

doi: 10.12029/gc20200506

王中波, 张江勇, 梅西, 陈晓辉, 赵利, 张勇, 张志珣, 李学杰, 李日辉, 陆凯, 孙荣涛, 杨守业. 2020. 中国陆架海 MIS5(74~128 ka)以来地层及其沉积环境[J]. 中国地质, 47(5): 1370-1394.

Wang Zhongbo, Zhang Jiangyong, Mei Xi, Chen Xiaohui, Zhao Li, Zhang Yong, Zhang Zhixun, Li Xuejie, Li Rihui, Lu Kai, Sun Rongtao, Yang Shouye. 2020. The stratigraphy and depositional environments of China's sea shelves since MIS5 74-128 ka[J]. Geology in China, 47(5):1370-1394(in Chinese with English abstract).

中国陆架海 MIS5 (74~128 ka) 以来地层及其沉积环境

王中波^{1,2}, 张江勇³, 梅西^{1,2}, 陈晓辉^{1,2}, 赵利³, 张勇^{1,2}, 张志珣^{1,2},
李学杰³, 李日辉^{1,2}, 陆凯^{1,2}, 孙荣涛⁴, 杨守业⁵

(1. 自然资源部天然气水合物重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071; 3. 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760; 4. 资源与环境工程学院, 山东理工大学, 山东 淄博 255049; 5. 海洋地质国家重点实验室, 同济大学, 上海 200092)

摘要: 基于中国海陆架 28 个晚第四纪钻孔实测数据和典型高分辨率地震剖面的综合地层分析, 对比区内已有 46 个钻孔的研究成果, 系统地开展晚第四纪地层特征识别和沉积环境重建。研究表明, MIS5 以来中国海陆架沉积记录了 3 次明显的海侵过程, 发育了 3 个相对完整的海相地层。其中, 渤海和东海 MIS3 和 MIS1 相对较薄, 而黄海海相地层较厚。渤海和黄海末次冰期的地层保存较少, 东海外陆架末次冰期地层发育完整, 较完整地记录 10 万年以来的沉积记录。南海晚更新世内陆架以滨岸和陆相沉积为主, 外陆架为滨岸和浅海沉积; 全新世发育浅海沉积。总体上, 中国海陆架晚第四纪以来沉积环境演变依次是 MIS5(74~128 ka)的浅海-滨海海相沉积, MIS4(60~74 ka)陆相潟湖-河流-滨海河口相沉积, MIS3(24~60 ka)浅海相-滨海潮坪沉积, MIS2(12~24 ka)/LGM 时期陆相-河流相沉积, MIS1(现在~12 ka)/全新世海侵潮流砂和浅海泥质沉积。此外, 新构造运动和区域沉降作用对地层的发育和保存具有一定的影响。上述认识为深入研究中国晚第四纪沉积与全球气候变化对比提供直接依据。

关键词: 中国海; MIS5; 陆架; 全球气候变化; 海平面变化; 沉积地层; 沉积环境; 海洋地质调查工程

中图分类号: P736.22³ 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)05-1370-25

The stratigraphy and depositional environments of China's sea shelves since MIS5 (74-128) ka

WANG Zhongbo^{1,2}, ZHANG Jiangyong³, MEI Xi^{1,2}, CHEN Xiaohui^{1,2}, ZHAO Li³, ZHANG Yong^{1,2},
ZHANG Zhixun^{1,2}, LI Xuejie³, LI Rihui^{1,2}, LU Kai^{1,2}, SUN Rongtao⁴, YANG Shouye⁵

(1. Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, Shandong, China; 2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, Shandong, China; 3. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, Guangdong, China; 4. School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, Shandong, China; 5. State Key

收稿日期: 2020-04-18; 改回日期: 2020-07-16

基金项目: 中国地质调查局海洋区域地质调查项目(DD20160137, DD20160138, DD20190208, GZH201400201)和国家自然科学基金项目(41876059, 41706069)联合资助。

作者简介: 王中波, 男, 1979 年生, 博士, 正高级工程师, 主要从事海洋沉积和第四纪地质研究; E-mail: wangzhongbo@mail.cgs.gov.cn。

Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the comprehensive analysis of 28 boreholes of late Quaternary sedimentation and the high-resolution seismic profiles, the authors studied the stratigraphic characteristics identification and sedimentary environment rebuilding by comparing the results of other 46 boreholes as references in China's sea shelves. Three distinct transgression processes were discovered in the shelves of China's sea areas, with 3 marine strata well preserved. The strata of MIS1 and MIS3 are relatively thin in the Bohai Sea and the East China Sea, but thick in the Yellow Sea. There exists little sedimentation of Last Glacial period in the Bohai Sea and the Yellow Sea, but there have been quite integrated sedimentation units without obvious hiatus in the East China Sea since 100 ka B.P. There were coastal and continental deposits in the inner shelf and nearshore and neritic deposition in the outer shelf of the South China Sea during late Pleistocene, with neritic sedimentation in Holocene. As a whole, the sedimentary environment changes of China's sea shelves since MIS5 in turn primarily were neritic and offshore deposits in MIS5 (74–128 ka), continental sedimentation of lagoon–fluvial–coast in MIS4 (60–74 ka), neritic and tidal flat deposits in MIS3 (24–60 ka), terrestrial or fluvial sedimentation in MIS2 (12–24 ka), and tidal sand ridge and neritic deposition in Holocene. Furthermore; the neotectonic movement and regional subsidence also influenced the late Quaternary stratigraphic development and their preservation in China seas. The results will provide direct evidence for the study of China's Quaternary sedimentation and global climate changes

Key words: China seas; MIS5; continental shelf; global climate changes; sea-level changes; sedimentary stratigraphy; depositional environment; marine geological survey engineering

About the first author: WANG Zhongbo, male, born in 1979, doctor, senior engineer, mainly engages in marine geology and Quaternary geology; E-mail: wangzhongbo@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported jointly by Geological Survey Project of China Geological Survey (No. DD20160137, No. DD20160138, No. DD20190208, No. GZH201400201) and National Natural Science Foundation of China (No. 41876059, No. 41706069).

1 引言

晚第四纪是全球气候变化的重要时期,在这一时期,冰期-间冰期转换和海平面大幅升降等变化,导致陆架的范围和沉积环境发生变化。因此,中国海陆架及沿海平原晚第四纪沉积最大的特点是存在多个在冰期-间冰期旋回形成的海侵层。前人对于中国边缘海陆架沉积晚第四纪海侵期次、地层记录和沉积环境等开展了大量研究工作。

近年来研究发现,中国海域晚更新世以来普遍发育3次大规模海侵(王靖泰等,1980;汪品先等,1981;杨子赓,1993;王强等,1999;Shi et al.,2009;高茂生等,2018),分别对应:全新世“第I海相层”、MIS3时期的“第II海相层”和MIS5时期的“第III海相层”。

已有研究揭示渤海第四系厚度介于300~600 m,海陆交互沉积是这一地质时期的重要沉积特征(秦蕴珊等,1985);且晚更新世以来甚至全新世以来的构造活动强烈(李西双等,2010;王洪聚等,2011);陆源物质供应丰富,黄河、辽河、滦河等河流入海带来的巨量陆源碎屑物质在渤海陆架堆积(秦

蕴珊等,1985;Liu et al.,2009)。第四纪冰期-间冰期转换引起的海平面波动与气候变化控制着渤海沉积格局(Marsset et al.,1996;Liu et al.,2009;Yi et al.,2012)。现有研究对渤海及周边地区晚第四纪以来发生过3次海侵的事实基本不存在争议,但对3次海侵发生的时间却产生了两种不同的观点。一种观点认为渤海及周边平原地区晚第四纪以来3次大规模海侵事件分别发育于MIS7、MIS5和MIS1的高海面时期,因为受全球海面及渤海海峡地貌的共同影响,MIS3期发生大规模海侵的可能性较小(姚政权等,2006;肖国桥等,2008;施林峰等,2009;Yi et al.,2012;高茂生等,2018)。另一种观点则认为渤海地区晚第四纪以来3次大规模海侵分别对应MIS5、MIS3和MIS1期的高海面时期(秦蕴珊等,1985;杨子赓等,1993;Liu et al.,2009),并认为MIS3海侵范围明显大于MIS5高海面时期(王强等,1999)。

黄海第四纪地层研究主要集中在南黄海,而北海黄海的相对薄弱。Liu et al.,(2010)通过山东半岛水下斜坡沉积体的两个钻孔(NYS101和NYS102)进行地层研究,发现其全新世沉积的厚度

分别是 20 m 和 36 m, 而且均记录了 MIS1 和 MIS3 两期海侵。南黄海中西部年代地层研究的代表性钻孔是 QC2 孔, 其全新世的厚度接近 18 m, 为潮流沙脊沉积。南黄海西部其他钻孔研究揭示该区全新世地层的厚度变化受控于陆源物质的输入, 即两侧靠近陆地的钻孔的全新世沉积较厚, 中部钻孔全新世明显变薄, 厚度都在 10 m 以内(杨子赓等, 1993)。这些钻孔基本都有 MIS1、MIS3 和 MIS5 的海侵记录, 部分地区 MIS1 期缺失, 如青岛岸外的 QDZ01 孔。此外, 南黄海中部底层流的存在, 导致某些区域的全新世地层遭受到侵蚀甚至是缺失, 如 DLC70-3 孔。1995 年开始的黄海地质地球物理综合调查获取的 YSDP102、103、104、105、1061 和 107 钻孔, 首次揭示了黄海东侧陆架的晚第四纪地层特征, 重建了 MIS3 以来的沉积过程(刘健等, 1999; Wang et al., 2014)。

早期的东海地层研究是根据浅部地球物理测量, 对比外陆架浅钻孔 YQ1 孔中微体古生物和孢粉组合, 对陆架地层进行划分, 推断了晚更新世以来沉积地层演化模式, 但地层划分缺乏绝对年龄的约束(Yang, 1989)。近十年来, 东海外陆架地区代表性研究成果主要是基于 1996 年中法合作采集的单道地震调查资料和 1990 年上海地质调查局的外陆架 DZQ4 孔资料, 对比海平面变化曲线, 分析地层形成年代、沉积相和沉积环境, 讨论第四纪东海的海进-海退层序(唐保根, 1996; Saito et al., 1998; Liu et al., 2000; Berné et al., 2002; Yoo et al., 2002; Wu et al., 2010)、潮流沙脊的分布和演化(Liu et al., 2002; 杨文达, 2002; Wellner & Bartek, 2003; Wu et al., 2005)和沉积地层对海平面变化的响应(刘振夏等, 1999; 张军强等, 2008), 建立晚第四纪地层框架。但由于对 DZQ4 孔热释光(TL)年龄的理解不同, 形成了两种观点。一种认为东海外陆架现存地层中, MIS2 和 MIS4 冰期历时短, 地层较薄, 部分缺失, 在地震剖面中无法辨识; MIS3 地层发育, MIS5 地层由于后期较强侵蚀作用, 地层无法识别; MIS6 强海退, 地层普遍发育, 是东海外陆架标志层(刘振夏等, 1999; Liu et al., 2000; Wu et al., 2010)。另外一种则考虑 TL 测年的敏感性, 提出东海外陆架主要由 MIS1、MIS2、MIS3~5.2、MIS5.3~5.5 和 MIS6 地层组成, 其中 MIS3 地层较不发育; MIS5 各期地层均

发育, MIS6 地层划分一致, 通过对比 DZQ4 孔和单道地震剖面提出晚更新世东海外陆架地层演化模式(Berné et al., 2002)。此外, 东海东北部 EA01 孔的地层分析表明外陆架末次冰盛期发育三角洲沉积, 末次冰盛期低海平面时期东海外陆架仍被海水覆盖而并未完全裸露成陆(李绍全等, 2002)。随后, EA05 孔研究也揭露出该岩心所处地区在末次冰盛期并未出露水面, 而一直处于河口滨岸环境, 与 DZQ4 孔等研究的认识截然不同(余华等, 2006)。

近年来, 南海陆架晚第四纪地层研究主要集中在北部陆架, 揭示出末次冰期以来的多次海侵事件。末次冰盛期, 大部分陆架出露在海平面之上, 部分地区发育河流等陆相沉积, 随后海侵形成埋藏古河道、水下三角洲等沉积体(蓝东兆等, 1993; 陈国能等, 1994; 黄永祥和葛同明, 1995; 姚衍桃等, 2009)。王树民等(2001)通过东北部晚第四纪不整合地层的研究, 发现 15.6 ka 时期古海平面位于现海平面 146 m 处, 古海岸线距现在海岸线 170 km。在冰后期海侵的不同海平面时期, 发育了多种特征的地貌和沉积, 包括海底阶地、陡坎、古岸线等, 在中全新世早期形成稳定的现代海洋沉积环境(汪品先, 1990; 时小军等, 2007; 姚衍桃等, 2009; 陈泓君等, 2017)。

总体来看, 过去的 20 多年受工作条件和研究手段等制约, 中国海域陆架第四纪沉积地层研究主要以内陆架及河流水下三角洲地区为主, 根据一些代表性的钻孔和测年, 建立了比较完整、可靠的年代地层, 对近岸浅海晚第四纪地层框架和地层演化有比较深入的认识(Chen et al., 2000; Li et al., 2002; Hori et al., 2002; Wang et al., 2005; Liu et al., 2007; Zhao et al., 2008; 徐方建等, 2009; 缪卫东等, 2016), 其中渤海和黄海地区晚第四纪研究程度相对较高, 相对而言, 东海和南海的中、外陆架地区的沉积地层与古环境研究比较薄弱。

当前, 随着中国海域 1:100 万海洋区域地质调查的全覆盖, 系统开展整个中国海域晚第四纪地层研究成为可能。本文基于中国陆架海实测高分辨率地震地层解释与典型地质钻孔地层分析, 选取代表性晚第四纪钻孔和部分典型过孔高分辨率浅地层剖面开展地层研究, 对比前人研究, 进行中国海域陆架晚第四纪地层厘定和沉积环境重建。

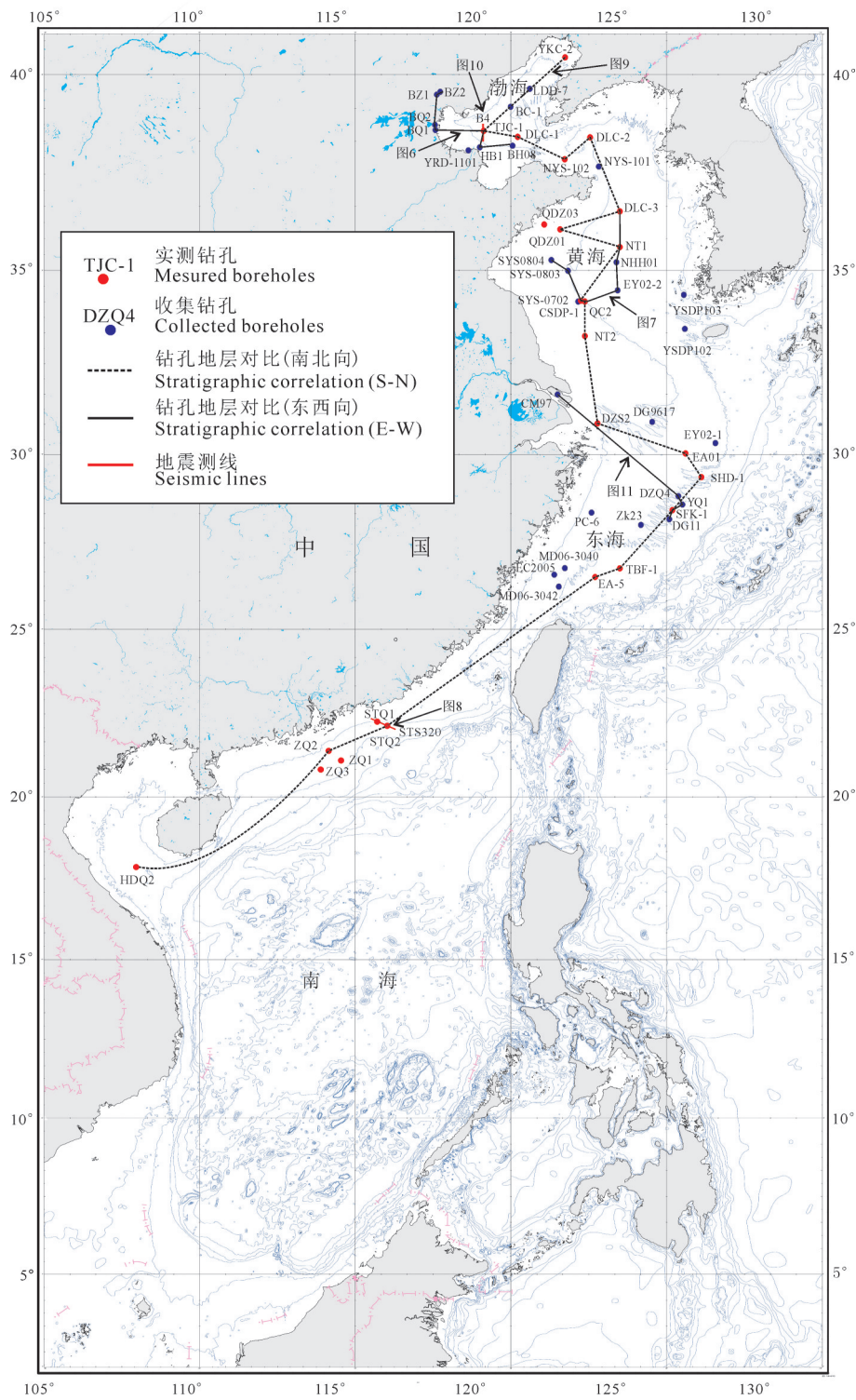


图1 中国陆架海典型钻孔与典型地震测线分布图
 Fig.1 Typical boreholes and some seismic profiles in the China's sea shelves

