



中国东部陆架第四纪沉积环境演化研究进展与展望

姚政权, 刘健, 万世明, 刘焱光, 易亮, 刘建兴, 单新, 乔淑卿, 赵德博, 肖国桥, 王昆山, 窦衍光, 王中波, 骨勤勉, 石学法

Progress and prospects of research on the Quaternary sedimentary environment in the eastern shelf of China

YAO Zhengquan, LIU Jian, WAN Shiming, LIU Yanguang, YI Liang, LIU Jianxing, SHAN Xin, QIAO Shuqing, ZHAO Debo, XIAO Guoqiao, WANG Kunshan, DOU Yanguang, WANG Zhongbo, XU Qinmian, and SHI Xuefa

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022063001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

姚政权, 刘健, 万世明, 等. 中国东部陆架第四纪沉积环境演化研究进展与展望 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(5): 42-57.
YAO Zhengquan, LIU Jian, WAN Shiming, et al. Progress and prospects of research on the Quaternary sedimentary environment in the eastern shelf of China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(5): 42-57.

中国东部陆架第四纪沉积环境演化研究进展与展望

姚政权^{1,2}, 刘健^{2,3}, 万世明^{2,4}, 刘焱光^{1,2}, 易亮^{2,5}, 刘建兴^{1,2}, 单新^{1,2}, 乔淑卿^{1,2}, 赵德博^{2,4},
肖国桥⁶, 王昆山^{1,2}, 窦衍光^{2,3}, 王中波⁷, 胥勤勉⁸, 石学法^{1,2}

1. 自然资源部第一海洋研究所, 自然资源部海洋地质与成矿作用重点实验室, 青岛 266061
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266237
3. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237
4. 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋与环境重点实验室, 青岛 266071
5. 同济大学海洋与地球科学学院, 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092
6. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 流域关键带演化湖北省重点实验室, 武汉 430074
7. 汕头大学海洋科学研究院, 海洋灾害预警与防护广东省重点实验室, 汕头 515063
8. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

摘要: 中国东部陆架位于亚洲大陆与西太平洋的过渡区域, 是连接全球最大的沉积源-汇系统的重要纽带, 记录了东亚构造变形、亚洲季风系统形成与演化、海平面变化及东亚重大水系变迁等诸多重要信息。在总结前人研究的基础上, 结合最近20年来中国海洋专项获得的数据资料和研究成果, 综述了中国东部陆架区第四纪以海侵-海退变化为主要特征的沉积环境变化, 探讨了陆架沉积环境变化与区域构造、海平面和东亚季风气候变化的联系; 基于目前在长江、黄河流域及东部陆架区开展的沉积物源-汇研究, 讨论了长江和黄河贯通入海的可能时代及控制因素; 提出新生代以来陆架地质环境演变与东亚构造历史、季风系统演化、海平面变化、重大水系调整及陆架有机碳埋藏的耦合机制研究是未来在中国东部陆架实施科学钻探的重点科学目标。

关键词: 海侵-海退; 海平面变化; 大陆架钻探; 黄河和长江; 中国东部陆架

中图分类号:P736 文献标识码:A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022063001

Progress and prospects of research on the Quaternary sedimentary environment in the eastern shelf of China

YAO Zhengquan^{1,2}, LIU Jian^{2,3}, WAN Shiming^{2,4}, LIU Yanguang^{1,2}, YI Liang^{2,5}, LIU Jianxing^{1,2}, SHAN Xin^{1,2}, QIAO Shuqing^{1,2},
ZHAO Debo^{2,4}, XIAO Guoqiao⁶, WANG Kunshan^{1,2}, DOU Yanguang^{2,3}, WANG Zhongbo⁷, XU Qinmian⁸, SHI Xuefa^{1,2}

1. Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China
2. Laboratory for Marine Geology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China
3. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China
4. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China
5. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China
6. Hubei Key Laboratory of Critical Zone Evolution, School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
7. Guangdong Provincial Key Laboratory of Marine Disaster Prediction and prevention, Institute of Marine Sciences, Shantou University, Shantou 515063, China
8. Tianjin Geological Survey Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

Abstract: The eastern shelf of China is located in the transitional zone between the Asian continent and the western Pacific Ocean. It is an important link connecting the largest sedimentary source-sink system in the world, and bears many important information on tectonic

资助项目: 青岛海洋科学与技术试点国家实验室山东省专项经费(2022QNL050203); 国家自然科学基金“晚第四纪长江和黄河物质在东海外陆架的沉积记录及其对环境变化的响应”(41876059)

作者简介: 姚政权(1980—), 男, 博士, 研究员, 从事海洋沉积与古环境、古气候研究, E-mail: yaozq@fio.org.cn

通讯作者: 姚政权(1980—), 男, 博士, 研究员, 从事海洋沉积与古环境、古气候研究, E-mail: yaozq@fio.org.cn

石学法(1965—), 男, 博士, 研究员, 从事海洋地质与海底成矿作用研究, E-mail: xfshi@fio.org.cn

收稿日期: 2022-06-30; 改回日期: 2022-08-20. 张现荣编辑

deformation in East Asia, the formation and evolution of the Asian monsoon system, sea level changes and major water system changes in East Asia. Based on the review of previous studies and the new data obtained from marine projects in China during the last two decades, this paper reviews the Quaternary sedimentary environmental changes in the eastern shelf of China, mainly focusing on changes in marine transgression and regression cycles, and discusses the connection between the Quaternary sedimentary environment in eastern shelf of China and regional tectonic, sea level and East Asian monsoon climate changes. Based on the previous sedimentary source-sink studies in the Yangtze and Yellow River basins and the shelf area, we discuss the timing of penetrating into the sea of the Yangtze and Yellow rivers and controlling factors. We propose that the coupling mechanism of the geological environment evolution in the eastern shelf of China with Asian tectonic deformation, monsoon system evolution, sea-level change, major water system adjustment and carbon burial since the Cenozoic is a key scientific goal for future scientific drilling in the eastern shelf of China.

Key words: transgression-regression; sea-level change; continental shelf scientific drilling; the Yellow River and Yangtze River; Eastern shelf of China

中国东部陆架及边缘海(渤海、黄海和东海)位于西太平洋与亚洲大陆的过渡区, 是海陆相互作用、物质和能量交换频繁和强烈的区域。亚洲大陆通过河流为主的源-汇系统向海输送了全球约 3 分之 2 的碎屑物质^[1], 如此大量的陆源碎屑物质输入对陆架、边缘海乃至全球大洋的沉积过程、生物地球化学循环和海洋生态系统演变都具有重要影响^[2-4]。

新生代以来, 东亚及相邻海区的气候和环境格局发生了重大变化, 其中最为重要的是青藏高原隆升和西太平洋一系列边缘海的形成^[5]以及亚洲季风系统的建立^[6]。伴随着上述一系列重大气候和环境格局的更替, 以黄河和长江为代表的东亚大河水系也经历了相应调整^[7-9], 这些重大气候和环境格局变化对中国东部陆架及邻近海域沉积过程及环境变化具有重要影响。此外, 因中国东部陆架地势平缓, 该区沉积环境对海平面变化十分敏感。第四纪冰期-间冰期气候旋回导致海平面波动变化^[10], 特别是中更新世以来变幅增加, 最大可达百余米^[11]。上述变化在中国东部陆架表现为以海侵和海退为主要特征的沉积层序^[12-21]。因此, 中国东部陆架沉积记录了碎屑物质从内陆至海洋的源-汇过程, 对深入理解新生代亚洲构造变形、季风系统演变、海平面变化与重大水系演化具有重要意义^[5, 22-24]。

但是, 由于陆架区沉积物来源十分复杂, 受海陆相互作用影响强烈, 长尺度及高分辨率年代框架的建立较为困难, 在一定程度上限制了对上述问题的深入理解。近年来, 随着中国各类海洋基础调查专项的实施, 在中国东部陆架区进行了大量浅层钻探并获得了许多高质量钻孔(图 1、表 1)^[17, 20, 25-46], 基于对这些钻孔岩心年代学、沉积学、矿物学、地球化学和微体古生物学等综合研究, 极大推动了中国东部陆架沉积环境演化规律与机制研究进展^[4, 19-21, 31-34]。本文在回顾和总结上述研究的基础上, 重点综述中国东部陆架区第四纪以海侵-海退为主要特征的沉

积环境变化, 探讨黄河和长江贯通的时代及控制因素, 揭示陆架沉积环境变化及其与构造、气候和海平面变化的联系。最后, 简要提出未来在中国东部陆架实施钻探需重点关注的科学问题。

1 中国东部陆架沉积第四纪年代学研究

中国东部陆架区由于物源和沉积动力复杂多变, 精确可靠、高分辨率年代框架的建立较为困难。早在 20 世纪 80 年代, Qin^[25] 对取自渤海中部长度为 240 m 的 BC-1 钻孔岩心进行了古地磁和¹⁴C 测年研究, 得到钻孔底部年代约为 200 ka。此后直到最近十几年, 又有一系列位于中国东部陆架及沿岸的长钻孔进行了详细的年代学研究, 例如, 渤海西岸长度均约为 200 m 的 BZ1 和 BZ2 钻孔磁性地层学研究结果揭示了钻孔底部年代分别为 2.2 Ma^[26] 和 3.2 Ma^[27]。黄河三角洲平原长度约为 400~500 m 的 CK3 和 G4 钻孔古地磁研究揭示了过去约 5~7 Ma 以来的沉积历史^[28]。渤海南岸 3 个长度为约 200~400 m 的钻孔 BH1、BH2 和 HLL02 古地磁研究结果表明其底界年代可达上新世约 3~5 Ma^[29]。渤海北部沿岸孔深 383 m 的 MT04 岩石磁学和古地磁研究结果显示底部年代为 3.2 Ma^[30]。渤海北部辽东湾长度均为约 70 m 的钻孔 JXC-1 和 YKC-2 古地磁学研究表明, 钻孔沉积底部年龄分别为 1.2 Ma 和 0.7 Ma^[31]。渤海中部海域长度为 200 m 的 TJC-1 钻孔磁性地层学结果显示, 钻孔底部年代为 2.28 Ma^[32]。来自黄河三角洲北岸长度为 200.3 m 的钻孔 YRD-1 101 古地磁研究结果揭示了过去 1.9 Ma 的沉积历史^[33]。对渤海中部靠近渤海海峡长度为 212 m 的 BH08 钻孔磁性地层学研究显示, 该钻孔底部年代约为 1 Ma^[34]。

