this feature indicates that the exogenous sediment transport pathway was cut off, and sediment provenance was completely dominated by local fluvial input. In the early Holocene (Unit 2, before ~7.7 ka BP, subtidal to inner shelf environment), the average smectite content reaches 10.2%, and the clay mineral assemblage is consistent with the Yangtze River end-member, which may indicate that sediment supply was dominated by Yangtze-derived materials transported by coastal currents. In the middle Holocene (Unit 3, 7.7–7.0 ka BP, stable sea-level highstand period), samples show smectite depletion and a significant increase in chlorite

基金项目：中国地质调查局地质调查项目（DD202607102203，DD20221778）；福建省海洋物理与地质过程重点实验室开放基金（KLMPG-22-05）；现代古生物学和地层学国家重点实验室开放课题基金（223129）

This research was financially supported by China Geological Survey Project (Grant No. DD202607102203 and DD20221778); Open Research Fund of Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Physics and Geological Processes (Grant No. KLMPG-22-05); Open Research Fund of the State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy (Grant No. 223129)

第一作者：王继龙（1992—），男，工程师，主要从事第四纪地质及生态地质调查研究。Email：445803759@qq.com

通信作者：王凤（1985—），女，高级工程师，主要从事古海洋学及第四纪深海沉积物研究。Email：wangfeng@tio.org.cn

《地质力学学报》预出版

content, corresponding to the maximum precipitation phase of the East Asian summer monsoon (EASM) when local watershed denudation intensity was enhanced. In the late Holocene (Unit 4, since ~7.0 ka BP, intertidal environment), with the weakening of the EASM, smectite content rebounds to 10.9%, and sediment provenance shifts back to Yangtze River dominance again. **[Conclusion]** Smectite content can serve as a proxy for distinguishing between distal Yangtze inputs and local watershed deposits. The sediment sources in Sansha Bay are jointly controlled by sea-level change and East Asian monsoon intensity, exhibiting a phased alternation pattern. **[Significance]** The sensitive sedimentary response of semi-enclosed bays to sea-level–monsoon coupling provides a scientific basis for predicting coastal sedimentation patterns under global warming and the sharp decline in Yangtze River sediment supply.

Keywords: Coastal sediments; Clay minerals; Late MIS 3; Quaternary stratigraphy; Environmental changes; Paleoclimate

摘 要：海平面变化与东亚季风如何协同控制小型海湾的沉积物源转换，目前尚缺乏沉积学证据。文章以福建三沙湾入湾河流表层沉积物和 NDQK5 钻孔沉积物为研究材料，基于已有 AMS^{14}C 测年和微体古生物鉴定结果，并通过黏土矿物组合分析，建立三沙湾 MIS3 晚期以来的沉积年代框架与物源演化序列。结果表明，MIS3 晚期~MIS2（深度 27.6~22.7 m），随着全球海平面下降，三沙湾形成封闭淡水湖泊，蒙皂石含量由 11.5%降至 0%；现代沉积物非感潮河段不含蒙皂石，指示外源通道被切断，物源完全转为本地河流供给。全新世早期（U2 单元，~7.7 ka B.P.之前，潮下带-内陆架），蒙皂石含量平均为 10.2%，黏土矿物组合与长江端元吻合，指示物源可能以沿岸流输送的长江物质为主；中期（U3 单元，7.7~7.0 ka B.P.，海平面高位稳定期），蒙皂石缺失，绿泥石含量显著增加，对应东亚夏季风降水极盛期，本地流域剥蚀强度增强；晚期（U4 单元，~7.0 ka B.P.以来，潮间带），夏季风减弱，蒙皂石含量回升至 10.9%，物源再次转为长江源主导。蒙皂石含量的差异可作为区分长江远端输入与本地流域沉积的参考指标；三沙湾沉积物源受海平面变化与东亚季风强度的耦合控制，呈现阶段性交替模式。半封闭海湾对海平面-季风耦合作用的敏感沉积响应，可为预测全球变暖与长江泥沙锐减背景下的海岸带沉积格局演变提供科学依据。

关键词：海岸带沉积；黏土矿物；MIS3 晚期；第四纪地层；环境变化；古气候
中图分类号：P534.63；P736.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006-6616（2026）06-0000-00
DOI：10. 12090 / j. issn. 1006-6616. 2026031

《地质力学学报》编辑出版

0 引言

河流系统是陆源物质向海洋输送的主要通道（Walsh et al., 2016；Xue et al., 2023）。长江每年向大海输送约 4.8 亿吨沉积物（Xu et al., 2016, 2023; Xue et al., 2025），其中一部分夏季在河口附近沉积，冬季沿浙闽海岸向南输送（Xu et al., 2016）。河流将巨量的陆源物质（包括营养物质、有机物和细颗粒沉积物等）从源地输送到海洋，对东南沿海沉积过程、有机碳埋藏等有着重要影响（ Duan et al., 2025; Yang et al.，2023），并在欧亚大陆和太平洋的关键过渡带形成了全球最大、最复杂的源-汇系统（Walsh et al., 2016; Yang et al., 2016; Zou et al.，2022）。自工业革命以来全球气温呈持续升高，未来海平面持续上升是全球变化的重要趋势之一（Hamlington et al., 2024; Kaufman et al., 2023; Lin et al., 2025; Roy et al., 2023; Seeger et al., 2025），海平面上升将重塑海岸带沉积动力格局，改变细颗粒物质的输运路径与沉积归宿。地质历史时期冰期-间冰期旋回驱动的大幅度海平面波动，为解析这一过程提供了天然的实验场。

三沙湾是浙闽沿岸典型的半封闭型深水港湾，位于浙闽泥质条带末端，其表层细颗粒沉积物的分布与输运受外海潮流与沿岸流的共同调控（严肃庄和曹沛奎，1997；于俊杰等，2022）。然而，自海洋同位素第 3 阶段（Marine Isotope Stage，MIS3）以来，该区域经历了海平面大幅度升降、海岸线迁

移以及季风强度变化等一系列重大环境转变（陈阳阳等，2024；林旭等，2024），这些多尺度的变化极可能深刻影响细粒物质的物源供给格局、输运路径和沉积环境（Cheng et al., 2012, 2016）。因此，该区域为理解小型海湾物源转换对古环境变化的响应机制提供了理想场所，也为揭示未来环境变化下浙闽港湾细粒物质的沉积过程提供了重要参考。然而，针对 MIS3 晚期以来这一包含强烈气候波动的关键阶段，三沙湾黏土矿物物源的控制机制，尤其是主导控制因素在不同时间尺度上的演变过程，仍缺乏系统深入的研究。

黏土矿物是重要的环境指示剂，可作为追溯沉积物物源的关键指标（Liu et al., 2010; Romero et al., 2021）。其组合特征受源区基岩类型、古气候（如风化强度、温度和湿度）、古水文（如水动力和搬运距离）、古构造（如源区隆升剥蚀）和古环境（如湖泊−海洋环境条件）多种因素共同作用和耦合控制（邓韬等，2023；Dou et al., 2010; 刘华华等，2016；Liu et al., 2010）。因此，在揭示其环境指示意义的同时，解析黏土矿物组合对物质来源的主控机制具有关键的科学价值。文章旨在利用黏土矿物数据，结合现代沉积物黏土矿物组合的空间差异分析和古沉积记录，揭示福建三沙湾现代黏土矿物差异的成因，并重点阐明 MIS3 晚期以来黏土矿物组成演化的控制机制及其随时间的变化。

