



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：长江三角洲 ZKA5 孔记录的新生代沉积环境与物源变迁

作者：石太衡，蒋仁，周效华，刘凯，于俊杰，曾剑威，劳金秀，朱衍宾

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2025179

投稿时间：2025-12-09

录用时间：2026-07-16

预出版时间：2026-10-30

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。

长江三角洲 ZKA5 孔记录的新生代沉积环境与物源变迁

石太衡, 蒋仁, 周效华, 刘凯, 于俊杰, 曾剑威, 劳金秀, 朱衍宾

SHI Taiheng, JIANG Ren, ZHOU Xiaohua, LIU Kai, YU Junjie, ZENG Jianwei, LAO Jinxiu, ZHU Yanbin

中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016

Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu China

Neogene Sedimentary Environment and Provenance Evolution Recorded by Core ZKA5 in the Yangtze River Delta

Abstract: [Objective] The Cenozoic provenance evolution of the northern Yangtze River Delta remains poorly understood due to a scarcity of continuous, deep sedimentary records. [Methods] To address this knowledge gap, we present a comprehensive analysis of the upper 408 m unconsolidated succession from Core ZKA5, located in the Nantong area. Through integrated lithological observation, grain size analysis, and detailed heavy mineral identification, we reconstruct the sedimentary environmental history and delineate the provenance shifts since the late Cenozoic. [Results] Our results show that the stratigraphic sequence comprises six lithostratigraphic units, include the Yancheng, Haimen, Qidong, Kunshan, Gehu, and Rudong Formations, and is characterized by five sedimentary facies, include alluvial plain, channel, floodplain, delta plain, and intertidal facies. Heavy mineral assemblages reveal a significant provenance transition. Sediments during the late Neogene were predominantly sourced from the northern basin of the middle-upper Huai River. However, beginning in the early Quaternary (approximately at ~2.6 Ma), the dominant sediment source has progressively shifted from the Huai River basin to the middle-lower reaches of the Yangtze River basin. [Conclusion] We interpret this provenance shift to be primarily driven by the southward migration of the regional depocenter from the Subei Basin to the Yangtze River Delta, coupled with changes in the East Asian monsoon precipitation regime during the Quaternary. [Significance] This study reveals the transformation of the provenance system driven by tectonic subsidence and climatic forcing, providing critical empirical evidence for the tectono-sedimentary-modification coupling mechanism in the Yangtze River Delta.

Keywords: Yangtze River Delta; Cenozoic; sedimentary environment evolution; heavy minerals; provenance

摘要: 针对长江三角洲北翼新生代沉积物源演化过程不清、深部连续记录缺乏的问题, 本研究基于南通地区 ZKA5 孔上部 408 m 未固结沉积序列, 通过系统的岩性观察、粒度分析和重矿物鉴定, 重建了该区新生代晚期以来的沉积环境与物源变迁历史。研究发现, 研究区地层包括盐城组、海门组、启东组、昆山组、海涂组和如东组共 6 个地层单元, 发育泛滥平原、河床、河漫滩、三角洲平原及潮间带相 5 种沉积相。其中河床相沉积物的重矿物组合特征揭示, 新生代晚期沉积物主要来源于淮河中上游北部流域, 但自第四纪初期 (约 2.6 Ma) 以来, 由淮河流域主导逐渐转向长江中下游流域贡献增强。这一物源系统的转变, 与第四纪以来沉积中心由苏北盆地向长江三角洲地区转移密切相关。此次研究揭示了构造沉降与气候驱动下物源系统的转型过程, 为长江三角洲构造-沉积-改造耦合机制提供了关键实证。同时也为长江三角洲地区新生代晚期沉积环境演变提供了重要的深部资料, 为理解构造活动和气候变化与区域侵蚀-沉积-改造耦合过程提供了研究案例。

关键词: 长江三角洲; 新生代; 沉积环境演化; 重矿物; 物源

中图分类号: P534.6; P512.2 **文献标识码:** A

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20240025, DD20230201)

This research was financially supported by the China Geological Survey Project (Grant No. DD20240025, DD20230201)

第一作者: 石太衡 (1996—), 男, 工程师, 第四纪地质学。Email: taihengshi@163.com

通信作者: 蒋仁 (1981—), 男, 正高级工程师, 第四纪地质学。Email: jiangren2004@126.com

0 引言

长江三角洲作为世界级大河与边缘海相互作用的产物,是研究沉积物“源-汇”过程及陆-海相互作用的天然实验室。其沉积序列不仅记录了海平面变化、构造沉降和河流动力演变的信息,也为揭示流域演化与区域沉积响应提供了关键地质档案(Wang et al., 2018; 潘大东和王张华, 2019; Chen et al., 2024; 李姿亭等, 2025; Zhou et al., 2025)。

基于钻孔岩心、地球物理资料及多种沉积学指标,已有学者已对长江三角洲第四纪晚期的沉积环境演化历史取得重要认识。研究表明,该区在冰期-间冰期旋回中形成了“同时异相”的沉积格局:中部为古长江下切河谷充填序列,南北两侧则分别发育潮控泥质沉积和浪控砂质沉积(Chen et al., 2000; Li et al., 2000, 2002; Hori et al., 2002)。这一格局清晰地揭示了古地形、海平面变化及区域动力机制共同控制下的沉积环境空间分异与演化历史。尽管近年来在长江三角洲多地实施了长岩心钻探(蒋仁等, 2015; 程瑜等, 2019; Xu et al., 2020; Li et al., 2024; 周效华等, 2025),但现有钻孔研究多集中于埋深小于 200 m 的第四纪晚期地层(邓程文等, 2016; 丁大林等, 2019; 刘宪光等, 2023; 陈嘉诺等 2024),对于长江三角洲全区新生代沉积环境重建而言,获取长时间序列的连续沉积至关重要。

沉积物源研究是重建古流域格局、反演古环境演变历史的重要方法。已有学者已综合运用重矿物、地球化学、碎屑锆石等多种指标,对长江三角洲地区沉积物源进行了系统分析(黄湘通等, 2009; Yang et al., 2009; 顾家伟等, 2018; 安郁辉等, 2020)。例如,上海 SG07 孔的磁性矿物特征显示,该区新生代以来沉积物源曾发生两次显著转变:上新世以周边玄武岩风化产物为主;早更新世早期转为贫铁的中酸性浅成岩或喷出岩来源;中更新世则以变质岩类物质为主,沉积物源的转变伴随着沉积环境由山间湖泊到山间河流/冲积扇再到冲积平原/滨海平原的演变,反映了长江三角洲在构造沉降作用下区域沉积环境演变对物源的重要控制作用(王张华等, 2008)。泰州 TZK3 孔的锆石年龄谱与上海 LQ11 孔的重矿物组合共同揭示,长江三角洲在上新世-第四纪之交发生了显著物源变迁(程瑜等, 2018; Yue et al., 2019):沉积物源从早期的长江中下游流域为主逐步扩展至晚期的长江中上游流域,这表明长江三角洲自第四纪初期开始系统性地接受来自长江上游的沉积物(Yue et al., 2019)。此外,上海 LQ24 孔的重矿物与地球化学指标进一步显示,该区从上新世的局地小河流物源逐渐转为更新世长江中游支流物源,并于约 1.2 Ma 后出现显著的上游物源,这一由近至远的物源转变,很可能受控于上新世以来青藏高原持续隆升与东部沿海加速沉降的区域构造背景(Yue et al., 2018)。然而,既有研究多集中于长江三角洲中南部,对其北翼深部连续沉积记录的物源演化过程及其驱动机制仍缺乏系统认识,制约了对全区构造-区域沉积耦合过程的整体理解。

岩性观察、粒度及重矿物分析是沉积环境重建和物源示踪的有效手段。其中,沉积岩性特征是识别沉积相的直接标志,粒度分布可反映搬运介质能量和沉积过程(张杰和宋永文, 2016; 杨劲松等, 2025; 张波等, 2025),二者综合分析及交叉验证可提高沉积环境重建的准确性。重矿物因其较强的抗风化能力和稳定性,能较好地保留源岩信息,是重要的物源指示剂。通过研究沉积物源在空间和时间上的变化,可以重建沉积盆地的充填和物源区迁移历史(于俊杰等, 2022; 高抒等, 2025; 王爱军等, 2025)。

基于上述认识,此次研究以长江三角洲北翼南通地区 ZKA5 孔上部 408 m 未固结沉积序列为研究对象,通过系统的岩性观察、粒度和重矿物分析,恢复该区新生代以来的沉积环境演变与物源变迁历史,旨在揭示该区构造活动与区域侵蚀-沉积体系的耦合机制。

1 区域地质概况

长江三角洲位于扬子克拉通东北缘(30°20'-32°30'N, 119°24'-122°30'E),地势低平,平均海拔约 4 m。除南部出露少数基岩残丘外,大部分地区被晚新生代松散沉积物覆盖。震旦纪早期为长江三角洲基底形成阶段,变质岩为扬子地块与华南地块边缘增生、相互碰撞及褶皱作用的产物。此后,三角洲先后经历了震旦纪-古生代

晚期的板块裂陷和新生代中期陆缘活动两个阶段。新近纪晚期,随着中国东部整体沉降过程持续发展,苏北-南黄海盆地范围进一步扩张。第四纪早期,长江三角洲地区转入全面沉降(Chen and Stanley, 1995)。

长江三角洲地区基岩类型以火成岩为主,从新元古代到新生代晚期均有分布(陈静等,2007)。其中,侏罗世晚期和白垩纪火成岩分布最广,占基岩面积的三分之二以上。沉积岩和变质岩仅在上海、镇江等地零星分布。基岩之上的新生代沉积地层以半固结-松散河流相沉积物为主,古近纪和新近纪地层明显缺失。西部沉积区靠近天目山,沉积厚度一般为 50-150 m,且多为第四纪沉积,普遍缺乏新近纪沉积。东部沉积区厚度一般为 200-350 m,沉积中心崇明岛地区最大厚度可达 400 余米(Chen and Stanley, 1995)。吴标云和李从先(1987)基于海门 D7 孔、启东南阳镇 D3 孔、昆山正仪镇 D97 孔、武进寨桥 D114 孔及如东北坎镇 Dh2 (D9) 孔等代表性钻孔,建立了长江三角洲地区第四纪地层划分方案,将地层由老至新划分为新近系盐城组(N_{1-2yc})、下更新统海门组(Qp^1h)、中更新统启东组(Qp^2q)、上更新统昆山组(Qp^3k)与太湖组(Qp^3g)以及全新统如东组(Qhr)共 6 个组。

盐城组(N_{1-2yc}),通常表现为多个上细下粗的正粒序沉积旋回(刘璐,2012;苗巧银等,2019)。单个旋回中,上部以灰绿、灰黄及黄褐色黏土与粉砂为主,含较多钙质及铁锰质结核,属泛滥平原相沉积;下部为浅黄、灰白及灰色粉细砂、细砂与含砾中粗砂,属河床相沉积。该组不整合覆盖于古生界五通组灰白色石英砂岩之上,与上覆海门组的分界对应于松山-高斯极性界线(M/G 界线)(吴标云和李从先,1987;苗巧银等,2019),对应第 5 硬黏土层顶界(赵希涛等,2017)。