关于黄海陆架第四纪沉积地层的年代, 早在 1989 年就有学者开展了研究(如 QC1 和 QC2 孔), 揭示了黄海陆架早更新世以来的沉积演化历史^[42]。

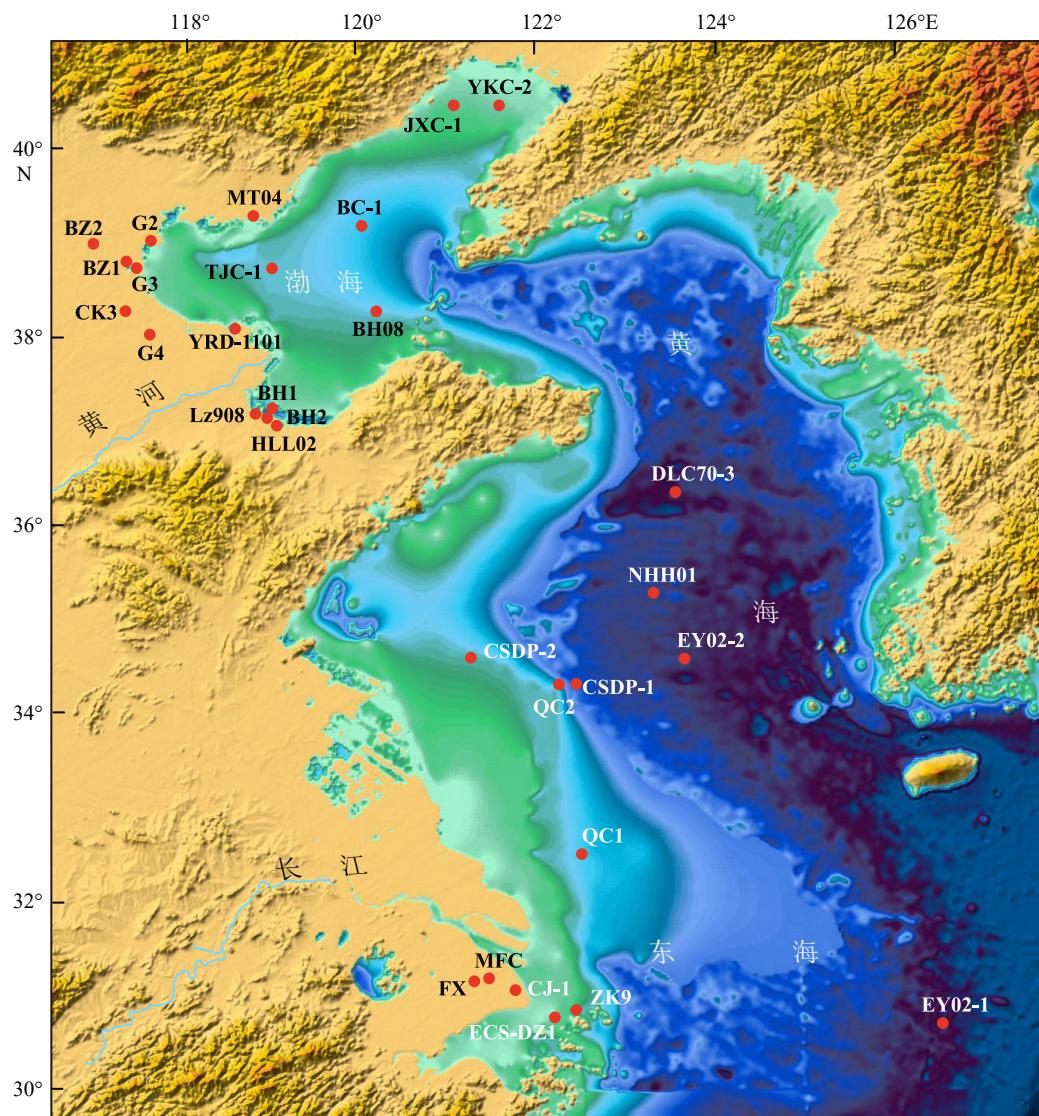


图 1 文中提到的中国东部陆架主要钻孔位置

钻孔信息见表 1。

Fig. 1 Location of main cores on the eastern shelf of China mentioned in text

Detailed information of these cores are listed in Table 1.

葛淑兰等^[40]对南黄海进尺为 70 m 的 EY02-2 孔进行了古地磁和岩石磁学研究,结果显示钻孔底部位于 B/M 界限(年代为约 0.78 Ma)。南黄海长度为 125 m 的 NHH01 钻孔磁性地层学研究结果表明,钻孔底部年代为约 1 Ma^[41]。南黄海长度为 300 m 的 CSDP-1 钻孔是目前黄海海域为数不多的具有精确年代控制、且钻穿第四纪地层的钻孔之一,古地磁年代学研究结果表明,其底界年代为约 3.5 Ma^[33]。最近,刘健等^[38]对南黄海钻取深度达 2 809.9 m 的 CSDP-2 孔进行了研究,推测该钻孔底部时代为三叠纪至奥陶纪,古地磁学研究揭示了上部 592 m 沉积形成于 5.2 MaBP 以来。

与渤海和黄海陆架相比,东海陆架区长序列钻

孔的年代学研究程度相对较弱。取自东海北部长度为 153.6 m 的 ECS-DZ1 钻孔磁性地层学研究表明,钻孔底部年代约为 2 Ma,且存在较长时间的地层缺失^[44]。应用古地磁强度和环境磁学指标,东海陆架长度为 82.9 m 的 SFK-1 钻孔底界年代约为深海氧同位素 MIS 6^[45]。位于长江三角洲平原长度为 172.3 m 的 CJ-1 孔古地磁研究结果显示,古地磁 B/M 界限位于钻孔 152.5 m 处,根据沉积速率推测钻孔底部年代约为 0.89 Ma^[43]。同样位于长江三角洲陆上平原的 Ch-1 钻孔(长度 344.64 m)可划分为下更新统、中更新统、上更新统和全新统 4 个沉积单元^[47]。而其他位于长江三角洲平原的钻孔,如 FX、MFC、ZK9 等沉积底界年代大多为晚第四纪以来^[17, 46]。

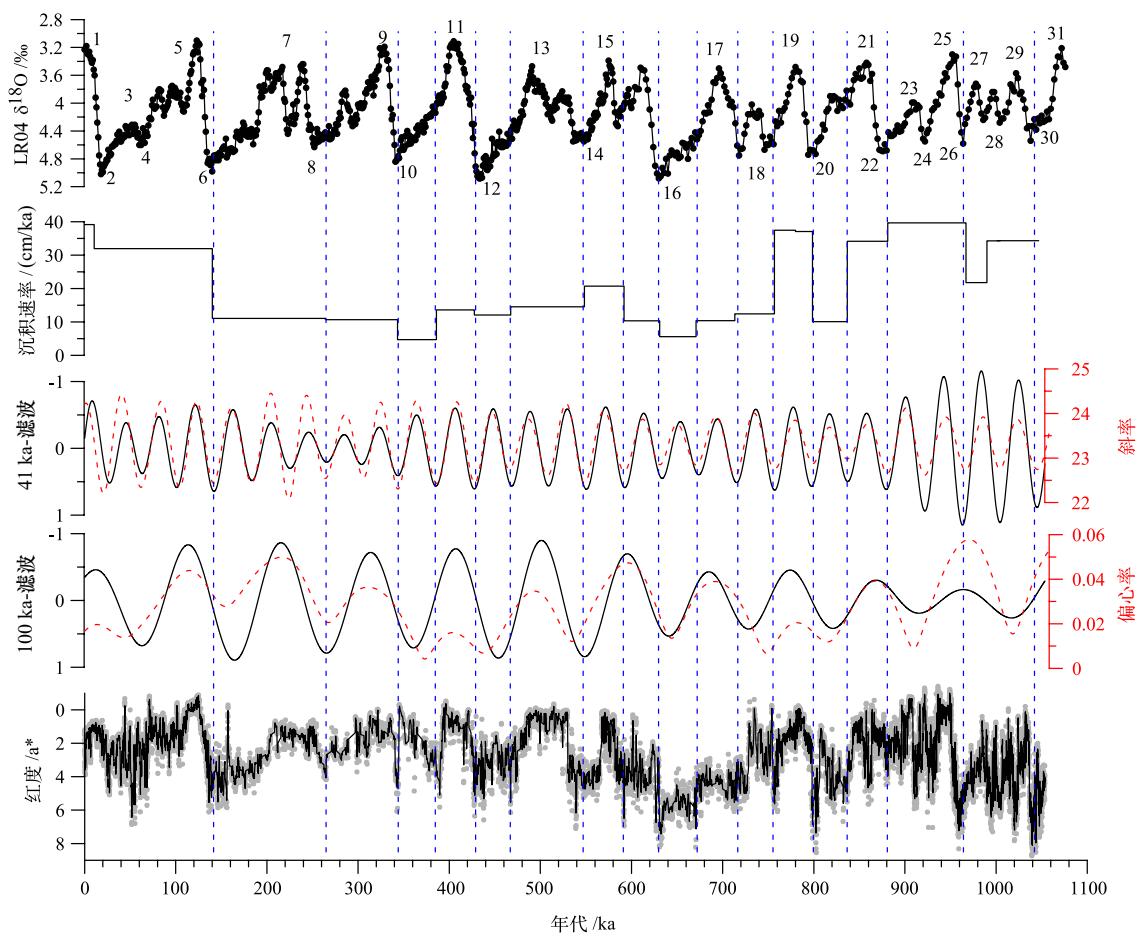
表 1 文中提及的中国东部陆架主要钻孔岩心信息
Table 1 Detailed information of cores on the coastal area and the eastern shelf of China mentioned in text

区域	钻孔	纬度/(°)	经度/(°)	长度/m	水深/m	底界年龄/Ma	文献来源
渤海	BC-1	39.15	119.9	240.5	24	0.24	[25]
	BH08	38.28	120	212.4	28	1	[34]
	BH1	37.28	119.1	198.8	4	3	[29]
	BH2	37.17	119.07	228.2	海上	3	[29]
	BZ1	38.85	117.38	204.5	海上	2.2	[26]
	BZ2	39.03	117.14	203.6	海上	3.2	[27]
	CK3	38.15	117.54	500	海上	6.6	[28]
	G2	39.07	117.63	1226	海上	8.5	[35]
	G3	38.83	117.43	905	海上	8	[36]
	G4	38.04	117.6	400	海上	5.2	[28]
	HLL02	37.03	119.13	425	海上	5	[29]
	JXC-1	40.4	121.05	70.3	22	1.2	[31]
	Lz908	37.15	118.97	101.3	海上	0.12	[20]
	MT04	39.27	118.83	383	海上	3.2	[30]
	TJC-1	38.73	118.95	200.3	26	2.28	[32]
	YKC-2	40.43	121.61	70.2	13	0.7	[31]
	YRD-1 101	38.04	118.6	200.3	1.8	1.9	[37]
黄海	CSDP-1	34.3	122.37	300.1	52.5	3.5	[33]
	CSDP-2	34.56	121.26	2 809.9	22	5*	[38]
	DLC70-3	36.33	123.53	71.2	72	0.8	[39]
	EY02-2	34.5	123.5	70	79	0.89	[40]
	NHH01	35.22	123.22	125.6	73	1	[41]
	QC1	32.52	122.5	117.2	29.5	1	[42]
	QC2	34.3	122.27	108.8	49.1	1.9	[42]
东海	CJ-1	31.13	121.75	172.3	海上	0.89	[43]
	ECS-DZ1	30.48	112.05	153.6	12	2	[44]
	EY02-1	30.73	126.57	70	90	0.26	[40]
	FX	31.20	121.25	102	海上	0.12	[17]
	MFC	31.24	121.46	112	海上	0.12	[17]
	SFK-1	29.1	125.3	88.3	82.9	0.15	[45]
	ZK9	30.88	122.42	50	12.5	0.013	[46]