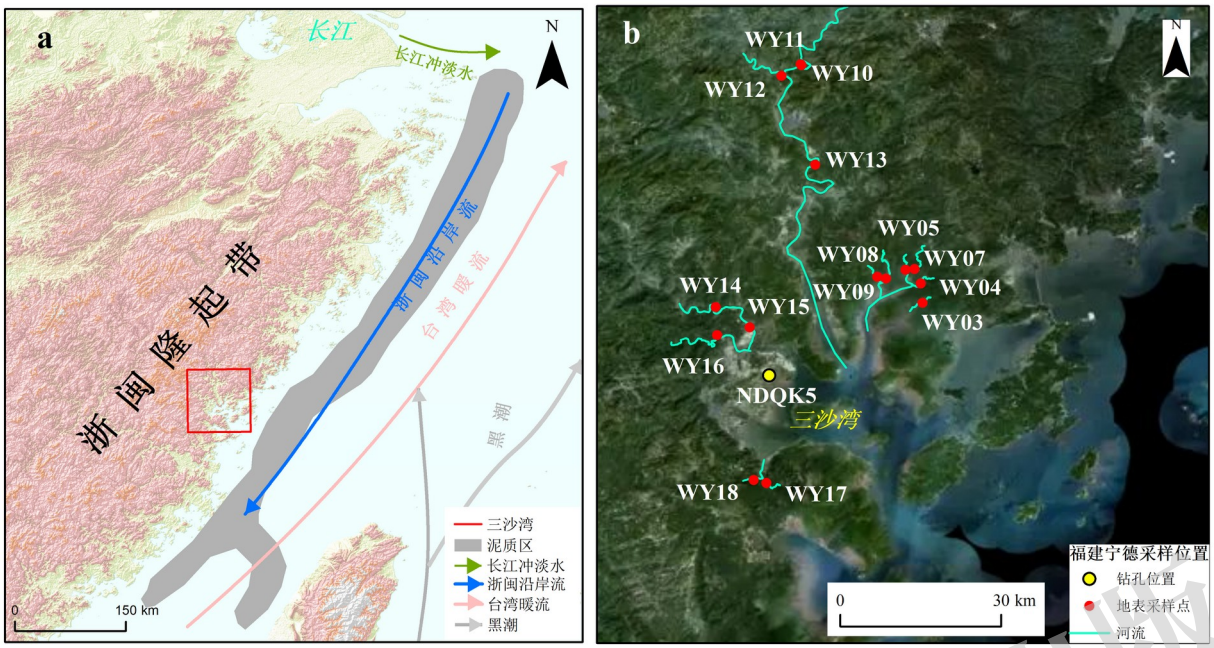
1 区域背景

三沙湾位于福建省东北部，是中国东南沿海地区的天然良港，海湾周围多为低山丘陵，仅东冲水道与外海相通（图 1）。福建东北部沿海小平原的地貌特征受到河流（如长江和浙闽河流）搬运－沉积作用以及东海沿岸洋流（浙江−福建沿岸流和台湾暖流）的显著影响（Liu et al., 2024; 图 1a）。

三沙湾地处华南褶皱系东部，自元古代以来经历了多期次岩浆活动和火山作用，其中侏罗—白垩纪的岩浆侵入和火山喷发最为强烈。三沙湾周围及径流流域地表出露岩石主要为花岗岩、花岗闪长岩、花岗斑岩等酸性、中酸性岩浆岩，以及凝灰岩、凝灰熔岩、流纹岩、英安岩等喷出岩（王继龙等，2022）。地层主要包括侏罗系坂头组、南园组和下白垩系石帽山群，其共同构成了一套陆相火山沉积−中酸性喷出岩系（严肃庄和曹沛奎，1997）。

注入三沙湾的山溪性河流有 10 余条，其中规模最大的是交溪和霍童溪。交溪长 165 km，年平均入海水量为 65.7×10^8 m^3，年平均输沙量为 107×10^4 t。霍童溪河长 126 km，年平均入海水量为 27.2×10^8 m^3，年平均输沙量为 3.42×10^4 t（洪辉亮，2008；严肃庄和曹沛奎，1997）。虽然三沙湾的纳潮量很大，但暴雨引起洪水泄下的泥沙仍会对三沙湾沉积过程产生重要影响。

《地质力学学报》预出版



陆架洋流系统图基于 Chen et al.. 2017; Liu et al., 2024 修改

a—研究区及周边主要洋流分布图；b—河流表层与岩芯采样点

图 1 区域位置图及采样点位置

Fig.1 Regional location and sampling sites

(a) Location of the study area and major surrounding ocean currents; (b) River surface and core sampling sites

The schematic of the shelf current system has been modified from Chen et al., 2017 and Liu et al., 2024

2 材料与方法

NDQK5 钻孔（位置坐标：26°42.30′N，119°36.52′E）位于福建省宁德市三沙湾西北侧沿海围填海区（图 1）。此次研究收集 NDQK5 岩芯的 AMS^{14}C 测年数据，并使用软件 Calib Rev 8.0.1（数据校正集 Marine 20，Δ R=113±37 a）进行校正，获得 9 个样品距今的日历年龄数据（贾宝岩等，2024）。根据钻孔沉积物的岩性特征，选择岩芯 1.3~27.6 m 段的淤泥质黏土、黏土质粉砂和粉砂质黏土样品进行黏土矿物分析，以 0.3~0.6 cm 不等间距取得 80 个沉积物样品。此外，在宁德市三沙湾海湾主要入湾河流的不同河段采集了 15 个沉积物样品（图 1b，表 1）。

表 1 入湾河流采样点位与基本信息表

Table.1 Sampling Sites and Basic Information for Rivers Discharging into the Bay

样品号	经度	纬度	海拔高度/m	河流	地貌部位	沉积物类型
WY-03	119°52'26.1445"	26°49'09.5584"	34.93	无名溪	河床	淤质黏土
WY-04	119°52'15.6388"	26°50'53.0563"	32.51	无名溪	河床	淤质黏土
WY-05*	119°50'43.9459"	26°52'07.2429"	8.00	杯溪	心滩	淤质黏土
WY-07	119°51'37.6716"	26°52'11.2740"	9.00		挡潮坝上游河床	砾石质砂土
WY-08*	119°48'45.8439"	26°51'20.6409"	9.00	无名溪	河床	黏土质砂
WY-09	119°47'53.8080"	26°51'30.4097"	17.27	无名溪	河床	淤质黏土
WY-10	119°40'15.7682"	27°10'27.7983"	50.91		边滩	淤质黏土
WY-11	119°40'11.9831"	27°10'31.7154"	56.74	交溪	边滩	粉细砂
WY-12*	119°38'15.4165"	27°09'29.2094"	29.00		边滩	淤质黏土

《地质力学学报》预出版

WY-13*	119°41'39.6398"	27°01'32.5609"	10.14		边滩	淤质黏土
WY-14	119°31'38.2864"	26°48'46.8081"	11.91	霍童溪	边滩	粉细砂
WY-15*	119°35'03.2244"	26°46'57.6925"	7.05		感潮河口边滩	淤质黏土
WY-16*	119°31'48.2031"	26°46'15.3312"	19.00	七都溪	边滩	黏土质砂
WY-17	119°36'45.3457"	26°32'57.6850"	18.48	飞鸾溪	挡潮坝上游河床	黏土质砂
WY-18	119°35'28.4843"	26°33'14.9774"	33.00		挡潮坝上游河床	淤质黏土

注： * 的点位布设河流于感潮河段，该区域受到涨潮影响，表层沉积物伴有腥臭味，河流溶解性总固体含量＞1000mg/L）

采用 X 射线衍射（X-ray diffraction，XRD）定向片法对黏土矿物样品进行分析，测试工作在南京地质调查中心实验测试室完成。样品前处理流程为：先用 1 mol/L 稀盐酸去除碳酸盐，再以过氧化氢氧化去除有机质，随后用去离子水反复洗涤至中性，并加入少量 5%六偏磷酸钠溶液使黏粒充分分散。取上层 10 cm 的悬浮液（对应<2 μm 粒级），采用涂抹法制成定向片。黏土矿物定量分析在同一定向片上完成，对该定向片依次进行自然风干、乙二醇饱和、550℃加热处理。XRD 测试使用 D/Max-2500 型衍射仪，工作条件为：电压 40 kV，电流 200 mA，扫描范围 2.5°~80°（2θ），扫描速率 4°/min。利用仪器配套软件对特征衍射峰面积进行拟合，参照 Biscaye（1965）方法计算蒙皂石、伊利石、高岭石和绿泥石 4 种主要黏土矿物的相对含量。具体而言，以乙二醇饱和样品图谱中蒙皂石（17Å）、伊利石（10Å）及高岭石与绿泥石共有的 7Å 峰的峰面积为基础数据，分别乘以强度因子 1、4 和 2；高岭石与绿泥石的比例则通过 25°（2θ）附近的 3.54 Å/3.57 Å 衍射峰面积比值确定。

