

doi: 10.12029/gc20200321

岳保静, 刘金庆, 刘健, 廖晶, 张军强. 2020. 渤海西缘 YRD-1101 孔晚更新世以来沉积物粒度特征及其环境变迁[J]. 中国地质, 47(3): 853-867.  
Yue Baojing, Liu Jinqing, Liu Jian, Liao Jing, Zhang Junqiang. 2020. Grain size distribution of sediment of core YRD-1101 in the western margin of the modern Bohai Sea since the latest Pleistocene and its environmental change[J]. Geology in China, 47(3): 853-867(in Chinese with English abstract).

## 渤海西缘 YRD-1101 孔晚更新世以来沉积物粒度特征及其环境变迁

岳保静<sup>1,2</sup>, 刘金庆<sup>3</sup>, 刘健<sup>1,2</sup>, 廖晶<sup>1,2</sup>, 张军强<sup>4</sup>

(1. 国土资源部油气资源和环境地质重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266071; 3. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛 266590; 4. 临沂大学地质与古生物研究所, 山东 临沂 276005)

**摘要:**对现代黄河三角洲地区 YRD-1101 孔上部岩心开展粒度分析, 并结合 AMS<sup>14</sup>C 和光释光(OSL)年代学测试结果、沉积特征、微体古生物鉴定及周边钻孔对比, 建立了 MIS5 期以来的地层框架, 揭示出该地区主要经历了 3 个阶段的沉积环境演化过程: (1) 晚更新世一早全新世河流与海相交替沉积, 其中 MIS5c 阶段海侵水动力环境中等, MIS3 期海侵水动力环境较弱, MIS2 期河流沉积水动力较强; (2) 全新世滨、浅海沉积环境, 动力环境整体较强, 相对比较稳定; (3) 1855 年至今形成的黄河三角洲沉积, 水动力强度较弱到中等。海平面变化和构造沉降是影响研究区晚更新世以来沉积演化的主要因素, 此外, 黄河带来的大量泥沙对海侵强度也有显著影响。

**关键词:** 粒度; 沉积环境; 现代黄河三角洲; 海洋地质调查工程; 渤海

中图分类号: P731.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)03-0853-15

## Grain size distribution of sediment of core YRD-1101 in the western margin of the modern Bohai Sea since the latest Pleistocene and its environmental change

YUE Baojing<sup>1,2</sup>, LIU Jinqing<sup>3</sup>, LIU Jian<sup>1,2</sup>, LIAO Jing<sup>1,2</sup>, ZHANG Junqiang<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, Shandong, China; 2. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, Shandong, China; 3. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China; 4. Institute of Geology and Paleontology of Linyi University, Linyi 276005, Shandong, China)

**Abstract:** Three stages of sedimentary environment evolution since MIS 5 were recognized based on the data of grain size analysis, AMS<sup>14</sup>C dating, OSL dating, sedimentary characteristics, benthic foraminifera and ostracoda identification in the upper part of core YRD-1101 drilled in the modern Yellow River Delta, and comparison with surrounding boreholes. Three stages of sedimentary

收稿日期: 2019-08-23; 改回日期: 2020-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(41330964, 41406079, 41406080, 41606059, 41706074)及青岛多要素城市地质调查(DD20189230)联合资助。

作者简介: 岳保静, 女, 1981 年生, 硕士, 助理研究员, 海洋地质专业, 从事海岸带环境地质研究; E-mail: selinayue1022@hotmail.com。

通讯作者: 刘金庆, 男, 1986 年生, 讲师, 博士后, 海洋地质专业, 从事海岸带地质研究; E-mail: jinqingliu@hotmail.com。

evolution are identified. (1) Interactive deposition of rivers and marine facies were formed during the Late Pleistocene- Early Holocene. Among them, the transgressive sediments in the MIS5c phase were formed in a medium hydrodynamic conditions, the transgressive sediments in the MIS3 phase were formed in a weak hydrodynamic environment, and the river sediments in the MIS2 phase were formed in a strong hydrodynamic environment. (2) The nearshore and shallow sea deposits during the Holocene formed in a strong and stable environment. (3) Modern Yellow River Delta sediments deposited since 1855 A.D. were formed in weak to medium sedimentary dynamic environments. Sea-level changes and neotectonic subsidence have been the major factors controlling the sedimentary evolution on the western margin of the modern Bohai Sea since MIS 5. In addition, the sediments were transported to the study area from Yellow River, which had a significant influence on transgression intensity.