2 研究区概况

本文研究区包括中国海域的渤海、黄海、东海

和南海的北部的陆架地区(图1)。

渤海是一个典型的半封闭陆架浅海,位于新生代的裂陷盆地—华北盆地,新构造运动活动强烈,水

深较浅,平均水深18 m,水深大于30 m的海域集中于渤海海峡北部的老铁山水道,沉积物主要来自周围黄河、辽河及滦河等入海河流携带的陆源碎屑物质(Liu et al., 2009)。黄海平均水深91 m,海底较平坦,大部分水深在60 m以上,也是典型的半封闭陆架浅海,和世界上其他陆架浅海(如北海和白令海)相比,其特点是陆源物质供应十分丰富,在风、浪、环流系统(黄海暖流、沿岸流及冷水团)和潮流的共同作用下,形成了现今黄海海底多种类型的沉积物。东海是典型的开放型边缘海,面积约75万km²,陆架最宽600 km左右,是世界上最宽阔的陆架之一,陆架盆地在第四纪的沉降速率为300 m/Ma左右,具有充足的沉积物可容空间。南海是西太平洋最大的边缘海,处在欧亚板块、印度板块、澳大利亚板块和太平洋板块相互作用的交接处(孙卫东等, 2018),决定了其沉积物具有鲜明的区域性特点,南海北、西、南部是浅海大陆架,外缘是大陆坡,陆架狭长,陡而窄。

中国海域陆架总体呈现东部陆架宽广,坡缓而可容空间巨大,而南部则窄而长,沉积物可容空间相对有限。

3 数据来源与处理

本文通过对比中国地质调查局中国海域1:100万海洋区域地质调查项目获取的实测钻孔以及已有研究钻孔地层组成(表1,图1),选取渤海TJC-1孔、黄海CSDP-1孔、东海SFK-1孔和南海STQ-2孔作为4个海区陆架典型晚第四纪钻孔进行地层分析,同时对过孔浅地层剖面进行地震相地层解释。

根据TJC-1孔和CSDP-1孔已有研究认识(李翔等, 2016; Liu et al., 2016; 梅西等, 2019),分别选取TJC-1孔上部51.50 m和CSDP-1孔上部50 m进行MIS5以来地层组成和沉积环境讨论。

4 中国海域代表孔地层特征

4.1 渤海TJC-1孔

渤海TJC-1孔岩心沉积物特征和测年数据对比分析,揭示了第四纪以来的沉积相及其地层框架(李翔等, 2016)。TJC-1孔下段200.20~51.50 m为2.28 Ma以来至MIS6的陆相沉积,主要以陆相介形虫分布为主,地层几乎不含海相微体化石,个别层

位零星见海相介形虫,且壳体不新鲜,为再沉积搬运的产物,相应层位中未见有孔虫。本文对渤海TJC-1孔上段51.50 m的晚更新世地层进行划分(图2),自下而上分别是MIS5浅海—滨海—陆相交替沉积、MIS4早期滨海相沉积、MIS4早期河流—河流充填相沉积、MIS3滨—浅海相沉积、LGM河流相—河流充填相沉积、全新世滨海—浅海相沉积。

MIS4早期滨海相沉积:沉积物为灰褐色、黄褐色中砂—细砂,微体古生物主要为底栖有孔虫,优势种以浅水种*Textularia foliacea* Heron-Allen et Earland与*Ammonia compressiuscula* (Brady)为主,27.04~27.06 m段的AMS¹⁴C年龄大于43500 a BP,显示该阶段对应MIS4海平面下降过程中的滨海相沉积。

MIS4晚期河流—河道充填相沉积:沉积物为黄棕色、灰褐色黏土,该段地层微体古生物化石极少,仅上部零星出现。结合测年数据,该段为MIS4期晚期海平面上升过程中的河流—河道充填相沉积,且与下伏地层存在明显的沉积间断。

MIS3早中期滨—浅海相沉积:沉积物为灰黑色黏土,除下部分布有透镜体状粉砂外,沉积物较为均一。微体古生物化石丰度与分异度较高,且自下而上有明显增加的趋势。底栖有孔虫优势种以冷水种*Buccella frigida* (Cushman)与*Protelphidium turberculatum* (d'Orbigny)、浅水种*Elphidium advenum* (Cushman)、*Elphidium magellanicum* (Heron-Allen et Earland)为主,上部层位冷水种丰度达到全孔最高。海相介形虫优势种以陆架浅水种*Echinocythereis bradyformis* Ishizaki、*Bicornucythere bisanensis* (Okubo)为主。该孔21.08~21.10 m、19.36~19.38 m、18.54~18.56 m、17.88~17.90 m段的AMS¹⁴C年龄分别为(34130 ± 240) a B.P.、(33050 ± 210) a B.P.、(36020 ± 280) a B.P.、(20730 ± 70) a B.P.,显示该阶段自下而上水深逐渐增加,对应MIS3早中期海平面逐渐升高过程中的浅海相沉积。

末次冰盛期—全新世之前的河流—河道充填相沉积:沉积物为灰褐色粉砂—细砂,夹7 cm厚的黑色泥炭层。该段地层零星出现底栖有孔虫以*Textularia foliacea* Heron-Allen et Earland、*Ammonia compressiuscula* (Brady)、*Ammonia beccarii* (Linne) var. 为主,介形虫以淡水种*Ilyocypris bradyi* Sars最多。岩心的4.74 m、6.41 m、10.64 m和14.98 m处的OSL测

表1 中国陆架海域及周边典型晚第四纪钻孔数据

Table 1 The data of the typical boreholes on China's sea shelves						
海域	钻孔	纬度	经度	长度/m	水深/m	数据来源
渤海	BZ1	38°51'	117°23'	204.5	陆地	肖国桥等,2008
	BZ2	39°1.8'	117°8.2'	203.6	陆地	姚正权等,2006
	BQ1	38°40'	117°33'	95.6	陆地	阎玉忠等,2006
	BQ2	38°49.5'	117°30'	32.8	陆地	阎玉忠等,2006
	YRD-1101	38°2.14'	118°36'	200.3	1.8	Liu et al., 2016
	LDD-7	39°40.7'	120°25'	50.1	30.5	孙荣涛等,2015
	BC-1	29°9'	119°54'	240.5	24	秦蕴珊等,1985
	BH08	38°17'	119°59.8'	212.4	28	Yao et al., 2014;
	HB1	38°9'	118°55.6'	61	4.5	Liu et al., 2009
	TJC-1	38°44'	118°57'	200.3	26	李翔等,2016; 本文
	DLC70-1	38°30'	120°7.6'	70.2	27.5	蓝先洪等,2016; 本文
	YKC-2	40°26'	121°36.5'	70.2	13	陈晓辉等,2020; 本文
黄海	CSDP-1	34°18'	122°22'	300.1	52.5	Liu et al., 2016
	QC2	34°18'	122°16'	108.8	49.1	杨子庚,1993
	SYS0702	34°18'	122°06'	70.3	32	Liu et al., 2010
	SYS0803	35°02'	121°45'	60.4	49	Liu et al., 2010
	SYS0804	35°16'	121°09'	65.1	38	张军强等,2015
	NT2	33°28'	122°15'	70.5	35.4	蓝先洪等,2010
	QDZ01	36°06'	121°30'	85.1	36	仇建东等,2015
	QDZ03	36°06'	121°30'	40.2	15.5	仇建东等,2015
	YSDP102	33°50'	125°45'	60.7	62	Lee et al., 2014
	YSDP103	34°29'	125°29'	34.5	53	Lee et al., 2014
	EY02-2	34°30'	122°30'	70	79	葛淑兰等,2005
	NHH01	35°13'	123°13'	125.6	73	Liu et al., 2014
	DLC70-3	36°20'	123°32'	71.2	72	Mei et al., 2016
	NT1	35°26'	123°24'	70	74.6	蓝先洪等,2009
DLC70-2	38°27'	122°24'	70.6	52.5	陈晓辉等,2014	
NYS-101	37°42'	122°48'	70.2	49	Liu et al., 2007	
NYS-102	37°56'	121°44'	70.1	34	Liu et al., 2007	
东海	EC2005	27°25'	121°20'	60.2	36	徐方建等,2009
	MD06-3042	27°5.4'	121°24.1'	34.1	62	郑妍等,2010
	MD06-3040	27°43.37'	121°46.88'	19.4	47	王可等,2008
	PC-6	28°58'	122°34'	7.5	56.7	肖尚斌等,2005
	CM97	31°37'	121°23'	70.5	陆地	Hori & Saito, 2017
	EA01	30°22.7'	125°45.6'	60.1	67.1	李绍全等,2002
	EA05	27°21'	122°46'	55.6	99.9	余华等,2006
	DZS1	30°54'	122°28'	200.4	15.8	张志忠等,2015
	EY02-1	30°44'	126°34'	70	90	庄丽华等,2004
	DZQ4	29°25'	125°22'	51.61	88.7	唐保根,1996
	SFK-1	29°3'	125°15'	88.3	82.9	Wang et al., 2014; 本文
	SHD-1	29°55'	126°2'	84	150.4	本文
	TBF-1	27°35'	123°32'	95.7	100.2	本文
南海	HDQ2	18.60	108.34	88.3	44	陈泓君等,2017
	STQ2	22.12	116.33	70.1	75.4	本文
	STQ1	22.66	116.04	71.2	30.8	本文
	ZQ1	21°29.5'	114°37.5'	74.4	110	韦成龙等,2015
	ZQ2	21°35.5'	114°4.5'	89.6	120	韦成龙等,2015
	ZQ3	21°0.4'	115°25.4'	121	125.8	韦成龙等,2015

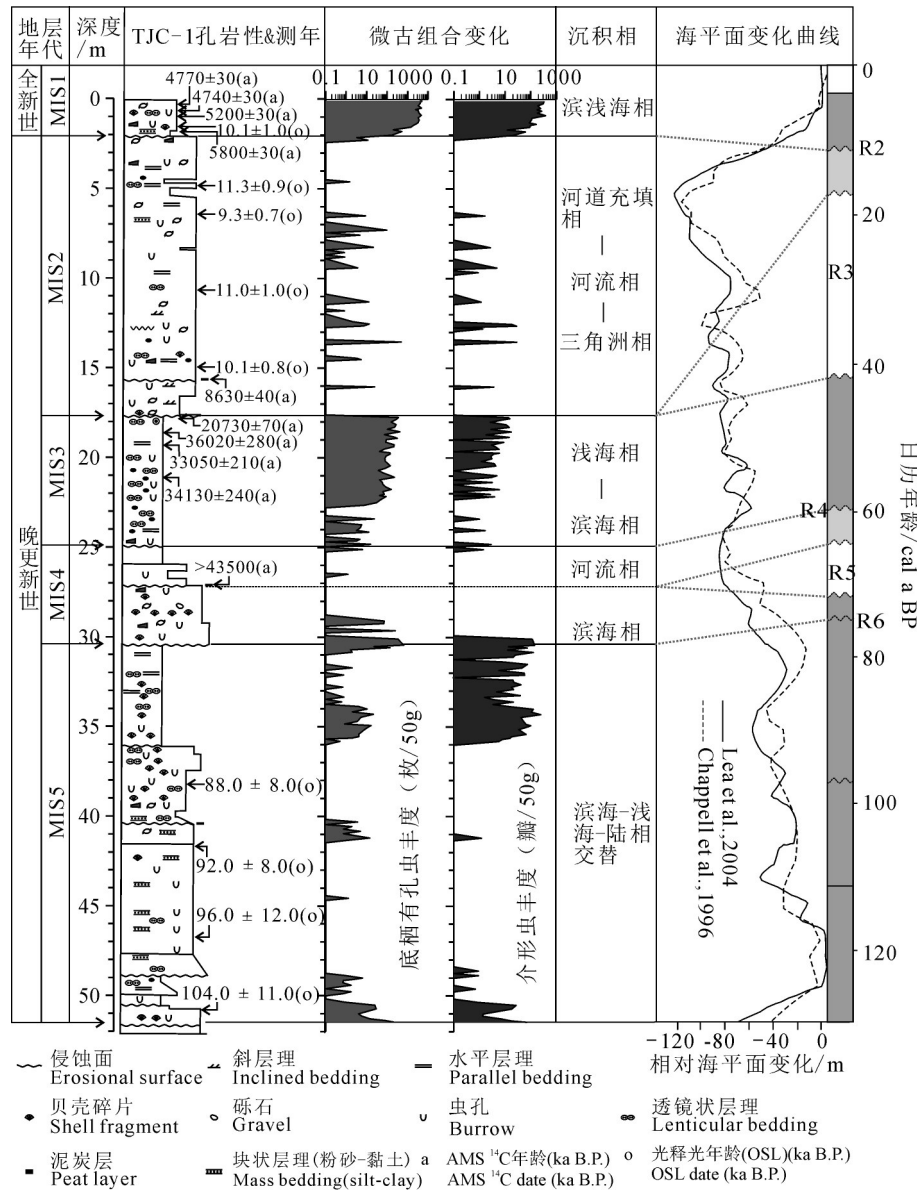


图2 TJC-1孔孔上段(51.5m)综合柱状图

Fig.2 Lithologic column and its sedimentary facies of upper borehole of TJC-1(51.5 m)

年结果分别为(11.3±0.9)ka B.P.、(9.3±0.7)ka B.P.、(11.0±1.0)ka B.P.、(10.1±0.8)ka B.P.，15.58~15.60 m段的AMS¹⁴C年龄为(8630±40)a B.P.，表明该阶段为末次冰盛期后的河流—河道充填沉积。

全新世早中期滨—浅海相沉积；沉积物由灰黑色粉砂质黏土逐渐过渡为黏土质粉砂。底部底栖有孔虫与介形虫的丰度及分异度较低。底栖有孔虫优势种主要包括浅水种 *Textularia foliacea* Heron-Allen et Earland、*Ammonia compressiuscula* (Brady)、*Elphidium advenum* (Cushman) 和冷水种

Protelphidium turberculatum (d'Orbigny)，且自下而上冷水种逐渐增加，浅水种逐渐减少。测年数据表明该阶段对应全新世早中期海平面逐渐上升至最高海平面的滨—浅海相沉积。

4.2 黄海 CSDP-1 孔

黄海 CSDP-1 孔岩心沉积物特征分析和测年结果对比分析，揭示出 MIS5 以来的沉积相及其地层框架(图3)。

单元6(33.90~48.99 m)，沉积物以粉砂为主，为浅海相沉积，沉积物中有冷水团指示种的底栖有孔

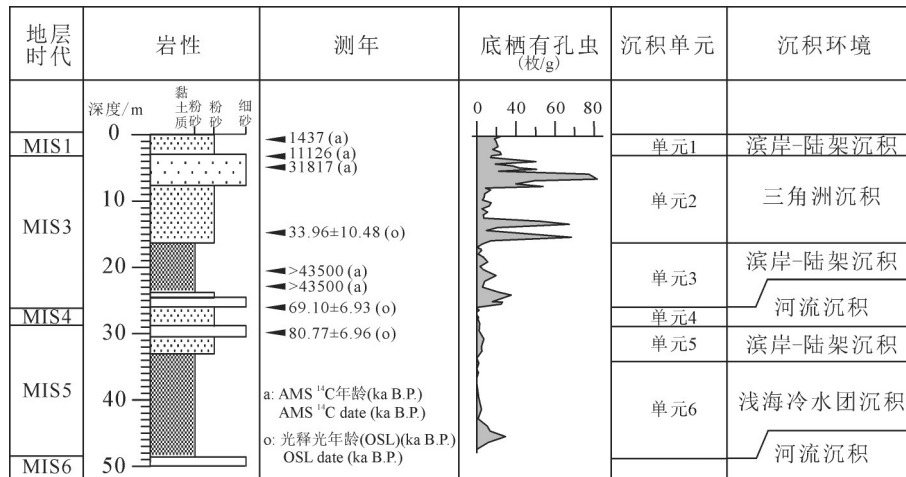


图3 黄海CSDP-1孔上段(50 m)综合柱状图(据 Liu et al., 2016; 梅西等, 2019 修改)
 Fig.3 Lithologic column and its sedimentary facies of upper borehole of CSDP-1(50.0 m)
 (modified from Liu et al., 2016; Mei et al., 2019)