3 结果

3.1 岩芯年代、岩性及微体变化特征

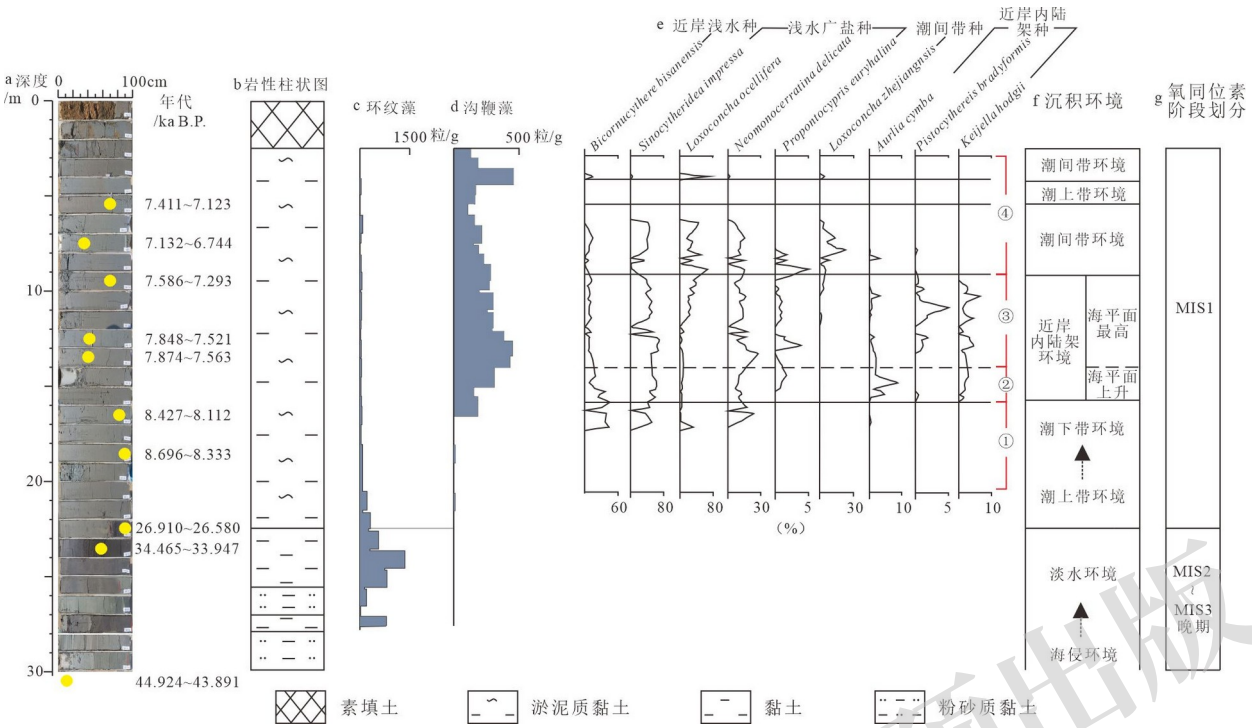
NDQK5 钻孔年代学框架依据于俊杰等（2021）和贾宝岩等（2024）发表的年代测试数据建立（图 2），其中，5.7 m 与 7.35 m 处年龄倒转；18.9 m 处校正后的年龄为 8.7~8.3 a B.P.，属于全新世；而 23.9 m 处校正后年龄为 26.9~26.6 ka B.P.，30.1 m 处校正后年龄为 44.9~43.9 a B.P.，属于晚更新世。

文章选择 NDQK5 钻孔 0~27.6 m 段（图 2a、2b），该段岩性以淤泥质黏土和粉砂质黏土为主。钻孔顶部 0~2.30 m 段为素填土，顶部为回填砂，底部伴有回填砂混合；2.30~22.7 m 段为浅灰色淤泥质黏土；22.7~27.6 m 段以浅青灰色粉砂质黏土为主，伴有厚层状深黑色黏土。

孢粉组合的垂向分布呈现出明显的阶段性特征（图 2c、2d）。在 22.7~27.6 m 段，海相沟鞭藻在底部缺失，淡水环纹藻整体含量明显较多。在 2.30~22.7 m 段，淡水环纹藻整体含量极少，海相沟鞭藻在底部缺失，中上部含量显著增加（Dai et al., 2021; 于俊杰等，2021）。沉积环境由钻孔底部的陆相淡水湖泊环境演变为滨海环境（Dai et al., 2021; 于俊杰等，2021）。

根据 2.30~22.7 m 段常见介形类属种的相对丰度，可将其细分为 4 段（贾宝岩等，2024）（图 2e、2f）：①孔深 22.7~15.8 m 段（相对海平面上升段）：22.7~17.1 m，介形类化石记录缺失，指示沉积环境可能为潮上带；17.1~15.8m，可见浅水广盐种 *Loroconcha ocellifera* 和 *Neomonoceratina delicata*，以及少量近岸内陆架种 *Keijella hodgii*、*Aurila cymba*、*Pistocythereis bradyformis*，指示沉积环境向潮下带迅速转变。②15.8~14 m 段（相对海平面继续上升段）：虽以浅水广盐种 *Sinocytheridea impressa* 、N.*delicata* 和近岸浅水种 *Bicornucythere bisanensis* 为主，但近岸内陆架种 K.*hodgii*、A.*cymba* 以及 P.*bradyformis* 的相对丰度明显上升，该组合指示近岸内陆架沉积环境，反映该区域沿海地区相对海平面正在上升。③14~9.1 m 段（相对海平面顶峰段）：近岸内陆架种 K.*hodgi* 和 P.*bradyformis* 的相对丰度呈现上升，并可见少量中-内陆架种 *Munseyella pupilla*，指示该期间相对海平面继续上升并达到最高。④9.1~2.3 m（相对海平面略有下降段）：以浅水广盐种 *Sinocytheridea impressa* 和 *Loxoconcha ocellifera* 为主，并可见主要分布于潮间带地区的 *Loxoconcha zhejiangensis*，指示潮间带沉积环境。另外，岩芯 4.15~5.55m 段的介形类化石记录缺失，指示沉积环境可能转变为潮上带。

《地质力学学报》预出版



年龄、孢粉、介形虫及沉积环境划分来自文献于俊杰等，2021；贾宝岩等，2024；黄色圆点代表年龄测试样品位置点

a—岩芯照片及年龄；b—岩性柱状图；c—环纹藻含量；d—沟鞭藻含量；e—介形虫含量；f—沉积环境划分；g—氧同位素阶段划分

图 2 NDQK5 钻孔综合地层柱状图

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column of the NDQK5 borehole

(a) Core photograph and age; (b) Lithologic column; (c) Concentricystes content; (d) Dinoflagellate content; (e) Ostracod content; (f) Sedimentary environment division; (g) Marine isotope stage (MIS) division

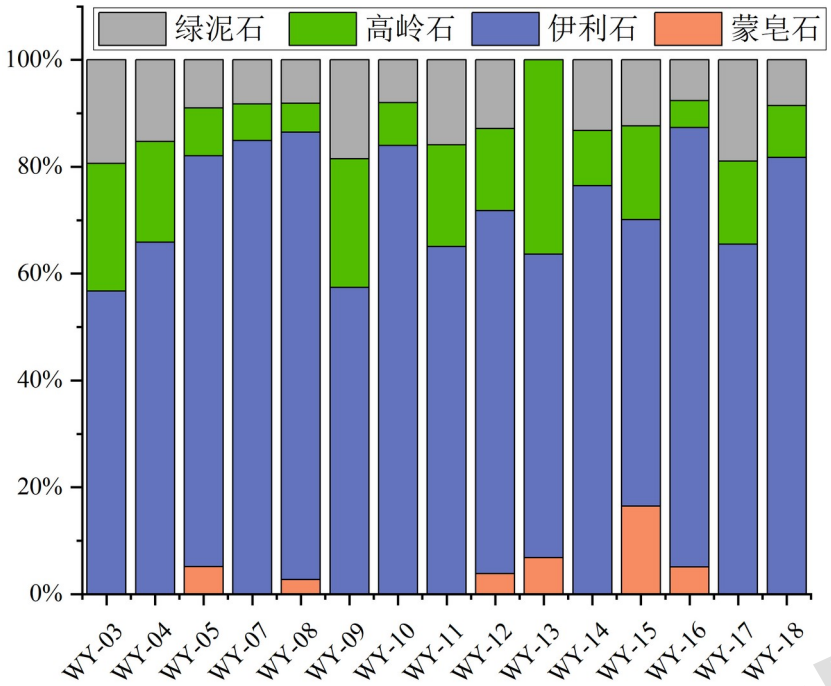
Age, sporopollen, ostracods, and sedimentary environment division are from Yu et al., 2021; Jia et al., 2024; Yellow dots indicate the positions of dating samples.