注: *为上部550 m沉积的底界年代。

需要注意的是, 上述沉积地层年代框架的建立主要是基于磁性地层学方法, 但该方法的优势是建立构造尺度上的年代标尺, 而对更高分辨率, 如轨道尺度上的年代却显得不足。为了获得高分辨率地层年代框架, 有研究者结合了天文调谐方法建立

了渤海^[34]和黄海^[48-49]1 Ma 以来轨道尺度年代框架(图 2、图 3), 为探讨冰期-间冰期陆架沉积环境演化奠定了年代学基础。不过, 海岸带-陆架区沉积是一个十分复杂的沉积体系, 在陆源物质输运入海的沉积初期, 由于波浪、潮汐和海流等多种因素的影

图 2 渤海 BH08 钻孔天文调谐方法建立的年代框架^[34]

深海氧同位素曲线引自文献 [48]。

Fig.2 The constructed chronology of core BH08 from the Bohai Sea using astronomical tuning methods^[34]

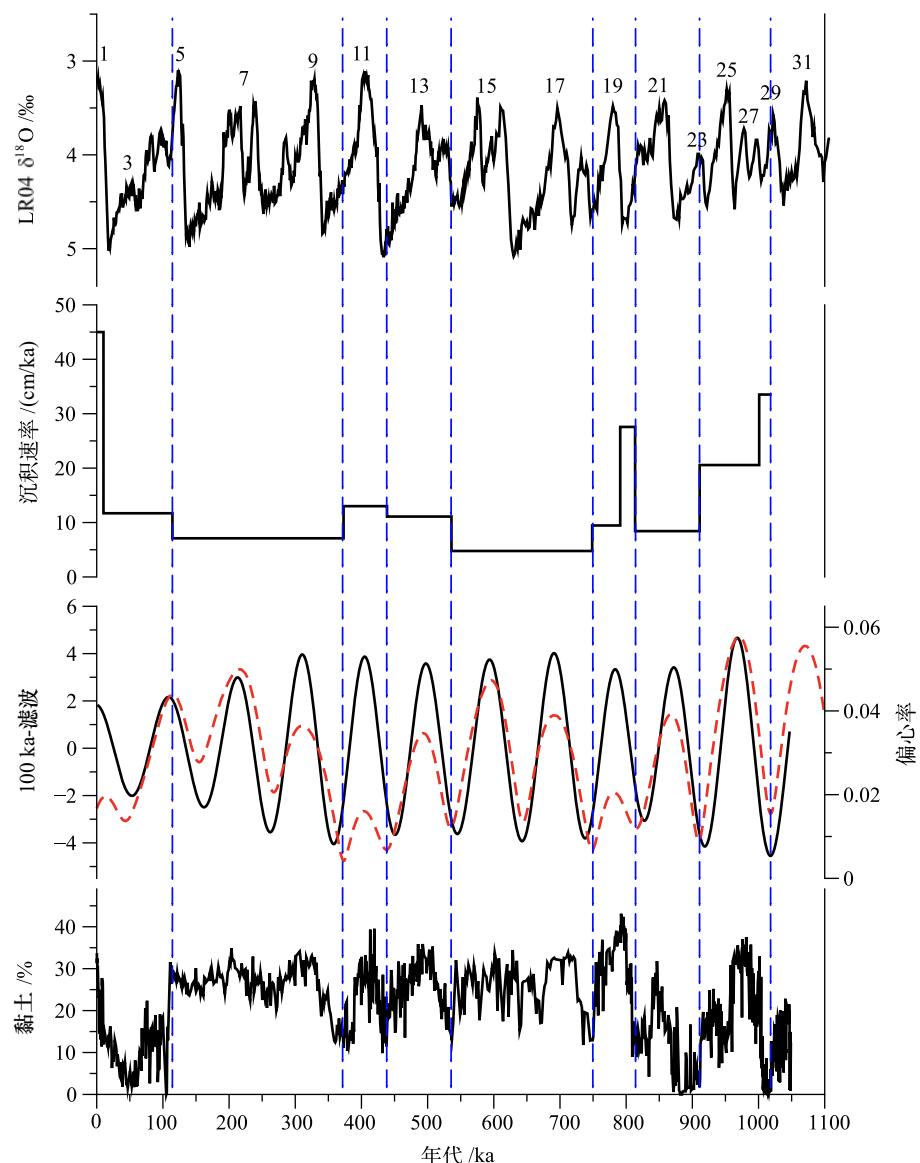
The record of marine oxygen isotope is from reference [48].

响,导致沉积物侵蚀、搬运和再堆积,因而在最终地层记录中,沉积物最终保存量可能非常有限^[50]。因此,理解沉积地层的连续性对准确解释沉积记录十分重要。天文调谐方法在建立渤海和黄海沉积地层年代框架的成功应用,也从另一方面说明了渤海和黄海海域的沉积地层至少在轨道尺度(4~10万年)上是大致连续的^[34],即使在冰期低海面时期,这些区域的沉积物也并没有被完全侵蚀掉。但是,在东海陆架的一些区域,冰期低位体系域河流相沉积会受到海侵时期浪、潮的再搬运,从而形成海侵滞留^[51]。因此,在应用层序地层或气候旋回地层的方法来建立沉积地层年龄框架时应考虑具体海域环境变化的影响。

2 中国东部陆架第四纪沉积环境变化研究

迄今为止,中国东部陆架第四纪沉积环境演化

研究具有代表性的工作主要集中在渤海和黄海海域,为理解陆架第四纪沉积环境变化提供了重要资料(图 4)。中国东部陆架大量的钻孔研究显示在第四纪期间,特别是晚第四纪以来该区普遍以海侵和海退沉积为主要特征,而且海侵-海退序列可与全球氧同位素分期对比^[14, 16, 18-19, 21, 25, 34, 52-55]。早期关于中国东部海侵变化的研究主要集中在沿海平原和海岸带,陆架区由于当时钻孔材料的缺乏而研究程度相对薄弱。早期研究表明,中国东部沿海平原第四纪以来普遍发育 4 个海侵层^[13],海侵层与陆相层分别形成于气候温暖期和气候寒冷期。根据古地磁和¹⁴C 年代数据推测,这四个海侵层自下而上分别对应于深海氧同位素 MIS9、MIS5、MIS3 和 MIS1^[13]。基于渤海湾西岸 60 个钻孔的沉积学和微体古生物研究结果,王强和李凤林^[14]认为本区第四纪以来发生 5 次海水入侵事件。渤海湾南岸黄河三角洲 S3 孔沉积学研究结合古地磁、¹⁴C 和 ESR 年代数据,表明中更新世晚期(约 400 ka)以来该区发

图 3 黄海 NHH01 钻孔天文调谐方法建立的年代框架^[49]

深海氧同位素曲线引自文献[48]。

Fig.3 The constructed age model of core NHH01 from the Yellow Sea using astronomical tuning methods^[49]

The record of marine oxygen isotope is from reference[48].

生了 7 次海侵-海退过程^[56]。最近, 王中波等^[57]基于中国东部陆架 28 个晚第四纪钻孔实测数据和高分辨率地震剖面的综合分析, 并结合前人发表的 46 个钻孔资料, 揭示了 MIS 5 以来中国东部陆架普遍存在 3 次海侵过程(MIS 5, MIS 3 和 MIS 1)。

近年来, 随着古地磁、释光等年代学技术的提高, 中国学者对渤、黄海海域数个长尺度钻孔岩心进行了详细的年代学和沉积环境变化研究。综合莱洲湾南岸 3 个钻孔的年代学和沉积学研究结果显示, 这一区域自 200 ka 以来发生了 4 次海侵, 作者认为这 4 次海侵分别形成于 MIS1、MIS3—5、MIS6 和 MIS7^[20], 其中发生在 MIS6 的海侵事件可能

受到区域构造活动的影响^[58]。渤海 BH08 钻孔沉积学、微体古生物学和地球化学研究结果显示^[21, 34], 渤海早更新世末期以来至少发生了 10 次海侵-海退变化(图 4), 而且这些海侵沉积可与深海氧同位素指示的间冰期很好地对应, 并提出了间冰期海平面变化控制渤海海侵沉积的概念模型^[21]。Yi 等^[29]通过对渤海南岸 3 个钻孔记录的沉积环境进行综合对比研究, 认为渤海在晚上新世以来主要以湖相沉积环境为主, “渤海古湖”的解体发生在约 1 Ma 以来, 之后以海相和陆相交互沉积占据主导^[29]。南黄海 NHH01 钻孔沉积环境研究显示, 黄海陆架在过去 1 Ma 以来主要以海相沉积为主, 只有在冰期极