虫和介形虫,本层位为 MIS5.5 高海平面发育的浅海相冷水团沉积。单元 5(28.30~33.90 m)沉积物较单元 6 明显变粗,为 MIS5.1~5.4 发育的浅海陆架沉积。单元 4(26.30~28.30 m)未见海相有孔虫化石,为 MIS4 发育的河漫滩河流相沉积。单元 3(16.57~26.30 m)为 MIS3 期早期发育的浅海陆架沉积。单元 2(3.40~16.57 m)为 MIS3 中晚期发育的三角洲前缘相沉积。单元 1(0~3.40 m)为 MIS1 期发育的全新世浅海相沉积。

4.3 东海

东海 SFK-1 孔岩心沉积物特征分析和测年结果对比分析,揭示出 MIS5 以来的沉积相及其地层框架(图 4)。由下而上,分别是 MIS5 中期浅海—前三角洲、潮流沙脊、MIS5 晚期的滨海/河口潮坪沉积、MIS4 潮坪—滨岸贝壳砂沉积、MIS3 浅海沉积、MIS3 晚期的近河口滨海沉积、LGM 河流相—河口相沉积、MIS2 晚期潮坪沉积和全新世潮流沉积。

MIS5.3~MIS5.2 浅海—前三角洲相沉积(单元 10):该沉积由块状层理的灰色粉砂组成,浅海相与前三角洲相之间为渐变过渡,二者之间没有沉积间断。有孔虫组合特征为中陆架深水种 *Bolivina robusta* 和 *Globocassidulina subglobosa* 含量较高,但由下而上广盐性近岸浅水种 *Protelphidium tuberculatum*、*Ammonia beccarii* vars. 增多,暖水种 *Cibicides pseudoungerianus* 和 *Hyalinea balthica* 减少至缺失(Wang et al., 1985; 汪品先等, 1988; 郑光膺,

1989),而凉水种增加,说明水深逐渐变浅,气温逐渐变凉,且生物潜穴出现并向上变强。测年数据显示,该沉积形成于 100 ka B.P. 前后的 MIS5.3~MIS5.2 相对高海平面下降时期。

MIS5.1 早期海侵发育的潮流沉积(单元 9):该段沉积物突出的特征是砂含量较高,且偏度明显正偏,形成块状层理的砂质沉积,表明其形成于较强的水动力环境。有孔虫分析表明浅水种有孔虫含量大幅度降低,广盐浅水种 *Ammonia beccarii* vars. 几乎未见,但中陆架深水种 *Bolivina robusta* 含量也相对不高,因此其沉积应分布在 30~50 m 水深的较深部位。此外,凉水种有孔虫 *Protelphidium tuberculatum* 和 *Buccella frigida* 含量较高,或表明本组合偏离暖流,而致水温偏凉。因此该沉积组合形成在海平面上升时期强潮流影响的中陆架地区。根据 OSL 测年结果推断该沉积发生在 80 ka B.P. 左右的 MIS5.1 的相对海平面上升时期,气温相对较低。

MIS5 晚期—MIS4 早期海退滨海/河口潮坪沉积(单元 7 和单元 8):单元 8 沉积物整体呈现出由下部的灰黑色细砂向上部发育韵律性的泥沙互层,生物扰动程度由强变弱甚至消失,粒度呈正粒序变化,分选性向上变好。下段出现较多的 *Gavelinopsis prageri* 和 *Sigmoilopsis asperula* 等中外陆架深水种,且 *Ammonia beccarii* vars. 和 *Cribronion incertum* 等浅水种含量的明显降低甚至缺失(汪品先等, 1988),说明其水深较上部明显

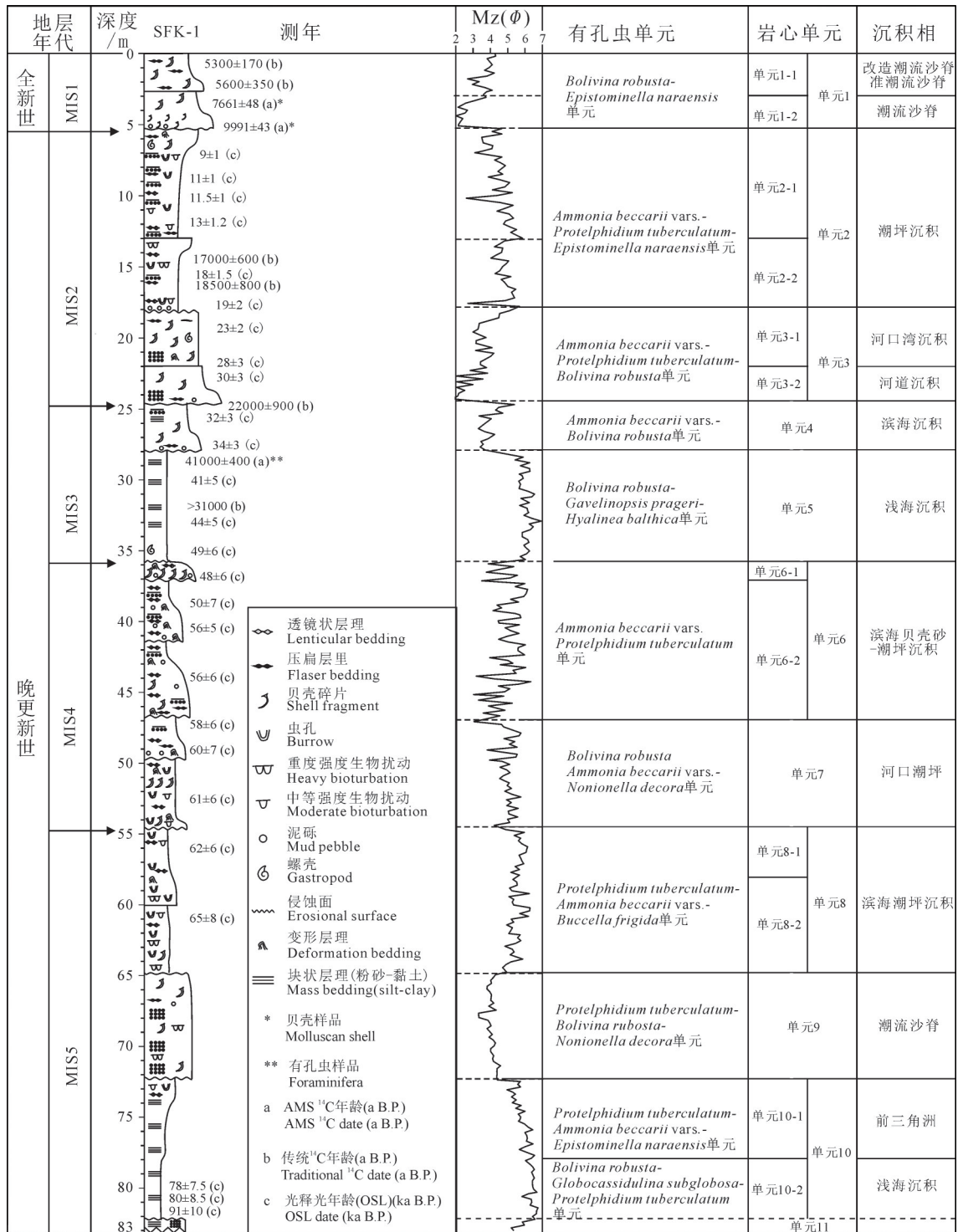


图4 SFK-1孔综合柱状图(据 Wang et al., 2019 修改)

Fig.4 Lithologic column and its sedimentary facies of borehole SFK-1 (modified from Wang et al., 2019)

增加,且有孔虫丰度向上呈显著降低趋势,浮游有孔虫减少,但其中小壳体浮游有孔虫含量却大幅度增加。有孔虫组合显示其沉积环境为水深向上降低的低温、低盐的滨岸浅水沉积,形成内陆架浅海

—近滨湖坪沉积,水深变化为10~50 m。单元7与单元8沉积环境基本一致,但有孔虫丰度和浮游有孔虫比例有所增加,小壳体浮游有孔虫减少,深水种底栖有孔虫 *Bolivina robusta*、*Siphovigerina*

proboscidea 和 *Globocassidulina subglobosa* 显著增加,表明其水深有所波动(汪品先等,1988);沉积物向上变粗,夹杂大量贝壳碎片,多生物活动遗迹,且偶见黄褐色泥砾,表明其沉积环境为近河口的潮坪沉积。综合测年数据及全球海平面 MIS5a 阶段的波动变化,判断其属于 MIS5 晚期—MIS4 早期的海平面下降时期发育的内陆架浅海—滨海潮坪—河口潮坪沉积,气候开始由暖变冷,沉积时间为 70~80 ka。

MIS4 低海平面—晚期海平面上升时期的潮坪沉积—滨海贝壳砂沉积:在沉积单元 6 表现为由下而上的潮流沉积特征,大量的灰色—灰黑色的透镜状层理、压扁层理发育,生物扰动显著,分布大量的生物潜穴遗迹,顶部发育了黑色的贝壳砂。有孔虫组合表明典型的低温、低盐的浅水环境,水深低于 20 m,有孔虫丰度的锐减、浮游有孔虫比例的降低以及大量的冷水种底栖有孔虫 *Protelphidium tuberculatum*、*Buccella frigida* 和 *Elphidium magellanicum* 出现(Wang et al., 1985; 汪品先等, 1988; 郑光膺, 1989),指示了当时相对冷的气温和浅水环境。对比测年数据及其误差范围,推测其沉积时间介于 55~68 ka。

MIS3 浅海沉积(单元 5):均匀的灰黑色粉砂,块状层理,基本没有生物扰动,典型的中内陆架浅海有孔虫组合 *Bolivina robusta*,以及较多的暖水种有孔虫 *Cibicides pseudoungerianus* 和 *Hyalinea balthica* (汪品先等,1988),说明其气候温暖,气温相对较高。该沉积单元的底栖有孔虫 AMS¹⁴C 测年为 (41 000±400)a B.P. (28.80 m),表明其沉积时代应介于 MIS3 高海面的亚间冰期相对暖期。

MIS3 晚期海退滨海沉积(单元 4):多平行层理,有透镜状层理,与上下地层侵蚀接触,沉积物由下而上呈正粒序分布。有孔虫组成显示海陆过渡沉积环境,广盐的近岸浅水种 *Ammonia beccarii* vars. 和中内陆架浅海种 *Bolivina robusta* 同时出现。测年显示该沉积形成于 MIS3 晚期 30 ka B.P. 左右。

末次冰盛期(LGM)河流—河口湾沉积(单元 3):由下而上的正粒序粒度组成,黄褐色—灰色砂质沉积物,整体分选性较好。浮游有孔虫和底栖有孔虫丰度均出现极值。其中,破碎幼体浮游有孔虫壳体和近岸广盐性底栖有孔虫的富集,表明其为强潮流控制下的感潮河段和河口沉积,且有大量冷水种有孔虫。测年

数据分析该沉积形成于 LGM 时期。

MIS2 晚期冰消期早期的潮坪沉积(单元 2):该段沉积特征是潮流影响显著的泥沙互层的潮坪沉积,压扁层理、透镜状层理及少量的平行层理。由于海侵过程中的海平面波动,而形成两个不同沉积亚层,与冰后期东海海平面上升中的两次缓慢上升阶段基本对应,之间的沉积间断对应快速融冰事件(Faribanks, 1989; Bard et al., 1990; Liu et al., 2004a; 李广雪, 2005)。有孔虫分析表明,优势种为典型的近岸浅水种 *Ammonia beccarii* vars. 和凉水种 *Protelphidium tuberculatum* 组合,揭示出其广盐、较低水温的沉积环境,而随着凉水种含量向上减少,说明气温和海平面的逐渐上升(Chappell et al., 1996)。

全新世的潮流沉积(单元 1):该段有孔虫 *Bolivina robusta* 组合代表典型的中—外陆架浅海环境(Wang et al., 1985, 1988),但单元 1-1 中细粒级代表悬浮组分的黏土和粉砂剧增表明其沉积动力环境与组合 1-2 截然不同,呈脉状分布在黑色的砂质沉积中;测年数据显示,该沉积发生在 (7255±45)a B.P. 以来,为高海平面之后的潮流沉积的变余沉积,是现代沉积(Liu et al., 2007),与下覆地层有明显的侵蚀面;而单元 1-2 沉积物分选程度、磨圆度相对较好,底部出现的 *Ammonia beccarii* vars. 及 *Protelphidium tuberculatum* 表明其广温、广盐性环境,为全新世早期冰消期海侵形成的潮流沙脊。由于海底多次波影响及相对较薄的沉积厚度,该沉积在浅地层剖面上较难识别,在研究区局部分布,呈明显的条带状分布(Liu et al., 2000; Berné et al., 2002; Yoo et al., 2002; Wu et al., 2010)。

4.4 南海

南海 STQ2 孔岩心沉积物特征分析和测年结果对比分析,揭示出 MIS6 以来的沉积相及其地层框架(图 5)。由下而上,分别是 MIS5 浅海沉积、MIS4 河流相、湖泊相和三角洲相沉积、MIS3 滨岸沉积、LGM 河流相—河口相沉积、MIS2 晚期潮坪沉积和全新世潮流沉积。

MIS5 浅海沉积:STQ2 沉积物为灰色、深灰色的黏土质粉砂,有孔虫和硅藻类化石普遍出现。沉积物孢粉中,松属花粉含量明显增加,草本植物花粉含量则明显下降,热带亚热带、温带乔木及热带山地罗汉松均略有增加。该段沉积物较厚,沉积物

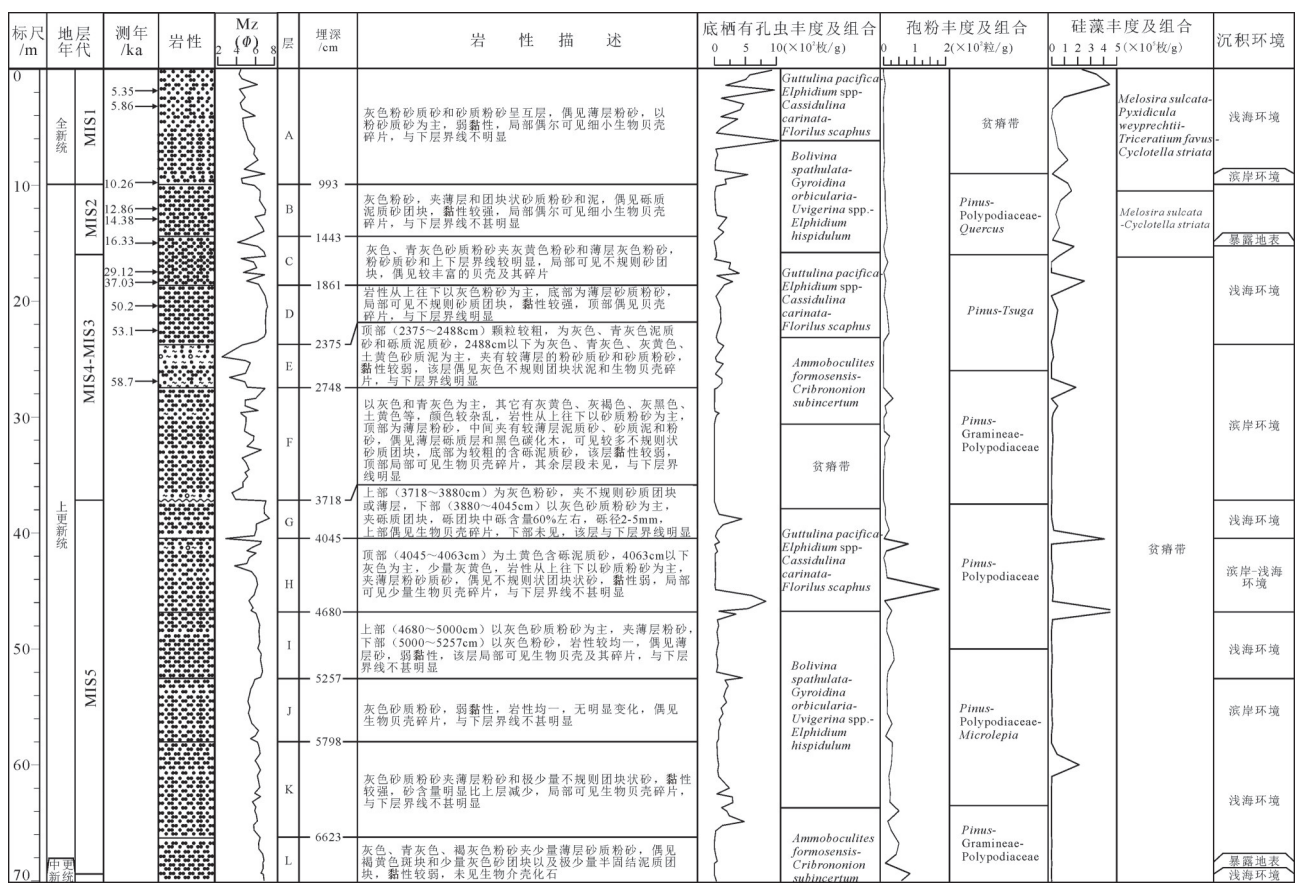


图5 STQ2钻孔综合柱状图
Fig.5 Lithologic column and its sedimentary facies of upper borehole STQ2