3.2 表层沉积物中黏土矿物特征

研究区三沙湾入湾河流表层沉积物黏土矿物以伊利石为主，高岭石和绿泥石次之，蒙皂石含量较低且分布具有明显的空间差异性（图 3）。感潮河段的 WY-05、WY-08、WY-12、WY-13、WY-15、WY-16 站位，黏土矿物组合为伊利石-高岭石-绿泥石-蒙皂石型，其中伊利石含量为 53.6%~83.8%（平均值为 70.2%），高岭石含量为 5.1%~36.4%（平均值为 14.8%），绿泥石含量为 0%~12.8%（平均值为 8.3%），蒙皂石含量为 2.7%~16.5%（平均值为 6.7%）。

研究区非感潮河段表层沉积物均未发现蒙皂石，黏土矿物组合为伊利石-高岭石-绿泥石型，其中伊利石含量为 56.7%~84.9%（平均值为 70.9%），高岭石含量为 6.8%~24.1%（平均值为 15.1%），绿泥石含量为 8.0%~19.4%（平均值为 14.0%）。

《地质力学学报》预出版



横坐标：样品号；纵坐标：黏土矿物百分含量

图 3 三沙湾现代河流表层黏土矿物特征图

Fig.3 Clay mineral characteristics of surface sediments from modern rivers in Sansha Bay.
X-axis: sample ID; Y-axis: clay mineral content (%)

3.3 岩芯黏土矿物含量变化特征

NDQK5 岩芯黏土矿物组成中伊利石含量最高，绿泥石、高岭石次之，蒙皂石含量较低（图 4）。根据黏土矿物的变化可划分为 4 个单元：

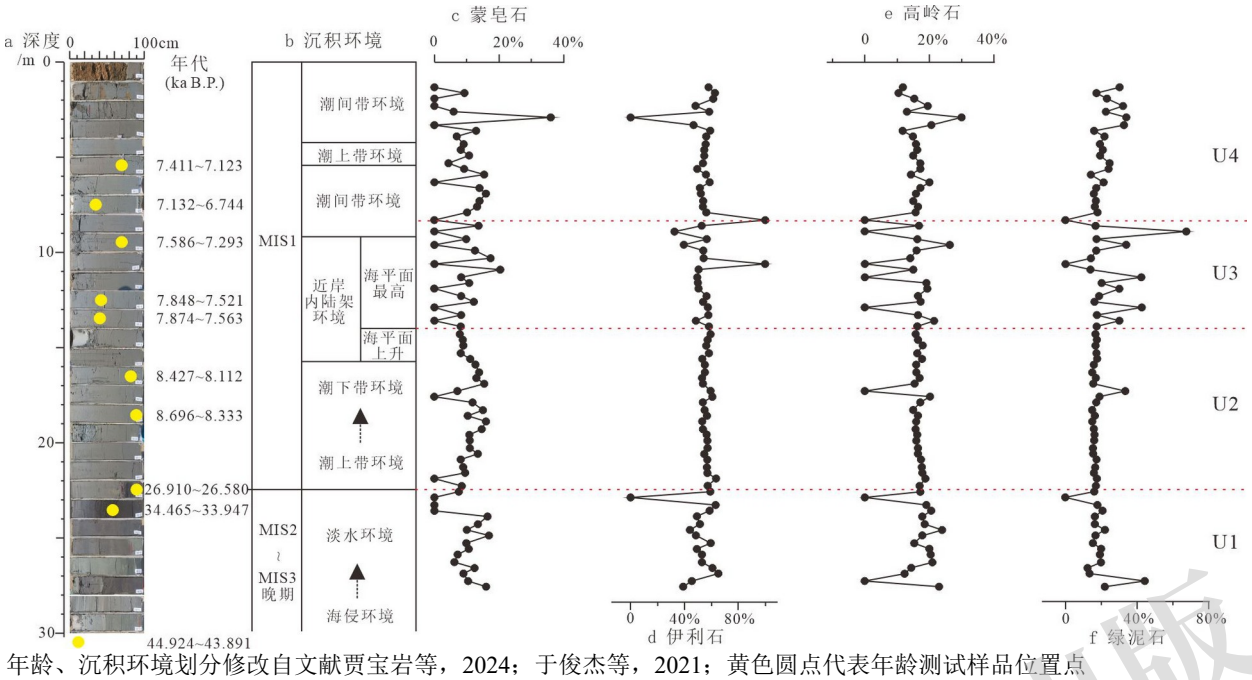
U1 单元（27.6~22.7 m），蒙皂石含量在该段顶部呈显著下降，平均值由 11.5%变为 0%，其余黏土矿物含量波动不明显，伊利石、高岭石、绿泥石含量平均值分别为 49.3%、16.3%、18.4%。

U2 单元（22.7~13.9 m）蒙皂石含量回升至较高水平，平均含量为 10.2%；伊利石、高岭石、绿泥石平均含量值分别为 56.6%、16.2%、17.1%。

U3 单元（13.9~8.3 m），蒙皂石含量再次下降，平均含量为 7.2%，含量为 0 的样品数量显著增加；伊利石、高岭石、绿泥石平均含量值分别为 56.7%、12.6%、23.5%，高岭石含量有所降低，而绿泥石含量明显增加。

U4 单元（8.3~0 m），该单元上部（2.3~0 m）受到人工回填扰动影响，黏土矿物组成不具古环境指示意义；下部（8.3~2.3 m）蒙皂石、伊利石、高岭石、绿泥石平均含量值分别为 10.9%、51.3%、16.2%、20.9%，其中，蒙皂石含量为 0 的样品数量有所减少。

《地质力学学报》预出版



年龄、沉积环境划分修改自文献贾宝岩等，2024；于俊杰等，2021；黄色圆点代表年龄测试样品位置点

a—岩芯照片及年龄；b—沉积环境划分；c—蒙皂石含量；d—伊利石含量；e—高岭石含量；f—绿泥石含量

图 4　NDQK5 岩芯黏土矿物含量变化与深度的关系。

Fig.4 Variations in clay-mineral content with depth in core NDQK5.

(a) Core photograph and age; (b) Depositional environment division; (c) Smectite content; (d) Illite content; (e) Kaolinite content; (f) Chlorite content

Age and depositional-environment divisions are based on Jia et al., 2024 and Yu et al., 2021. Yellow dots indicate the positions of dating samples.

4 讨论

4.1 年代框架的建立

晚更新世以来，气温发生大幅度冷暖变化，全球海平面随之发生基本同步的升降响应。MIS3 时期，全球气候阶段性转暖，导致中国东部沿海普遍发生海侵；至 MIS3 晚期，相对海平面整体转为下降趋势。进入 MIS2 阶段，海平面大幅下降，降幅约 130~150m（Tang et al.，2025；Gao et al.，2025）。直至 MIS1 阶段初期，相对海平面开始回升；至约 7.0 ka B.P.的中全新世，海侵范围达到最大，5.0 ka B.P.以后海平面逐渐回落（黄猛等，2021；Creel et al.，2024）。

此次研究钻孔的岩性及孢粉藻类特征显示，U1 单元指示趋于淡水环境，而 U2~U4 单元则反映咸水环境，二者沉积环境差异显著（图 2）。U1 底部受~44.4 ka B.P.的 AMS^{14}C 年龄约束，顶部附近年龄约为 26.8 ka B.P.（图 2）。MIS2/MIS3 界限定于约 29.0 ka B.P.（Yan et al.，2023）。U1 顶部为厚层状深黑色黏土，形成于强还原环境，这与长江三角洲（Wang et al.，2018）、珠江三角洲（Sheng et al.，2024）和新加坡（Chua et al.，2020）等诸多海岸地区 MIS2 时期暴露氧化环境下普遍发育的典型黄色硬黏土特征截然不同，表明钻孔所在区域在 MIS2（25.0~11.7 ka B.P.）期间，尽管处于全球大范围海退的背景下，仍长期维持水体覆盖的稳定还原沉积环境。这一沉积差异很可能与研究区的局部封闭地貌有关，使该区域在全球低海平面阶段未发生地表暴露，持续保留了水下沉积条件。蒙皂石在 U1 顶部含量降至 0，这一矿物学转变进一步佐证：在海退背景下，局部封闭地貌不仅调控了沉积环境的演化，也引发了物源供给体系的显著调整。结合年龄框架与沉积演化序列，可明确 U1 单元的沉积时代对应 MIS3 晚期至 MIS2 时期。