**Key words:** grain size; sedimentary environment; modern Yellow River Delta; oceanic geological survey engineering; Bohai Sea

**About the first author:** YUE Baojing, female, born in 1981, assistant researcher, master, majors in geology, engages in research on coastal environmental geology; E-mail: selinayue1022@hotmail.com.

**Fund support:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41330964, No. 41406079, No. 41406080, No. 41606059, No. 41706074).

## 1 引 言

河口海岸带地区是记录海陆交互作用的敏感地区,三角洲的地貌演化受海平面变化、气候变化及沿岸沉积物供给、沿岸水动力变化及人类活动等多种控制因素的影响(Saito et al.,2001; 印萍等,2017; Wang et al.,2019)。沉积物的粒度参数受源区性质和沉积作用、沉积动力特征和搬运方式等综合因素影响,不同的沉积环境通常对应特定的动力因素和沉积物粒度特征,是重建古气候、古环境的重要参考指标,目前广泛应用于海洋、湖泊、河流等沉积环境的研究中(窦衍光等,2018; 黄晓璇等,2018; 李杰等,2018; 丁大林等,2019; 方文丽等,2019; 密蓓蓓等,2019; 吴同等,2019),用于判断沉积物的来源、水动力条件、古气候环境和泥沙运移趋势等(Wang et al.,2012; Vandenberghe,2013; Chen et al.,2019; Mei et al.,2019)。自20世纪60年代起,众多学者根据大量钻孔研究揭示出渤海及其西岸地区自晚更新世以来存在3套海相地层(秦蕴珊等,1985; Liu et al.,2009; Yao et al.,2012; 方静涛,2020),但受测年技术的限制,对海相地层的年代划分,特别是第II海相层的形成时代存在争议(胥勤勉等,2011; Yi et al.,2012; 陈永胜等,2012; 商志文等,2016);受地层内关键数据不足影响,对现代黄河三角洲地区晚更新世和全新世一些沉积亚相的划分和判定也存在分歧(Liu et al.,2014);此外,黄河对本区沉积环境演化的控制作用也有待深化(Liu et al.,2016)。

本文选取现代黄河三角洲地区 YRD-1101 孔

上部 55.61 m 的岩心为研究对象,以粒度分析为主要手段,结合该孔的岩性描述、AMS<sup>14</sup>C 测年及光释光测年、微体古生物等综合分析探讨本区氧同位素 5 期以来沉积相变化和沉积环境演化过程。

## 2 地质背景

渤海三面被陆地包围,东部通过渤海海峡与北黄海相连,海域面积 77000 km<sup>2</sup>,平均水深 18 m。渤海周边陆地河流输入的陆源物质,是渤海最主要的沉积物来源,主要包括黄河、滦河、辽河等(秦蕴珊等,1985)。其中,黄河是中国的第二大河,也是世界上泥沙含量最高的河流,其多年平均径流量达  $31.6 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/a,多年平均输沙量达到  $7.68 \times 10^8$  t/a,占渤海河流输入的 90%左右(Saito et al.,2001)。黄河三角洲位于渤海西缘,地处华北地台的埕宁隆起和济阳拗陷两个次级构造单元的交界处(Chen et al.,2009),由一系列古三角洲和现代三角洲组成(Xue,1993)(图 1)。渤海西缘第四纪以来主要为拗陷时期,整体沉降,晚第四纪以来,伴随着冰期-间冰期海平面变化,现代黄河三角洲地区主要经历了 3 次海侵(秦蕴珊等,1985)。另外,黄河中下游河道很不稳定,黄河的入海口在历史上多次变迁,因此本区形成了复杂的海陆交替层序结构(Liu et al.,2009)。

YRD-1101 孔海拔约 +1.84 m,岩心长 200.3 m,顶部 3.36 m 为人工回填土(表 1,图 2)。岩心采用油压式钻机取得,为全取心钻孔,泥质沉积物的采取率超过 90%,砂质沉积物的采取率大于 85%(Liu et al.,2016)。粒度样品按 10 cm 间隔取样,共测试样品