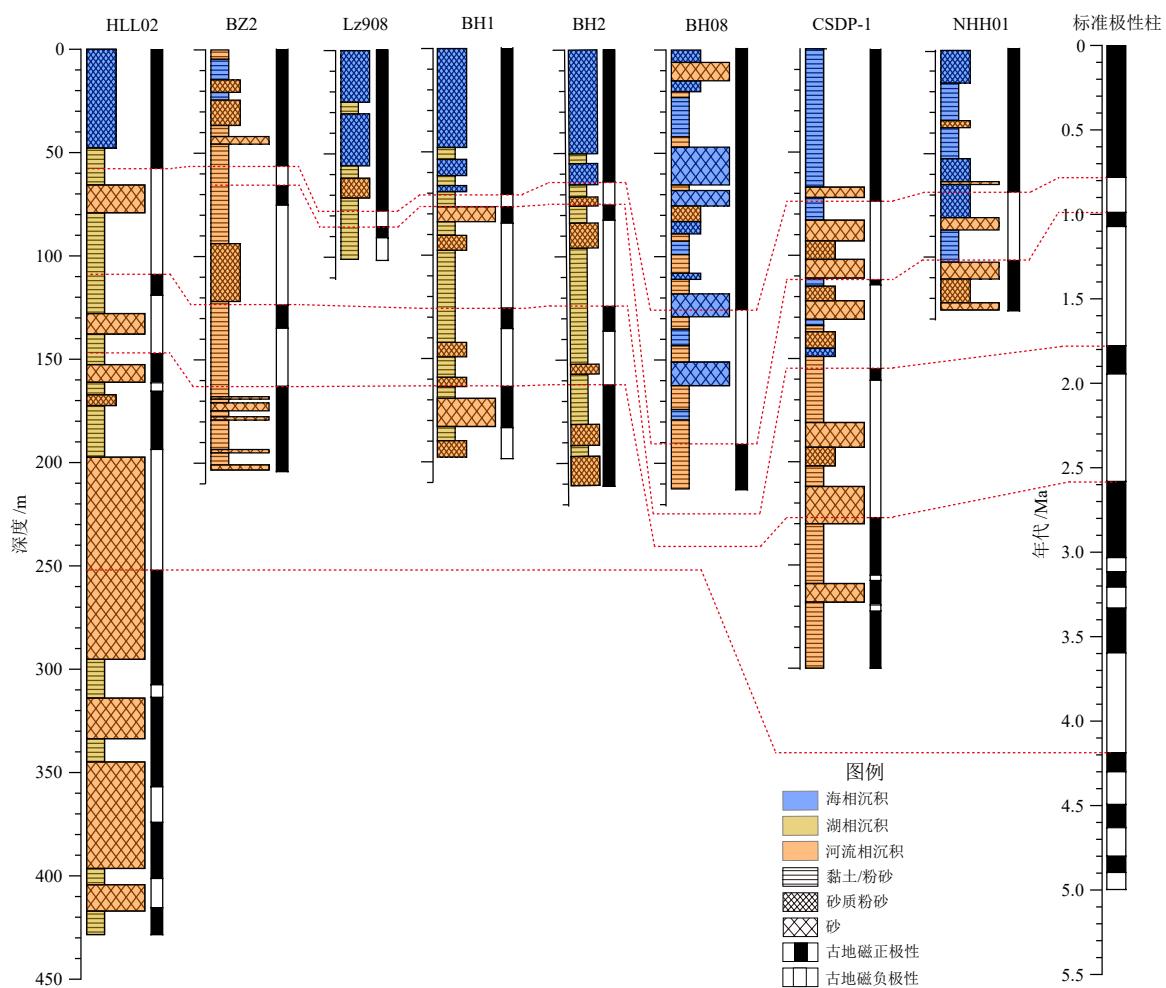


图 4 中国渤、黄海海域及沿岸第四纪沉积环境对比^[49]

钻孔位置及信息见图 1 和表 1, 标准极性柱引自文献 [59]。

Fig.4 Comparison of sedimentary environmental change in the Bohai Sea and Yellow Sea and coastal area^[49]

The location and information of the cores are shown in Figure 1 and Table 1. The Geological time scale is from reference [59].

盛期如 MIS10、MIS18 和 MIS20 发育河流相沉积^[41]。同样来自南黄海的 CSDP-1 钻孔沉积揭示了在 3.5~1.66 Ma 研究区以河流相为主, 在 1.66~0.83 Ma 以潮坪相和河流相交互沉积为主要特征, 而直至 0.83 Ma, 现代浅海与河流的交互沉积才开始主导这一区域的沉积环境变化^[60]。南黄海中部隆起区 CSDP-2 研究揭示, 从约 5.2~1.7 Ma, 研究区发育河流沉积; 约 1.7 Ma 以来发生自新生代以来的首次海侵, 此后的环境演化与 CSDP-1 钻孔一致^[38]。

上述研究结果表明, 虽然不同海域的海侵次数及特征不尽相同, 但总体上表现出海侵均发生于第四纪温暖的间冰期, 且在空间上呈现由陆向海方向海侵次数先增加后减少的变化规律^[49](图 4)。除此之外另一个明显的特征是, 中国东部陆架海侵沉积在空间上大范围普遍出现的时间为早更新世末期(约 1 Ma)^[8, 59]。比较而言, 在东海陆架有关沉积环

境演化的时间尺度相对较短, 主要以 MIS5/MIS3 至全新世为主^[45-46, 61-62], 且大多数记录集中在长江三角洲平原地区。长江三角洲平原 FX 和 MFC 钻孔沉积环境研究表明, 晚第四纪以来该区共记录了两次海侵过程, 分别形成于 MIS5 和 MIS3, 且在 MIS5 期受到河流作用的影响更为强烈^[16, 17]。从 MIS3 末期至末次盛冰期, 海平面下降致使长江下切, 造成陆架上广泛发育呈长条形或扇形的下切河谷^[63], 长数十至数百千米, 宽数十千米, 深约 40~90 m^[61]。随着冰后期海平面逐步上升和可容空间的增加, 在河谷内充填了长江的河道、河漫滩、河口湾沉积体系, 而后的进积形成了现代长江三角洲^[64]。

3 长江和黄河贯通入海时代研究

早始新世以来, 伴随青藏高原的阶段性隆升,

亚洲地形发生倒转并呈现现今西高东低的地貌格局^[5, 22]。这一重大环境格局的变化导致亚洲水系发生根本性变化, 黄河和长江雏形出现并最终贯通入海^[7-9, 65-66]。但是, 对于黄河和长江贯通入海的时代及其机制, 学术界仍存在不同的观点(图 5)。长江流经三峡的时间通常被视为长江贯通入海的重要标志。前人应用磷灰石裂变径迹和低温热年代学方法, 认为长江贯通三峡可能发生在始新世^[66]。长江三角洲钻孔沉积中独居石年龄谱的研究表明, 在上新世向第四纪转折期, 沉积物的物源发生了改变, 表明长江贯通入海可能发生在第四纪初期^[67]。同样取自长江三角洲岩心沉积中锆石 U-Pb 年龄研究表明, 上新世约 3.2 Ma 以来沉积物锆石中出现大量来自长江上游物质的信息, 表明长江贯通的时间应不晚于 3.2 Ma^[68]。Zheng 等^[7]根据长江下游沉积地层中锆石 U-Pb 测年数据, 认为现代长江水系格局在早中新世(约 23 Ma)就已形成, 并强调了青藏高原隆升和季风降水在此时的增强可能起了重要作用。

关于黄河的形成与贯通入海时代, 同样存在诸多争议。早期研究中, 有关黄河形成与演化的研究主要集中在黄河中、上游地貌学分析。前人通过对黄河流域各类地质与构造证据进行综合对比, 认为黄河早在始新世就呈现自西向东的水系格局^[65]。根据地层学、地质年代学和地貌资料, Craddock 等^[69]认为, 黄河的出现和上游盆地的整合发生在约 1.8~0.5 Ma。三门峡是黄河流经中下游入海前的最后一道峡谷, 因此其切穿时间通常认为是黄河贯通入海

的时间。基于三门峡风成沉积在约 0.15 Ma 粒度突然变粗和沉积速率增加, Jiang 等^[70]将这一变化归因于黄河在此时切穿三门峡。根据三门峡黄土沉积序列的古地磁测年, Pan 等^[71]认为黄河切穿三门峡入海的时间不晚于约 1.2 Ma。与上述结论相似, Kong 等^[72]对三门峡河流阶地和沉积序列应用¹⁰Be/²⁶Al 测年和锆石 U-Pb 年龄, 认为黄河切穿三门峡的时间为约 1.3~1.4 Ma。最近, 有学者通过对三门古湖沉积相的研究显示, 三门古湖由湖相沉积转变为风成沉积的年代为约 1.6 Ma, 说明黄河在约 1.6 Ma 前贯通三门峡^[73]。对于探讨黄河贯通入海时代, 黄河下游及其入海后陆架区的沉积记录非常关键。黄河三角洲钻孔沉积元素地球化学研究结果显示, 在第四纪早期钻孔沉积中的元素组成与现代黄河一致, 认为黄河在第四纪早期就已流入渤海^[74]。Xiao 等^[9]通过对取自华北平原年代超过 8 Ma 的 3 个钻孔沉积的锆石年龄研究发现, 大约从 1.6 MaBP 开始, 3 个钻孔同时大量出现黄河中、上游的锆石信息, 表明黄河此时已经贯通入海, 将这些锆石从中游和上游带到下游沉积, 这与来自三门峡沉积地层的研究^[73]结论一致。渤海和黄海是黄河物质的主要汇区, 通过对取自渤海和黄海钻孔沉积物黏土矿物及地球化学研究, 发现这一地区在 0.88 Ma 发生了一次重要的物源转变, 表现为由渤海周边近源的山地河流供给为主转变为黄河供给为主, 由此认为黄河至少在 0.88 MaBP 前就已贯通入海^[75]。Zhang 等^[8]对南黄海陆架晚上新世以来的沉积序列进行了沉积相、黏土矿物和 Sr-Nd 同位素组

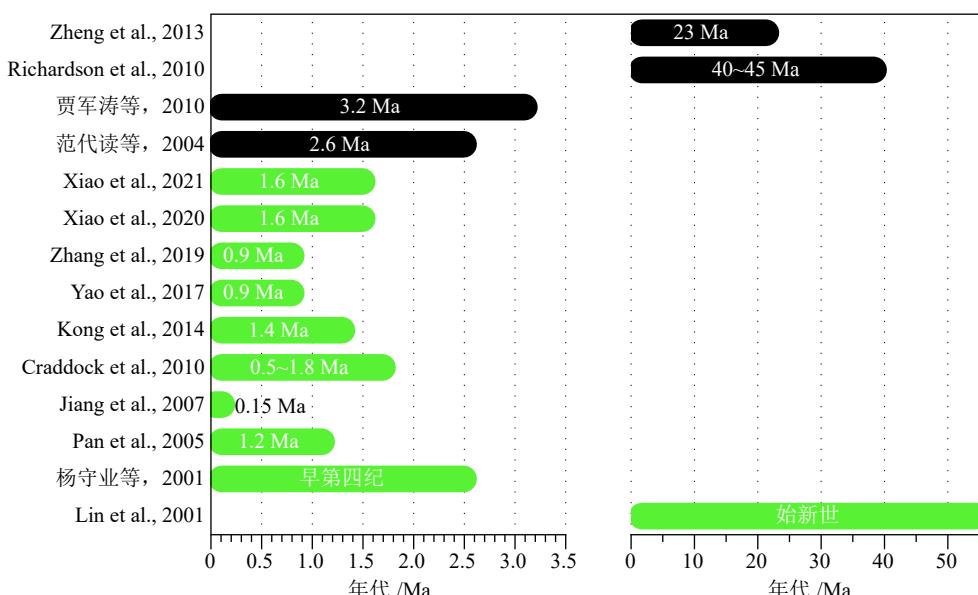


图 5 不同研究显示的长江(黑色)、黄河(绿色)贯通时代

Fig.5 Timing of the integration of the Yangtze River (black bars) and Yellow River (green bars)

成等研究,发现在 3.5~0.8 Ma 物源主要来自于老长江物质,而 0.8 Ma 以来主要来自于黄河,暗示黄河至少从中更新世就开始影响南黄海^[8],这一发现与 Yao 等^[75]的认识吻合。