岩性相对均一,以灰色砂质粉砂为主。微体古生物组成中,普遍含有底栖有孔虫 *Ammobaculites formosensis* 和 *Cribronion subincertum* 等以及浮游有孔虫 *Globigerinita glutinata* 和 *Sphaeroidinella dehiscentis* 等,但是硅藻化石含量较少,在岩心的40.45~40.55 m段,沉积物的硅藻含量较其上下部明显增加,反映了相对高海平面沉积环境,指示海侵时期,记录了MIS5发生的多次海侵。

MIS4河流相、湖泊相和三角洲相沉积:沉积物以灰色和青灰色及灰黄色、灰褐色砂质粉砂为主,颜色比较杂乱,偶见薄层砾质沉积物和黑色炭屑。底栖有孔虫和硅藻几乎未见。

MIS3滨岸沉积:沉积物为粉砂、砂质粉砂,夹有多层含贝壳碎屑的细砂,该段17.50 m和18.40 m处获取的贝壳年龄分别为29120 a B. P.和37030 a B. P.,3个光释光测年结果均小于59 ka,特征种底栖有孔虫组合为 *Guttulina pacifica*、*Elphidium spp.*、*Cassidulina carinata* 和 *Florilus scaphus*,孢粉丰度低

且多个层位未见,分异度低,以松属占绝对优势和铁杉属含量相对较高为特征,草本花粉基本未见。

MIS2滨岸—陆相沉积:沉积物以灰色粉砂为主,夹薄层和团块状砂质粉砂和泥,偶见砾质泥质砂团块,黏性较强,局部偶尔可见细小生物贝壳碎片,14.85~15.23 m段为灰黄色粉砂,为低海平面滨岸或者陆相沉积特征,与下层界线明显。孢粉组合以栎属和栲属含量相对较高为特征,其他类型木本花粉少见,草本花粉含量低。蕨类孢子以水龙骨科为主,鳞盖蕨属、凤尾蕨属常见。浮游有孔虫丰度相对较低,底栖有孔虫丰度向下明显降低。

全新世浅海沉积:该段沉积物是灰色粉砂质砂和砂质粉砂,偶见薄层粉砂,以粉砂质砂为主,弱黏性,局部可见细小生物贝壳碎片。9.78 m处沉积物AMS¹⁴C测年结果为10260 a B.P.,12.05 m处AMS¹⁴C测年结果为12860 a B.P.,年龄数据表明沉积发生在全新世晚期。松属含量升高至50%以上,其他属种木本花粉少见,草本禾本科、苦苣苔科断

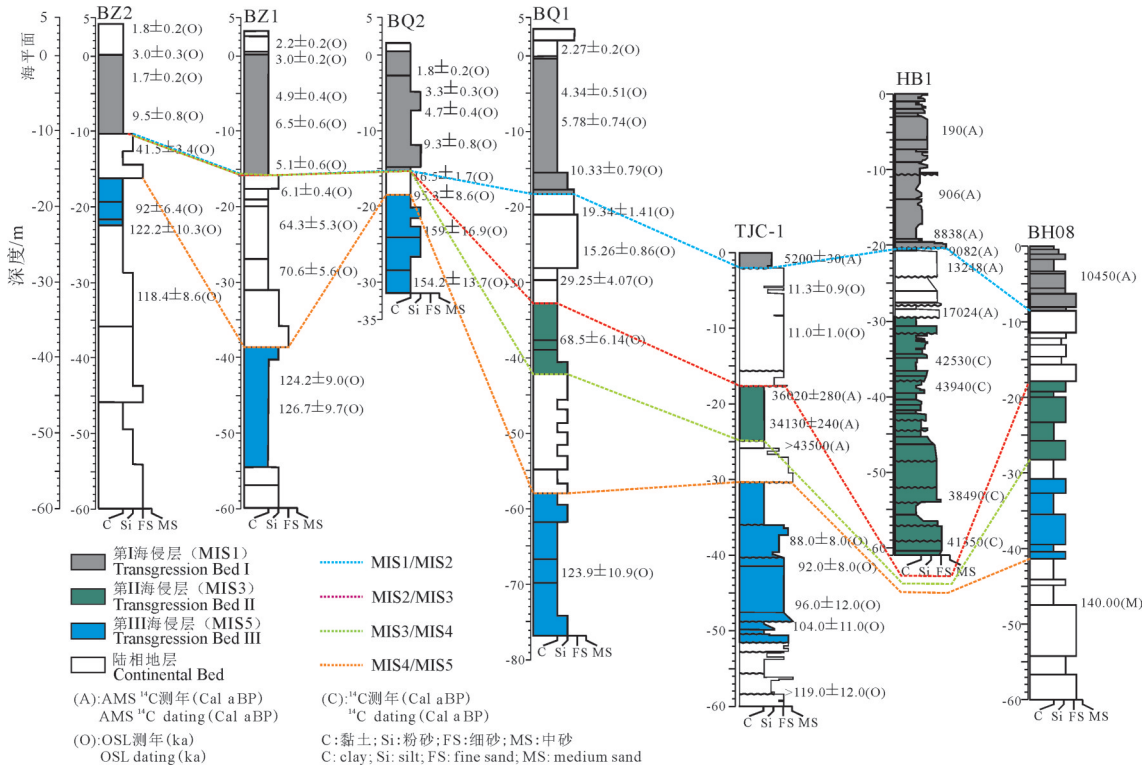


图6 渤海典型钻孔晚第四纪地层对比(钻孔位置见图1)

Fig.6 Late Quaternary stratigraphic correlation of the typical boreholes on Bohai Sea shelf (location in Fig. 1)

续分布,含量低。底栖有孔虫的特征种包括 *Guttulina pacifica*、*Elphidium* spp、*Cassidulina carinata*和 *Florilus scaphus*等。

5 讨论

选取渤海湾 TJC-1 孔、辽东湾 YKC-2 孔及渤

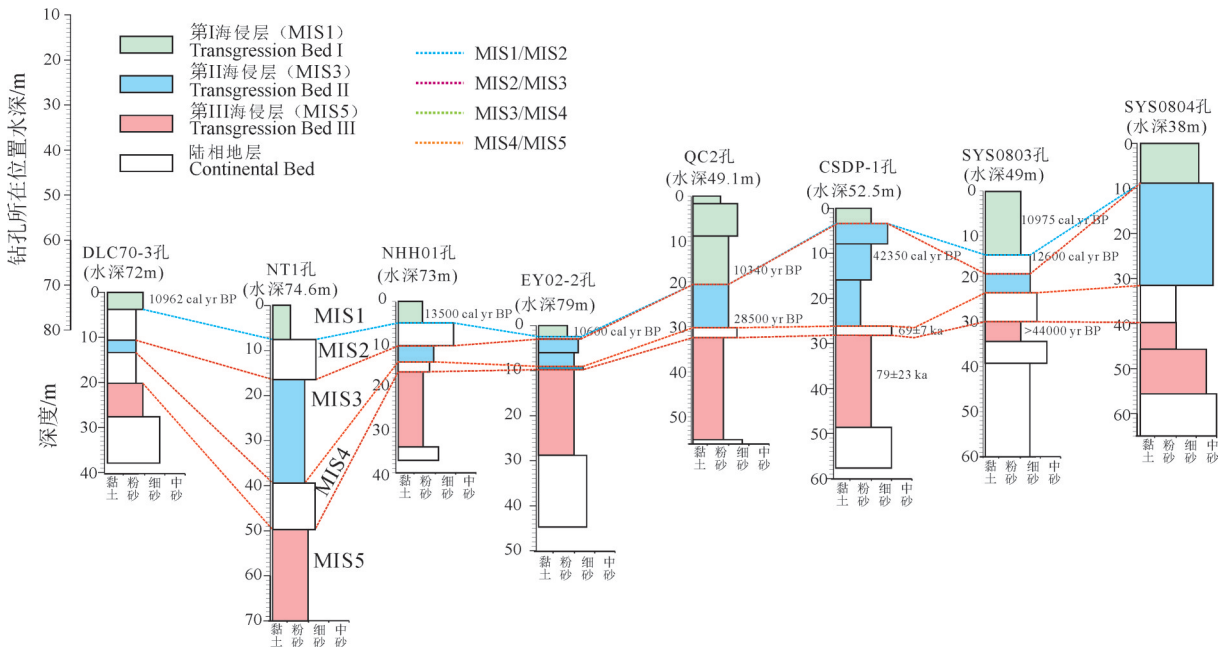


图7 黄海陆架典型钻孔晚第四纪地层对比(钻孔位置见图1)

Fig.7 Late Quaternary stratigraphic correlation of the typical boreholes on Yellow Sea shelf (location in Fig. 1)

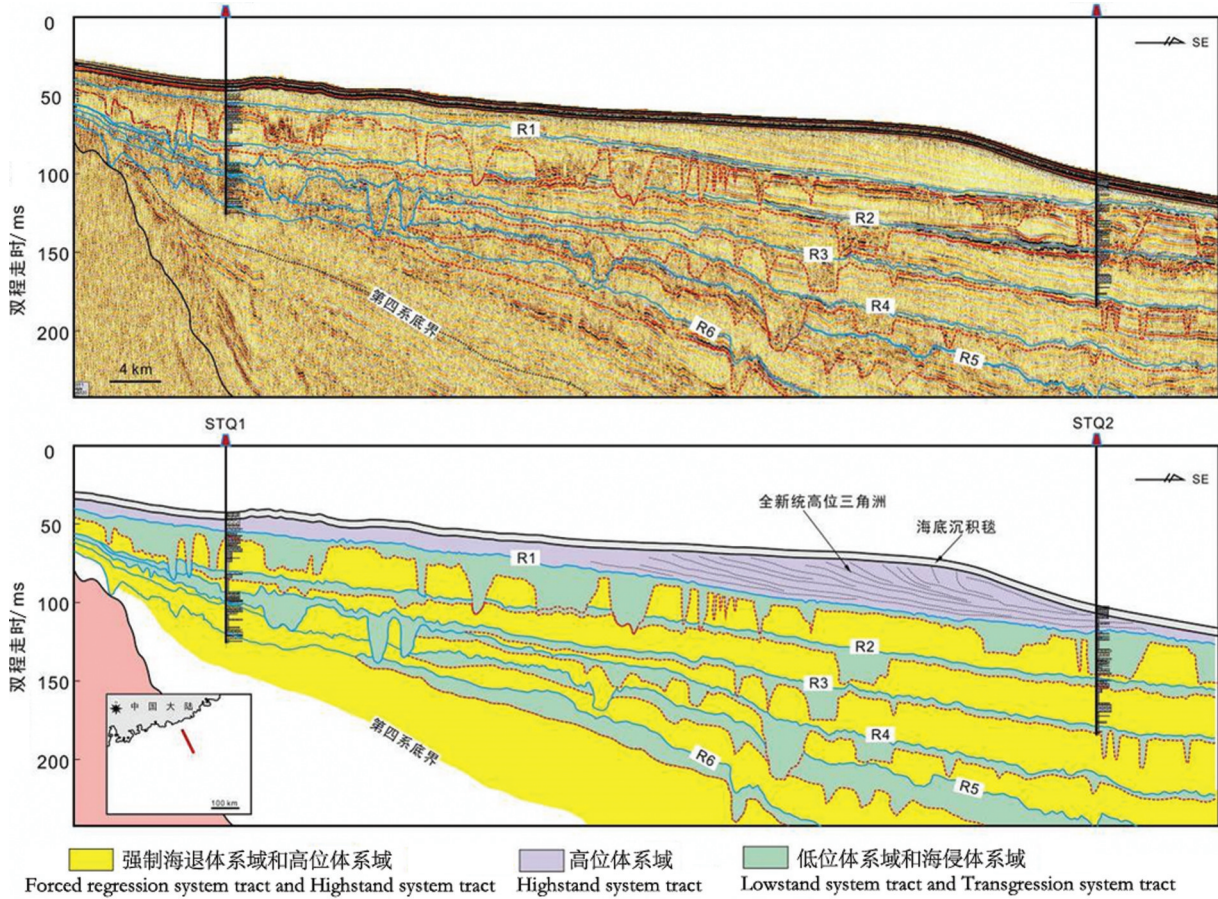


图8 南海陆架STQ1和STQ2孔和过孔地震剖面地层对比(测线位置见图1)

Fig.8 Relation between the boreholes STQ1 and STQ2 and the cross seismic profile (line location in Fig. 1)

海东部DLC70-1孔的沉积地层与浅地层剖面声学地层的对比分析,以及前人研究成果BH08等孔资料(图6);选取南黄海CSDP-1孔对比SYS-0702孔、QC2孔的综合地层对比(图7);选取东海SFK-1孔及周围钻孔EA01、EA05等综合地层对比,选取南海STQ1和STQ2孔等综合地层对比(图8),对中国海域陆架第四纪重点是晚更新世以来的地层格架及古环境进行了研究(表1,图9)。

渤海陆架的晚第四纪钻孔沉积特征、年代框架与高分辨率声学特征显示,MIS5以来该区发生了陆相到浅海相的剧烈变迁,不但与海平面变化密切相关,还受控于构造活动因素。同时,渤海海峡早全新世以来受到强潮流的侵蚀作用水深明显增加(Liu et al., 2009),这一因素对渤海晚第四纪以来的沉积环境造成不可忽视的影响。

晚更新世以来,渤海及周边平原地区大部分地层形成于MIS5(渤海湾至东部可推迟至MIS4晚

期)、MIS3、MIS1的3次高海面时期,对应3次明显的海侵事件,发育3期海相地层(图6,图9)(高茂生等,2018),对应海侵体系域或高水位体系域的沉积。自辽东湾至渤海湾至渤海东部,3期海相地层的厚度明显增加、海相性增强(图6)。3期海相地层之间广泛发育河流—河流充填相沉积,分别形成于MIS4与MIS2低海面时期,对应低水位体系域的沉积,与下伏地层之间发育明显沉积间断。周边钻孔中第2海相层(MIS3)未见沉积记录(阎玉忠等,2006;姚正权等,2006;肖国桥等,2008; Yao et al., 2014),主要由于末次冰盛期的低海面时期,陆架裸露,河流下切作用造成在某些地区该海相层的缺失(图6)。渤海MIS3海侵强度明显大于MIS5,主要由于MIS3庙岛群岛和渤海盆地的持续沉降所致,这一时期的构造活动性在浅地层剖面上有明显的显示(陈晓辉等,2020)。

北黄海中西部陆架采集的4916 km 高分辨率浅

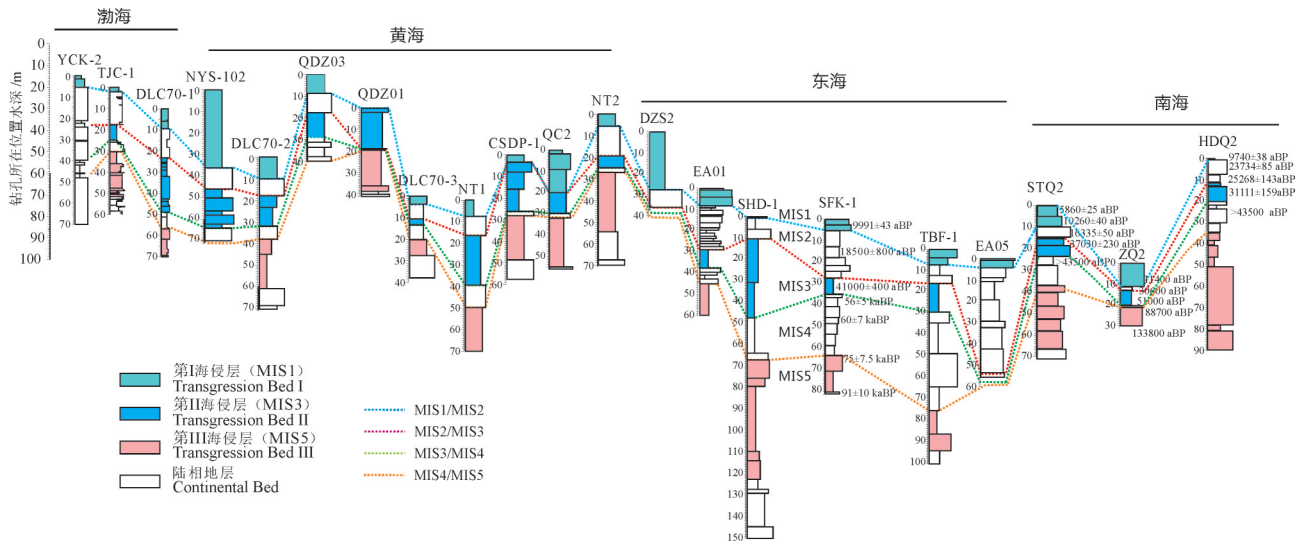


图9 中国海域陆架晚第四纪地层分布(钻孔位置见图1)