海门组(Qp^1h),一般发育 3-5 个上细下粗的正粒序沉积旋回,含较多钙质与铁锰质结核(吴标云和李从先,1987),整体具河床-河漫滩-泛滥平原相沉积序列(刘璐,2012)。单个旋回中,上部为灰色黏土、粉砂、粉细砂及砂砾石层,属泛滥平原与河床相沉积;中部为灰绿、灰黄绿及棕黄色黏土、粉细砂与中粗砂,属湖泊、河漫滩及河床相沉积;下部为灰色细砂、中粗砂及含砾中粗砂,为河床相沉积。该组底界为 M/G 界线,顶界为布容-松山极性界线(B/M 界线)(吴标云和李从先,1987),对应第 3 硬黏土层顶界(赵希涛等,2017)。

启东组(Qp^2q)通常表现为 2 个由粗至细的逆粒序沉积旋回,岩性包括灰黄、灰绿及深灰色黏土、粉砂、粉细砂、中细砂、中粗砂与含砾中粗砂,属泛滥平原、河漫滩、河床相沉积,局部为潮坪、河口相沉积(吴标云和李从先,1987)。该组底界为 B/M 界线,顶界为第 2 硬黏土层顶界(吴标云和李从先,1987;赵希涛等,2017)。

昆山组(Qp^3k)和太湖组(Qp^3g)主体为一套受海侵影响的河口与潮坪相沉积,岩性为青灰、灰、深灰及灰白色黏土、粉砂、粉细砂、中细砂、中粗砂与含砾中粗砂,含丰富海相化石,顶部常因侵蚀而缺失(吴标云和李从先,1987;刘璐,2012)。太湖组顶界为第 1 硬黏土层顶界(吴标云和李从先,1987;赵希涛等,2017)。

如东组(Qhr)位于第 1 硬黏土层之上,主体为潮坪与滨-浅海相沉积,岩性为灰、浅灰色黏土、粉砂与粉细砂,局部黏土与粉砂互层,发育波状、脉状及水平层理,含丰富海相化石(吴标云和李从先,1987;刘璐,2012)。

2 材料与方法

ZKA5 孔(121°04'36"E, 32°22'48"N, 图 1)取自长江三角洲北翼南通市。岩心总长 510 m,平均取心率约为 93%。基岩出露于岩心 408 m 处,为古生界五通组灰白色石英砂岩(郑开富,1990)。该文重点研究 ZKA5 孔上部约 408 m 未固结的新生代沉积序列,主要包括黏土、含粉砂黏土、含黏土粉砂、粉砂、细砂、中砂、含砾粗砂及砾石层。岩心沿中轴纵向剖开后,91 m 以下沉积物以黄色调为主,呈灰黄色、棕黄色、黄褐色及灰色,91 m 以上则以灰色调为主,表现为灰色、灰黑色和灰褐色。本研究于岩心 20 至 30 m 共采集 7 个贝壳、炭屑样品用于 AMS¹⁴C 年代学测试(图 2,表 1)。基于年代学测试结果,依据岩性特征进一步划分为盐城组、海门组、启东组、昆山组、太湖组、如东组共 6 个组,14 个沉积单元,受“同时异相”沉积特征影响,部分沉积单元跨越岩石地层(图 2,表 2)。

按岩性分层采集粒度分析样品共 65 个,其中砂层 34 个,粉砂层 15 个,黏土层 16 个(图 2)。受中粗砂、砂砾石等粗粒沉积物影响,部分层位的采样间隔不均匀。粒度测试在中国地质大学(武汉)地质微生物与环境国家重点实验室完成,采用美国贝克曼库尔特(香港)有限公司生产的 LS-230 激光粒度仪进行测定。为揭示不同沉积阶段的环境特征与水动力条件,本研究对样品进行了粒度分布图、概率累积曲线和 C-M 图分析。

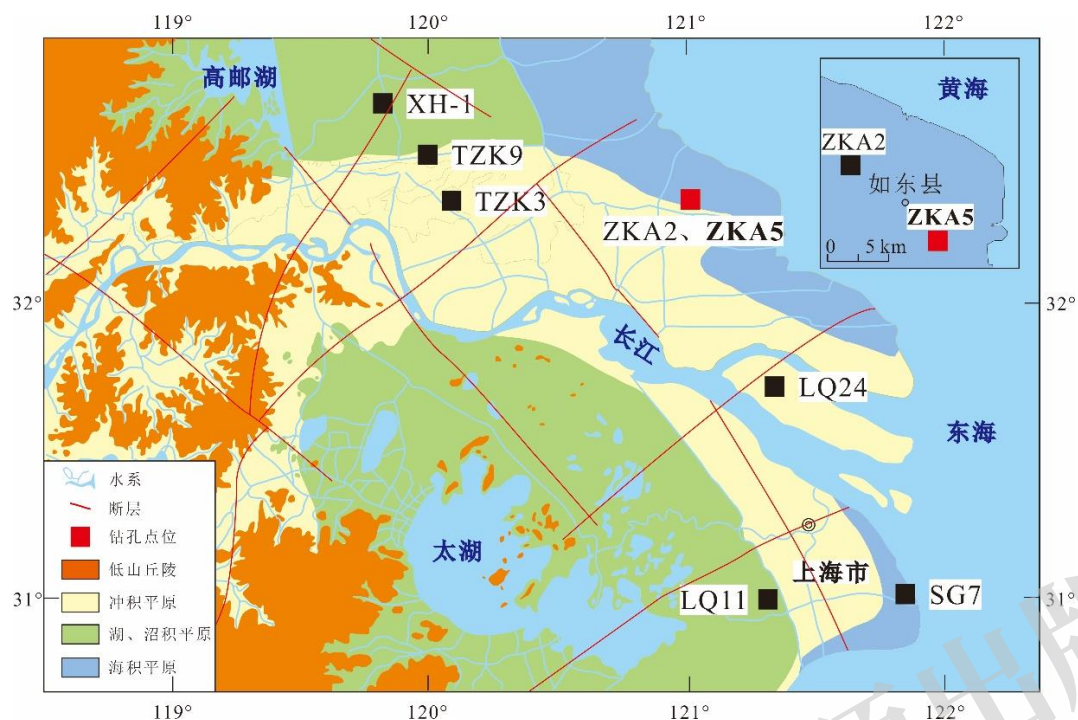


图 1 长江三角洲地区 ZKA5 孔（红色，加粗）和文中引用部分钻孔的分布位置及第四纪地貌图。插图展示 ZKA5 和 ZKA2 孔的具体位置（底图据 Xu et al., 2020 修改）

Figure 1 Topographic map and location (red Square, bold) of the core ZKA5 and other core cited in this study in the Yangtze River Delta. Panel presents the locations of core ZKA5 and ZKA2 (modified from Xu et al., 2020)

表 1 长江三角洲 ZKA5 孔 AMS¹⁴C 年代结果

Table.1 The AMS¹⁴C dating results of core ZKA5 in the Yangtze River Delta

样品编号	样品类型	深度 (m)	年代 (1950 年前)	误差 (年)
BA140058	贝壳	23.60	2560	25
BA140059	炭屑	25.60	5655	25
BA140060	炭屑	27.08	4865	30
BA140061	炭屑	27.60	样品无法满足实验需要	
BA140062	炭屑	27.80	样品无法满足实验需要	
BA140063	炭屑	28.10	样品无法满足实验需要	
BA140064	炭屑	29.15	6300	25

重砂样品主要采集于细砂-含砾粗砂沉积层，共采集样品 122 个（图 2）。样品采集后经自然风干，筛选 500-32 μm 碎屑进行重矿物挑选和鉴定统计。分析测试采用实体显微镜观察和偏光显微镜油浸法，在华东师范大学河口海岸学国家重点实验室完成。该文采用王中波等（2012）的重矿物分类标准，将重矿物分为稳定矿物、闪石类、辉石类、帘石类、铁质金属矿物、变质矿物以及其它类等 7 类。

表 2 长江三角洲 ZKA5 孔岩性描述

Table.2 Lithological description of core ZKA5 in the Yangtze River Delta

岩石地层与时代	单元	深度 (m)	岩性特征	岩石地层鉴定依据
---------	----	--------	------	----------

盐城组 (N ₁₋₂ yc)	1	380-408	灰褐色-杂色黏土	钙质与铁质结核发育，黏土与砂砾石构成沉积旋回，第 5 硬黏土层顶界 267 m。相邻 ZKA2 孔 M/G 界线约 254 m (Xu et al., 2020)
	2	370-380	灰色-灰白色中砂、砂砾石层	
	3	357-370	棕黄色-青灰色-杂色黏土	
	4	338-357	灰黑色-灰黄色粉砂、细砂、含砾粗砂、砾石层	
	5	267-338	棕黄色-黄褐色黏土，偶夹粉砂、细砂、含砾粗砂、砾石层	
	6	238-267	灰黑色-灰黄色-灰褐色粉砂、细砂、中粗砂、含砾粗砂、砾石层	
	7	182-238	灰绿色-黄褐色黏土、含粉砂黏土、含黏土粉砂、粉细砂	
海门组 (Qp ¹ h)	8	159-182	深灰色黏土-粉细砂、细砂、中细砂	黏土、粉砂、砂砾石构成 3 个上细下粗的沉积旋回，第 3 硬黏土层顶界 113 m。相邻钻孔 B/M 界线埋深 (86 m, 舒强, 2010; 90-110 m, Zhang et al., 2013; 85 m, 程瑜等, 2019; 88 m, Xu et al., 2020)
	9	142-159	灰褐色-黄褐色黏土、含粉砂黏土、含黏土粉砂，偶夹粉砂薄层	
	10	129-142	灰黄色-黄褐色黏土、含黏土粉砂	
	11	113-129	青灰色-灰黄色-灰褐色黏土、含黏土粉砂	
启东组 (Qp ² q)	12	91-113	灰色-灰黑色-灰黄色细砂、粗砂、含砾粗砂、砾石层	第 2 硬黏土层顶界 68 m
启东组-昆山组-隔湖组 (Qp ² q-Qp ³ k-Qp ³ g)	13	34-91	灰色-灰黑色-灰褐色黏土、含黏土粉砂、粉砂	海相化石丰富，第 1 硬黏土层顶界 39 m
如东组 (Qhr)	14	1-34	灰色-灰黑色粉砂、细砂，夹黏土薄层	AMS ¹⁴ C 测年结果显示 30 m 以浅属全新统，该层沉积于第 1 硬黏土层之上

3 测试结果

3.1 年代学结果

ZKA5 孔 AMS¹⁴C 年代结果如表 1 所示，其中 3 个样品的含碳量未满足实验需要，因此共获得 4 个有效年龄，其均分布于全新世时段。其中 25.60 m 和 27.08 m 存在年龄倒转的现象（表 1），这可能与底栖生物的扰动有关。岩心描述显示，在 20 至 30 m 段可见较多腹足类和双壳类壳体不均匀分布，这类潜穴生物会将深层较老的沉积物搬运至浅层，造成年龄倒转的现象。

3.2 粒度特征

沉积物粒度以粉砂和砂为主，含量高于 80%，黏土含量普遍低于 20%，局部层段含砾石（图 2）。146 m 以及 290-340 m 段黏土含量相对较高，约 10%-20%，反映较弱的沉积水动力条件。而 106 m、240-260 m 段及 350-380 m 段砾石含量增加，可达 10%-20%，反映较强的沉积水动力条件。平均粒径表示平均粒度大小，反映介质搬运的平均动能条件。由图 2 可以看出，样品平均粒径约 190 μm，主要分布于 10.0~300.0 μm 之间，部分含砾石层位平均粒径超过 1000 μm，整体粒度较粗。中值粒径表示粒径大于和小于该值的颗粒各占 50%，对极端粒径不敏感，反映介质搬运动能的中心趋势。中值粒径整体与平均粒径一致的变化，表明沉积物的粒度分布的对称性和均匀性较好。