由此看来,目前学术界对长江和黄河贯通入海的年代仍没有达成广泛一致,而且对造成这些大河最终贯通入海的原因,究竟是气候驱动还是构造控制,仍存在分歧^[7-9, 72-73, 75]。“构造控制”观点认为,黄河或长江的最终贯通是由于青藏高原的隆升^[7-8],因为构造隆升加剧了中国“西高东低”这种地形和地貌格局,导致河流的侵蚀基准面降低从而造成水系的溯源侵蚀加剧。“气候驱动”观点主要强调了亚洲季风降水和中更新世气候转型对河流水系的调整^[9, 73, 75]。

4 中国东部陆架第四纪沉积环境与海平面、构造和气候变化的联系

陆架沉积层序主要受控于沉积物供给和可容空间的相互平衡,而二者则与海平面、构造、气候变化及水动力条件等密切相关。沉积物供给指河流从内陆携带的沉积物,其产生及堆积过程受全球气候、区域构造活动等因素的影响,而可容空间的变化主要取决于区域构造运动(如隆升、沉降)和全球绝对海平面变化的双重影响^[76-77]。由于中国东部陆架区水深较浅且地形平缓,受海平面变化影响强烈,因此海平面变化是控制陆架沉积的重要因素,海平面升降变化及频繁的海侵-海退对陆架沉积的改造作用显著。在构造稳定期,海面快速上升造成可容空间增加,发育以低沉积物供给与高海面为特点的陆架沉积体系和地层堆叠样式;在海平面下降的海退期,可容空间减少,有利于陆源沉积物向海进积,发育以补给为主导的沉积体系^[78]。

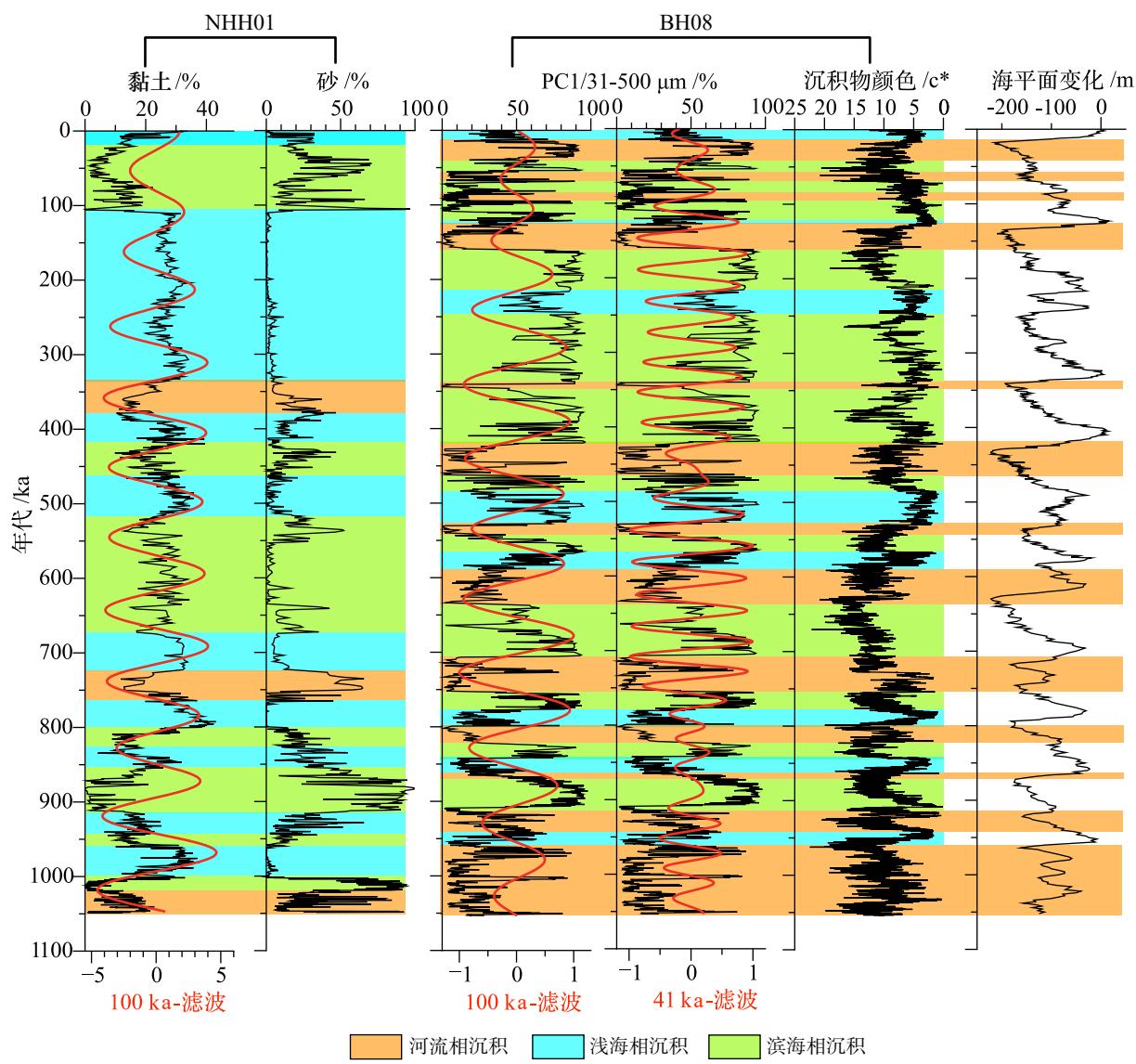
海平面变化研究表明,晚上新世以来的间冰期时期全球海平面呈逐渐降低的趋势^[79]。但中国东部陆架海侵变化研究显示这一地区海侵规模和影响是加强的,陆架区大规模海侵发生在晚更新世以来^[13, 16, 19, 53, 57, 80]。从长时间尺度来看,渤海和黄海陆架海域的沉积记录虽然显示最早海侵发生在约 1.7 Ma^[37-38, 59],但在中更新世约 1 Ma 以前,这一区域以河湖相为主,直到中更新以来才出现海相和陆相交互沉积的特征^[8, 21, 29, 34, 37-38, 59]。上述变化与全球海平面变化的趋势不完全一致,其原因可能受到中国东部持续下沉的影响^[8, 13, 19, 81-82],因为自晚第三纪以来,中国东部陆架一直处于构造下沉过程中^[83]。进

一步的研究发现,约 1 Ma 以来,南黄海陆架沉积序列主要以低频(约 100 ka)的海平面波动为主,而在较浅的渤海沉积中除了有 100 ka 周期外,还存在高频(约 40 ka)的海平面变化信息(图 6)^[49]。这一发现意味着中国东部陆架沉积环境整体受到了海平面变化的影响,不同海域地形和地貌的差别可能不足以导致海平面变化对沉积环境产生显著的差异化影响。通过与印度尼西亚 Sangiran 地区和日本 Osaka 湾沉积记录的对比发现,约 0.8~1 Ma 大规模的海侵至少在东南亚沿海普遍存在^[84-85],这可能是由于中更新世转型期后以 100 ka 为主导周期的高海平面持续时间加长造成的^[49]。

上述结果表明,中国东部陆架区海侵-海退是在本区第四纪以来持续的构造沉降背景下,由于冰期间冰期海平面升降变化造成的。中国东部陆架区的研究结论与全球其他陆架区研究基本一致,均表明海平面变化是控制陆架沉积层序的重要因素^[86-87]。来自新西兰 Wanganui 盆地的研究表明,第四纪期间在海平面升降幅度达 100 多米的背景下,该地区普遍形成具有 41 ka 和 100 ka 周期的海侵与海退沉积旋回^[88],揭示了海平面变化在沉积层序形成中的主要控制作用。在美国东部新泽西陆架区 IODP313 航次钻孔的微体古生物^[89]、层序地层^[90]和孢粉研究^[87]进一步证实了全球海面变化对陆架地层层序的绝对控制。

应当指出,虽然海平面变化在陆架沉积层序形成和环境演化中占重要地位,但其他因素如气候变化也不容忽视。研究表明,气候变化会导致沉积物供给发生改变,对沉积层序可能产生强烈的改造^[91]。例如,即使在海面上升期间,突然增加的陆源物质输入也可能在浅海陆架形成以进积为主的陆相沉积体系;而在海平面下降时期,若陆源物质供给严重不足也可以形成退积型海相沉积体系^[76]。上述情形均会造成地层记录与海平面变化之间的不一致。由于陆架沉积是包含海平面、气候驱动的沉积物供给、区域构造运动、水动力变化等因素综合作用的结果,因此要区分出陆架沉积中诸如海平面、气候等因素如何影响沉积层序并非易事。

由于中国东部广大区域处于东亚季风的影响下,季风降水是调控该区水文循环的主要因素,并通过影响水系径流变化从而改变流域内碎屑物质产生和搬运。据此可以推测,中国东部陆架沉积中应当记录了季风气候变化的信息。最近,我们对渤海 BH08 钻孔粒度进行深入分析,获得了分别代表粗粒组分的 PC1(31~500 μm)和代表细粒组分的

图 6 渤、黄海陆架轨道尺度沉积环境变化^[49]

海平面变化曲线引自文献[86]。

Fig.6 The sedimentary environmental change at orbital timescale in the Bohai Sea and Yellow Sea^[49]