Fig.9 Late Quaternary stratigraphic correlation of the typical boreholes in the China's sea shelves (location in Fig. 1)

地层剖面的声学记录与北黄海目前最深、取心最完整的DLC70-2孔沉积地层的对比分析,揭示了研究区晚第四纪(MIS6)以来的地层框架,该孔完整地记录了MIS1、MIS3和MIS5三期海侵(图9)(陈晓辉等,2014)。南黄海CSDP-1孔的综合地层分析揭示出下部150 m属于陆相地层,海相地层都位于150 m上部,但MIS5以来的地层记录相对完整(Liu et al., 2016)。

对比东海SFK-1孔沉积相和地震相地层划分(图4)及全球海平面变化曲线(图10)(Chappell et al., 1996),东海外陆架自MIS5中期以来,随着海平面波动,形成了两期基本完整的海侵-海退层序地

层,沉积过程基本连续,未见明显的地层缺失。

南海北部STQ1孔和STQ2孔及过孔单道地震剖面揭示出3期海侵地层,综合分析认为晚更新世气候较为温凉,内陆架以滨岸和陆相沉积环境为主,外陆架以滨岸和浅海沉积环境为主,经历了较为频繁的海侵和海退过程;全新世气候温暖湿润,区域海平面上升,发育浅海沉积(图8)。此外,海南岛西部HDQ2孔的晚第四纪研究表明,晚更新世早期,海南岛西部古岸线由昌化江河口向南至乐东三亚之间迁移,MIS4古岸线加快向海迁移,侵蚀强烈,但由于海南岛陆源物质供应充足,形成较厚沉积层,但北部湾及海南岛西部大部分暴露成陆(陈泓

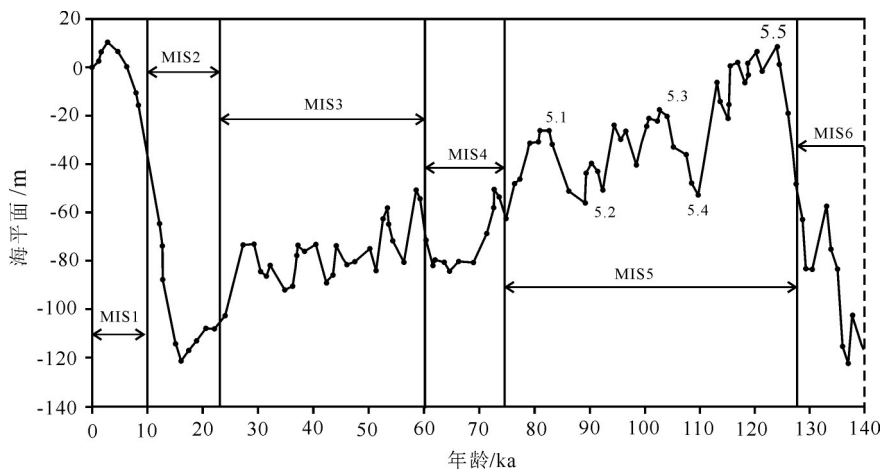


图10 MIS5以来全球海平面变化曲线(据Chappell et al., 2002修改)

Fig.10 Global sea level curve after MIS 5 (modified from Chappell et al., 2002)

君等,2017)。

综上所述,根据中国1:100万海洋区域地质调查实测数据,结合目前最新研究成果,中国陆架海域晚第四纪以来的沉积环境演化特征在不同时期的海平面波动(图10)、陆源物质通量变化、地形和地貌以及新构造活动的背景下详述如下:

5.1 氧同位素5期(MIS5,74~128 ka)

MIS5早期,海平面上升,海水由东海漫过宽广陆架,最终穿过渤海海峡侵入渤海,发生海侵,最大海侵范围可达渤海西岸的近岸平原,MIS6时期形成的陆相地层被充填埋藏,在黄海和东海形成以海相沉积为主地层,渤海形成以滨岸相与海相沉积交替的地层,该沉积在东海、黄海及渤海的钻孔中均有显示(图9)。底栖有孔虫和海相介形虫在众多钻孔中普遍出现,而广盐性的近岸浅水种则降至很低水

平,这一阶段基本对应晚第四纪以来全球海平面最高时期(图10)。这一时期辽东湾地势明显高于渤海其他海区,造成辽东湾钻孔中MIS5期地层海相性较渤海其他海域明显偏弱(图11),而不同钻孔中这一时期地层顶界面埋深差异推断可能由新构造活动造成(图12)。南海北部陆架总体处于浅海环境,发育多期海侵地层(图8,图9)。

MIS5中晚期至MIS4早期,海平面开始逐渐下降,这期间海水仍可通过渤海海峡侵入渤海,形成的滨海相地层在渤海东部DLC70-1孔与渤海湾TJC-1孔沉积记录中得以保存(图6,图11),大量的陆源碎屑物质在该区形成滨岸沉积(Liu et al., 2009; 蓝先洪等,2015)。东海SFK-1孔揭示MIS5.3时期,水深大约为50 m(图4),之后海平面下降,在缓平的外陆架发育了浅海—前三角洲细粒沉积。

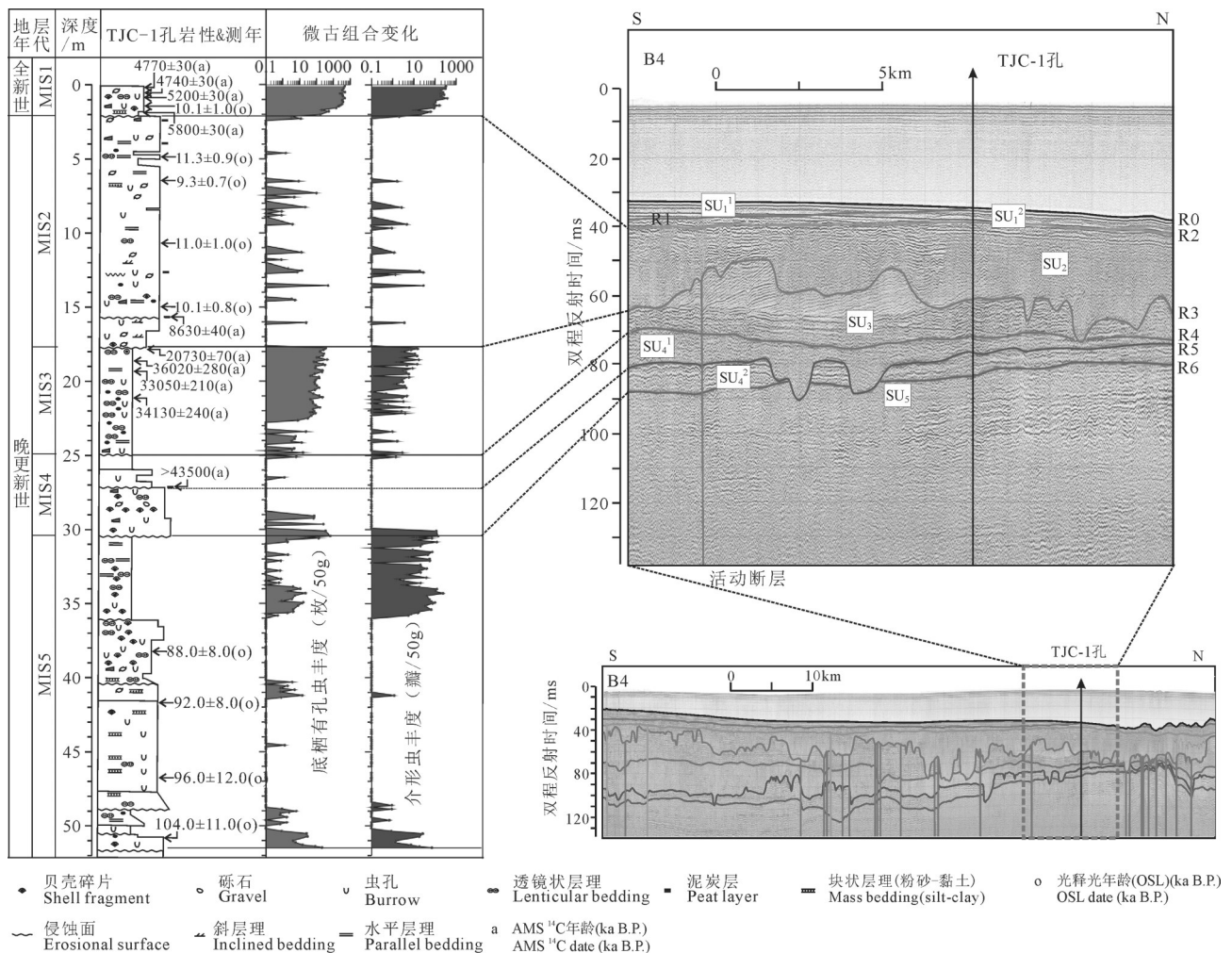


图11 渤海西部TJC-1孔与过孔高分辨率浅地层剖面对比(测线B4位置见图1)

Fig.11 Relation between the borehole TJC-1 and the high-resolution seismic profile (location in Fig.1)

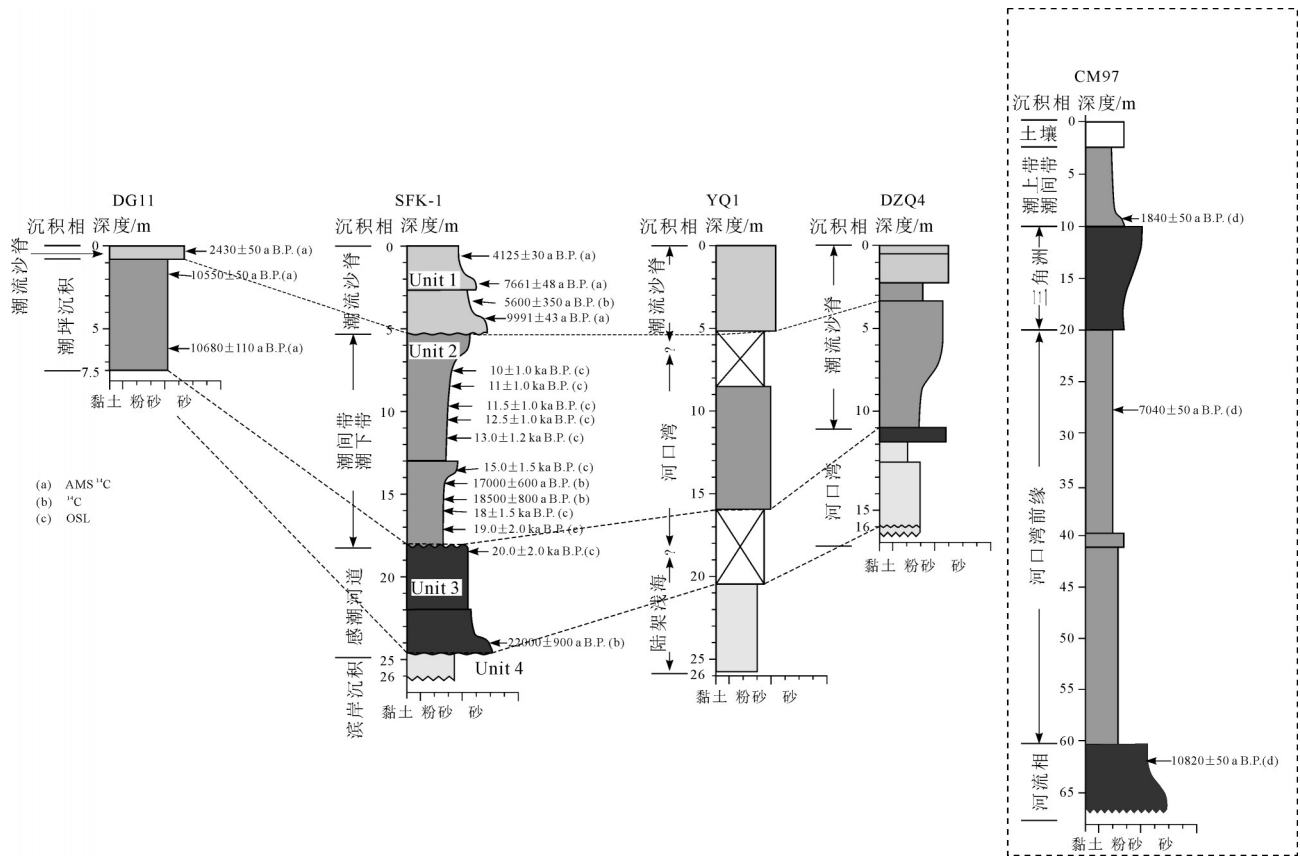


图12 东海陆架典型钻孔晚第四纪地层对比(据 Wang et al., 2014) (钻孔位置见图1)

Fig.12 Late Quaternary stratigraphic correlation of the typical boreholes on the East China Sea shelf (modified from Wang et al., 2014) (location in Fig. 1)

在 MIS5.2 时期,东海依然形成浅海—前三角洲沉积。此后,在太平洋潮波系统作用下对前三角洲沉积进行冲刷,发育潮流沉积,在浅海—前三角洲和潮流沙脊沉积之间形成明显的侵蚀面。在 MIS5.1 达到高海平面之后发育海泛沉积(汪品先等, 1988)。MIS5.1 晚期,受潮流影响,在东海中外陆架地区发育滨海的潮坪沉积,形成海退时期高位体系域。这期间海平面波动较大,形成的滨海相地层在黄海大部分钻孔的沉积记录中得以保存。本阶段底栖有孔虫丰度和分异度变化,也反映了其沉积环境的不稳定性。

5.2 氧同位素 4 期(MIS4, 60 ~74 ka)

MIS4 是末次冰期亚冰期,早期由于持续海退,东海发育潮流影响的近河口潮坪沉积,但水深较浅,生物扰动显著(图4)。MIS4 中后期,冰川发育,海水温度较低,持续时间较短,期间海平面迅速下降后上升,下降到现代海平面之下 90 m 后,在较短

时间内上升至 -70 m (图 10) (Martinson et al., 1987),在东海中外陆架附近形成了低海平面及快速海侵时期的潮坪和黑色贝壳砂沉积,该沉积在外陆架均有分布。由于渤海海峡屏障作用,阻碍了海水侵入渤海,陆架裸露,古河流盛行,对早期形成的地层存在明显的下切侵蚀作用,发育沉积间断。这一时期形成沉积间断面及 MIS4 晚期海平面上升形成的河口充填沉积,在渤海海域多钻孔中均有显示(图 6),而在南黄海现今水深 32~49 m 陆架区侵蚀殆尽未有沉积记录(Liu et al., 2010),在东海陆架同期的沉积地层相对连续,不存在沉积间断(Berné et al., 2002)。黄海地层该阶段以零星出现的底栖有孔虫以近岸冷水种和广盐性的滨岸种为主,一方面反映出进入末次冰期开始变冷的水体环境,另一方面也说明该阶段处于海陆过渡阶段,且以陆相沉积为主,偶见的短期海侵也以近岸冷水团为主,符合末次冰期的大背景。这一沉积单元在南黄海陆架

区侵蚀殆尽(Liu et al., 2010),但在东海陆架同期的沉积地层相对连续,不存在沉积间断(Berné et al., 2002)。该时期南海的内陆架、中陆架地区分别发育河流相、湖泊相、三角洲相沉积(图5,图8)。

5.3 氧同位素3期(MIS3, 24~60 ka)

MIS3的海平面处在相对稳定期,水深变化在-60~-90 m(图10)(Chappell et al., 1996; Chappell, 2002; Siddall et al., 2008),海平面缓慢下降,在东海陆架发育大面积的浅海—三角洲体系,浅部地震剖面上表现较强亚平行连续侧向前积分布、较高频率的振幅特征,几乎覆盖整个研究区(图4)。海水再次通过渤海海峡侵入渤海,渤海发生第2次海侵,由于该时期新构造活动影响尤其庙岛群岛和渤海盆地的持续沉降,导致MIS3早期海侵规模明显大于MIS5,但受地形及后期低海面侵蚀因素的影响,造成这一地质时期的海相层在渤海及周边钻孔记录中未全保存(图6,图9)。