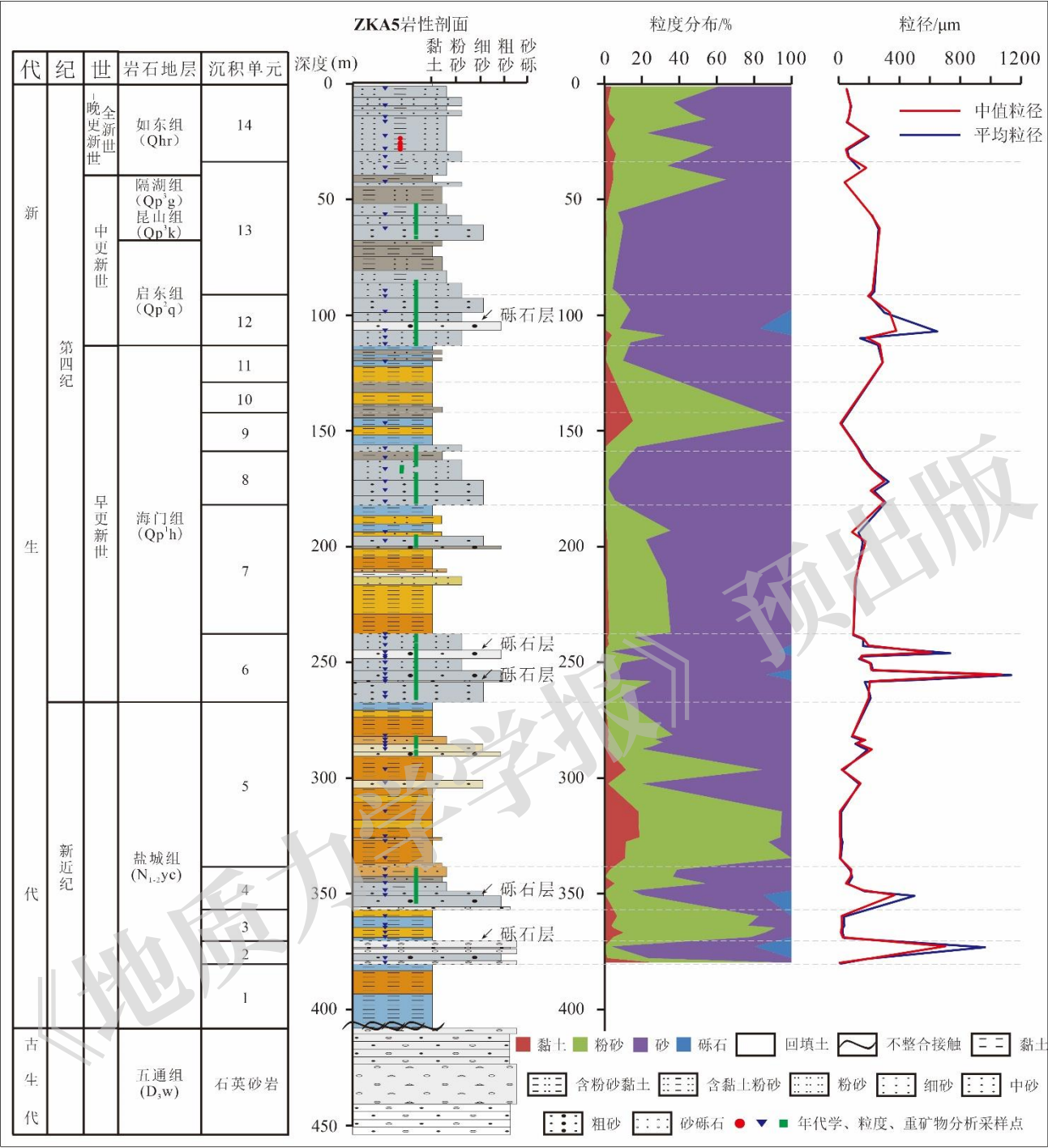


图 2 ZKA5 孔岩性与粒度参数特征

Figure 2 The lithology and grain size parameters of core ZKA5

沉积物的概率累积曲线显示，沉积物中以跳跃组分占主导，部分层位悬浮组分含量较高（图 3a-e）。C-M 图分析表明，沉积单元 1、3、4、5、7、9、10、11、13、14 的样品点落于 SR 区及其下方（C 值介于 1-400 μm，M 值介于 1-20 μm），反映均匀悬浮沉积作用，沉积单元 2、6、8 的样品点分布于 PR 区（C 值介于 30-400 μm，M 值介于 20-30 μm），指示递变悬浮沉积过程（图 3f）。

总体看，黏土、粉砂、砂和砾石的含量与平均粒径、中值粒径在垂向上表现出很好的对应关系仅在各沉积单元界线附近表现出较明显的波动（图 2），表明此时的沉积环境发生了转变。

3.3 重矿物结果

研究区 122 个重砂分析样品采集于河床相沉积物中,共鉴定出 19 种重矿物,其分布层位和含量变化如图 4 所示。其中,稳定矿物包括:锆石、磷灰石、金红石、榍石、电气石、石榴石、独居石、闪石类包括:角闪石、辉石类包括:辉石、帘石类包括:绿帘石、铁质金属矿物包括:赤褐铁矿、钛铁矿、磁铁矿、变质矿物包括:蓝晶石、十字石、铬尖晶石。金属矿物是本区第一优势矿物种,以钛铁矿、磁铁矿为主,少量赤褐铁矿。含量变化范围为 22.87-84.17%,平均含量为 58.57%。帘石类矿物的绿帘石是本区第二优势矿物种,含量变化范围为 4.38-46.11%,平均含量为 15.56%。稳定矿物是本区第三优势矿物种,以锆石、石榴石为主,少量金红石、榍石。含量变化范围为 6.51-29.78%,平均含量为 15.22%。闪石类矿物的角闪石是本区第四优势矿物种,含量为 0-23.52%,平均含量为 4.06%。辉石类矿物的辉石是本区第五优势矿物种,含量为 0-1.68%,平均含量为 0.34%。自生矿物以黄铁矿为主,含量极低,平均约为 0.20%,零星分布于 150 m 以下的深部地层中。

4 讨论

4.1 ZKA5 孔记录的沉积环境演变

根据岩性特征和粒度数据,将 ZKA5 孔岩心 14 个沉积单元划分为 5 个沉积相。

4.1.1 泛滥平原相

单元 1、3 和 5 沉积物以灰褐色、棕黄色、黄褐色及杂色黏土为主,发育大量铁锰质浸染斑块与钙质结核(图 5a),显示出较强的暴露成壤特征。粒度组成以黏土和粉砂为主,总含量约占 75%,砂含量约 15%。概率累积曲线表明,悬浮组分占比超过 80%(图 3e);C-M 图中样品点主要集中于 SR 段,平均粒径(Ma)与中值粒径(Md)介于 10-30 μm (图 3f)。上述特征共同反映出弱水动力条件下的沉积环境,指示该层段属于泛滥平原沉积(刘宪光等, 2023; 江志霖等, 2024)。

4.1.2 河床相

单元 2、4、6、8 及 12 沉积物以灰色、灰黑色及灰黄色的粉砂、细砂、中砂、粗砂、含砾粗砂和砾石层为主。垂向上表现出典型的二元沉积结构,粒度整体向上变细,可见多组由细砂与含砾粗砂构成的沉积旋回(图 5b),底部发育冲刷面(Miall, 1977; Halfar et al., 1998),但受河道摆动、冲刷影响,上部细粒沉积较薄。砾石大小不一,分选性与磨圆度较差,多呈次棱角至次圆状,为典型河床沉积的标志。粒度组成以砂为主,含量约 80%,含少量砾石(图 2)。概率累积曲线显示跳跃组分占比超过 90%(图 3c);C-M 图中样品点主要落在 SR 至 PR 段, Ma 和 Md 介于 50-1200 μm (图 3f)。上述特征一致指示该类单元形成于强水动力条件下的河床沉积环境(江志霖等, 2024)。

4.1.3 河漫滩相

单元 7、9 和 11 沉积物以灰绿色、灰褐色及黄褐色的黏土、含粉砂黏土、含黏土粉砂和粉砂为主。发育水平层理,局部见低角度单斜层理,部分层位可见显著铁质浸染(图 5c),反映了较强的水动力条件与间歇性暴露环境。粒度组成以粉砂和砂为主,含量分别约为 30%与 65%(图 2)。概率累积曲线显示悬浮组分约占 30%,跳跃组分约占 70%(图 3d);C-M 图中样品点主要分布于 SR 段, Ma 和 Md 介于 80-130 μm (图 3f)。上述沉积结构与粒度特征共同指示该类单元形成于水动力较强的河漫滩环境(马雪等, 2015)。

4.1.4 三角洲平原相

单元 10 和 13 沉积物以灰黑色至灰黄色的黏土、含黏土粉砂及粉砂为主,发育水平层理,未见暴露标志,含完整的贝壳、螺壳和碳化木屑等海相与陆相生物化石(图 5d)。粒度组成以砂为主,含量约 90%(图 2)。概率累积曲线显示悬浮组分约占 10%,跳跃组分约占 90%(图 3b);C-M 图中样品点主要分布于 SR 段, Ma 和 Md 介于 180-270 μm (图 3f)。上述沉积构造、生物组合与粒度特征共同反映较强水动力条件下的沉积环境,指示其为三角洲平原沉积(张辉等, 2017; 罗浩渝等, 2021)。

4.1.5 潮间带相

单元 14 沉积物以灰色至灰黑色粉砂和细砂为主,夹有黏土薄层,发育水平层理与波状层理,并含较多完整贝壳、螺壳等生物遗存(图 5e),为典型的潮间带沉积标志。粒度组成以粉砂(约 45%)和砂(约 50%)为主,黏土含量较低(图 2)。概率累积曲线显示悬浮组分与跳跃组分占比相近,各约占 50%(图 3a);C-M 图中样

品点主要分布于 SR 段, Ma 和 Md 介于 $50\text{--}80\text{ }\mu\text{m}$ (图 3f)。上述沉积构造、生物组合与粒度特征共同反映了一种砂泥互层、中等水动力条件下的沉积环境, 指示其属于潮间带相 (程瑜等, 2018; 陈嘉诺等, 2024)。