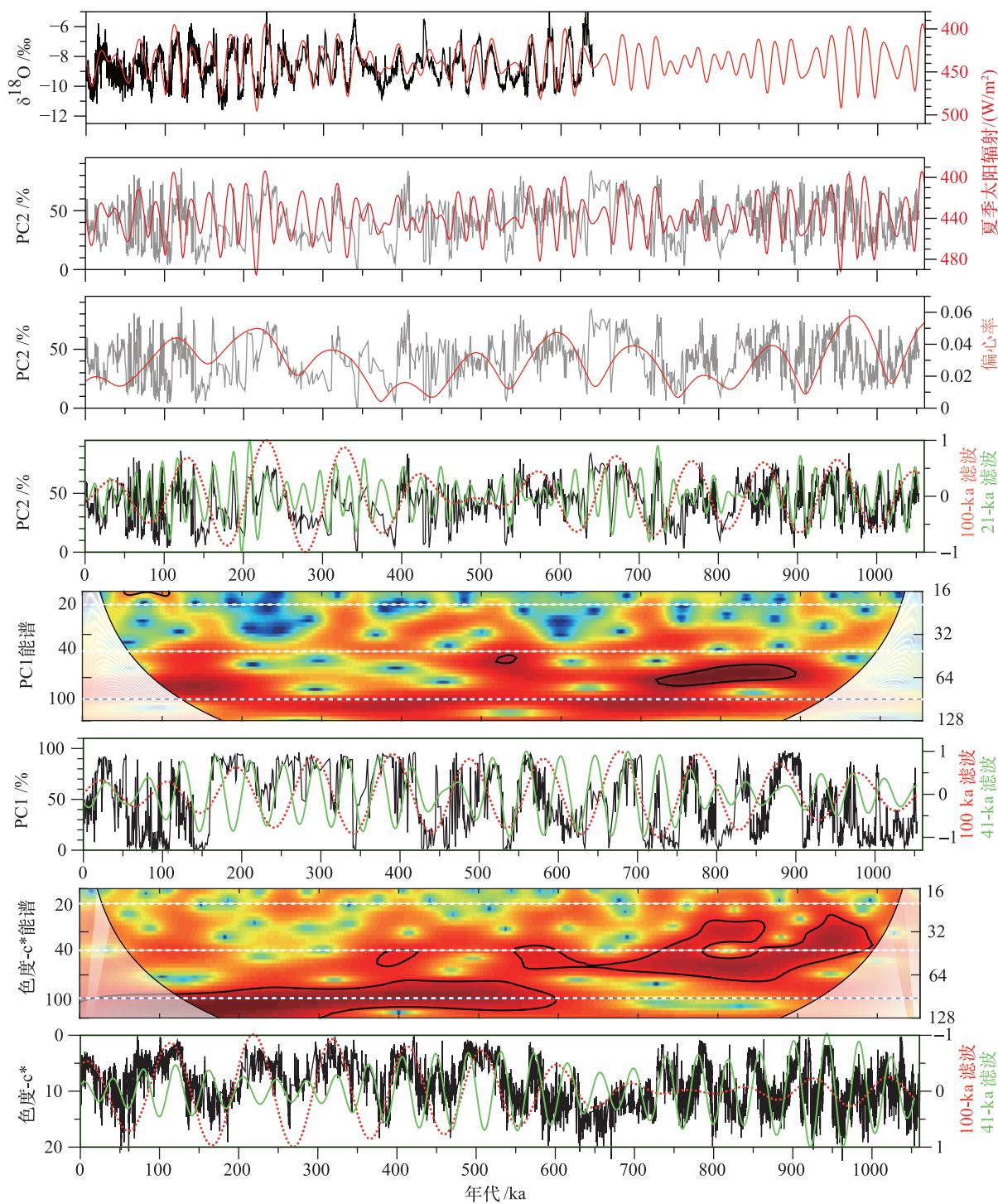
The sea-level curve is from reference[86].

PC2(18~66 μm)两个主成分^[92]。周期分析结果显示, PC1 具有以海平面变化为特征的 100 ka 和 40 ka 主周期, 而 PC2 除了具有上述两个周期外, 还表现出显著的 20 ka 周期^[92](图 7)。由此推测 PC1 主要受海平面变化的影响, 而 PC2 则受季风降水和海平面变化的共同控制。这一现象清晰揭示了季风变化控制了中更新世以来渤海沉积物的供应^[92], 且海平面变化及水动力作用会进一步改造入海沉积物的分布和输运。

5 中国东部陆架钻探展望

总体而言, 目前在中国东部渤、黄、东海陆架地

层完整钻穿第四纪的记录还很少, 能够覆盖新生代的记录几乎没有, 因而对陆架边缘海地质环境演化与亚洲构造变形、季风系统演化、海平面变化、重大水系建立与调整等一系列重要地质事件的耦合机制还不清楚。国际大洋发现计划 (International Ocean Discovery Program, IODP, 2013—2023) 及其前身 (ODP、DSDP 等) 是地球科学史上规模最大、影响最深、合作成效最为显著的国际合作研究计划。从 1998 年中国正式加入 IODP 以来, 以中国科学家为主导实施了南海 4 个钻探航次 ODP184 (1999 年)、IODP349 (2014 年) 和 IODP367/368X (2017 年)。然而直到目前, 在中国东部渤、黄、东海内陆架还没有实施大洋钻探。虽然在 2013 年实

图 7 渤海 BH08 钻孔沉积粒度揭示的海平面与东亚夏季风变化^[92]

石笋氧同位素曲线引自文献 [93]，北半球 65 度夏季太阳辐射数据引自文献 [94]。

Fig.7 Changes in grain size of BH08 sequence and implication for sea level and East Asian summer monsoon^[92]

Stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record is from reference [93] and summer insolation at 65°N is from reference[94].

施的以日本海为主题的 IODP346 航次在冲绳海槽北部钻取了两个站位, 但其底界年代仅为约 0.4 Ma^[95]。因此, 在中国东部陆架亟需开展深部钻探与综合研究工作, 将有助于显著提升我们对前述一系列重大科学问题的认知。

20 世纪 90 年代, 在中国还未正式加入 IODP 之前, 石学法^[96]已详细阐述了中国边缘海开展大洋钻探的重要意义, 提出古黑潮演变与陆海相互作用、长江/黄河入海时代对冲绳海槽沉积环境的影响、陆架沉积作用对古季风和青藏高原隆升的响应

以及海平面变化等一系列科学问题。郑洪波^[97]从海陆对比和海陆相互作用的视角, 提出研究中国新生代宏观地质格局变化、青藏高原隆升、西太平洋边缘海扩张和亚洲季风系统的建立是中国科学家参与 IODP 计划的优势所在。随后, 于 2007 年提交了在长江中下游和东海陆架盆地实施大洋钻探的建议书(IODP 第 683 号建议书), 主要目标是揭示长江历史和东亚季风演化, 并为青藏高原的演化提供新证据^[24]。

时隔二十多年, 现在看来上述问题仍是中国东部陆架研究的主要科学目标, 许多重大科学问题并未得到解决。这其中, 尤以陆架边缘海地质环境演化与亚洲构造隆升、季风系统演化、海平面变化、重大水系调整的耦合机制最为突出, 不但对深入理解新生代东亚地质环境和气候格局演化具有重要意义, 而且也是未来在中国东部陆架区进行大洋钻探的重点研究方向。此外, 陆架边缘海虽然只占全球海洋面积的 8%, 但贡献了全球海洋有机碳埋藏通量的 80% 以上, 而中国东部近海有机碳埋藏又占全球边缘海沉积碳埋藏的约 10%^[98]。因此, 中国东部陆架是重要的有机碳储库, 在区域和全球碳循环中发挥了重要作用。在新生代东亚构造运动、气候和海平面协同演变背景下, 中国东部陆架沉积源-汇过程及有机碳埋藏如何影响及反馈区域及全球气候变化也是开展陆架科学钻探应关注的研究内容。

此外, 还应加强海陆对比研究。青藏高原的隆升和东亚边缘海的形成促成了从陆地到海洋这一全球最大沉积源-汇系统的形成, 大量陆源物质从亚洲大陆输送到太平洋和印度洋, 其中绝大部分物质堆积在陆架边缘海。陆源物质从源到汇的输运过程成为联接内陆和海洋过程的关键纽带。因而, 与国际大陆科学钻探计划 (International Continental Scientific Drilling Program, ICDP) 结合起来, 选取合适区域, 如长江下游盆地-东海陆架闽浙隆起-冲绳海槽实施海陆断面联合钻探, 展开新生代东亚大陆从源到汇过程、青藏高原隆升与东部陆架边缘海形成的关联机制、东亚季风-海平面变化对陆架沉积层序的影响等研究, 加强上述海陆对比研究对深入认识新生代东亚构造和地貌演化、亚洲边缘海形成、季风与水系演化、海平面变化及有机碳埋藏的耦合机制具有重要意义。

6 结语

本文回顾了前人在中国东部陆架(渤海、黄海

和东海)获得的长序列沉积岩心的相关研究, 结合最近二十年来中国海洋专项新获得的数据资料和研究成果, 阐述了中国东部陆架区沉积环境变化及其与区域构造、海平面和东亚季风气候变化的联系机制; 基于目前在长江、黄河流域及东部陆架区开展的沉积物源研究, 讨论了长江和黄河贯通入海的可能时代及控制因素; 针对目前中国东部陆架能够揭示新生代演化历史的沉积记录非常缺乏这一现状, 提出在中国东部陆架开展陆架钻探的重要意义和必要性, 并且将新生代以来陆架地质环境演变与东亚构造历史、季风系统演化、海平面变化、重大水系调整及陆架有机碳埋藏的耦合机制作为陆架钻探的重点科学目标。

参考文献 (References)

- [1] Milliman J D, Farnsworth K L. River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 1-384.
- [2] Johnson K S, Chavez F P, Friederich G E. Continental-shelf sediment as a primary source of iron for coastal phytoplankton [J]. *Nature*, 1999, 398 (6729): 697-700.
- [3] Blair N E, Aller R C. The fate of terrestrial organic carbon in the marine environment [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2012, 4: 401-423.
- [4] 石学法, 乔淑卿, 杨守业, 等. 亚洲大陆边缘沉积学研究进展(2011-2020)[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40 (2): 319-336. [SHI Xuefa, QIAO Shuqing, YANG Shouye, et al. Progress in sedimentology research of the Asian continental margin (2011-2020) [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, 40 (2): 319-336.]
- [5] 汪品先. 亚洲形变与全球变冷: 探索气候与构造的关系 [J]. *第四纪研究*, 1998, 18 (3): 213-221. [WANG Pinxian. Deformation of Asia and global cooling: searching links between climate and tectonics [J]. *Quaternary Sciences*, 1998, 18 (3): 213-221.]
- [6] Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. *Nature*, 2002, 416 (6877): 159-163.
- [7] Zheng H B, Clift P D, Wang P, et al. Pre-Miocene birth of the Yangtze River [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110 (19): 7556-7561.
- [8] Zhang J, Wan S M, Clift P D, et al. History of Yellow River and Yangtze River delivering sediment to the Yellow Sea since 3.5 Ma: tectonic or climate forcing? [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 216: 74-88.
- [9] Xiao G Q, Sun Y Q, Yang J L, et al. Early Pleistocene integration of the Yellow River I: detrital-zircon evidence from the North China Plain [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 546: 109691.
- [10] Shackleton N J. Oxygen isotopes, ice volume and sea level [J]. *Qua-*