MIS3早期气候相对较为暖湿(甄治国等, 2008; 顾明光, 2009),沉积物中出现较多的暖水种有孔虫壳体,水深分布在50 m以深(图10),由于远离海岸,沉积速率较低。中期由于岁差周期导致出现在中低纬度夏季低太阳辐射所造成的末次冰期中期的冰阶(MIS3.2)(施雅风等, 2002),在40 ka B.P.左右海平面迅速下降,东海陆架大部分在短时间内裸露成陆(图4,图9),陆架地层中形成沉积间断(Marsset et al., 1996; 刘振夏等, 1999; Liu et al., 2000; Lea et al., 2002),该事件在黄、渤海地区均有发现(杨子赓等, 1996; Marsset et al., 1996; Mei et al., 2019)。MIS3晚期海平面持续下降,气候发生快速振荡并极其不稳定,在多次千年尺度的Heinrich和D-O(Dansgaard-Oeschger)事件作用下,波动频繁,全球温度明显低于末次间冰期(MIS5)和冰后期的全新世,但稍高于MIS4和末次冰盛期MIS2(Jouzel et al., 1987; Dansgaard et al., 1993; Grootes et al., 1993; 赵侃等, 2008),岸线后退,东海陆架上发育泥砂互层的滨海沉积,形成海陆过渡沉积。由于海平面下降及渤海海峡的阻隔,渤海地层出现沉积间断,地层发育存在三角洲相与海相交互相沉积(图11)。而同期的三角洲沉积(厚度超过20 m)在南黄海西部(Liu et al., 2010)与东海(Berné et al., 2002)地层中均有发育。南海北部陆架区,大部分

区域出露地表,外陆架呈现为滨海和内陆架沉积(韦成龙等, 2015)。

需要注意的是,通常认为MIS3海平面呈现高频率、低幅度的波动,整体在现今海平面以下40~80 m之间变化(图10)(Lambeck and Chappell, 2001; Siddall et al., 2008)。但是,在全球许多地区都发现了MIS3期的高海平面证据,如在北美洲(Rodriguez et al., 2000)、欧洲(Mauz and Hassler, 2000)、大洋洲(Cann et al., 1988; Cann et al., 2000)和东南亚地区(Hanebuth et al., 2006)都发现同时期海平面仅仅比现今海平面低15~20 m。中国东部陆架MIS3海平面变化研究也有不同认识,如Liu et al. (2010)对黄海地层对比研究认为, MIS3海平面变化在-35~-60 m波动,对南黄海西部的研究认为其海平面在-20~-50 m波动。黄河三角洲和长江三角洲地区的地层研究表明MIS3期时最高海平面可能高达-5~-10 m(王靖泰和汪品先, 1980; Zhao et al., 2008)。这一阶段的黄海的水深可能与目前相当,在本阶段广泛发育了较好的海相沉积地层。目前,对该现象仍未有很好的解释,有部分学者认为是测年方法及测年材料的问题。

5.4 氧同位素2期(MIS2, 1.2~24 ka)

末次冰盛期海平面大幅度下降(图10),这一低海面时期,渤海、黄海、东海和南海大部分陆架海域暴露地表,河道广泛发育,下切MIS3乃至MIS4甚至更老的地层,与下伏地层存在明显的沉积间断。这一时期的沉积在全球陆架区广泛分布,如美国东部陆架(Nordfjord et al., 2006)、南非东部陆架(Green, 2009)、黄东海陆架区(Satio et al., 1998; Berné et al., 2002; Liu et al., 2010; Yoo et al., 2016),是标志性识别地层。与东海有着较好的地层保存记录不同,黄海大部分钻孔缺失了本阶段的沉积(图7,图9)。南海北部陆架广泛出露海面,形成广阔的滨海平原,台湾、海南岛以及其他岛屿相连成片,海岸线在大陆架和大陆坡的转折线附近。

由于东海陆架地形平缓,河流下切,在陆架上形成泛滥的河流、近岸河口及滨海沉积,而外陆架并未暴露成陆,而为水体覆盖(李绍全等, 2002; 余华等, 2006)。虽然河流携带陆源泥沙入海,但是由于海岸线向海迁移较深,靠近冲绳海槽,接近开放大洋,河口及下游河道受到强潮流控制(Liu et al., 2007),形成潮控河口和感潮河流,有证据显示其为

古长江沉积(Wang et al., 2013; 缪卫东等, 2016), 这些沉积物以含有大量壳体严重破损的浮游有孔虫幼虫为特征(Wang et al., 1985; Zhao et al., 2008)。由于LGM气候干冷, 河流入海携带陆源碎屑物质少, 河流作用较弱(Winkler and Wang, 1993; Wellner and Bartek, 2003; Liu et al., 2007; Wang et al., 2019)。虽然部分浅地层剖面可以识别出多期的河道—河口沉积, 且显示其随河流摆动而左右迁移形态(Yang, 1989; Saito et al., 1998; Chen et al., 2000; Liu et al., 2000; Berné et al., 2002; Li et al., 2002; Wellner and Bartek, 2003), 但多数地区该地层厚度较薄, 通常在浅部地震剖面上难以识别(Saito et al., 1998; Liu et al., 2000; Zhao et al., 2008)。

MIS2晚期冰消期, 随着全球气温转暖, 冰盖的消融, 海平面上升(图10), 岸线后退(Saito et al., 1998a; Liu et al., 2000; Wellner and Bartek, 2003; Li et al., 2005), 在潮流作用下, 对LGM时期的滨岸沉积物进行冲刷和充填(Berné, 2002; 杨文达, 2002), 东海陆架广泛发育潮坪沉积, 此时物源方向为由海及陆。海水经渤海海峡侵入渤海, 冰后期海侵开始, 早期发育盐沼或潮坪沉积(Liu et al., 2009; Wang et al., 2014)。但由于海平面波动, 在海平面快速上升的融冰事件中(Faribanks, 1989; Bard et al., 1990; Liu et al., 2004)(图12), 沉积环境变化较快, 侵蚀作用主导, 未形成沉积, 发生沉积间断。在海平面缓慢上升期间, 沉积环境稳定, 在较强的潮流作用下(Uehara and Saito, 2003), 东海陆架持续形成潮流沉积(图9, 图12)。渤海东部沉积形成渤海东部潮流沉积体系(刘振夏和夏东兴, 2004), 同时, 在近岸河口如滦河口形成潮流沙脊(薛春汀, 2016)。同期的潮流沉积体系在北黄海(陈晓辉等, 2014)、南黄海(Yang et al., 2001; Yoo et al., 2016)和东海(Liu et al., 1998; Berné et al., 2002)均有发育。

晚更新世晚期(MIS2), 距今24~12 ka(LGM), 气候寒冷, 南海发生大规模、大幅度海退, 海面一直下降到-165 m(图10)。这是一次全球性大海退, 中国陆架沉积均有记录, 最低海平面均低至-150 m以下。

5.5 氧同位素1期(MIS1, 全新世, 现在~12 ka)

随着海平面的逐步上升, 全新世早期东海海平面由-50 m左右上升, 在7 ka B.P. 达到最高海平面

并相对稳定(图10)(赵希涛等, 1979; Chen et al., 1985; Saito et al., 1998), 外陆架地区在较强的太平洋潮波系统作用下, 发育大范围的海侵潮流沙脊(刘振夏等, 1999; 杨子赓等, 2001; Berné et al., 2002; 刘振夏等, 2007)(图4), 而现代河流物质由于沿岸流影响主要沉积在河口以及浙闽沿岸地区(Liu et al., 2007; 石学法等, 2010)。海水经黄海槽入侵到南黄海, 全新世海侵开始, 早期发育盐沼或潮坪相沉积(Liu et al., 2009), 随着海平面的逐步上升, 沉积地层逐渐转换为陆架滨海相沉积。渤海沉积地层逐渐转换为陆架滨海相沉积(图7, 图9), 对应第1海相层的下部。随着水深的增加与岸线的后退, 渤海现代环流体系形成, 形成以浅海相为主的地层, 对应第1海相层的上部, 沉积物主要来自现代黄河入海泥沙(Liu et al., 2004; 高茂生等, 2010)。距今12 ka左右, 南海古海岸线的位置约在-50 m水深处(刘以宣等, 1993)。进入全新世, 气候温暖, 南海陆架出现了规模较大的海侵, 较为广泛的海侵为距今7.5~5.0 ka, 广东沿海普遍发生海进, 珠江三角洲和韩江三角洲地区均有明显记录。在韩江三角洲, 海侵范围迅速扩大, 海水沿韩江上达潮州和沿榕江到达白塔, 沿龙江至惠来, 海水还到达陆丰、海丰等地区(韦成龙等, 2015)。

但在最高海平面之后, 东海外陆架潮流和海流作用依然较强, SFK-1孔钻井取样期间ADCP(Acoustic Doppler Current Profiling, 声学多普勒流速剖面仪)实测底层流速在潮流周期内最高可达0.13 cm/s(苏大鹏等, 2008), 且该流速是在海况较好的钻探施工期间测量, 前人在该区实测流速则可达到0.55 cm/s(Berné et al., 2002), 因此在大潮和强风浪海况下, 外陆架潮流底流速可以达到60~70 cm/s(刘振夏等, 2004), 进而对海侵期间形成的潮流沙脊进行冲刷改造, 发育明显的侵蚀接触面; 同时, 大量现代海洋环流携带的陆源悬移质组分沉降, 形成黏土和粉砂组分明显增多的潮流砂沉积, 即准活动潮流沙脊(Liu et al., 2007), 在陆架上呈脊状分布(刘振夏等, 2004), 也是东海外陆架高位体系域沉积特征之一。东海陆架全新世潮流沉积物上下分层的沉积特征, 在南海南部深海沉积物中亦有发现(Chen et al., 2000), 指示了全新世早期和晚期沉积环境的差别及气候动荡。

6 结 论

由北及南,晚第四纪以来中国海域陆架均发生了3次明显的海侵。MIS5以来有3个完整的海相地层,其中渤海和东海 MIS3 和 MIS1 相对较薄,而黄海海相地层较厚。渤海和黄海末次冰期的地层保存较少(LGM大部分地层缺失),东海外陆架末次冰期地层发育完整,较完整地记录10万年以来的沉积记录。南海晚更新世气候较为温凉,内陆架以滨岸和陆相沉积环境为主,外陆架以滨岸和浅海沉积环境为主,全新世气候温暖湿润,发育浅海沉积。

对比全球海平面变化,中国海陆架晚第四纪以来的沉积相分别是:MIS5的浅海—滨海海相沉积,水深变化介于现在海平面-60~20 m; MIS4陆相潟湖—河流—滨海河口相沉积,水深变化介于现在海平面-80~-60 m; MIS3浅海相—滨海潮坪沉积,水深变化介于现在海平面-110~-60 m; MIS2/LGM时期陆相—河流相沉积,水深变化介于现在海平面-120~-60 m; MIS1/全新世海侵潮流砂和浅海泥质沉积,水深变化介于现在海平面-60~10 m。中国各海域陆架沉积差异反映了不同构造背景下陆源碎屑物质在海平面波动、海洋环流变化下的沉积作用。冰期海平面显著下降,陆架暴露,发生河流侵蚀下切作用;间冰期海平面上升,陆源物质在陆架堆积;海平面变化导致海岸线和河口的进退,海洋环流控制陆架沉积物输运和沉积过程,形成特征的沉积地层和沉积体系。此外,新构造运动和区域沉降作用对地层的发育和保存具有一定的影响。

致谢:感谢陈中原教授、[李从先](#)教授、王强研究员、[刘振夏](#)教授、Serge Berné教授、范代读教授、刘青松教授、赖忠平教授、林和茂研究员、何起祥研究员、黄永祥研究员、何希贤研究员等对本文部分内容提出的建议;感谢顾兆峰研究员、黄龙高级工程师、夏非博士、秦亚超副研究员、李杰博士、陈珊珊高级工程师、密蓓蓓高级工程师和王燕博士等参与样品和数据处理工作;感谢上海海洋石油局第一海洋调查大队“勘407”轮海上地质取样工作。

References

Bard E, Hamelin B, Fairbanks R G, Zindler A. 1990. Calibration of the ^{14}C timescale over the past 30000 years using mass spectrometric U-Th ages from Barbados corals[J]. *Nature*, 345,

405-409.

Berné S, Vagner P, Guichard F, Lericolais G, Liu Z X, Trentesaux A, Yin P, Yi H I. 2002. Pleistocene forced regressions and tidal sand ridges in the East China Sea[J]. *Marine Geology*, 188: 293-315.

Cann J H, Bourman R P, Barnett E J. 2000. Holocene Foraminifera as indicators of relative Estuarine-Lagoonal and oceanic influences in Estuarine sediments of the River Murray, South Australia[J]. *Quaternary Research*, 54(3):378-391.

Chappell J, Omura A, Esat T, McCulloch M, Pandolfi J, Ota Y, Pillars B. 1996. Reconciliation of late Quaternary sea levels derived from coral terraces at Huon Peninsula with deep sea oxygen isotope records[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 141:227-236.

Chappell J. 2002. Sea level changes forced ice breakouts in the Last Glacial Cycle: New results from coral terraces[J]. *Quaternary Science Review*, 21(10): 1229-1240.

Chen Guoneng, Zhang Ke, He Xikun, Chen Fanshen, Nian Hong. 1994. Paleo-geographic evolution of the Pearl River delta since the late Pleistocene[J]. *Quaternary Sciences*, (1): 67- 74 (in Chinese with English abstract).

Chen Hongjun, Huang Wenkai, Qiu Yan. 2017. The inversion of Late Quaternary Paleo-water depth in southwestern offshore Hainan Island[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 37 (6):128-139 (in Chinese with English abstract).

Chen Xiaohui, Li Rihui, Lan Xianhong, Zhang Xunhua, Li Jie. 2014. Formation and paleo-environmental implications of hard clay in the central North Yellow Sea during the late period of Pleistocene[J]. *Quaternary Sciences*, 34(3): 570-578 (in Chinese with English abstract).

Chen Xiaohui, Meng Xiangjun, Li Rihui. 2020. Sequence stratigraphy of Late Quaternary in the Liaodong Bay[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 40(2):37-47(in Chinese with English abstract).

Chen Y J, Peng G, Jiao W G. 1985. Radiocarbon dates from the East China Sea and their geological implications[J]. *Quaternary Research*, 24(2): 197-203.

Chen Z Y, Song B P, Wang Z H, Cai Y L. 2000. Late Quaternary evolution of the subaqueous Yangtze Delta, China: Sedimentation, stratigraphy, palynology, and deformation[J]. *Marine Geology*, 162 (2): 423-441.

Fairbanks R G. 1989. A 17000-year glacio-eustatic sea level record: Influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation[J]. *Nature*, 342: 637-642.

Ge Shulan, Shi Xuefa, Zhu Rixiang, Liu Yanguang, Yin Pin, Liu Lejun. 2005. The Magnetostratigraphy and its paleo-environment implication of the borehole EY02-2 of the South Yellow Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(22):2531-2540 (in Chinese).

Green A N. 2009. Paleo-drainage, incised valley fills and transgressive systems tract sedimentation of the northern KwaZulu-Natal continental shelf, South Africa, SW Indian Ocean[J]. *Marine Geology*, 263: 46-63.