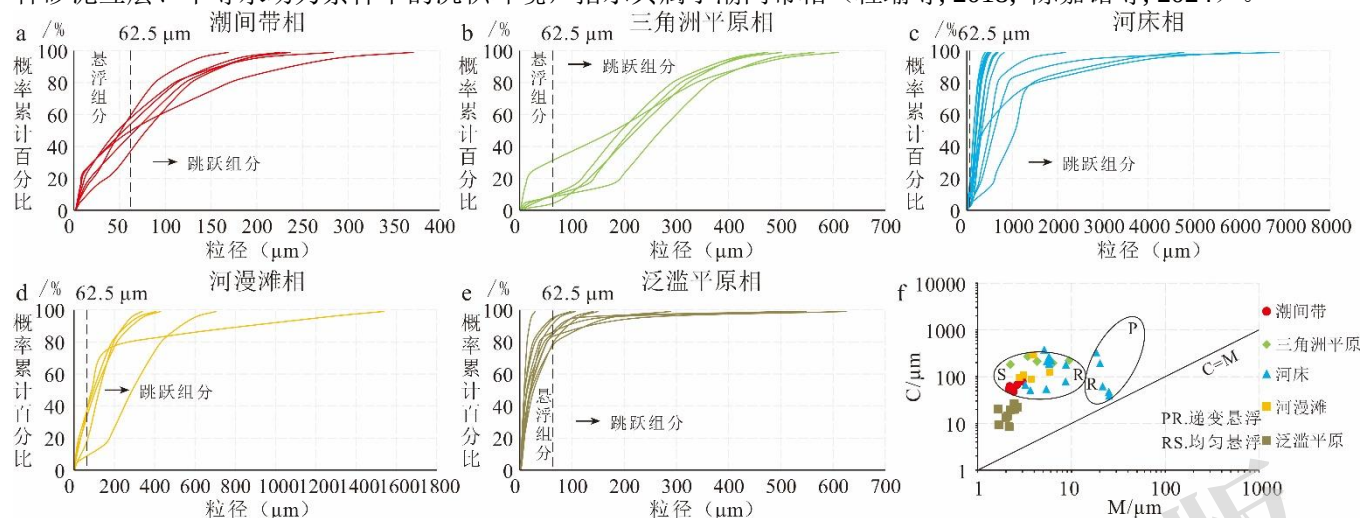


图 3 ZKA5 孔概率累计曲线图与 C-M 图。a-潮间带相; b-三角洲平原相; c-河床相; d-河漫滩相; e-泛滥平原相; f-C-M 图

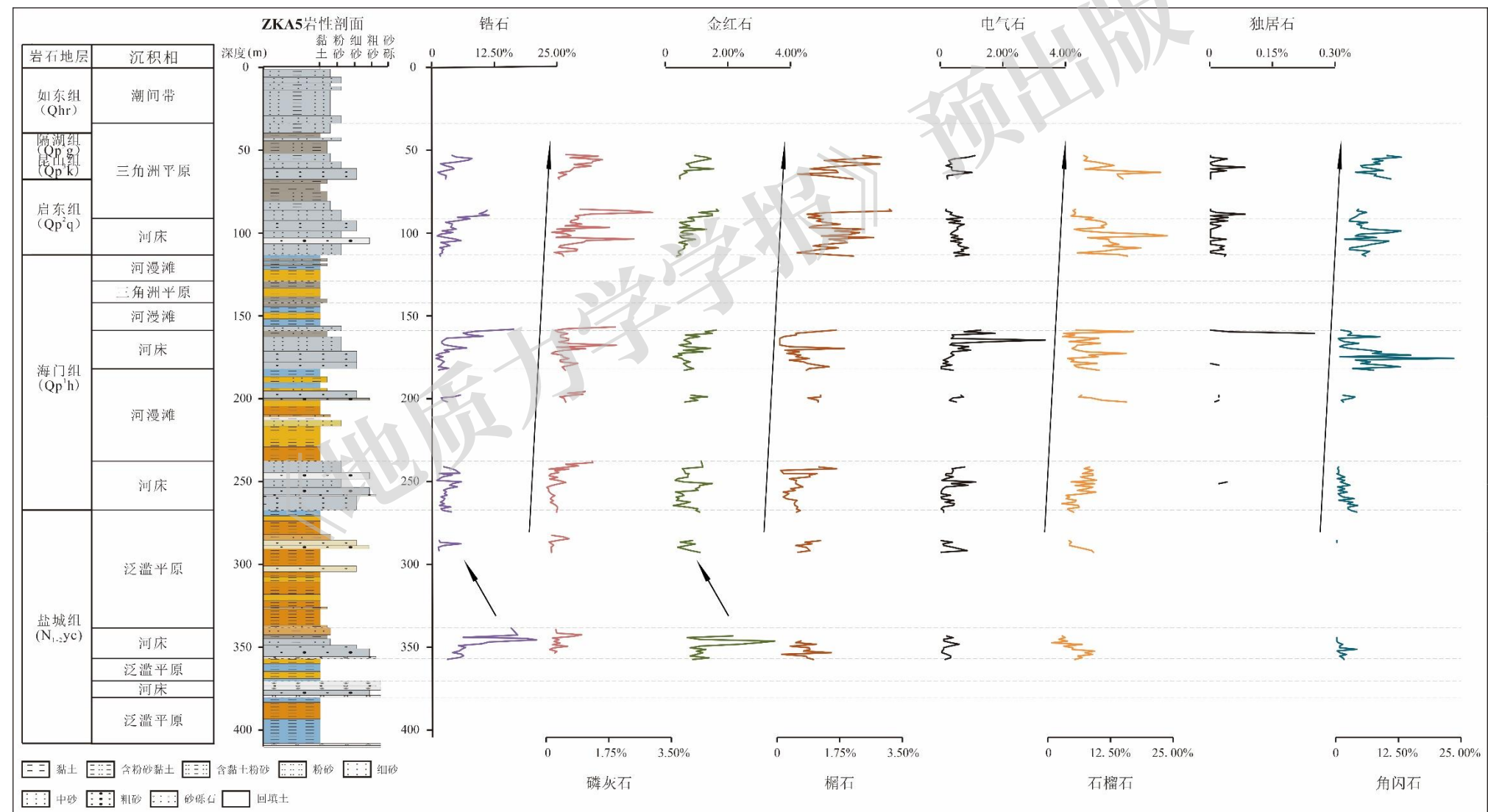
Figure 3 Probability cumulative curves and C-M diagram of samples from core ZKA5. a- intertidal face; b- delta plain face; c- channel face; d- floodplain face; e- alluvial plain face; f-C-M diagram

4.2 ZKA5 孔河床相沉积物的重矿物来源

特定矿物间的共生关系使得重矿物组合对物源变化较为敏感 (赖佩欣, 2016; 宁泽等, 2022)。图 6 显示, ZKA5 孔河床相沉积物中重矿物以钛铁矿, 绿帘石, 磁铁矿为主, 其次为锆石、赤褐铁矿和石榴石。其中钛铁矿和磁铁矿主要产于与基性-超基性岩浆作用相关的火成岩中, 如辉长岩、玄武岩 (Morton et al., 2005; 岳伟等, 2024)。绿帘石主要产于区域变质作用相关的变质岩中, 如绿片岩、矽卡岩等 (Morton et al., 2005; 岳伟等, 2024)。锆石极其稳定, 分布极为广泛, 作为副矿物几乎分布于所有主要岩石类型中。赤褐铁矿属含铁矿物在富氧条件下变化的产物 (陈静等, 2007)。石榴石主要产于变质岩和部分火成岩, 如片岩、片麻岩、花岗岩等 (岳伟等, 2024)。上述重矿物组合特征表明 ZKA5 孔沉积物来源不仅有基性岩浆岩, 还有中酸性岩浆岩, 和一定比例的变质岩。

已有研究表明, 长江中下游流域源岩类型主要为中酸性岩浆岩和变质岩类, 流域沉积物的重矿物组合主要为角闪石-绿帘石-磁性矿物-褐铁矿-石榴石, 且角闪石为绝对优势矿物 (表 3, Vezzoli et al., 2016; 王孟瑶等, 2019; 李姝睿等, 2022; 刘桃等, 2025)。不同于长江中下游流域, 淮河中上游流域北部源岩类型主要为基性岩浆岩和变质岩类 (表 3, 赖绍聪等, 1997; 江来利和胡召齐, 2014; 王孟瑶, 2019), 流域沉积物重矿物组合主要为钛铁矿-磁铁矿-绿帘石-石榴石-赤褐铁矿-锆石, 金属矿物为绝对优势矿物 (表 3, 高文华等, 2015), 南部源岩类型与长江中下游流域一致, 主要为中酸性岩浆岩和变质岩类 (表 3, Yang et al., 2009)。而淮河下游流域沉积物中的重矿物组合主要为赤褐铁矿-绿帘石-榍石-石榴石-钛铁矿 (表 3, 高文华等, 2015)。通过对比 ZKA5 孔河床相沉积物的重矿物组合与长江中下游、淮河流域的源岩类型及沉积物重矿物组合特征, 发现其与淮河中上游北部流域源岩和沉积物的重矿物组合特征最为接近, 而与长江中下游流域源岩和沉积物及淮河下游流域沉积物存在明显差异。这表明研究区河床相沉积物主要源自淮河中上游北部流域, 同时可能伴随有长江中下游及淮河中上游南部流域物质的少量汇入。该结果也得到了位于研究区西北部淮河流域的 JH 孔 (180-268 m) 和 TZK9 孔 (新近纪晚期沉积物) 重矿物组合的支持 (郑良烁, 2013; 程瑜等, 2016)。

这两种矿物在 350-250 m 段比例的降低, 可能与长江中下游流域和/或淮河中上游南部流域的物源输入比例下降有关。然而, 在该深度段, 仅锆石和金红石的比例降低, 而长江中下游流域沉积物的特征重矿物 (如角闪石、榍石、磷灰石、石榴石等, 宋召军等, 2015; Vezzoli et al., 2016; 骆丁等, 2016; 王孟瑶等, 2019; 李姝睿等, 2022) 并无明显变化, 表明这一变化并非由长江中下游流域的物源输入变动所致。已有研究表明, 淮河中上游南部流