- ternary Science Reviews, 1987, 6(3-4): 183-190.
- [11] Rohling E J, Grant K, Bolshaw M, et al. Antarctic temperature and global sea level closely coupled over the past five glacial cycles [J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(7): 500-504.
- [12] 赵松龄, 杨光复, 苍树溪, 等. 关于渤海湾西岸海相地层与海岸线问题[J]. 海洋与湖沼, 1978, 9(1): 15-25. [ZHAO Songling, YANG Guangfu, CANG Shuxi, et al. On the marine stratigraphy and coastlines of the western coast of the Gulf of Bohai [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1978, 9(1): 15-25.]
- [13] 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 等. 我国东部第四纪海侵地层的初步研究 [J]. 地质学报, 1981, 55(1): 1-13. [WANG Pinxian, MIN Qiubao, BIAN Yunhua, et al. Strata of Quaternary transgressions in East China: a preliminary study [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1981, 55(1): 1-13.]
- [14] 王强, 李凤林. 渤海湾西岸第四纪海陆变迁[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1983, 3(4): 83-89. [WANG Qiang, LI Fenglin. The changes of marine-continental conditions in the West coast of the Bohai Gulf during Quaternary [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1983, 3(4): 83-89.]
- [15] 汪品先, 闵秋宝. 我国第四纪海侵研究中的几个基本问题[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1985, 5(1): 15-25. [WANG Pinxian, MIN Qiubao. Quaternary marine transgressions in China: some basic questions [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1985, 5(1): 15-25.]
- [16] 王张华, 丘金波, 冉莉华, 等. 长江三角洲南部地区晚更新世年代地层和海水进退[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(4): 1-8. [WANG Zhanghua, QIU Jinbo, RAN Lihua, et al. Chronostratigraphy and transgression/regression during Late Pleistocene in the southern Changjiang (Yangtze) River delta plain [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(4): 1-8.]
- [17] Zhao B C, Wang Z H, Chen J, et al. Marine sediment records and relative sea level change during Late Pleistocene in the Changjiang delta area and adjacent continental shelf [J]. *Quaternary International*, 2008, 186(1): 164-172.
- [18] Liu J, Saito Y, Wang H, et al. Stratigraphic development during the Late Pleistocene and Holocene offshore of the Yellow River delta, Bohai Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 36(4-5): 318-331.
- [19] Yao Z Q, Guo Z T, Xiao G Q, et al. Sedimentary history of the western Bohai coastal plain since the late Pliocene: implications on tectonic, climatic and sea-level changes [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 54-55: 192-202.
- [20] Yi L, Lai Z P, Yu H J, et al. Chronologies of sedimentary changes in the South Bohai Sea, China: constraints from luminescence and radiocarbon dating [J]. *Boreas*, 2013, 42(2): 267-284.
- [21] Shi X F, Yao Z Q, Liu Q S, et al. Sedimentary architecture of the Bohai Sea China over the last 1 Ma and implications for sea-level changes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 451: 10-21.
- [22] Wang P X. Cenozoic deformation and the history of sea-land interactions in Asia [M]//Clift P, Kuhnt W, Wang P, et al. Continent-Ocean Interactions within East Asian Marginal Seas. Washington: American Geophysical Union, 2004: 1-22.
- [23] 杨守业. 亚洲主要河流的沉积地球化学示踪研究进展[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(6): 648-655. [YANG Shouye. Advances in sedimentary geochemistry and tracing applications of Asian rivers [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(6): 648-655.]
- [24] 郑洪波, 汪品先, 刘志飞, 等. 东亚东倾地形格局的形成与季风系统演化历史寻踪: 综合大洋钻探计划683号航次建议书简介[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(11): 1150-1160. [ZHENG Hongbo, WANG Pinxian, LIU Zhifei, et al. Carving the history of East Asia's East-tilting topography and East Asian monsoon—an introduction to IODP proposal 683 [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(11): 1150-1160.]
- [25] Qin Y S, Zhao Y Y, Chen L R, et al. Geology of Bohai Sea [M]. Beijing: China Ocean Press, 1990.
- [26] 肖国桥, 郭正堂, 陈宇坤, 等. 渤海湾西岸BZ₁钻孔的磁性地层学研究 [J]. *第四纪研究*, 2008, 28(5): 909-916. [XIAO Guoqiao, GUO Zhengtang, CHEN Yukun, et al. Magnetostratigraphy of BZ₁ borehole in West coast of Bohai Bay, northern China [J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(5): 909-916.]
- [27] 姚政权, 郭正堂, 陈宇坤, 等. 渤海湾海陆交互相沉积的磁性地层学 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(1): 9-15. [YAO Zhengquan, GUO Zhengtang, CHEN Yukun, et al. Magnetostratigraphy of marine-terrigenous facies deposits in Bohai Bay [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(1): 9-15.]
- [28] Xu Q M, Yang J L, Hu Y Z, et al. Magnetostratigraphy of two deep boreholes in southwestern Bohai Bay: tectonic implications and constraints on the ages of volcanic layers [J]. *Quaternary Geochronology*, 2018, 43: 102-114.
- [29] Yi L, Deng C L, Tian L Z, et al. Plio-Pleistocene evolution of Bohai Basin (East Asia): demise of Bohai Paleolake and transition to marine environment [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 29403.
- [30] 肖勤勉, 袁桂邦, 秦雅飞, 等. 淮河三角洲南部MT04孔磁性地层研究及其构造与气候耦合关系的探讨 [J]. *第四纪研究*, 2014, 34(3): 540-552. [XU Qinmian, YUAN Guibang, QIN Yafei, et al. Magnetostratigraphy and discussion of coupling relationship between tectonic movement and climate change of MT04 borehole in southern Luanhe River delta [J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(3): 540-552.]
- [31] 王忠蕾, 郑洪波, 梅西, 等. 辽东湾北部钻孔磁性地层年代框架及地质意义 [J]. *第四纪研究*, 2020, 40(3): 616-632. [WANG Zhonglei, ZHENG Hongbo, MEI Xi, et al. Magnetic stratigraphy of boreholes in the north of Liaodong Bay and its significance [J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40(3): 616-632.]
- [32] 李翔, 李日辉, 陈晓辉, 等. 渤海西部TJC-1孔磁性地层研究 [J]. *第四纪研究*, 2016, 36(1): 208-215. [LI Xiang, LI Rihui, CHEN Xiaohui, et al. Quaternary magnetostratigraphy recorded in the sediments of core TJC-1 in the western Bohai Sea [J]. *Quaternary Sciences*, 2016, 36(1): 208-215.]
- [33] Liu J X, Liu Q S, Zhang X H, et al. Magnetostratigraphy of a long Quaternary sediment core in the South Yellow Sea [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 144: 1-15.
- [34] Yao Z Q, Shi X F, Liu Q S, et al. Paleomagnetic and astronomical dating of sediment core BH08 from the Bohai Sea, China: implications for glacial-interglacial sedimentation [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 393: 90-101.
- [35] 肖国强, 杨吉龙, 赵长荣, 等. 天津滨海地区G2孔磁性地层年代及其构造指示 [J]. *地质通报*, 2014, 33(10): 1642-1650. [XIAO Guoqi, YANG Jilong, ZHAO Changrong, et al. Paleomagnetic dating and tectonic implication of G2 borehole in Tianjin coastal area [J]. *Geological Bulletin*, 2014, 33(10): 1642-1650.]

- ang, YANG Jilong, ZHAO Changrong, et al. Magnetostratigraphy of drill hole G2 in the Tianjin coastal area and its tectonic significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33 (10): 1642-1650.]
- [36] Yang J L, Liang M Y, Algeo T J, et al. Upper Miocene-Quaternary magnetostratigraphy and magnetic susceptibility from the Bohai Bay Basin (eastern China) and implications for regional volcanic and basin-al subsidence history [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 538: 109469.
- [37] Liu J, Wang H, Wang F F, et al. Sedimentary evolution during the last ~ 1.9 Ma near the western margin of the modern Bohai Sea [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 451: 84-96.
- [38] 刘健, 段宗奇, 梅西, 等. 南黄海中部隆起晚新近纪—第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(5): 25-43. [LIU Jian, DUAN Zongqi, MEI Xi, et al. Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the Late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41 (5): 25-43.]
- [39] Mei X, Li R H, Zhang X H, et al. Evolution of the Yellow Sea warm current and the Yellow Sea cold water mass since the Middle Pleistocene [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 442: 48-60.
- [40] 葛淑兰, 石学法, 朱日祥, 等. 南黄海EY02-2孔磁性地层及古环境意义 [J]. 科学通报, 2006, 51 (7): 855-865. [GE Shulan, SHI Xuefa, ZHU Rixiang, et al. Magnetostratigraphy of borehole EY02-2 in the southern Yellow Sea and its paleoenvironmental significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51 (7): 855-865.]
- [41] Liu J X, Shi X F, Liu Q S, et al. Magnetostratigraphy of a greigite-bearing core from the south yellow sea: implications for remagnetization and sedimentation [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(10): 7425-7441.
- [42] 郑光膺. 南黄海第四纪层型地层对比 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1-262. [ZHENG Guangying. Comparison of Sandwich Stratum of Quaternary in the South Yellow Sea [M]. Beijing: Science Press, 1989: 1-262.]
- [43] Duan Z Q, Liu Q S, Shi X F, et al. Reconstruction of high-resolution magnetostratigraphy of the Changjiang (Yangtze) River Delta, China [J]. *Geophysical Journal International*, 2016, 204 (2): 948-960.
- [44] Yi L, Ye X Y, Chen J B, et al. Magnetostratigraphy and luminescence dating on a sedimentary sequence from northern East China Sea: constraints on evolutionary history of eastern marginal seas of China since the Early Pleistocene [J]. *Quaternary International*, 2014, 349: 316-326.
- [45] Jiang Z X, Jin C S, Wang Z B, et al. Chronostratigraphic framework of the East China Sea since MIS 6 from geomagnetic paleointensity and environmental magnetic records [J]. *Global and Planetary Change*, 2020, 185: 103092.
- [46] Wang Z H, Xu H, Zhan Q, et al. Lithological and palynological evidence of Late Quaternary depositional environments in the subaqueous Yangtze delta, China [J]. *Quaternary Research*, 2010, 73 (3): 550-562.
- [47] Chen Z Y, Chen Z L, Zhang W G. Quaternary stratigraphy and trace-element indices of the Yangtze Delta, eastern China, with special reference to marine transgressions [J]. *Quaternary Research*, 1997, 47 (2): 181-191.
- [48] Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records [J]. *Paleoceanography*, 2005, 20 (1): PA1003.
- [49] Shi X F, Yao Z Q, Liu J X, et al. Dominant role of sea level on the sedimentary environmental evolution in the Bohai and Yellow Seas over the last 1 million years [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 638221.
- [50] McKee B A, Nittrouer C A, DeMaster D J. Concepts of sediment deposition and accumulation applied to the continental shelf near the mouth of the Yangtze River [J]. *Geology*, 1983, 11 (11): 631-633.
- [51] Shan X, Shi X F, Clift P D, et al. Carbon isotope and rare earth element composition of Late Quaternary sediment gravity flow deposits on the mid shelf of East China Sea: implications for provenance and origin of hybrid event beds [J]. *Sedimentology*, 2019, 66 (5): 1861-1895.
- [52] 阎玉忠, 王宏, 李凤林, 等. 渤海湾西岸晚更新世沉积的差异性特征 [J]. 第四纪研究, 2006, 26 (3): 181-191. [YAN Yuzhong, WANG Hong, LI Fenglin, et al. Different depositional processes of boreholes BQ1 and BQ2 in the Late Pleistocene on the West coast of Bohai Bay [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26 (3): 181-191.]
- [53] 王强, 张玉发, 袁桂邦, 等. MIS 3阶段以来河北黄骅北部地区海侵与气候期对比 [J]. 第四纪研究, 2008, 28 (1): 79-95. [WANG Qiang, ZHANG Yufa, YUAN Guibang, et al. Since MIS 3 stage the correlation between transgression and climatic changes in the North Huanghua area, Hebei [J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28 (1): 79-95.]
- [54] 刘健, 王红, 李绍全, 等. 南黄海北部泥质沉积区冰后期海侵沉积记录 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24 (3): 1-10. [LIU Jian, WANG Hong, LI Shaoquan, et al. Postglacial transgressive sedimentary records of muddy sedimentary areas in the North of the South Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24 (3): 1-10.]
- [55] Yi L, Yu H J, Ortiz J D, et al. Late Quaternary linkage of sedimentary records to three astronomical rhythms and the Asian monsoon, inferred from a coastal borehole in the South Bohai Sea, China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 329-330: 101-117.
- [56] 庄振业, 许卫东, 刘东生, 等. 渤海南部S₃孔晚第四纪海相地层的划分及环境演变 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19 (2): 27-35. [ZHUANG Zhenye, XU Weidong, LIU Dongsheng, et al. Division and environmental evolution of Late Quaternary marine beds of S₃ hole in the Bohai Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19 (2): 27-35.]
- [57] 王中波, 张江勇, 梅西, 等. 中国陆架海MIS 5(74 ~ 128 ka)以来地层及其沉积环境 [J]. 中国地质, 2020, 47 (5): 1370-1394. [WANG Zhongbo, ZHANG Jiangyong, MEI Xi, et al. The stratigraphy and depositional environments of China's sea shelves since MIS 5 (74-128 ka) [J]. *Geology in China*, 2020, 47 (5): 1370-1394.]
- [58] Yi L, Yu H J, Ortiz J D, et al. A reconstruction of Late Pleistocene relative sea level in the South Bohai Sea, China, based on sediment grain-size analysis [J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 281: 88-100.