- Gao Maosheng, Guo Fei, Hou Guohua, Qiu Jiandong, Kong Xianghui, Liu Sen, Huang Xueyong, Zhuang Haihai. 2018. The evolution of sedimentary environment since Late Pleistocene in Laizhou Bay, Bohai Sea[J]. *Geology in China*, 45(1): 59–68 (in Chinese with English abstract).
- Gu Mingguang. 2009. Late Quaternary sediments and paleoenvironmental evolution on the northern bank of the Qiantang River[J]. *Geology in China*, 36(2): 378–386 (in Chinese with English abstract).
- Hanebuth, T J J, Saito Y, Tanabe S, Vu Q L, Ngo Q T. 2006. Sea levels during late marine isotope stage 3 (or older?) reported from the Red River delta (northern Vietnam) and adjacent regions[J]. *Quaternary International*, 145–146.
- Hori K, Saito Y, Zhao Q H, Wang P X. 2002. Architecture and evolution of the tide-dominated Changjiang (Yangtze) River delta, China[J]. *Sedimentary Geology*, 146: 249–264.
- Hori K, Saito Y. 2017. Differences in radiocarbon ages among molluscan shells, plant materials, and total organic carbon: An example from the paleo-Changjiang incised-valley fill, China[J]. *Quaternary International*, 455:45–55.
- Huang Yongyang, Ge Tongming. 1995. Late Quaternary stratigraphy and environment in the Zhujiang River Mouth Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 15 (4): 23–36 (in Chinese with English abstract).
- Jouzel J, Lorius C, Petit J R, Genthon C, Barkov N I, Kotlyakov V M, Petov V M. 1987. Vostok ice core: A continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160000 years)[J]. *Nature* 329, 403–408.
- Lambeck K, Chappell J. 2001. Sea level change through the last glacial cycle[J]. *Science*, 292: 679–686.
- Lan Dongzhao, Zhang Weilin, Chen Chenhui, Yu Yongfen. 1993. Sea intrusion and sea level changes since the Late Pleistocene in western Taiwan strait[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 15(4):77–84 (in Chinese with English abstract).
- Lan Xianhong, Mi Beibei, Chen Xiaohui, Li Rihui, Wang Zhongbo, Lu Kai. 2015. Tracing of Rare Earth Elements in late Quaternary sediments from central North Yellow Sea[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 33(2):241–252 (in Chinese with English abstract).
- Lan Xianhong, Qin Yachao, Wang Zhongbo, Chen Xiaohui, Mi Beibei, Huang Long. 2016. Geochemical characteristics of sediments in the eastern Bohai Sea since Late Pleistocene[J]. *Acta Seimentologica Sinica*, 34(5):892–901 (in Chinese with English abstract).
- Lan Xianhong, Zhang Xianjun, Zhao Guangtao, Zhang Zhixun. 2009. Distribution of rare earth elements in sediments from Core NT1 of the South Yellow Sea and their provenance discrimination[J]. *Geochimica*, 38(2):123–132 (in Chinese with English abstract).
- Lan Xianhong, Zhang Zhixun, Li Rihui, Ding Dong. 2010. Provenance study of sediments in core NT2 of the South Yellow Sea[J]. *Acta Seimentologica Sinica*, 28(6):1182–1189 (in Chinese with English abstract).
- Lea D W, Martin P A, Pak D K, Spero H J. 2002. Reconstructing a 350 ky history of sea level using planktonic Mg/Ca and oxygen isotope records from a Cocos Ridge core[J]. *Quaternary Sciences Reviews*, 21: 283–293.
- Lee G S, Kim D C, Yoo D G, Yi H I. 2014. Stratigraphy of late Quaternary deposits using high resolution seismic profile in the southeastern Yellow Sea[J]. *Quaternary International*, 344: 109–124.
- Li C X, Wang P, Sun H P, Zhang J Q, Fan D D, Deng B. 2002. Late Quaternary incised-valley fill of the Yangtze delta (China): Its stratigraphic framework and evolution[J]. *Sedimentary Geology*, 152:133–158.
- Li G X, Liu Y, Yang Z G, Yue S H, Yang W D, Han X B. 2005a. Ancient Changjiang channel system in the East China Sea continental shelf during the last glaciation[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 48 (11):1972–1978.
- Li Shaoquan, Li Shuanglin, Chen Zhengxin, Tang Baogen, Chen Yuxun. 2002. Deltaic sedimentary sequences developed during last Glacial Maximum in the EA01 core on the outer shelf of the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 22(3):19–26 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiang, Li Rihui, Chen Xiaohui, Qiang Xiaoke, Zhaohui. 2016. Quaternary magnetostratigraphy recorded in the sediments of core TJC-1 in the western Bohai Sea[J]. *Quaternary Sciences*, 36(1): 208–215 (in Chinese with English abstract).
- Li Xishuang, Zhao Yuexia, Liu Baohua, Liu Chenguang, Pei Yanliang, Han Guozhong, Hua Qingfeng. 2010. Structural deformation and fault activity of the Tan-Lu Fault zone in the Bohai Sea since the Late Pleistocene[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(1): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Liu J P, Milliman J D, Gao S, Cheng P. 2004. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 209: 45–67.
- Liu J P, Milliman J D. 2004. Reconsidering melt-water pulses 1A and 1B: Global impacts of rapid sea-level rise[J]. *Journal of Ocean University of China*, 3(3): 183–190.
- Liu J P, Xu K H, Li A C, Milliman J D, Velozzi D M, Xiao S B, Yang Z S. 2007. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea[J]. *Geomorphology*, 85:208–224.
- Liu J X, Liu Q S, Zhang X H, Liu J, Wu Z Q, Mei X, Shi X F, Zhao Q H. 2016. Magnetostratigraphy of a long Quaternary sediment core in the South Yellow Sea[J]. *Quaternary Science Reviews*, 144:1–15.
- Liu J X, Shi X F, Ge S L, Liu Q S, Yao Z Q, Yang G. 2014. Identification of the thick-layer greigite in sediments of the South Yellow Sea and its geological significances[J]. *Chinese Science Bulletin*, 59(2):2764–2775.
- Liu J, Saito Y, Kong X H, Wang H, Wen C, Yang Z G, Nakashima R.

2010. Delta development and channel incision during marine isotope stages 3 and 2 in the western South Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 278: 54–76.
- Liu J, Saito Y, Kong X H, Wang H, Zhao L. 2009. Geochemical characteristics of sediment as indicators of post-glacial environmental changes off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 29: 846–855.
- Liu J, Saito Y, Wang H, Yang Z G, Nakashima R. 2007. Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous clinof orm off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 236, 165–187.
- Liu J, Saito Y, Wang H, Zhou LY, Yang Z G. 2009. Stratigraphic development during the Late Pleistocene and Holocene offshore of the Yellow River delta, Bohai Sea[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 36(4/5): 318–331.
- Liu J, Wang H, Wang F F, Qiu J D, Saito Y, Liu J F, Zhou L Y, Xu G, Du X L, Chen Q. 2016. Sedimentary evolution during the last ~1.9 Ma near the western margin of the modern Bohai Sea[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 451:84–96.
- Liu Jian, Li Shaoquan, Wang Shengjie, Yang Zigeng, Ge Zongshi. 1999. Sea level changes of the Yellow Sea and formation of the Yellow Sea Warm Current since the last Deglaciation[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 19(1): 13–24 (in Chinese with English abstract).
- Liu K, Zhuang Z Y, Liu D Y, Ye Y C, Hu G Y. 2009. Study of the buried ancient channels in the continental shelf area out of the mouth of the Changjiang River in China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 31(5):80–88 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yixuan, Zhan Wenhuan, Chen Xinshu, Chen Junren, Chen Tegu, Xu Shigeng. 1993. The preliminary study on neoid sea level change and crustal elevation and subsidence movement in South China Sea[J]. *Tropical Oceanology*, 12(3): 24–31(in Chinese with English abstract).
- Liu Z X, Berné S, Saito Y, Lericolais G, Marsset T. 2000. Quaternary seismic stratigraphy and paleoenvironments on the continental shelf of the East China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 18: 441–452.
- Liu Z X, Berné S, Saito Y, Yu H, Trentesaux A, Uehara K, Yin P, Liu P J, Li C X, Hu G H, Wang X Q. 2007. International architecture and mobility of tidal sand ridges in the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 1820–1834.
- Liu Zhenxia, Berné S, L' Atalante Scientific Party. 1999. Paleoenvironment in the continental shelf of the East China Sea since the Mid Pleistocene[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 19(2):1–10 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhenxia, Xia Dongxing. 2004. *Tidal Sands in China Seas*[M]. Beijing: Ocean Press (in Chinese with English abstract).
- Marsset T, Xia D X, Berné S, Liu Z X, Wang K. 1996. Stratigraphy and sedimentary environments during the Late Quaternary, in the Eastern Bohai Sea (North China Platform) [J]. *Marine Geology*, 135: 97–114.
- Mauz B, Hassler U. 2000. Luminescence chronology of Late Pleistocene raised beaches in southern Italy: New data of relative sea-level changes[J]. *Marine Geology*, 170:187–203.
- Mei X, Li Rihui, Zhang X H, Wang Z B, Zhang Yong. 2019. Reconstruction of phytoplankton productivity and community structure in the South Yellow Sea[J]. *China Geology*, 2: 315–324.
- Mei X, Li Rihui, Zhang X H, Liu Q S, Liu J X, Wang Z B, Lan X H, Liu J, Sun R T. 2016. Evolution of the Yellow Sea Warm Current and the Yellow Sea Cold Water Mass since the Middle Pleistocene[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 442: 48–60.
- Mei Xi, Zhang Xunhua, Liu Jian, Wang Zhongbo, Guo Xingwei, Huang Xiangtong. 2019. Elemental Geochemical record of land and sea environmental evolution since 3.50 Ma in South Yellow Sea[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 49(1): 74–84 (in Chinese with English abstract).
- Miao Weidong, Li Shijie, Feng Jinshun, Gao Li, E Jian. 2016. Stratigraphic division of NB5 core in the Yangtze delta area and its environmental change information[J]. *Geology in China*, 43(6): 2022–2035 (in Chinese with English abstract).
- Nordfjord S, Goff J A, Austin Jr. J A. 2006. Seismic facies of incised valley fills, New Jersey continental shelf: Implications for erosion and preservation processes acting during latest Pleistocene–Holocene transgression[J]. *Journal of Sedimentary Researches*, 76: 1284–1303.
- Qin Yunshan, Zhao Yiyang, Zhao Songling. 1985. *Geology of the Bohai Sea*[M]. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiandong, Zhang Yong, Kong Xianghuai, Xu Gang, Wang Shuang. 2015. Shallow acoustic stratigraphy of Late Quaternary in the coastal and offshore areas of southern of Shandong Peninsula[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 35(2):1–10 (in Chinese with English abstract).
- Saito Y, Katayama H, Ikehara K, Kato Y, Matsumoto E, Oguri K, Oda M, Yumoto M. 1998. Transgressive and highstand systems tracts and post-glacial transgression, the East China Sea[J]. *Sedimentary Geology*, 122:217–232.
- Shi Linfeng, Zhai Zimei, Wang Qiang, Yang Zhenyu. 2009. Geochronological study on transgressional layer of the CQJ4 borehole at Dagang area in Tianjin, China[J]. *Geological Review*, 55(3):375–384 (in Chinese with English abstract).
- Shi Linfeng, Zhai Zimei, Wang Qiang, Zhang Xuebin, Yang Zhengyu. 2009. Geochronological study on transgression layers of the CQJ4 borehole at Dagang area in Tianjin, China [J]. *Geological Review*, 55(3): 375–384 (in Chinese with English abstract).
- Shi Xiaojun, Yu Kefu, Chen Tegu. 2007. Progress in researches on sea-level changes in South China since mid-Holocene[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27(5):121–132 (in Chinese with

- English abstract).
- Shi Xuefa, Liu Shengfa, Qiao Shuqing, Liu Yanguang, Fang Xisheng, Wu Yonghua, Zhu Zhiwei. 2010. Depositional features and paleoenvironmental records of the mud deposits in Min-Zhe coastal mud area, East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(4):19-30 (in Chinese with English abstract).
- Shi Yafeng, Yao Tandong. 2002. MIS 3b (54-44 ka B.P.) cold period and glacial advance in middle and low latitudes[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 24(1):1-9 (in Chinese with English abstract).
- Siddall M, Rohling E J, Thompson W G, Waelbroeck C. 2008. Marine isotope stage 3 sea level fluctuations: Data synthesis and new outlook[J]. *Reviews of Geophysics*, 46, RG4003, doi: 10.1029/2007RG00026.
- Su Dapeng, Hu Gang, Liu Jian, Zhang Xianjun. 2008. Sedimentary dynamics of the tidal sand ridges on the shelf of the East China Sea[J]. *Marine Geology Letters*, 24(6):15-18 (in Chinese).
- Sun Rongtao, Zhao Jingtao, Li Jun, Hu Bangqi. 2015. Stratigraphic and paleo-environmental evolution of Liaodong Bay since Late Pleistocene: Evidence from core LDD7[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 45(5): 1460-1469 (in Chinese with English abstract).
- Sun Weidong, Lin Qiuting, Zhang Lipeng, Liao Renqiang, Li Congying. 2018. The formation of the South China resulted from the closure of the Neo-Tethys: A perspective from regional geology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(12): 3467-3478 (in Chinese with English abstract).
- Tang Baogen. 1996. The Quaternary stratigraphy of the East China Sea shelf[C]//Yang Zigeng, Lin Hemaio (ed.). *Quaternary Stratigraphy in China and Its International Correlation*. Beijing: Geological Publishing House, 56-75 (in Chinese with English abstract).
- Uehara K, Saito Y. 2003. Late Quaternary evolution of the Yellow/East China Sea tidal regime and its impacts on sediments dispersal and seafloor morphology[J]. *Sedimentary Geology*, 162: 25-38.
- Wang Hongju, Liu Baohua, Li Xishuang. 2011. Activity of the Faults in the southern part of Bohai Sea since the Late Pleistocene[J]. *Advances in Earth Science*, 26(5):556-564 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jingtai, Wang Pinxian. 1980. Relationship between sea-level changes and climatic fluctuations in East China since Late Pleistocene[J]. *Acta Geographica Sinica*, 35(4): 299-312 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ke, Zheng Hongbo, Maarten P, Zheng Yan. 2008. High-resolution paleoenvironmental record of the mud sediments of the East China Sea inner shelf[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 28(4):1-10 (in Chinese with English abstract).
- Wang P X, Zhang J J, Min Q B. 1985. Distribution of foraminifera in surface sediments of the East China Sea[C]//Wang P X (ed.). *Marine Micropaleontology of China*. China Ocean Press & Springer-Verlag, 34-69.
- Wang Pinxian, Min Qiubao, Bian Yunhua, Cheng Xinrong. 1981. Strata of Quaternary transgressions in east China: A preliminary study[J]. *Acta Geologica Sinica*, (1): 1-13 (in Chinese with English abstract).
- Wang Pinxian, Zhang Jijun, Zhao Quanhong, Min Qiubao, Bian Yunhua, Zheng Lianfu, Cheng Xinrong, Chen Ronghua. 1988. Foraminifera and Ostracodes in Surface Sediments of the East China Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 20-51 (in Chinese with English abstract).
- Wang Pinxian. 1990. The ice-age China: Sea-status and problems[J]. *Quaternary Science*, 10(2):111-124 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Tian Guoqiang. 1999. The neotectonic setting of late Quaternary transgressions on the eastern coastal plain of China[J]. *Journal of Geomechanics*, 5(4): 41-48 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y H, Li G X, Zhang W G, Dong P. 2014. Sedimentary environment and formation mechanism of the mud deposit in the central South Yellow Sea during the past 40 kyr[J]. *Marine Geology*, 347:123-125.
- Wang Z B, Li R H, Yang S Y, Bai F L, Mei X, Zhang J, Lu K. 2019. Comparison of detrital mineral compositions between stream sediments of the Yantze River (Changjiang) and the Yellow River (Huanghe) and their provenance implication[J]. *China Geology*, 2: 169-178.
- Wang Z B, Yang S Y, Wang Q, Zhang Z X, Lan X H, Song Z J. 2019. Reconstruction of sedimentary stratigraphy and environment since MIS 5 on the outer shelf of the East China Sea[J]. *Marine Geology*, under revision.
- Wang Z B, Yang S Y, Wang Q, Zhang Z X, Zhang X H, Lan X H, Li R H, Huang L. 2014. Late Quaternary stratigraphic evolution on the outer shelf of the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 90: 5-16.
- Wang Z B, Yang S Y, Zhang Z X, Lan X H, Gu Z F, Zhang X H. 2013. Paleo-fluvial sedimentation on the outer shelf of the East China Sea during the last glacial maximum[J]. *Chinese Journal Oceanology and Limnology*, 31 (4): 886-894.
- Wang Z H., Saito Y, Hori K, Kitamura A, Chen Z Y. 2005. Yangtze offshore, China: Highly laminated sediments from the transition zone between subaqueous delta and the continental shelf[J]. *Coastal and Shelf Science*, 62(1/2): 161-168.
- Wei Chenglong, Zhang Ke, Yu Zhangxin, Qiu Yan. 2015. Correlation of stratigraphic sequences between the Pearl River Delta and its offshore continental shelf since the Late Pleistocene[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(4):714-723 (in Chinese with English abstract).
- Wellner R W, Bartek L R. 2003. The effect of sea level, climate, and shelf physiography on the development of incised-valley