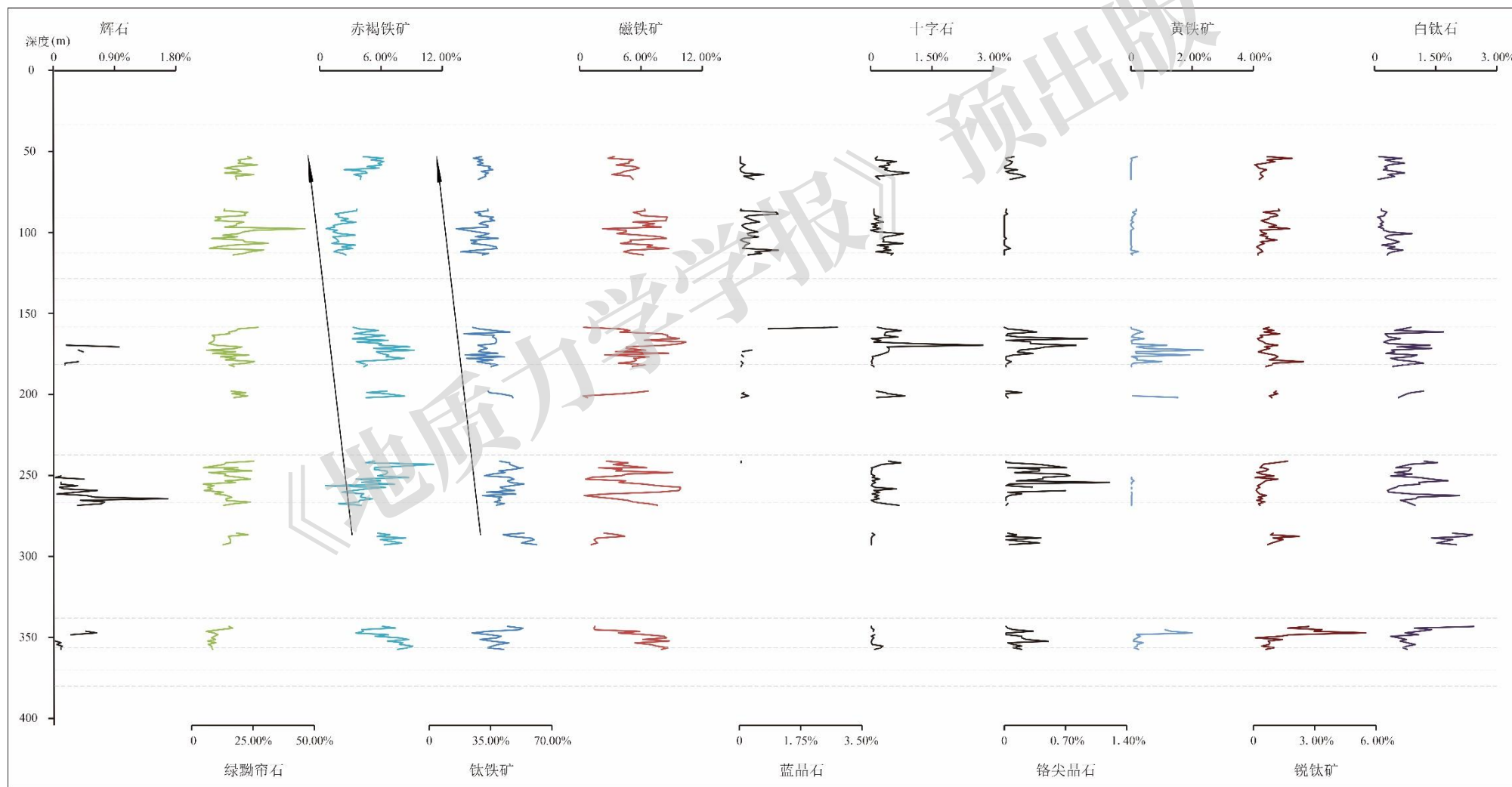


图 4 ZKA5 孔重矿物图谱

Figure 4 Heavy mineral spectrum of core ZKA5

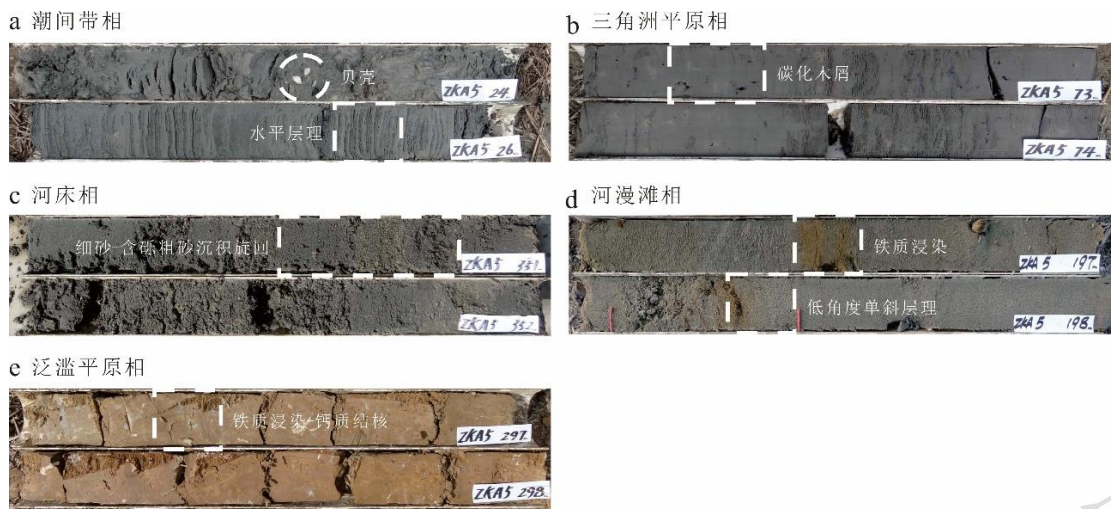


图 5 ZKA5 孔典型岩心照片及沉积特征。a-潮间带相；b-三角洲平原相；c-河床相；d-河漫滩相；e-泛滥平原相
Figure 5 Photographs of typical cores and sedimentary characteristics of core ZKA5. a- intertidal face; b- delta plain face; c- channel face; d- floodplain face; e-alluvial plain face

表 3 ZKA5 孔河床相沉积物重矿物潜在来源地区的源岩类型和沉积物重矿物特征对比

Table.3 A comparison of heavy mineral characteristics and source rock types in potential provenance areas of the ZKA5 core channel sediments

	长江中下游流域	淮河中上游流域北部	淮河中上游流域南部	淮河下游流域
源岩类型	中酸性岩浆岩和变质岩类	基性岩浆岩和变质岩类	中酸性岩浆岩和变质岩类	沉积岩类
沉积物重矿物组成	角闪石-绿帘石-磁性矿物-褐铁矿-石榴石	钛铁矿-磁铁矿-绿帘石-石榴石-赤褐铁矿	角闪石-绿帘石-磁性矿物-褐铁矿-石榴石	赤褐铁矿-绿帘石-石榴石-石榴石-钛铁矿
特征重矿物	角闪石、石榴石和电气石 新近纪晚期	钛铁矿、磁铁矿	角闪石、石榴石和电气石 第四纪以来	赤褐铁矿

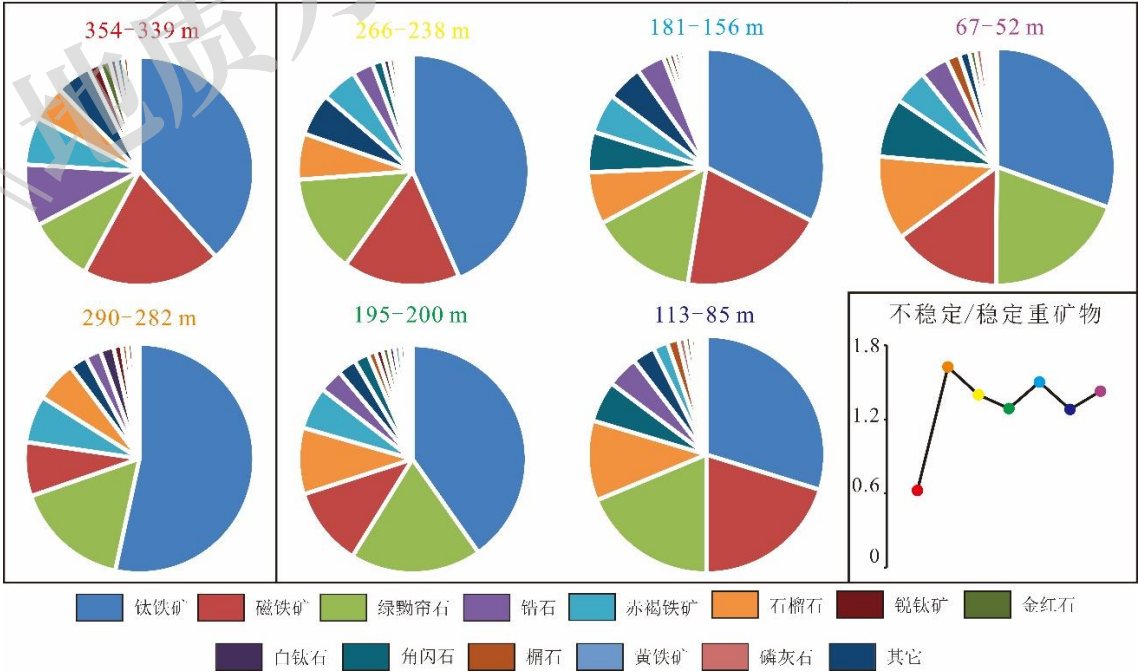


图 6 ZKA5 孔不同深度河床相沉积物的重矿物比例饼状图和不稳定与稳定重矿物比值曲线

Figure 6 Pie charts showing the proportions of heavy minerals and the curve of the ratio of unstable to stable heavy minerals in channel sediments at different depths of core ZKA5

域的大别造山带内发育大型金红石矿床（如河南省方城县、泌阳县及安徽省岳西县等，徐少康, 1999; 王立平等, 2007; 郑明辉等, 2025），该区域出露的大量三叠纪和侏罗纪碎屑岩中锆石含量也十分丰富（比例约 10%，张妍等, 2017; 李超和胡修棉, 2022），二者均为沉积物重矿物的重要来源。因此，350-250 m 段锆石和金红石比例的降低，应与淮河中上游南部流域物源输入比例下降有关。角闪石和榍石主要来自中酸性岩浆岩（张风艳和孟翊, 2011; 宋召军等, 2015），而淮河中上游北部流域源岩类型主要为基性岩浆岩和变质岩类，因此第四纪以来角闪石和榍石输入比例的增加表明并非淮河中上游北部流域的物源变化引起。同时，长江中下游流域特征重矿物比例的持续增加，指示了该流域物源输入比例的增加。综上所述，新近纪晚期（350-250 m 段）锆石和金红石比例的降低，与淮河中上游南部流域物源输入比例的逐渐降低有关；进入第四纪以来（250 m 以浅），磷灰石，榍石，石榴石和角闪石比例的增加与长江中下游流域物源输入比例逐渐增加有关。此外，第四纪以来赤褐铁矿和钛铁矿输入比例的降低，也表明来自淮河中上游北部流域基性岩浆岩的物源比例逐渐降低。综合 ZKA5 孔河床相沉积物重矿物随深度的变化分析可以看出，虽然淮河中上游北部流域一直是该岩心河床沉积物的主要物质来源，但第四纪以来，沉积物源输入比例发生转变，来自淮河中上游流域的物源比例有所降低，相反，来自长江中下游流域的物源比例持续增加。这种沉积物源的变化也记录在邻近钻孔的同期层位。例如，上海市 SG07 孔在第四纪之初物源由周边玄武岩转变为贫铁的中酸性浅成岩或喷出岩（王张华等, 2008）。兴化市 XH-1 孔在 2.32-2.13 Ma 也记录到长江中下游物源比例的明显增加（舒强等, 2006）。泰州市 TZK9 孔在第四纪初期以淮河流域沉积物为主，而后开始受到长江流域的影响（程瑜等, 2016）。

4.3 新生代以来长江三角洲北翼地区重矿物来源变化的驱动机制

沉积物中重矿物组成的变化受物源、风化、搬运和成岩等多阶段过程的综合控制。首先，物源区源岩性质及构造背景决定了重矿物的初始组合，其改变可导致沉积序列中重矿物组成的显著突变。其次，地表风化作用会优先分解不稳定矿物（如闪石类、帘石类和辉石类矿物），使稳定矿物（如锆石、金红石）及风化次生产物（如赤褐铁矿）相对富集（Morton and Hallsworth, 1999; 梁文栋和胡修棉, 2023; 张欣蓓等, 2025）。此外，搬运与沉积过程中的水动力分选会按矿物密度与粒度进行筛选，在高压环境下密度较大的重矿物（如钛铁矿、锆石）更易富集（Morton and Hallsworth, 1999; 梁文栋和胡修棉, 2023; 张欣蓓等, 2025）。最后，埋藏成岩作用可进一步改造矿物组成，既可能消解不稳定矿物，仅保留稳定组合，也可能在特定地球化学条件下形成自生重矿物（如黄铁矿，Morton and Hallsworth, 1999; 梁文栋和胡修棉, 2023）。

ZKA5 孔由深至浅的河床相沉积物中，重矿物种类基本一致，表明物源区未发生根本性改变。然而，各类矿物之间的相对比例存在明显变化，反映不同源区输入比例发生调整或有新的物源加入，这可能与区域构造活动有关。此外，新近纪晚期江淮地区水热条件优越，进入第四纪后水热条件迅速恶化（Lu et al., 2021; Lu et al., 2022）。与之对应，不稳定矿物与稳定矿物的比值在新近纪晚期偏低，而在第四纪以来高位波动，表明风化作用也可能是控制重矿物组成变化的重要因素。

本研究所有样品均取自河床相沉积，除个别含砾石样品外，平均粒径和中值粒径主要分布于 100-300 μm 间（图 2），表明样品沉积时的平均水动力条件相对一致，因此水动力分选的影响可忽略。此外，自生黄铁矿仅为零星出现，垂向上无明显变化趋势，表明成岩作用对重矿物组成的影响也不显著。综上所述，ZKA5 孔河床相沉积物重矿物组成比例的变化，最可能与区域构造活动引起的物源输入比例调整和/或气候变化导致的风化作用有关。