U2~U4 单元中介形类组合指示的沉积环境演变，与 MIS1 阶段全球海平面的阶段性变化具有良好对应关系。U2 单元中下部（钻孔深度 19~18 m 处）AMS^{14}C 年龄约为～8.7 ka B.P.（图 2），为该单元提供了直接的年代约束。

针对 U2 单元下部（钻孔深度 22.7~19 m 段），岩性与微体化石特征显示其为连续的海侵沉积序

《地质力学学报》预出版

列，自 22.7 m 的 U2 底界起无介形类化石过渡至 17.1~15.8 m 区间浅水广盐种，指示沉积环境由潮上带到潮下带转变，表明海平面回升引发的海侵作用已抵达研究区，对应 MIS1 初期（起始于 11.7 ka B.P.）的海平面快速回升阶段。结合全球海平面曲线（Tan et al.，2023；Yi et al.，2025），11.7~8.7 ka B.P.为末次冰消期后的海平面快速上升期，属于 MIS1 初期海侵序列的组成部分。

在此基础上结合介形类化石的环境指示可进一步划分：U2 单元整体对应 MIS1 初期的海平面回升阶段，U3 单元对应海平面持续上升并达到最高位的高海平面阶段，U4 单元则与全新世中后期的海平面回落调整阶段一致（Yi et al.，2025）。综上，U2~U4 单元的沉积时代整体对应 MIS1 阶段（图 2）。

4.2 现代河流沉积物中黏土矿物的差异

黏土矿物源于岩石风化，其组合特征受流域气候、地貌及地质背景制约（Eberl，1984）。蒙皂石可由陆域中性−基性火山岩风化形成（Liu et al.，2016），亦可在碱性条件下由海底火山物质转化生成（汤艳杰等，2002）。此次研究显示，除长江流域外，蒙皂石仅见于闽江口感潮河段、宁德感潮河段表层、浙闽泥质区及台湾海峡区的沉积物中；而钱塘江、瓯江、闽江流域、台湾独水溪及宁德非感潮河段陆域河流沉积物中均未检出蒙皂石，宁德感潮河段表层与浙闽泥质区黏土矿物组合特征相似（表 2）。长江沉积物中检出的蒙皂石主要源自上游峨眉山玄武岩的风化（Chen et al.，2009），该岩体未见于东南沿海及台湾省其他流域。受浙闽沿岸流影响，细颗粒物质可以长距离搬运至台湾海峡，冬季沿岸流作用更加强烈，长江物质最远能被输送至福建泉州湾附近（Liu et al.，2024；Xu et al.，2009）。这表明浙闽沿岸区海域沉积物很可能受到长江物质输送的影响。虽然基性火山物质易在海水作用下自生蒙皂石（Liu et al.，2016；邓韬等，2023），但三沙湾地区主要分布酸性流纹质凝灰岩（于俊杰等，2022；王继龙等，2022），自生蒙皂石的可能性较低。因此，感潮河段表层沉积物中的蒙皂石更可能源于湾外海源物质与本地物质的混合。

伊利石由陆域火成岩、变质岩或古老的沉积岩中的云母或长石类经过弱的淋滤作用风化保存而成（刘华华等，2016；明洁，2013）。高岭石形成于温暖潮湿的气候条件，由花岗岩、花岗闪长岩等酸性介质被强烈风化后形成（明洁，2013；邓韬等，2023）。绿泥石通常是由陆域低级变质岩、火成岩及古老沉积岩机械剥蚀而成的（王银等，2021）。福建地区花岗岩（富含长石）的出露面积较大，在亚热带温暖潮湿气候以及相对起伏地貌的综合影响下，化学风化增强，导致闽江表层沉积物以高岭石为主（徐勇航等，2013；Bi et al.，2015）（表 2）。而宁德地区除钾长花岗岩发育之外，二长花岗岩、花岗闪长岩、流纹质晶屑凝灰熔岩、流纹质凝灰岩等其他火成岩分布面积也非常广（严肃庄和曹沛奎，1997；王继龙等，2022），且河流径流路径较闽江流域短，导致水系沉积物黏土矿物以伊利石（＞70%）为主，反映较弱的淋滤条件。此特征与台湾河流（物源主要来自以变质岩为主的中央山脉，黏土矿物以伊利石和绿泥石为主）相似（表 2），均指示了以快速机械剥蚀为主的环境（Liu et al.，2008，2010），与闽江流域以高岭石为主的强烈化学风化特征有显著不同。此外，宁德非感潮河段绿泥石含量高于感潮河段，亦反映了更强的机械剥蚀作用。

表 2 对比区域黏土矿物含量组成

Table.2 Comparison of Clay Mineral Content Composition in the Study Areas

地点	样品数量	蒙皂石/%	伊利石/%	高岭石/%	绿泥石/%	数据来源
长江	1	6	64	9	21	徐勇航等，2013
	18	5	67	9	19	Xu et al.，2009
	10	4.8	65	14.1	15.9	Chen et al.，2017
钱塘江	16	0	64.7	18.4	16.9	
瓯江	12	0	65.7	17.2	17.1	
闽江流域	10	0	30.5	69.5	0	
	15	0	29	52	19	徐勇航等，2013
闽江口	10	4	33	43	20	
浙闽泥质区	6	7	64	12	17	
台湾省大甲溪	3	0	73	2	25	Xu et al.，2009；Chen et al.,2017
台湾省独水溪	6	0	70	1	29	徐勇航等，2013
	7	0	71	1	28	Xu et al.，2009；
台湾海峡区	138	8	61	12	19	徐勇航等，2013
宁德表层（感潮河段）	6	6.7	70.2	14.8	8.3	文中
宁德表层（非	9	0	70.9	15.1	14.0	

感潮河段）						

4.3 MIS3 晚期以来环境变化对黏土矿物组成控制

中国东南沿海沉积物受长江南下物质及浙闽—台湾小型河流北上物质的共同影响（Shan et al.，2023；Xu et al.，2023；）。Xu et al.（2023）发现，东海大陆架的泥质带主要由长江沉积物组成，并且有部分来自台湾和浙闽河流物质的贡献。三沙湾内细粒沉积物主要由潮汐从湾外泥质带携入（严肃庄和曹沛奎，1997；于俊杰等，2022）。因此，文章选取长江、浙闽沿岸河流及台湾西部河流 3 个潜在端元，示踪宁德钻孔 NDQK5 的黏土矿物来源（图 5）。高岭石-绿泥石-蒙皂石三元图显示（图 5），大部分数据点集中于长江源区，少数落入瓯江、闽江等浙闽河流区间，指示长江远端沉积物是三沙湾沉积物的重要物源。

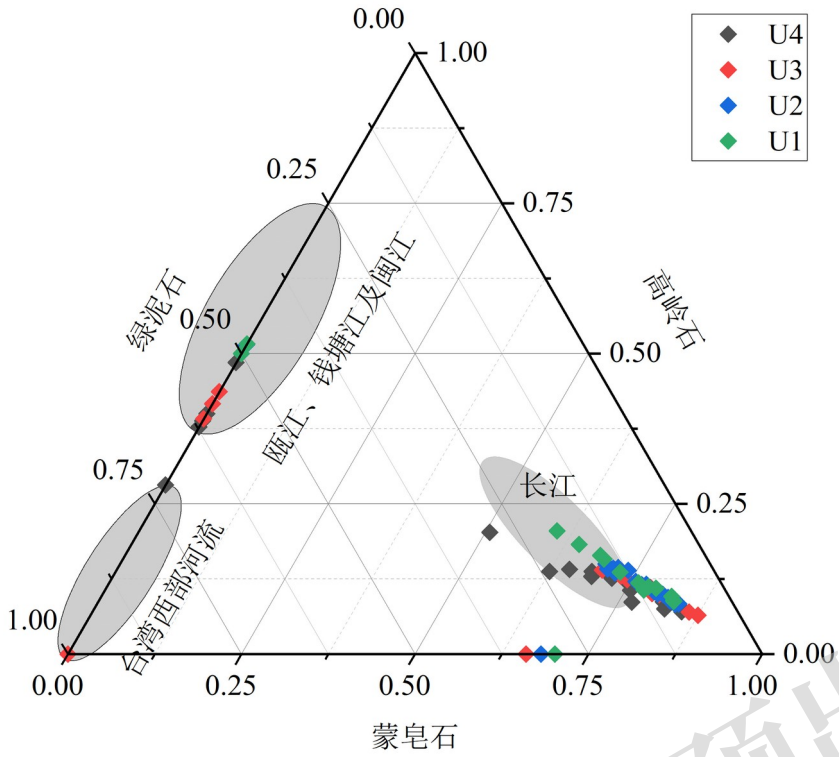
如前所述，蒙皂石可作为长江源的指示性矿物，而东南沿海陆域河流缺乏蒙皂石。NDQK5 岩芯黏土矿物整体含蒙皂石，但其含量存在明显的阶段性波动，揭示了长江源与本地源主导作用的阶段性差异。