- complexes: A model example from the East China Sea[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 73:926–940.
- Winkler M G, Wang P K. 1993. Late– Quaternary vegetation and climate in China[C]// Wright H E, Kutzbach J E, Webb T, Ruddiman W F, Street– Perrott F A, Bartlein P J (ed.). *Global Climates Since the Last Glacial Maximum*. University of Minnesota Press, London, 221–253.
- Wu Z Y, Jin X L, Li J B, Zheng Y L, Wang X B. 2005. Linear sand ridges on the outer shelf of the East China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(21):2517–2528.
- Xiao Guoqiao, Guo Zhengtang, Chen Yukun, Yao Zhengquan, Shao Yongxin, Wang Xulong, Hao Qingzhen, Lu Yanchou. 2008. Magnetostratigraphy of BZ1 borehole in west coast of Bohai Bay, northern China[J]. *Quaternary Sciences*, 28(5):909–916 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Shangbin, Li Anchun, Chen Muhong, Liu Jinpu, Jiang Fuqing, Li Tiegang, Xie Qiang, Xiang Rong, Chen Zhong. 2005. Recent 8 ka mud records of the East Asian Winter Monsoon from the inner shelf of the East China Sea[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(5): 573–580 (in Chinese with English abstract).
- Xu Fangjian, Li Anchun, Xiao Shangbin, Wan Shiming, Liu Jianguo, Zhang Yongchao. 2009. Paleoenvironmental evolution in the inner shelf of the East China Sea since the Last Deglaciation[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(1):118–127 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunting. 2016. Extents, types and evolution of Luanhe River fan– delta system, China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 36(6):13–22 (in Chinese with English abstract).
- Yan Yuzhong, Wang Hong, Li Fenglin, Tian Lizhu. 2006. Different depositional processes of boreholes BQ1 and BQ2 in the late Pleistocene on the west coast Bohai Bay[J]. *Quaternary Sciences*, 26(3):321–326 (in Chinese with English abstract).
- Yang C S. 1989. Active, moribund and buried tidal sand ridges in the East China Sea and the Southern Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 88: 97–116.
- Yang Wenda. 2002. Structure and sedimentary environment for submarine dune ridges in the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 22(1):9–16 (in Chinese with English abstract).
- Yang Z S, Ji Y, Bi N S, Lei K, Wang H J. 2001. Sediment transport off the Huanghe (Yellow River) delta and in the adjacent Bohai Sea in winter and seasonal comparison[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93(3):173–181.
- Yang Zigeng , Lin Hemao, Zhang Guangwei. 1996. Quaternary stratigraphy in the shelf of the Yellow Sea[C]//Yang Zigeng, Lin Hemao (ed.). *Quaternary stratigraphy in China and Its International Correlation*. Beijing: Geological Publishing House, 1996, 31–55 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zigeng, Lin Hemao. 1993. Proposal of Quaternary correlation of China and its adjacent areas[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 13(3): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zigeng. 1993. Proposal of Quaternary correlation of China and its adjacent areas[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 13(3): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zigeng. 1993. The sedimentary sequence and paleogeographic changes of the South Yellow Sea since the Olduvai subchron[J]. *Acta Geologica Sinica*, 67(4): 357–366 (in Chinese with English abstract).
- Yao Yantao, Harff J, Meyer M, Zhan Wenhuan. 2009. Reconstruction of paleo–coastlines for the northwestern South China Sea since the Last Glacial Maximum[J]. *Science in China (Series D)*, 36(6):753–762 (in Chinese with English abstract).
- Yao Z Q, Shi X F, Liu Q S, Liu Y G, Larrasoana J C, Liu J X, Ge S L, Wang K S, Qiao S Q, Li X Y, Shi F D, Fang X S, Yu Y G, Yang G, Duan Z Q. 2014. Paleomagnetic and astronomical dating of sediment core BH08 from the Bohai Sea, China: Implications for glacial– interglacial Sedimentation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 393:90–101.
- Yao Zhengquan, Guo Zhengtang, Chen Yukun, Xiao Guoqiao, Shao Yongxin, Wang Xulong. 2006. Magnetostratigraphy of marine terrigenous facies depositions in Bohai Bay[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(1):9–15 (in Chinese with English abstract).
- Yi L, Yu H J, Ortiz J D, Xu X Y, Chen S L, Ge J Y, Hao Q Z, Yao J, Shi X F, Peng S Z. 2012. 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*, 329–330: 101–117.
- Yoo D G, Chang T S, Lee G S, Kim G Y, Kim S P, Park S C. 2016. Late Quaternary seismic stratigraphy in response to postglacial sea– level rise at the mid– eastern Yellow Sea[J]. *Quaternary International*, 392:125–136.
- Yoo D G, Lee C W, Kim S P, Jin J H, Han H C. 2002. Late Quaternary transgressive and highstand systems tracts in the northern East China Sea mid–shelf[J]. *Marine Geology*, 187:313–328.
- Yu Hua, Liu Zhenxia, Xiong Yinggan, Li Shuanglin, Xiang Rong. 2006. Stratigraphy of core EA05 from southern East China Sea continental shelf since the Last Glacial Maximum and its paleo– environment implication[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 36(4):545–550 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Junqiang, Liu Jian, Kong Xianghuai, Xugang, Qiu Jiandong, Yue Baojing, Wang Feifei. 2015. Stratigraphic sequence and depositional environment since MIS6 in the continental shelf of the western South Yellow Sea: a case of SYS–0804 core[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 35(1):1–12 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Junqiang, Tang Lulu, Zou Hao. 2008. The response to the variety of paleoclimatic and sea level in the East China Sea after the

- Late Pleistocene[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1: 25–31 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhizhong, Zou Liang, Yang Zhenjing, Zhai Bin. 2015. Study on the spore–pollen record and paleo–environment from borehole DZS1 in the northern sea area of East China Sea[J]. Marine Science Bulletin, 34(5):499–507 (in Chinese with English abstract).
- Zhao B C., Wang Z H, Chen J, Chen Z Y. 2008. Marine sediment records and relative sea level change during Late Pleistocene in the Changjiang delta and adjacent continental shelf[J]. Quaternary International, 186:164–172.
- Zhao Kan, Kong Xinggong, Cheng Hai, Wang Yongjin. 2008. Intensity and timing of D–O events of East Asian Monsoon during the late episode of MIS3[J]. Quaternary Sciences, 28(1):177–183 (in Chinese with English abstract).
- Zhao X T, Geng X S, Zhang J W. 1979. Sea level changes of the eastern China during the past 20,000 years[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1(2): 269–281 (in Chinese with English abstract).
- Zhen Zhiguo, Zhong Wei, Xue Jibin, Zheng Yanming, Liu Wei. 2008. Progress in the studies of climatic features in different areas of China during the MIS–3[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 30(5): 814–824(in Chinese with English abstract).
- Zheng Guangying. 1989. Quaternary Strata Type Stratigraphic Correlation of the South Yellow Sea[M]. Beijing: Science Press, 1–262(in Chinese with English abstract)
- Zheng Yan, Zheng Hongbo, Wang Ke. 2010. History of sea level change since Last Glacial: reflected by sedimentology of core from East China Sea inner shelf[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 38(9):1381–1386 (in Chinese with English abstract).
- Zhuang Lihua, Li Tiegang, Chang Fengming, Sun Rongtao, Yan Jun. 2004. Quantitative analysis on the benthic foraminifer fauna in late Quaternary period in the north continental shelf of the East China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 24(1):43–50 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献
- 陈国能, 张珂, 贺细坤, 陈翻身, 念红. 1994. 珠江三角洲晚更新世以来的沉积–古地理[J]. 第四纪研究, (1): 67–74.
- 陈泓君, 黄文凯, 邱燕. 2017. 海南岛西南海域晚第四纪古水深反演[J]. 海洋地质与第四纪地质, 37(6): 128–139.
- 陈晓辉, 李日辉, 蓝先洪, 张训华, 李杰. 2014. 晚更新世北黄海中部硬质粘土层的形成及其古环境意义[J]. 第四纪研究, 34(3): 570–578.
- 陈晓辉, 孟祥君, 李日辉. 2020. 辽东湾晚第四纪层序地层[J]. 海洋地质与第四纪地质, 40(2): 37–47.
- 仇建东, 张勇, 孔祥准, 徐刚, 王双. 2015. 山东半岛南部滨浅海区晚第四纪声学地层[J]. 海洋地质与第四纪地质, 35(2): 1–10.
- 葛淑兰, 石学法, 朱日祥, 刘炎光, 印萍, 刘乐军. 2005. 南黄海EY02–2孔磁性地层及其古环境意义[J]. 科学通报, 50(22): 2531–2540.
- 高茂生, 郭飞, 侯国华, 仇建东, 孔祥准, 刘森, 黄学勇, 庄海海. 2018. 渤海南部莱州湾晚更新世以来沉积演化特征[J]. 中国地质, 45(1): 59–68.
- 顾明光. 2009. 钱塘江北岸晚第四纪沉积与古环境演变[J]. 中国地质, 36(2): 378–386.
- 黄永祥, 葛同明. 1995. 珠江口盆地晚第四纪地层及环境初步研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 15(4): 23–36.
- 蓝东兆, 张维林, 陈承惠, 于永芬. 1993. 晚更新世以来台湾海峡西部的海侵及海平面变化[J]. 海洋学报, 15(4): 77–84.
- 蓝先洪, 密蓓蓓, 陈晓辉, 李日辉, 王中波, 陆凯. 2015. 北黄海中部晚第四纪沉积物来源的稀土元素示踪[J]. 中国稀土学报, 33(2): 241–252.
- 蓝先洪, 秦亚超, 王中波, 陈晓辉, 密蓓蓓, 黄龙. 2016. 渤海东部晚更新世以来的沉积物地球化学特征[J]. 沉积学报, 34(5): 892–901.
- 蓝先洪, 张宪军, 赵广涛, 张志珣. 2009. 南黄海NT1孔沉积物稀土元素组成与物源判别[J]. 地球化学, 38(2): 123–132.
- 蓝先洪, 张志珣, 李日辉, 丁东. 2010. 南黄海NT2孔沉积物物源研究[J]. 沉积学报, 28(6): 1182–1189.
- 李绍全, 李双林, 陈正新, 唐保根, 陈裕迅. 2002. 东海外陆架EA01孔末次冰期最盛期的三角洲沉积[J]. 海洋地质与第四纪地质, 22(3): 19–26.
- 李西双, 赵月霞, 刘保华, 刘晨光, 裴彦良, 韩国忠, 华清峰. 2010. 郯庐断裂带渤海段晚更新世以来的浅层构造变形和活动性[J]. 科学通报, 55(1):1–12.
- 李翔, 李日辉, 陈晓辉, 强小科, 赵辉. 2016. 渤海西部TJC–1孔磁性地层研究[J]. 第四纪研究, 36(1): 208–215.
- 刘健, 李绍全, 王圣洁, 杨子赓, 葛宗诗. 1999. 末次冰消期以来黄海海平面变化与黄海暖流的形成[J]. 海洋地质与第四纪地质, 19(1): 13–24.
- 刘奎, 庄振业, 刘冬雁, 叶银灿, 胡广元. 2009. 长江口外陆架区埋藏古河道研究[J]. 海洋学报, 31(5): 80–88.
- 刘以宣, 詹文欢, 陈欣树, 陈俊仁, 陈特固, 许时耕. 1993. 南海晚近海平面变化与构造升降初步研究[J]. 热带海洋, 12(3): 24–31.
- 刘振夏, Berné S, L’ATALANTE科学考察组. 1999. 中更新世以来东海陆架的古环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 19(2): 1–10.
- 刘振夏, 夏东兴. 2004. 中国近海潮流沙脊沉积体系[M]. 北京: 海洋出版社.
- 梅西, 张训华, 刘健, 王中波, 郭兴伟, 黄湘通. 2019. 南黄海3.50 Ma以来海陆环境演变的元素地球化学记录[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 49(1): 74–84.
- 缪卫东, 李世杰, 冯金顺, 高立, 鄂建. 2016. 长江三角洲NB5孔第四纪地层划分及环境变化信息[J]. 中国地质, 43(6): 2022–2035.
- 秦蕴珊, 赵一阳, 赵松龄. 1985. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社.
- 施林峰, 翟子梅, 王强, 张学斌, 杨振宇. 2009. 从天津CQJ4孔探讨中国东部海侵层的年代问题[J]. 地质论评, 55(3): 375–384.
- 施雅风, 姚檀栋. 2002. 中低纬度 MIS–3b(54–44 ka B.P.)冷期与冰川前进[J]. 冰川冻土, 24(1): 1–9.
- 时小军, 余克服, 陈特固. 2007. 南海周边中全新世以来的海平面变化研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 27(5): 121–132.
- 石学法, 刘升发, 乔淑卿, 刘焱光, 方习生, 吴永华, 朱志伟. 2010. 东

- 海浙闽沿岸泥质区沉积特征与古环境记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 30(4): 19-30.
- 苏大鹏, 胡刚, 刘健, 张宪军. 2008. 东海陆架区潮流沙脊的沉积动力学[J]. 海洋地质动态, 24(6): 15-18.
- 孙荣涛, 赵京涛, 李军, 胡邦琦. 2015. 辽东湾LDD7孔晚更新世以来的沉积层序与古环境演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 45(5):1460-1468.
- 孙卫东, 林秋婷, 张丽鹏, 廖仁强, 李聪颖. 2018. 跳出南海看南海—新特提斯洋闭合与南海的形成演化[J]. 岩石学报, 34(12):3467-3477.
- 唐保根. 1996. 东海陆架第四纪地层[C]//杨子庚, 林和茂主编, 中国第四纪地层与国际对比, 北京:地质出版社, 56-75.
- 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 成鑫荣. 1981. 我国东部第四纪海侵地层的初步研究[J]. 地质学报, (1): 1-13.
- 汪品先, 章纪军, 赵泉鸿, 闵秋宝, 卞云华, 郑连福, 成鑫荣, 陈荣华. 1988. 东海底质中的有孔虫和介形虫[M]. 北京:海洋出版社, 1988, 20-51.
- 汪品先. 1990. 冰期时的中国海:研究现状与问题[J]. 第四纪研究, 10(2):111-124.
- 王洪聚, 刘保华, 李西双. 2011. 晚更新世以来渤海南部海域断裂活动性[J]. 地球科学进展, 26(5): 556-564.
- 王靖泰, 汪品先. 1980. 中国东部晚更新世以来海平面升降与气候变化的关系[J]. 地理学报, 35(4):299-312.
- 王可, 郑洪波, Maarten P, 郑妍. 2008. 东海内陆架泥质沉积反映的古环境变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(4):1-10.
- 王强, 田国强. 1999. 中国东部晚第四纪海侵的新构造背景[J]. 地质力学学报, 5(4):41-48.
- 韦成龙, 张珂, 余章馨, 邱燕. 2015. 珠江口外海域与珠江三角洲晚更新世以来的地层层序对比[J]. 沉积学报, 33(4):714-723.
- 肖国桥, 郭正堂, 陈宇坤, 姚政权, 邵永新, 王旭龙, 郝青振, 卢演铸. 2008. 渤海湾西岸BZ1钻孔的磁性地层学研究[J]. 第四纪研究, 28(5):909-916.
- 肖尚斌, 李安春, 陈木宏, 刘敬圃, 蒋富清, 李铁刚, 谢强, 向荣, 陈忠. 2005. 近8 ka东亚季风变化的东海内陆架泥质沉积记录[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 30(5):573-580.
- 徐方建, 李安春, 肖尚斌, 万世明, 刘建国, 张永超. 2009. 末次冰消期以来东海内陆架古环境演化[J]. 沉积学报, 27(1):118-127.
- 薛春汀. 2016. 滦河冲积扇—三角洲的范围和类型及其演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 36(6):13-22.
- 阎玉忠, 王宏, 李凤林, 田立柱. 2006. 渤海湾西岸晚更新世沉积的差异性特征[J]. 第四纪研究, 26(3): 321-326.
- 杨文达. 2002. 东海海底沙脊的结构及沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 22(1):9-16.
- 杨子庚, 林和茂, 张光威. 1996. 黄海陆架第四纪地层[M]//杨子庚, 林和茂主编. 中国第四纪地层与国际对比. 北京:地质出版社, 1996, 31-55.
- 杨子庚, 林和茂. 1993. 中国与邻区第四纪地层对比[J]. 海洋地质与第四纪地质, 13(3):1-14.
- 杨子庚. 1993. Olduvai 亚时以来南黄海沉积层序及古地理变迁[J]. 地质学报, 67(4):357-366.
- 姚衍桃, Harff J, Meyer M, 詹文欢. 2009. 南海西北部末次盛冰期以来的古海岸线重建[J]. 中国科学(D辑), 36(6):753-762.
- 姚政权, 郭正堂, 陈宇坤, 肖国桥, 邵永新, 王旭龙. 2006. 渤海湾海陆交互沉积的磁性地层学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 26(1):9-15.
- 余华, 刘振夏, 熊应乾, 李双林, 向荣. 2006. 末次盛冰期以来东海陆架南部EA05岩心地层划分及其古环境意义[J]. 中国海洋大学学报 36(4):545-550.
- 张军强, 刘健, 孔祥淮, 徐刚, 仇建东, 岳保静, 王飞飞. 2015. 南黄海西部陆架区SYS-0804孔MIS6以来地层和沉积演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 35(1):1-12.
- 张军强, 唐璐璐, 邹昊. 2008. 晚更新世以来古气候与海平面变化在东海地区的响应[J]. 海洋湖沼通报, 1:25-31.
- 张志忠, 邹亮, 杨振京, 韩月, 翟滨. 2015. 东海北部海域DZS1钻孔孢粉记录与古环境研究[J]. 海洋通报, 34(5):499-507.
- 赵侃, 孔兴功, 程海, 汪永进. 2008. MIS3晚期东亚季风强度和D-O事件年龄[J]. 第四纪研究, 28(1): 177-183.
- 赵希涛, 耿秀山, 张景文. 1979. 中国东部20000年来的海平面变化[J]. 海洋学报, 1(2):269-281.
- 甄治国, 钟巍, 薛积彬, 郑琰明, 刘伟. 2008. 中国不同区域MIS-3时期气候特征研究进展[J]. 冰川冻土, 30(5):814-824.
- 郑光膺. 1989. 南黄海第四纪层型地层对比[M]. 北京:科学出版社, 1-262.
- 郑妍, 郑洪波, 王可. 2010. 末次冰期以来东海内陆架沉积反映的海平面变化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 38(9):1381-1386.
- 庄丽华, 李铁刚, 常凤鸣, 孙荣涛, 阎军. 2004. 东海中陆架晚第四纪底栖有孔虫定量分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 24(1):43-50.