新生代早期，研究区持续隆升，古近纪地层普遍缺失，导致新近纪地层不整合覆盖于古生代及中生代基岩之上。长江三角洲岩心记录中普遍存在的侏罗系和/或白垩系与新近系和/或第四系之间的不整合面，也表明该区在新生代早期长期处于构造隆起状态（陈中原和杨文达, 1991）。新近纪晚期，中国东部的主要沉积中心位于苏北盆地，堆积了厚达数百米的陆相沉积；而长江三角洲地区仍为一块隆起的高地，仅零星发育极薄的古近纪陆相层（陈中原和杨文达, 1991; Chen and Stanley, 1995）。由此可见，新近纪晚期苏北盆地整体海拔相对较低，长

江三角洲主要为剥蚀区。进入第四纪后,受喜马拉雅运动的影响,中国东部沿海发生区域性沉降,沉积中心随之由苏北盆地向南迁移至长江三角洲地区(Chen and Stanley, 1995; 顾家伟, 2015; Yue et al., 2018; 岳伟等, 2024)。这一构造格局的转变,使得淮河中上游流域相对研究区的地势高差减小,从而切断了淮河中上游南部流域物质与研究区的联系,并抑制了淮河中上游北部流域向研究区的物质输送。相比之下,长江中下游流域相对研究区的海拔显著抬升(郑家欣和周积元, 1986),加之长江中下游古河道逐渐南移,更有利于该流域物质的侵蚀及其向研究区的输送(图 7a)。

此外,新近纪晚期受赤道太平洋低温度梯度影响,江淮地区降水量丰富(Lu et al., 2021)。丰富的降水增强了区域风化强度,有利于不稳定矿物的分解和稳定矿物的保存,导致研究区新近纪晚期河道相沉积物中稳定矿物锆石和金红石相对富集。随后,第四纪初青藏高原的剧烈隆升重塑了大气环流格局,对全球及区域气候产生了深远影响(Lisiecki and Raymo, 2005; Gibbard and Head, 2010)。沉积记录表明,全球冰量增加导致东亚夏季风持续减弱,降水量减少(Ding et al., 2005)。孢粉资料进一步显示,第四纪以来江淮地区乔木孢粉比例呈低位波动,反映了降水贫瘠(图 7b, Zhang et al., 2013)。这种不利的水热条件一方面不利于流域内的水土保持,可能促进长江中下游物质向研究区的输入;另一方面有利于不稳定矿物的保存,从而提高第四纪以来研究区河道相沉积物中不稳定矿物与稳定重矿物的比值(图 6)。

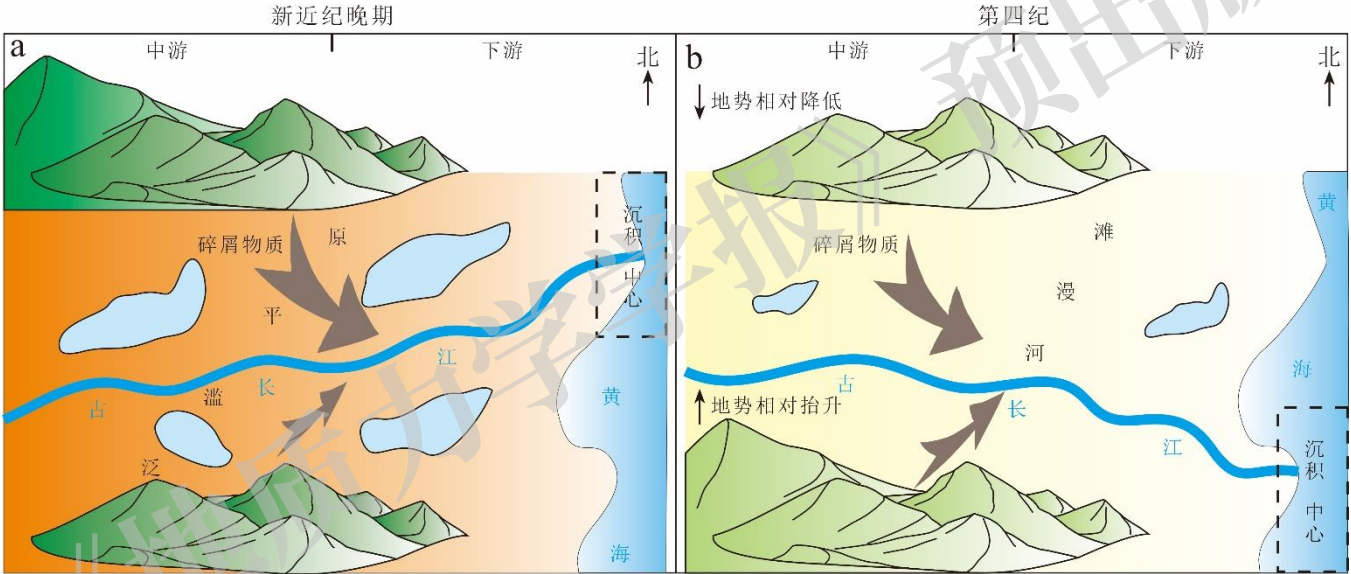


图 7 长江三角洲北翼新近纪晚期-第四岩相古地理图与物源运输模式图

Figure 7 Late Neogene-Quaternary lithofacies paleogeographic map of the northern Yangtze River Delta and provenance transport model map of the study area

综上所述,通过对 ZKA5 孔河床相沉积物的重矿物组成及其比例随深度的分析,本研究发现长江三角洲地区新生代晚期以来沉积物源主要来自淮河中上游北部流域,但自第四纪初期,来自淮河中上游流域的物源比例有所降低,长江中下流域的物源比例持续增加,这与第四纪以来长江三角洲地区转变为区域沉积中心有关,研究区降水量的变化也对沉积物的重矿物组成起到重要的改造作用,体现了构造活动和气候变化对区域侵蚀-沉积-改造耦合过程的关键作用。

5 结论

此次研究基于长江三角洲北翼南通市 ZKA5 孔上部 408 m 未固结沉积物,通过系统岩性观察与粒度和重矿物分析,重建了南通地区新生代晚期以来的沉积环境演化序列与河床相沉积物的物源变迁历史。研究发现:

(1) 该区新生代晚期地层包括盐城组、海门组、启东组、昆山组、溇湖组和如东组共 6 个单元,共发育泛滥平原、河床、河漫滩、三角洲平原以及潮间带相等 5 种沉积相类型。

(2) ZKA5 孔河床相沉积物的重矿物组合以金属矿物钛铁矿、磁铁矿和赤褐铁矿为主, 其次为变质矿物绿帘角闪石和石榴石。以金属矿物为主导的重矿物组合特征表明, 新生代晚期以来河床相沉积物主要源自淮河中上游北部流域。

(3) 在第四纪初期, 长江三角洲地区沉积物中锆石、金红石和金属重矿物比例降低, 角闪石、榍石和石榴石的比例持续增加, 表明淮河流域物源贡献相对减少, 而长江中下游物源比例持续增加。这一重矿物成分的转变与第四纪以来中国东部沿海地区大范围沉降, 长江三角洲地区转变为区域沉积中心, 区域气候条件恶化有关, 这一过程伴随着长江中下游流域周边山体剥蚀作用的增强, 风化作用减弱。

References

- AN Y H, LIU J, ZHANG J Q, et al., 2020. Comparative researches on the provenance indicators of Huaihe River, Yangtze River and Yellow River sediment[J]. *Quaternary Sciences*, 40(3): 837-850. (in Chinese with English abstract)
- CHEN J, WANG Z, WANG Z H, et al., 2007. Heavy mineral distribution and its provenance implication in late Cenozoic sediments in western and eastern area of the Changjiang River delta[J]. *Quaternary Sciences*, (05): 50-58. (in Chinese with English abstract)
- CHEN J F, LI C, GALY A, et al., 2024. Uranium-series comminution ages constrain large catchment erosion and its response to climate change: A case study from the Changjiang[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 625: 118493.
- CHEN J N, SUN G Y, WEN Y X, et al., 2024. Grain sizes characteristics of sediments from QDQ2 borehole in the Yangtze River Delta since the Late Pleistocene and their paleoenvironmental significance [J]. *East China Geology*, 45(4): 466-477. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Z Y, SONG B P, WANG Z H, et al., 2000. Late Quaternary evolution of the sub-aqueous Yangtze Delta, China: sedimentation, stratigraphy, palynology, and deformation[J]. *Marine geology*, 162(2-4): 423-441.
- CHEN Z Y, STANLEY D J, 1995. Quaternary Subsidence and River Channel Migration in the Yangtze Delta Plain, Eastern China[J]. *Journal of Coastal Research*, 11(3), 927-945.
- CHEN Z Y, YANG W D, 1991. Quaternary paleogeography and paleoenvironment of Changjiang river estuarine region [J]. *Acta Geographica Sinica*, 46(4), 436-448. (in Chinese with English abstract)
- CHENG Y, LI X Q, ZHANG P, et al., 2019. Revision of the early Pleistocene lithostratigraphy in the northern Yangtze River delta[J]. *Journal of Stratigraphy*, 43(1): 89-95. (in Chinese with English abstract)
- CHENG Y, LI X Q, ZHAO Z Y, et al., 2016. Magnetostratigraphy and heavy minerals records of TZK9 core in Subei basin[J]. *Journal of Geomechanics*, 22(4): 10. (in Chinese with English abstract)
- CHENG Y, LI X Q, ZHAO Z Y, et al., 2018. Detrital zircon U-Pb ages and its provenance significance in the TZK3 core from the Yangtze River delta[J]. *Journal of Geomechanics*, 24(5): 635-644. (in Chinese with English abstract)
- DENG C W, ZHANG X, LIN C M, et al., 2016. Grain-size characteristics and hydrodynamic conditions of the Changjiang estuarine deposits since last glacial[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 36(6): 185. (in Chinese with English abstract)
- DING D L, ZHANG X H, YU J J, et al., 2019. Sediment grain size distribution patterns of the late Quaternary on the back side of northern Yangtze River delta and their environmental implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 39(4): 34-45. (in Chinese with English abstract)
- DING Z L, DERBYSHIRE E, YANG S L, et al., 2005. Stepwise expansion of desert environment across northern China in the past 3.5 Ma and implications for monsoon evolution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 237: 45-55.
- GAO S, 2025. On integrated modeling of tidal flat environments based on the systems theory[J]. *East China Geology*, 46(4): 429-437. (in Chinese with English abstract)