MIS3 晚期~MIS2：尽管 MIS3 阶段全球平均海平面低于现今（Pico et al.，2016 提出-31 ~ -45 m；于革等，2016 提出-26.3 ~ -29.9 m），但该时期的气候回暖事件仍引发了中国东部沿海地区的区域性海侵（Gao et al.，2025）。至 MIS3 晚期，全球气候转冷并进入末次冰盛期过渡阶段，海平面开始大幅下降；至 MIS2 阶段，全球海平面降至末次冰期最低值，较现今低 130~150 m（黄猛等，2021）。受此大范围海退作用控制，研究区与外海的连通中断，钻孔沉积物中淡水型环纹藻含量显著增加（图 6b；Dai et al.，2021），指示沉积环境向封闭淡水湖泊转变；同时黏土矿物组合记录显示物源供给体系发生明显调整，物质来源逐渐以本地近源小型山溪性河流输入为主，对应蒙皂石平均含量从 11.5% 降至 0%，与沉积环境的转变呈耦合响应。

全新世时期：约 7.7 ka B.P.之前为持续海侵期，海平面持续上升（图 6a、6h；贾宝岩等，2024），研究区沉积环境由潮下带逐步过渡为近岸内陆架环境。该时期黏土矿物组合特征与长江源高度相似，全新世初期长江流域物质已通过浙闽沿岸流的纵向输运作用抵达三沙湾，这一认识与基于重矿物特征的区域物源研究结论一致（于俊杰，2022）。7.7~7.0 ka B.P.期间，海平面攀升至全新世高位后趋于稳定，研究区维持稳定的近岸内陆架沉积环境（图 6a、6h；贾宝岩等，2024）。高海平面稳定期会为三角洲进积与本地物源垂向加积提供了充足的可容纳空间（Bird et al., 2010）。该时期北半球夏季太阳辐射达到峰值，驱动东亚夏季风显著增强，流域降水进入极盛期（图 6f—6j），进一步提升了流域侵蚀强度与物源供给能力。该时期长江远程物源输入持续稳定，近源本地流域物源贡献相对增强。7.0 ka B.P.以来，海平面在高位波动后开始相对下降，研究区沉积环境由近岸内陆架逐步转变为潮间带。伴随北半球夏季太阳辐射逐渐减弱，东亚夏季风强度与流域降水量同步显著降低（图 6f—6j），本地流域的侵蚀剥蚀通量大幅锐减，近源物质供给不足，沉积物源再度转为以长江远程输入占绝对主导。

综上所述，MIS3 晚期以来，三沙湾黏土矿物组合记录了海平面-季风耦合控制下长江远端供给与本地流域输入的阶段性转换过程。当前，在全球变暖与流域筑坝背景下，长江入海泥沙通量显著减少，未来海平面上升背景下海洋动力对近海沉积物再分配的影响亦不容忽视。今后，需加强高精度年代框架下的沉积通量定量重建，并深入开展极端气候事件对湾内源-汇格局扰动机制的研究，为海湾生态系统保护与韧性海岸带管理提供科学依据。

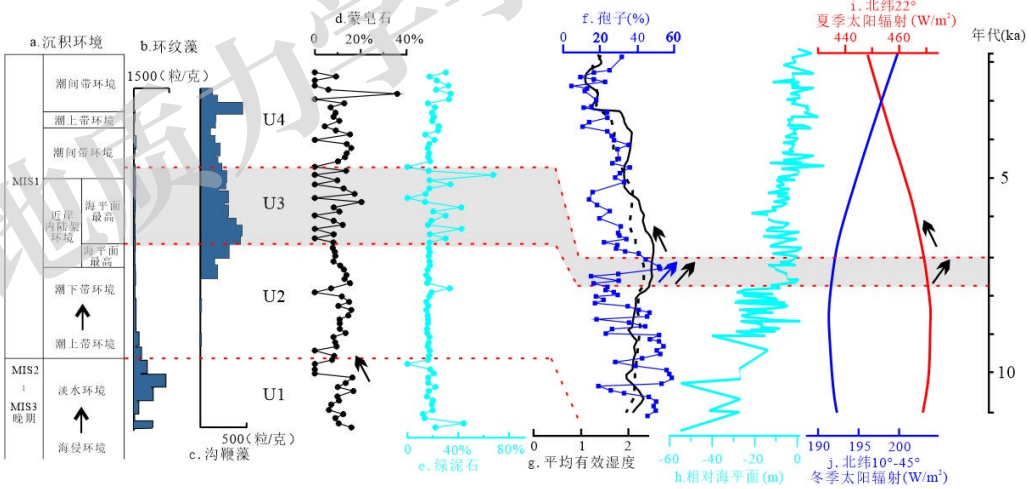
《地质力学学报》预印版



端元数据据 Chen et al.， 2017，端元分别为长江，瓯江、钱塘江及闽江，台湾西部河流；蒙皂石含量已放大 10 倍投图（原始值=图中读数÷10）；黏土矿物含量由 X 射线衍射（XRD）测定，经归一化处理

图 5 三沙湾 NDQK5 孔沉积物高岭石-绿泥石-蒙皂石三元图（。

Figure 5 Ternary diagram of kaolinite-chlorite-smectite in sediments from core NDQK5 in Sansha Bay (end-member data from Chen et al., 2017, representing the Yangtze River, Ou River, Qiantang River, Min River, and rivers in western Taiwan; smectite content has been magnified 10 times for plotting (original value = value in the figure ÷ 10). Clay mineral content was determined by X-ray diffraction (XRD) and normalized.



a—沉积环境划分；b—环纹藻类丰度（贾宝岩等，2024；于俊杰等，2021）；c—沟鞭藻类丰度（贾宝岩等，2024；于俊杰等，2021）；d—蒙皂石含量；e—绿泥石含量；f—台湾南部 TYP-B 岩芯的孢子（%）（Lee and Liew，2010）；g—季风中心（虚线）和东南亚（实线）的平均有效湿度（Herzschuh，2006）；h—相对海平面高程（Grant et al.，2014）；—22°N 夏季日照太阳辐射梯度；j—10°~45°N 冬季太阳辐射梯度（Laskar et al.，2004）。

图 6 MIS3 晚期以来三沙湾黏土矿物典型组分与区域环境演化过程对比

Fig.6 Comparison of typical clay-mineral components in Sansha Bay with regional environmental evolution since the late MIS 3.

(a) Sedimentary environment division; (b) Concentricystes abundance (Yu et al., 2021; Jia et al., 2024); (c) dinoflagellate abundance (Yu et al., 2021; Jia et al., 2024); (d) contents of smectite in clay minerals; (e) contents of chlorite in clay minerals; (f) spore content in core TYP-B, southern Taiwan (Lee and Liew, 2010); (g) mean effective moisture in the monsoon center (dashed line) and Southeast Asia (solid line) (Herzschuh, 2006); (h) relative sea-level elevation (Grant et al., 2014); (i) summer

《地质力学学报》预出版

insolation at 22°N (Laskar et al., 2004); (j) winter insolation gradient between 10°N and 45°N, averaged over June–August and December–February, respectively (Laskar et al., 2004).