- [59] Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, et al. *The Geologic Time Scale* [M]. Amsterdam: Elsevier, 2012: 1-1144.
- [60] Liu J, Zhang X H, Mei X, et al. The sedimentary succession of the last ~3.50 Myr in the western South Yellow Sea: paleoenvironmental and tectonic implications [J]. *Marine Geology*, 2018, 399: 47-65.
- [61] 李从先, 范代读, 杨守业, 等. 中国河口三角洲地区晚第四纪下切河谷层序特征和形成 [J]. *古地理学报*, 2008, 10(1): 87-97. [LI Congxian, FAN Daidu, YANG Shouye, et al. Characteristics and Formation of the Late Quaternary incised-valley sequences in estuary and delta areas in China [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(1): 87-97.]
- [62] Fan D D, Shang S, Burr G. Sea level implications from Late Quaternary/Holocene paleosols from the Oujiang Delta, China [J]. *Radiocarbon*, 2019, 61(1): 83-99.
- [63] Wellner R W, Bartek L R. The effect of sea level, climate, and shelf physiography on the development of incised-valley complexes: a modern example from the East China Sea [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(6): 926-940.
- [64] 李从先, 陈庆强, 范代读, 等. 末次盛冰期以来长江三角洲地区的沉积相和古地理 [J]. *古地理学报*, 1999, 1(4): 12-25. [LI Congxian, CHEN Qingqiang, FAN Daidu, et al. Palaeogeography and Palaeoenvironment in Changjiang delta since last glaciation [J]. *Journal of Palaeogeography*, 1999, 1(4): 12-25.]
- [65] Lin A M, Yang Z Y, Sun Z M, et al. How and when did the Yellow River develop its square bend? [J]. *Geology*, 2001, 29(10): 951-954.
- [66] Richardson N J, Densmore A L, Seward D, et al. Did incision of the Three Gorges begin in the Eocene? [J]. *Geology*, 2010, 38(6): 551-554.
- [67] 范代读, 李从先, Yokoyama K, 等. 长江三角洲晚新生代地层独居石年龄谱与长江贯通时间研究 [J]. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2005, 48(10): 1718-1727. [FAN Daidu, LI Congxian, Yokoyama K, et al. Monazite age spectra in the Late Cenozoic strata of the Changjiang delta and its implication on the Changjiang run-through time [J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 2005, 48(10): 1718-1727.]
- [68] 贾军涛, 郑洪波, 黄湘通, 等. 长江三角洲晚新生代沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄及其对长江贯通的指示 [J]. *科学通报*, 2010, 55(15): 1520-1528. [JIA Juntao, ZHENG Hongbo, HUANG Xiangtong, et al. Detrital zircon U-Pb ages of Late Cenozoic sediments from the Yangtze delta: implication for the evolution of the Yangtze River [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15): 1520-1528.]
- [69] Craddock W H, Kirby E, Harkins N W, et al. Rapid fluvial incision along the Yellow River during Headward Basin integration [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(3): 209-213.
- [70] Jiang F C, Fu J L, Wang S B, et al. Formation of the Yellow River, inferred from loess-palaeosol sequence in Mangshan and lacustrine sediments in Sanmen Gorge, China [J]. *Quaternary International*, 2007, 175(1): 62-70.
- [71] Pan B T, Wang J P, Gao H S, et al. Paleomagnetic dating of the top-most terrace in Kouma, Henan and its indication to the Yellow River's running through Sanmen Gorges [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(7): 657-664.
- [72] Kong P, Jia J, Zheng Y. Time constraints for the Yellow River traversing the Sanmen Gorge [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2014, 15(2): 395-407.
- [73] Xiao G Q, Pan Q, Zhao Q Y, et al. Early Pleistocene integration of the Yellow River II: evidence from the Plio-Pleistocene sedimentary record of the Fenwei Basin [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 577: 110550.
- [74] 杨守业, 蔡进功, 李从先, 等. 黄河贯通时间的新探索 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(2): 15-20. [YANG Shouye, CAI Jingong, LI Congxian, et al. New discussion about the run-through time of the Yellow River [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2001, 21(2): 15-20.]
- [75] Yao Z Q, Shi X F, Qiao S Q, et al. Persistent effects of the Yellow River on the Chinese marginal seas began at least ~880 ka ago [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 2827.
- [76] Coe A L. *The Sedimentary Record of Sea-Level Change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 1-288.
- [77] Limarino C, Tripaldi A, Marenssi S, et al. Tectonic, sea-level, and climatic controls on Late Paleozoic sedimentation in the western basins of Argentina [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2006, 22(3-4): 205-226.
- [78] Komatsubara J. Fluvial architecture and sequence stratigraphy of the Eocene to Oligocene Iwaki Formation, northeast Japan: channel-fills related to the sea-level change [J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 168(1-2): 109-123.
- [79] Chappell J, Shackleton N J. Oxygen isotopes and sea level [J]. *Nature*, 1986, 324(6093): 137-140.
- [80] 韦桃源, 陈中原, 魏子新, 等. 长江河口区第四纪沉积物中的地球化学元素分布特征及其古环境意义 [J]. *第四纪研究*, 2006, 26(3): 397-405. [WEI Taoyuan, CHEN Zhongyuan, WEI Zixin, et al. The distribution of geochemical trace elements in the Quaternary sediments of the Changjiang River mouth and the paleoenvironmental implications [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(3): 397-405.]
- [81] 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 黄海地质 [M]. 北京: 海洋出版社, 1989: 1-289. [QIN Yunshan, ZHAO Yiyang, CHEN Lirong, et al. *Geology of Yellow Sea* [M]. Beijing: China Ocean Press, 1989: 1-289.]
- [82] Chen Z Y, Stanley D J. Quaternary subsidence and river channel migration in the Yangtze delta plain, eastern China [J]. *Journal of Coastal Research*, 1995, 11(3): 927-945.
- [83] Allen M B, Macdonald D I M, Xun Z, et al. Early Cenozoic two-phase extension and Late Cenozoic thermal subsidence and inversion of the Bohai Basin, northern China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1997, 14(7-8): 951-972.
- [84] Yokoyama T, Koizumi I. Marine transgressions on the Pleistocene pecangan Formation in the Sangiran area, central Java, Indonesia [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1989, 72: 177-193.
- [85] Kitaba I, Harada M, Hyodo M, et al. MIS 21 and the Mid-Pleistocene climate transition: climate and sea-level variation from a sediment core in Osaka Bay, Japan [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 299(1-2): 227-239.
- [86] Miller K G, Kominz M A, Browning J V, et al. The Phanerozoic re-

- cord of global sea-level change [J]. *Science*, 2005, 310(5752): 1293-1298.
- [87] McCarthy F M G, Katz M E, Kotthoff U, et al. Sea-level control of New Jersey margin architecture: palynological evidence from Integrated Ocean Drilling Program Expedition 313 [J]. *Geosphere*, 2013, 9(6): 1457-1487.
- [88] Naish T, Kamp P J J, Alloway B V, et al. Integrated tephrochronology and magnetostratigraphy for cyclothemtic marine strata, Wanganui Basin: implications for the Pliocene-Pleistocene boundary in New Zealand [J]. *Quaternary International*, 1996, 34-36: 29-48.
- [89] Katz M E, Browning J V, Miller K G, et al. Paleobathymetry and sequence stratigraphic interpretations from benthic foraminifera: insights on New Jersey shelf architecture, IODP Expedition 313 [J]. *Geosphere*, 2013, 9(6): 1488-1513.
- [90] Miller K G, Sugarman P J, Browning J V, et al. Pleistocene sequence stratigraphy of the shallow continental shelf, offshore New Jersey: constraints of Integrated Ocean Drilling Program Leg 313 core holes [J]. *Geosphere*, 2013, 9(1): 74-95.
- [91] Reynolds D J, Steckler M S, Coakley B J. The role of the sediment load in sequence stratigraphy: the influence of flexural isostasy and compaction [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1991, 96(B4): 6931-6949.
- [92] Yao Z Q, Shi X F, Liu Y G, et al. Sea-level and climate signatures recorded in orbitally-forced continental margin deposits over the last 1 Myr: New perspectives from the Bohai Sea [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 550: 109736.
- [93] 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.
- [94] Laskar J, Robutel P, Joutel F, et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2004, 428(1): 261-285.
- [95] Zhao D B, Wan S M, Clift P D, et al. Provenance, sea-level and monsoon climate controls on silicate weathering of Yellow River sediment in the northern Okinawa Trough during Late Last Glaciation [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 490: 227-239.
- [96] 石学法. 大洋钻探与中国边缘海沉积地质学[J]. 海洋科学, 1996, 25(3): 47-50. [SHI Xuefa. Ocean drilling and sedimentary geology of China marginal seas [J]. Marine Sciences, 1996, 25(3): 47-50.]
- [97] 郑洪波. IODP中的海陆对比和海陆相互作用[J]. 地球科学进展, 2003, 18(5): 722-729. [ZHENG Hongbo. Land-ocean comparison and interactions in IODP [J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(5): 722-729.]
- [98] 赵美训, 丁杨, 于蒙. 中国边缘海沉积有机质来源及其碳汇意义[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(9): 70-76. [ZHAO Meixun, DING Yang, YU Meng. Sources of sedimentary organic matter in China marginal Sea surface sediments and implications of carbon sink [J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(9): 70-76.]