- GAO W H, GAO S, WANG D D, et al., 2015. Sediment Source Information of Different Catchments in the Sedimentary Records of the Abandoned Yellow River: Heavy Mineral and Geochemical Analyses[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 35(12): 9. (in Chinese with English abstract)
- GIBBARD P L, HEAD M J, 2010. The newly-ratified definition of the Quaternary System/Period and redefinition of the Pleistocene Series/EPOCH, and comparison of proposals advanced prior to formal ratification[J]. *Episodes*, 33: 152-158.
- GU J W, 2015. Analysis of the Main Control Factors on Neogene Hydrocarbon Accumulation in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 34(1), 6. (in Chinese with English abstract)
- GU J W, 2018. Geochemical finger prints on China's Yangtze River channelization into the sea and its provenance implications [J]. *Advances in Earth Science*, 33(5): 506-516. (in Chinese with English abstract)
- HALFAR J, RIEGEL W, WALTHER H, 1998. Facies architecture and sedimentology of a meandering fluvial system: a Palaeogene example from the Weissenhofer Basin, Germany[J]. *Sedimentology*, 45(1): 1-17.
- HORI K, SAITO Y, ZHAO Q H, et al., 2002. Architecture and evolution of the tide-dominated Changjiang (Yangtze) River delta, China[J]. *Sedimentary Geology*, 146(3-4): 249-264.
- HUANG X T, ZHENG H B, YANG S Y, et al., 2009. Investigation of sedimentary geochemistry of core DY03 in the Yangtze Delta: implications to tracing provenance[J]. *Quaternary Sciences*, 29(2): 299-307. (in Chinese with English abstract)
- JIANG L L, HU Z Q, 2014. Metamorphic stratigraphic framework in the eastern part of the Dabie MT.[J]. *Geology of Anhui*, (01): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- JIANG R, YU J J, LAO J X, et al., 2015. Characteristics and Implications of the Quaternary Magnetostratigraphy in Borehole ZKA4 from the Northern Flank of Yangtze River delta[J]. *Geological survey of China*, 2(7): 30-34. (in Chinese with English abstract)
- JIANG Z L, MAO L J, WANG T, et al., 2024. Grain size end-member analysis in sediments from ZK3 borehole and its responses to climate-sea level in Hangjiahu Plain, China[J]. *Journal of Earth Environment*, 15(2): 306-316, 341. (in Chinese with English abstract)
- LAI P X, 2016. Application of Heavy Minerals in Analysis of Source and Sedimentary Environment of Surface Sediment[J]. *Geological south China sea*, (1): 146-150. (in Chinese)
- LAI S C, ZHANG G W, DONG Y P, 1997. The Geochemistry and Geotectonic Significance of the Zhejiawangyan Variegated Basalt in the Qinling-Dabie Mountains Area of Suizhou[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 04: 77-77. (in Chinese)
- LI C, HU X M, 2022. The Earliest Denudation Record of the Dabie Orogenic Belt Evidenced from the Middle Triassic Huangmaqing Formation in the Ningwu Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, (004): 028. (in Chinese with English abstract)
- LI S R, SUN G Y, MAO C P, et al., 2022. The Provenance Analysis of Radial Sand Ridges off the Jiangsu Coast, East China -Evidence from the heavy mineral compositions and zircon geochronology[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, (004): 040. (in Chinese with English abstract)
- LI C X, CHEN Q Q, ZHANG J Q, et al., 2000. Stratigraphy and paleoenvironmental changes in the Yangtze Delta during the Late Quaternary[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(4): 453-469.
- LI C X, WANG P, SUN H P, et al., 2002. Late Quaternary incised-valley fill of the Yangtze delta (China): its stratigraphic framework and evolution[J]. *Sedimentary Geology*, 152(1-2): 133-158.
- LI G M, JIN W T, XIAO G Q, et al., 2024. An integrated chronological study on the Quaternary sedimentary sequences of the Yangtze River delta, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 641: 112135.

- LIANG W D, HU X M, 2023. Research progress of sand composition in modern river sediments[J]. *Acta Geologica Sinica*, 97(9):2975-2991. (in Chinese with English abstract)
- LISIECKI L E, RAYMO M E, 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records[J]. *Paleoceanography*, 20: PA1003.
- LIU L, 2012. Establishment of the Quaternary 3D model and analysis in Nantong city[D]. China University Geosciences (Beijing). (in Chinese)
- LIU T, LIAO S B, SHAO W, et al., 2025. Research on the pore structure of Gufeng Formation shale in the Lower Yangtze area based on fractal theory[J]. *East China Geology*, 46(2): 238-251. (in Chinese with English abstract)
- LIU X G, YANG J W, JIANG R, et al., 2023. Evolution of sedimentary environment at the ZKA01 borehole in the north wing of the Yangtze River Delta since late Quaternary[J]. *Journal of Geomechanics*, 29(6): 856-868. (in Chinese with English abstract)
- LI Z T, FU X W, DONG Z H, et al., 2025. Revealing the evolutionary history of the Yangtze River based on sediments provenance in the middle and lower reaches and offshore regions: progress, challenges and prospects[J]. *East China Geology*, 46(2): 171-190. (in Chinese with English abstract)
- LU H, LIU W, YANG H, et al., 2022. Decoupled land and ocean temperature trends in the early-middle Pleistocene[J]. *Geophysical Research Letters*, 49(17): e2022GL099520.
- LU J, YANG H, GRIFFITHS M L, et al., 2021. Asian monsoon evolution linked to Pacific temperature gradients since the Late Miocene[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 563: 116882.
- LUO H Y, CHEN J, ZHANG X Q, et al., 2021. Sedimentary characteristics of fluvial dominated shallow water delta front and its control on lithologic reservoir: A case study of Baxigai Formation in south slope of Kuqa Depression[J]. *Lithologic Reservoirs*, 33(5): 70-80. (in Chinese with English abstract)
- MA X, YU J J, JIANG R, et al., 2015. Grain-size analysis of the Quaternary sediments in borehole ZKA4 in the Yangtze River delta and its paleoenvironment and paleoclimate implications[J]. *Journal of Stratigraphy*, 39(4): 423-432. (in Chinese with English abstract)
- MIALL A D, 1977. A review of the braided-river depositional environment[J]. *Earth-Science Reviews*, 13(1): 1-62.
- MIAO Q Y, ZHANG P, PAN M B, et al., 2019. Evolution characteristics of Neogene sedimentary environment and the Yangtze River channel, Jiangsu Province [J]. *Shanghai Land & Resources*, 40(3): 59-66. (in Chinese with English abstract)
- MORTON A C, HALLSWORTH C R, 1999. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones[J]. *Sedimentary geology*, 124(1-4): 3-29.
- MORTON A C, WHITHAM A G, FANNING C M, 2005. Provenance of Late Cretaceous to Paleocene submarine fan sandstones in the Norwegian Sea: integration of heavy mineral, mineral chemical and zircon age data[J]. *Sedimentary Geology*, 182(1-4): 3-28.
- NING Z, XU L, LIN X H, et al., 2022. Distribution and provenance of detrital minerals in surface sediments of the northeastern East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 42(5): 58-69. (in Chinese with English abstract)
- PAN D D, WANG Z H, 2020. A comparative study on the Late Quaternary stratigraphic architecture and formation of megadeltas in East and South Asia[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 40(1): 12-21. (in Chinese with English abstract)
- SHU Q, LI J J, ZHAO Z J, et al., 2006. A Correlation between Magnetic Susceptibility and the Content of Different Grain Sizes of XH-1# Core in North Jiangsu Basin and Its Significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(2): 6. (in Chinese with English abstract)

- SHU Q, XIAO J Y, ZHAO Z J, et al., 2010. Environmental records in XH-1core in northern Jiangsu basin since about 780 ka B.P.[J]. *Journal of Stratigraphy*, (1): 8. (in Chinese with English abstract)
- SONG Z J, GAO L, GU Z K, et al., 2015. Identification of the Yangtze River and the Yellow River Paleochannels in the South Yellow Sea Shelf[J]. *Marine Sciences*, 39(01): 126-130. (in Chinese with English abstract)
- VEZZOLI G, GARZANTI E, LIMONTA M, et al., 2016. Erosion patterns in the Changjiang (Yangtze River) catchment revealed by bulk-sample versus single-mineral provenance budgets[J]. *Geomorphology*, 261(15): 177-192.
- WANG A J, YE X, ZHANG X F, et al., 2025. Erosion-Accretion Patterns and Driving Mechanisms of Tidal Flats along the East China Coast[J]. *East China Geology*, 46(4): 438-450.
- WANG L P, GAO Q, WANG W Q, et al., 2007. Resource State of Rutile Mineral in Henan Province[J]. *Rare Metals Letters*, 26(006): 18-20. (in Chinese with English abstract)
- WANG M Y, JIN B F, YUE W, 2019. Patterns of heavy mineral combination in different grain-size categories and their sedimentary significance: A case study for surficial sediments in the Changjiang River Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 41(11): 12. (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.
- WANG Z H, ZHANG D, LI X, et al., 2008. Magnetic properties and relevant minerals of late Cenozoic sediments in the Yangtze River delta and their implications[J]. *Chian Geology*, 35(4): 670-682. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z B, YANG S Y, ZHANG Z X, et al., 2012. The heavy mineral assemblages of the surface sediments on the northeast shelf of the East China Sea and their environmental implication[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 34(6): 12. (in Chinese with English abstract)
- WU B Y, 1987. Quaternary Geology of the Yangtze River Delta[M]. The 1st Hydrogeological and Engineering Geology Team of the Jiangsu Provincial Geological Survey Bureau. (in Chinese)
- XU S K, 1999. Review the 50 years of Chinese rutile minerals exploration and research[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 21(3): 188-192. (in Chinese with English abstract)
- XU Y C, JIANG R, DENG Y Z, et al., 2020. A robust geochronology of the Yangtze River Delta based on magnetostratigraphy and cyclostratigraphy of sediment core ZKA2[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 541: 109532.
- YANG J S, CHEN P, YANG K, et al., 2025. Progress and thought of ground substrate survey from the perspective of Quaternary geology[J]. *East China Geology*, 46(3): 314-327. (in Chinese with English abstract)
- YANG S Y, WANG Z B, GUO Y, et al., 2009. Heavy mineral compositions of the Changjiang (Yangtze River) sediments and their provenance-tracing implication[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(1): 56-65.
- YUE W, JIN B F, ZHAO B C, 2018. Transparent heavy minerals and magnetite geochemical composition of the Yangtze River sediments: Implication for provenance evolution of the Yangtze Delta[J]. *Sedimentary Geology*, 364: 42-52.
- YUE W, YANG S, ZHAO B, et al., 2019. Changes in environment and provenance within the Changjiang (Yangtze River) Delta during Pliocene to Pleistocene transition[J]. *Marine Geology*, 416: 105976.
- 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*, 2022, 43(1):30-39. (in Chinese with English abstract)
- YUE W, LIU J H, WANG Y, 2024. Basin evolution in the Subei Basin during the Pliocene-Quaternary based on provenance analysis of detrital heavy minerals[J]. *Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition)*, 42(4): 51-58.
- ZHAO X T, HU D G, WU Z H, et al., 2017. Reviews on the research of late Cenozoic geology and environment of the Yangtze River delta area[J]. *Journal of Geomechanics*, 23(1): 64. (in Chinese with English abstract)

- ZHANG B, GUO X Y, MENG T, et al., 2025. Geochemical characteristics of trace elements in the Es4x Formation of the Bonan Sag and their implications for sedimentary environment[J]. *East China Geology*, 46(1): 55-67. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H, WU Z J, ZHOU W, et al., 2017. Source-sink analysis and sedimentary facies of the first member of Liushagang Formation in WZA area, Beibuwan Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 29(5): 55-66. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J, SONG Y W, 2016. Grain size analysis methods and their application in identifying sedimentary environments[J]. *Inner Mongolia Coal Economy*, (8): 45-45. (in Chinese)
- ZHANG F Y, MENG Y, 2011. Heavy mineral distribution and magnetic characteristics of surface sediments in the north branch of the Changjiang River[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 031(001): 31-41. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG P, MIAO Y F, ZHANG Z Y, et al., 2013. Late Cenozoic sporopollen records in the Yangtze River Delta, East China and implications for East Asian summer monsoon evolution[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 388,: 153-165.
- ZHANG X P, SU N, YANG BO, et al, 2025. Heavy Mineral Composition and Provenance Analysis of the First Hard Clay in the Southern Wing of the Yangtze River Delta[J]. *Quaternary Sciences*. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y, SHI Y H, SONG C Z, et al, 2017. Sedimentary environments and its geological significance of Jurassic Moshan Formation in the northeastern margin of Dabie Mountain [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(2): 14. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU Z B, LIU H H, WANG Z B, et al., 2025. Sedimentary records of East Asian Summer Monsoon evolution and source-sink variations in the northern continental slope of the South China Sea since 70 ka[J]. *Global and Planetary Change*, 105059.
- ZHENG J X, ZHOU J Y, 1984. Elementary Features of the New Structural Movement in Southern Part of Jiangsu Province (Including the City of Shanghai) [J]. *SHANGHAI LAND & RESOURCES*, 14(01): 128-136. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG K F, 1990. The sedimentary environment and oil-gas potential of the late devonian Wutong formation in Jiangsu province[J]. *Journal of Geology*, (1):21-24. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG L S, 2013. Study on the provenance of heavy minerals in the XH-2 borehole during the Late Miocene period in Northern Jiangsu[D]. Nanjing Normal University. (in Chinese)
- ZHENG H M, ZENG J, DUAN C B, 2025. Geological Characteristics and Prospecting Directions of Rutile Deposits in the Changpu Area, Yuexi County, Anhui Province[J]. *China Non-metallic Minerals Industry*, (4): 55-59. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU X H, JIANG R, ZENG J W, et al., 2025.Holocene chronostratigraphic framework and limnological changes of Gaoyou Lake area, Lixia River Plain[J]. *East China Geology*, 46(4): 528-544.