5 结论

（1）通过现代河流沉积物黏土矿物对比，蒙皂石含量差异可作为区分长江远端输入与本地流域沉积的参考指标：长江物质富含蒙皂石（4%～8%），而三沙湾周边非感潮河流因流域内地层岩性以酸性岩浆岩为主、化学风化较弱，沉积物以伊利石（>70%）为主，且基本不含蒙皂石。

（2）NDQK5 钻孔记录显示，三沙湾沉积环境经历了“淡水湖泊→滨海相→陆相潮滩”的完整旋回。MIS3 晚期~MIS2（U1 单元），海平面下降使湾内封闭成湖，物源转变为由本地短源河流主导，蒙皂石缺失。全新世海侵期间（U2—U4 单元），随着海平面阶梯式上升，沉积环境由潮下带演变为近岸内陆架再转为潮间带；黏土矿物组合指示物源供给发生两次转换：早期（~7.7 ka B.P.前）长江物质沿浙闽沿岸流远距离输入，中期（约 7.7~7.0 ka）高海平面与强夏季风耦合作用增强了本地剥蚀，晚期（7.0 ka B.P.以来）随季风减弱，物源再次转为长江主导。

（3）三沙湾黏土矿物组成的阶段性波动受控于海平面变化引起的沉积环境演变与东亚季风强度调控的流域剥蚀通量之间的耦合作用。海平面上升控制着远端海洋物质的输入格局，而季风降水高峰期则强化本地山溪性河流供给。在全球变暖与长江泥沙锐减背景下，理解这一海–陆相互作用机制对评估未来海岸带沉积格局演变及海湾生态系统保护具有重要科学价值。

作者贡献声明：王继龙、王凤负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作；许乃岑、彭博参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图；曾剑威、吴中海参与数据分析、研究方法和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author’s Contributions: Example: Wang Jilong and Wang Feng conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; Xu Naicen and Peng Bo participated in data analysis, practical application of technical approaches, and figure generation; Zeng Jianwei and Wu Zhonghai were involved in data analysis, refinement of the research methodology, and manuscript revision. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。 Conflict of Interests : All authors declare no conflict of interests.

《地质力学学报》预出版

参考文献：

BI L, YANG S Y, LI C, et al., 2015. Geochemistry of river-borne clays entering the East China Sea indicates two contrasting types of weathering and sediment transport processes[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 16: 3034–3052.

BIRD M I , AUSTIN W E N , WURSTER C M, et al., 2010. Punctuated eustatic sea-level rise in the early mid-Holocene[J]. Geology, 38(9): 803-806.

BISCAYE P E, 1965. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans[J]. GSA Bulletin, 76(7): 803-832.

CHEN J, MA J Q, XU K H, et al., 2017. 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, 27(1): 110-121.

CHEN J, WANG Z H, CHEN Z Y, et al., 2009. Diagnostic heavy minerals in Plio-Pleistocene sediments of the Yangtze Coast, China with special reference to the Yangtze River connection into the sea[J]. Geomorphology, 113: 129–136.

CHEN Y Y, YANG K, YU J B, et al., 2024. Quaternary strata lithological characteristics and environmental geological significance of borehole WKZK01 in the eastern Songnen Plain[J]. Journal of Geomechanics, 30(6): 952−964. (in Chinese with English abstract)

CHENG H, SINHA A, WANG X, et al., 2012. The Global Paleomonsoon as seen through speleothem records from Asia and the Americas[J]. Climate dynamics, 39(5): 1045-1062.

CHENG H., EDWARDS R L, SINHA A, et al., 2016. The Asian monsoon over the past 640,000 years and ice age terminations[J]. Nature 534(7609): 640–646.

CHUA S, SWITZER A D, KEARSEY T I, et al., 2020. A new quaternary stratigraphy of the Kallang River Basin, Singapore: Implications for urban development and geotechnical engineering in Singapore[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 200: 104430.

CREEL R C, AUSTERMANN J, KOPP R E, et al.,2024. Global mean sea level likely higher than present during the holocene[J]. Nature communications, 15(1): 10731.

DAI L, LI S L, YU J J, et al., 2021. Palynological evidence indicates the paleoclimate evolution in southeast China since late marine isotope stage 5[J]. Quaternary Science Reviews, 266: 106964.

DENG T, XU D, XIAO T L, et al., 2023. Clay mineral characteristics of sediments in the seamount basin of the Western Pacific and its indicative significance[J]. Journal of Marine Sciences, 41(3): 56-72. (in Chinese with English abstract)

DOU Y G, YANG S Y, LIU Z X, et al., 2010. Clay mineral evolution in the central Okinawa Trough since 28ka: Implications for sediment provenance and paleoenvironmental change[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 288, (1-4): 108-117.

DUAN D , XU K , YANG Y ,et al., 2025. Dynamic organic matter sources drive intact polar lipids recently deposited in surface sediments from the Yangtze River Estuary and adjacent sea[J].Marine Chemistry, 273(c):104574.

EBERL D D, 1984. Clay mineral formation and transformation in rocks and soils[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A, 311(1517): 241-257.

GAO L, LONG H, ZHANG J, et al., 2025. Luminescence dating reveals late Quaternary evolution of the Pearl River Delta estuary (China) in response to global climate and sea-level changes[J]. Quaternary Science Reviews, 369: 109609.

GRANT K M , ROHLING E J , RAMSEY C B ,et al.,2014. Sea-level variability over five glacial cycles[J].Nature Communications, 5:5076.

HAMLINGTON B D, BELLAS-MANLEY A, WILLIS J K, et al., 2024. The rate of global sea level rise doubled during the past three decades[J]. Communications Earth & Environment, 5(1): 601.

HERZSCHUH U, 2006. Palaeo-moisture evolution in monsoonal Central Asia during the last 50,000 years[J]. Quaternary Science Reviews, 25(1-2): 163-178.

HONG H L, 2008. Study on heavy minerals in Sansha Bay[J]. Journal of Applied Oceanography, 27(3): 381-392. (in Chinese with English abstract)

HUANG M, HAN R W, NIU Y, et al., 2021. Marine transgression since the MIS3 stage on the northwest coast of Bohai Bay， China[J]. Geological Bulletin of China, 40(5): 721-733. (In Chinese with English abstract)

《地质力学学报》预出版

JIA B Y, PENG B, WANG J L, et al., 2024. Mid-Holocene sea-level fluctuation in the Fujian coastal area: Evidence from the ostracod records of the core NDQK5[J]. Acta Geologica Sinica, 98(2): 333-345. (in Chinese with English abstract)

KAUFMAN D S, BROADMAN E, 2023. Revisiting the Holocene global temperature conundrum[J].Nature, 614(7948):425~535.

LASKAR J, ROBUTE P, JOUTEL F, et al., 2004. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth[J]. Astronomy & Astrophysics, 428(1): 261-285.

LEE C Y, LIEW P M, 2010. Late Quaternary vegetation and climate changes inferred from a pollen record of Dongyuan Lake in southern Taiwan[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 287(1-4): 58-66.

LI Y, SHAN X, HUANG X, et al.,2025. Tracing the Changjiang-derived sediments along the southeast coast of China during the Holocene[J]. Global and Planetary Change, 248: 104770.

LIN Y, KOPP R E, XIONG H, et al., 2025. Modern sea-level rise breaks 4,000-year stability in southeastern China[J]. Nature: 1-9.

LIN X, WU Z H, DONG Y Y, et al., 2024. The evolutionary process of Cenozoic Asian monsoon[J]. Journal of Geomechanics， 30(4): 673−690. (in Chinese with English abstract)

LIU H H, JIANG F Q, ZHOU Y, et al., 2016. Provenance of clay minerals in the Amami Sankaku Basin and their paleoclimate implications since late Pleistocene[J]. Advances in Earth Science, 31(3): 286-297. (in Chinese with English abstract)

LIU P, ZHANG J, LIU Y, et al., 2024. Sediment source-to-sink patterns along the southeast China coast during the late Quaternary: New insights from sediment geochemistry and OSL ages in Ningde Bay[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 656: 112577.

LIU Z F, COLIN C, LI X J, et al., 2010. Clay mineral distribution in surface sediments of the northeastern South China Sea and surrounding fluvial drainage basins: Source and transport[J]. Marine Geology, 277(1-4): 48-60.

LIU Z F, TUO S T, COLIN C, et al., 2008. Detrital fine-grained sediment contribution from Taiwan to the northern South China Sea and its relation to regional ocean circulation[J]. Marine Geology, 255: 149-155.

LIU Z F, ZHAO Y, COLIN C, et al., 2016. Source-to-sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea[J]. Earth-Science Reviews, 153: 238-273.

MING J. 2013. Quaternary sedimentary characteristics, provenance and paleo-environmental significance of the Parece Vela Basin in the eastern Philippine Sea [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. (in Chinese with English abstract)

PICO T, MITROVICA J X, FERRIER K L, et al., 2016. Global ice volume during MIS3 inferred from a sea-level analysis of sedimentary core records in the Yellow River Delta[J]. Quaternary Science Reviews, 152: 72–79.

ROY P, PAL S C, CHAKRABORTTY R, et al., 2023. Effects of climate change and sea-level rise on coastal habitat: Vulnerability assessment, adaptation strategies and policy recommendations[J]. Journal of Environmental Management, 330: 117187.