附中文参考文献

- 安郁辉, 刘健, 张军强, 等, 2020. 淮河与长江和黄河沉积物的物源识别指标比较研究[J]. *第四纪研究*, 40(3): 837-850.
- 陈嘉诺, 孙高远, 温永祥, 等, 2024.长江三角洲 QDQ2 钻孔晚更新世以来沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. *华东地质*, 45(4): 466-477.
- 陈静, 王哲, 王张华, 等, 2007. 长江三角洲东西部晚新生代地层中的重矿物差异及其物源意义[J]. *第四纪研究*, (05): 50-58.

- 陈中原, 杨文达. 1991. 长江河口地区第四纪古地理古环境变迁[J]. 地理学报, 46(4): 436-448.
- 程瑜, 李向前, 张平, 等, 2019. 长江三角洲北翼泰州地区早更新世地层序列的厘定[J]. 地层学杂志, 43(1): 89-95.
- 程瑜, 李向前, 赵增玉, 等, 2016. 苏北盆地 tzk9 孔磁性地层及重矿物组合特征研究[J]. 地质力学学报, 22(4): 10.
- 程瑜, 李向前, 赵增玉, 等, 2018. 长江三角洲地区 TZK3 孔碎屑锆石 U-Pb 年龄及其物源意义[J]. 地质力学学报, 24(5): 635-644.
- 邓程文, 张霞, 林春明, 等, 2016. 长江河口区末次冰期以来沉积物的粒度特征及水动力条件[J]. 海洋地质与第四纪地质, 36(6): 185.
- 丁大林, 张训华, 于俊杰, 等, 2019. 长江三角洲北翼后缘第四纪晚期以来的沉积粒度特征及环境演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 39(4): 34-45.
- 高抒, 2025. 论潮滩系统模型[J]. 华东地质, 46(4): 429-437.
- 高文华, 高抒, 王丹丹, 等, 2015. 废黄河沉积记录中来自不同河流物质的信息——基于重矿物与地球化学元素分析[J]. 地理科学, 35(12): 9.
- 顾家伟, 2015. 上新世以来苏北盆地与长江三角洲构造沉降史分析[J]. 地质科技情报, 34(1), 6.
- 顾家伟, 2018. 长江河口区晚新生代以来沉积化学元素分布及物源指示意义[J]. 地球科学进展, 33(5): 506-516.
- 黄湘通, 郑洪波, 杨守业, 等, 2009. 长江三角洲 DY03 孔沉积物元素地球化学及其物源示踪意义[J]. 第四纪研究, 29(2): 299-307.
- 江来利, 胡召齐, 2014. 大别山东段的变质地层格架[J]. 安徽地质, (01): 1-6.
- 蒋仁, 于俊杰, 劳金秀, 等, 2015. 长江三角洲北翼 ZKA4 钻孔剖面第四纪磁性地层特征及其意义[J]. 中国地质调查, 2(7): 30-34.
- 江志霖, 毛龙江, 王婷, 等, 2024. 杭嘉湖平原 ZK3 钻孔沉积物粒度端元分析及其气候-海平面响应[J]. 地球环境学报, 15(2): 306-316, 341.
- 李姿亭, 付晓伟, 董足华, 等, 2025. 基于长江中下游及海域沉积物源揭示长江演化历史: 进展、挑战与展望[J]. 华东地质, 46(2): 171-190.
- 赖佩欣, 2016. 浅谈重矿物在表层沉积物物源和沉积环境分析中的应用[J]. 南海地质研究, (1): 146-150.
- 赖绍聪, 张国伟, 董云鹏, 1997. 秦岭-大别山随州南周家湾变质玄武岩地球化学及其大地构造意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 04: 77-77.
- 李超, 胡修棉, 2022. 宁芜盆地中三叠统黄马青组是大别造山带最早剥露的记录[J]. 高校地质学报, (004): 028.
- 李姝睿, 孙高远, 茅昌平, 等, 2022. 江苏沿岸辐射沙脊物源分析——来自碎屑重矿物与锆石年代学的证据[J]. 沉积学报, (004): 040.
- 梁文栋, 胡修棉, 2023. 现代河流沉积物碎屑及矿物组分研究新进展[J]. 地质学报, 97(9): 2975-2991.
- 刘璐, 2012. 南通市第四纪地层格架与三维建模分析[D]. 中国地质大学(北京).
- 刘桃, 廖圣兵, 邵威, 等, 2025. 基于分形理论的下扬子地区孤峰组页岩孔隙结构研究[J]. 华东地质, 46(2): 238-251.
- 刘宪光, 杨晋炜, 蒋仁, 等, 2023. 长江三角洲北翼 ZKA01 钻孔第四纪晚期以来的沉积环境演化[J]. 地质力学学报, 29(6): 856-868.
- 罗浩渝, 陈军, 章学岐, 等, 2021. 河控浅水三角洲前缘沉积特征及对岩性油藏的控制: 以库车坳陷南斜坡巴西改组为例[J]. 岩性油气藏, 33(5): 70-80.
- 马雪, 于俊杰, 蒋仁, 等, 2015. 长江三角洲顶部 ZKA4 钻孔第四纪沉积物粒度特征及其古环境古气候意义[J]. 地层学杂志, 39(4): 423-432.
- 苗巧银, 张平, 潘明宝, 等, 2019. 江苏省新近纪沉积环境演化特征与长江古河道变迁探讨[J]. 上海国土资源, 40(3): 59-66.

- 宁泽, 徐磊, 林学辉, 等, 2022. 东海东北部陆架表层沉积物碎屑矿物分布及其物源分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 42(5): 58-69.
- 潘大东, 王张华, 2020. 东亚和南亚典型大河三角洲第四纪晚期地层结构及成因对比[J]. 海洋地质与第四纪地质, 40(1): 12-21.
- 舒强, 李吉均, 赵志军, 等, 2006. 苏北盆地 XH-1#钻孔沉积物磁化率与粒度组分相关性变化特征及其意义研究[J]. 沉积学报, 24(2): 6.
- 舒强, 萧家仪, 赵志军, 等, 2010. 苏北盆地 XH-1 钻孔 0.78Ma 以来的气候环境变化记录[J]. 地层学杂志, (1): 8.
- 宋召军, 高泳, 顾畛逵, 等, 2015. 南黄海陆架长江与黄河埋藏古河道判别研究[J]. 海洋科学, 39(01): 126-130.
- 王爱军, 叶翔, 张晓飞, 等, 2025. 中国华东海岸潮滩侵蚀-淤积现状及机理[J]. 华东地质, 46(4): 438-450.
- 王立平, 高颀, 王伟琪, 等, 2007. 河南省金红石矿的资源状况[J]. 稀有金属快报, 26(006): 18-20.
- 王孟瑶, 金秉福, 岳伟, 2019. 长江口表层沉积物重矿物在不同粒级中的分布与研究意义[J]. 海洋学报, 41(11): 12.
- 王张华, 张丹, 李晓, 等, 2008. 长江三角洲晚新生代沉积物磁性特征和磁性矿物及其指示意义[J]. 中国地质, 35(4): 670-682.
- 王中波, 杨守业, 张志珣, 等, 2012. 东海西北部陆架表层沉积物重矿物组合及其沉积环境指示[J]. 海洋学报, 34(6): 12.
- 吴标云, 1987. 长江三角洲第四纪地质[M]. 江苏省地矿局第 1 水文地质工程地质大队 等.
- 徐少康, 1999. 建国 50 年来我国金红石矿产地质勘查及研究历史的回顾[J]. 化工矿产地质, 21(3): 188-192.
- 杨劲松, 陈彭, 杨柯, 等, 2025. 第四纪地质学视角下地表基质调查进展与思考[J]. 华东地质, 46(3): 314-327.
- 于俊杰, 刘平, 林丰增, 等, 福建三沙湾 90ka 以来沉积物来源及环境演变研究[J]. 华东地质, 43(1): 30-39.
- 岳伟, 刘佳虹, 王媛, 2024. 基于碎屑重矿物物源分析的苏北盆地上新世第四纪盆地演化[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版), 42(4): 51-58.
- 赵希涛, 胡道功, 吴中海, 等, 2017. 长江三角洲地区晚新生代地质与环境研究进展述评[J]. 地质力学学报, 23(1): 64.
- 张波, 郭晓英, 孟涛, 等, 2025. 渤南洼陷沙四下亚段微量元素地球化学特征及其对沉积环境的指示[J]. 华东地质, 46(1): 55-67.
- 张辉, 吴子瑾, 周伟, 等, 2017. 北部湾盆地 WZA 区流一上亚段源-汇分析及沉积相展布[J]. 岩性油气藏, 29(5): 55-66.
- 张杰, 宋永文, 2016. 粒度分析方法及其在辨别沉积环境中的应用[J]. 内蒙古煤炭经济, (8): 45-45.
- 张风艳, 孟翊, 2011. 长江口北支表层沉积物重矿物分布和磁学特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 031(001): 31-41.
- 张欣蓓, 苏妮, 杨博, 等, 2025. 长江三角洲南翼第一硬土层重矿物组成与物源分析[J]. 第四纪研究.
- 张妍, 石永红, 宋传中, 等, 2017. 大别山东南缘侏罗系磨山组沉积环境及地质意义[J]. 岩石学报, 33(2): 14.
- 郑家欣, 周积元, 1984. 苏南地区(包括上海市)新构造运动基本特征的探讨[J]. 上海国土资源, 14(01): 128-136.
- 郑开富, 1990. 江苏地区上泥盆统五通组的沉积环境与潜在的油气[J]. 江苏地质, (1): 21-24.
- 郑良烁, 2013. 苏北兴化 2 孔晚中新世以来重矿物物源示踪研究[D]. 南京师范大学.
- 郑明辉, 曾俊, 段传波, 2025. 安徽岳西菖蒲地区金红石矿地质特征及找矿方向[J]. 中国非金属矿工业导刊, (4): 55-59.
- 周效华, 蒋仁, 曾剑威, 等, 2025. 里下河平原高邮湖地区全新世年代地层格架和湖沼变迁[J]. 华东地质, 46(4): 528-544.