ROMERO M, TORRE G, GAIERO D M, 2021. Paleoenvironmental changes in southern South American dust sources during the last glacial/interglacial transition: Evidence from clay mineral assemblages of the pampean loess[J]. Quaternary International, 580: 11-21.

SEEGER K., MINDERHOUD P S J, 2026. Sea level much higher than assumed in most coastal hazard assessments[J]. Nature, 652, 667–674.

SHAN X., DALRYMPLE R W, SHI X, et al., 2023. Changjiang coastal mud-belt deposits in Taiwan Strait: controls on its distribution and facies[J]. Sedimentology, 70(4): 1131–1163.

SHENG C, JIAO J J, ZHANG J, et al., 2024. Evolution of groundwater system in the Pearl River Delta and its adjacent shelf since the late Pleistocene[J]. Science Advances, 10(15): eadn3924.

TAN F, KHAN N S, LI T, et al., 2023. Holocene relative sea-level histories of far-field islands in the mid-Pacific[J]. Quaternary Science Reviews, 310: 107995.

TANG Y J, JIA J Y, XIE X D, 2002. Environmental significance of clay minerals [J]. Earth Science Frontiers, 9(2): 337-344. (in Chinese with English abstract)

TANG N, WANG Z, LIN P, et al., 2025. Luminescence dating of core DLC70-2 from the North Yellow Sea in China and its implication for late Quaternary transgressions[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 666: 112842.

《地质力学学报》预出版

WALSH J P, WIBERG P L, AALTO R, et al., 2016. Source-to-sink research: economy of the Earth's surface and its strata[J]. Earth-Science Reviews, 153(1): 1–6.

WANG J L, LIN F Z, PENG B, et al., 2022. Evaluation and practice of urban construction suitability in coastal volcanic areas of southeast China: a case study of Ningde City, Fujian Province[J]. East China Geology, 43(4): 490-502. (in Chinese with English abstract)

WANG Y, LÜ S H, SU X, et al., 2021. Assemblage of clay minerals at polymetallic nodules contract area in Northwest Pacific Ocean[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 31(10): 2696−2712. (in Chinese with English abstract)

WANG Z H, SAITO Y, ZHAN Q, et al., 2018. Three-dimensional evolution of the Yangtze River mouth, China during the Holocene: impacts of sea level, climate and human activity[J]. Earth-Science Reviews, 185: 938–955.

XUE C, YANG Y, JIA J, et al., 2023. Sedimentary records reveal two stages of evolution of the Abandoned Yellow River Delta from AD1128 to AD1855: vertical accretion and land-forming[J]. Anthropocene Coasts, 6(1): 1-14.

XUE J, ZHANG W, ZHAI S, et al., 2025. Characteristics of runoff and sediment transport during flood events in the upper Yangtze River, China, in the last 50 years[J]. Catena, 249: 108688.

XU G, BI S P, GUGLIOTTA M, et al., 2023. Dispersal mechanism of fine-grained sediment in the modern mud belt of the East China Sea[J]. Earth-Science Reviews. 240: 104388.

XU G, LIU J, LIU S, et al., 2016. Modern muddy deposit along the Zhejiang coast in the East China Sea: Response to large-scale human projects[J]. Continental Shelf Research, 130: 68-78.

XU K H, MILLIMAN J D, LI A, et al., 2009. Yangtze-and Taiwan-derived sediments on the inner shelf of East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 29(18): 2240-2256.

XU Y H, CHEN J, WANG A J, et al., 2013. Clay Minerals in Surface Sediments of the Taiwan Strait and Their Provenance[J]. Acta Sedimentological Sinica, 31(1): 120-129. (in Chinese with English abstract)

YAN S Z, CAO P K, 1997. Mineral characteristics and provenance of surface sediments in Sansha Bay, China [J]. Journal of Applied Oceanography, (2): 128-134. (in Chinese with English abstract)

YANG S Y, BI L, LI C, et al., 2016. Major sinks of the Changjiang (Yangtze River)-derived sediments in the East China Sea during the late quaternary[M]. Geological Society, London, Specical Publications, 429 (1): 137–152.

YANG S, BOUMA T J, Xu K, et al.,2023. Storms dominate the erosion of the Yangtze Delta and southward sediment transport[J]. Science Bulletin, 68(6): 553-556.

YAN Q, OWEN L A, GUO C, et al., 2023. Widespread glacier advances across the Tian Shan during Marine Isotope Stage 3 not supported by climate-glaciation simulations[J]. Fundamental Research, 3(1): 102-110.

YU G, YE L T, LIAO M N, et al., 2016. Quantitative reconstruction, simulation and mechanism study on the late Pleistocene marine transgressions in the coastal plains of China[J]. Quaternary Sciences, 36: 711–721 (In Chinese with English abstract)

YU J J, LIU P, LIN F Z, et al., 2022. Sediment sources and environment evolution since 90 ka in Sansha Bay, Fujian Province[J]. East China Geology, 43(1): 30-39. (in Chinese with English abstract)

YU J J, PENG B, LAN Y, et al., 2021. Palynological Record Revealed Anthropogenic Deforestation, Sea Level and Climate Changes since Marine Isotope Stage 5a in the Northeastern Coast of Fujian Province[J]. Earth Science, 46(1): 281-292. (in Chinese with English abstract)

ZOU J, SHI X, ZHU A, et al.,2022. New REE-constrained terrigenous depositional changes in the central Okinawa Trough and their responses to climate since 92 millennia[J]. Lithosphere, (Special 9): 2455969.

附中文参考文献

陈阳阳, 杨柯, 于俊博, 等, 2024. 松嫩平原东部 WKZK01 钻孔第四纪地层岩性特征及环境地质意义[J].地质力学学报, 30(6): 952-964.

邓韬, 许冬, 肖婷露, 等, 2023. 西太平洋海山盆地沉积物黏土矿物特征及其指示意义[J]. 海洋学研究, 41 (3):56-72.

洪辉亮, 2008. 三沙湾重矿物研究[J]. 应用海洋学学报, 27(3):381-392.

黄猛, 韩荣文, 牛毅, 等, 2021. 渤海湾西北岸 MIS3 阶段以来的海侵特征[J]. 地质通报, 40(5): 721-733.

《地质力学学报》预出版

贾宝岩, 彭博, 王继龙, 等, 2024. 中全新世福建沿海地区海平面波动: 基于 NDQK5 岩芯介形类化石记录[J]. 地质学报, 98(2): 333-345.

林旭, 吴中海, 董延钰, 等, 2024. 新生代亚洲季风的演化过程[J]. 地质力学学报, 30(4): 673−690.

刘华华, 蒋富清, 周烨, 等, 2016. 晚更新世以来奄美三角盆地黏土矿物的来源及其对古气候的指示[J]. 地球科学进展, 31(3): 286-297.

明洁, 2013. 东菲律宾海帕里西维抗海盆第四纪沉积特征和物质来源及其古环境意义[D]. 青岛:中国科学院海洋研究所.

汤艳杰, 贾建业, 谢先德, 2002. 黏土矿物的环境意义[J]. 地学前缘, 9(2): 337-344.

王继龙, 林丰增, 彭博, 等, 2022.东南沿海火山岩区城镇建设适宜性评价与实践——以福建省宁德市为例[J]. 华东地质, 43(4): 490-502.

王银, 吕士辉, 苏新, 等, 2021. 西北太平洋多金属结核区沉积物黏土矿物特征[J]. 中国有色 金属学报, 31(10): 2696-2712.

徐勇航, 陈坚, 王爱军, 等, 2013. 台湾海峡表层沉积物中黏土矿物特征及物质来源. 沉积学报, 31(1): 120-129.

严肃庄, 曹沛奎, 1997. 三沙湾表层沉积物中矿物特征及其泥沙来源[J]. 应用海洋学学报, (2):128-134.

于革, 叶良涛, 廖梦娜, 等, 2016. 我国沿海平原晚更新世海侵的定量重建、模拟与机制研究.第四纪研究, 36(3), 11.

于俊杰, 刘平, 林丰增,等, 2022. 福建三沙湾 90 ka 以来沉积物来源及环境演变研究[J]. 华东地质, 43(1):30-39.

于俊杰, 彭博, 兰佑, 等, 2021. 孢粉证据揭示 MIS5a 以来福建东北沿海地区人类活动, 海平面及气候变化. 地球科学, 46(1): 281-292.

《地质力学学报》预出版