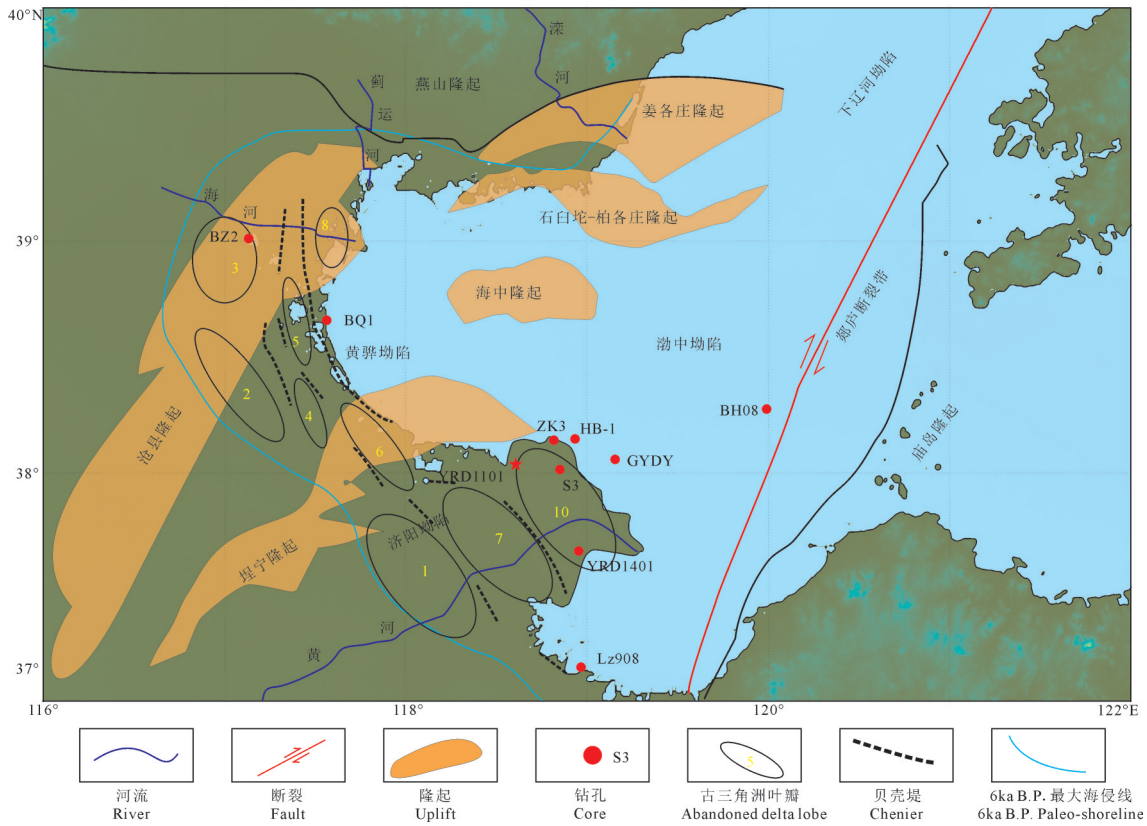


图1 钻孔位置、渤海湾盆地构造分区示意图及渤海西、南岸古黄河三角洲(古黄河三角洲9位于苏北地区,本图未标出)(据Xue,1993修改)

Fig.1 Schematic map showing the locations of the sediment cores, the tectonic divisions of the Bohai Bay Basin and the deltas on the western and southern coasts of the Bohai Bay (modified from Xue,1993)

表1 本文涉及钻孔的位置、高程及长度等基本信息  
Table 1 Locations, core site elevations, and lengths of all cores in this paper

钻孔编号	取样位置		相对高程/m	最大取 芯深度/m	文献
	纬度	经度			
YRD-1101	38°02'08.97"N	118°36'25.88"E	+1.84	200.3	(Liu et al.,2016)
BZ2	39°1'00"N	117°08'00"E	+4.0	203.6	(陈宇坤等,2008)
BQ1	38°39.883'N	117°33.808'E	+3.404	95.6	(阎玉忠等,2006)
BH08	38.28°E	119.99°N	-25.0	212.4	(Shi et al.,2016)
HB-1	38°09'N	118°56'E	-4.50	61.01	(Liu et al.,2009)
ZK3	38°08'40"N	118°49'00"E	+1.77	31	(赵广明等,2014)
GYDY	38°3'39.0"N	119°9'15.97"E	-10.55	40.2	(刘世昊等,2015)
YRD-1401	37°42'08.38"N	118°58'28.93"E	+2.64	81	(张欣等,2016)
S3	38°01'N	118°51'E	+2.868	450.27	(庄振业等,1999)
Lz908	37°09'N	118°58'E	+6.0	101.3	(Yi et al.,2015)

1733个,本文选取钻孔上部55.62 m开展研究。

### 3 材料与方法

YRD-1101孔(38°02'08.97"N、118°36'25.88"E)位于现代黄河三角洲北部的刁口流路入海口附近(钻孔位置见图1),YRD-1101孔海拔约+1.84 m,岩

心长200.3 m,顶部3.36 m为人工回填土(表1,图2)。岩芯采用油压式钻机取得,为全取心钻孔,泥质沉积物的采取率超过90%,砂质沉积物的采取率大于85%(Liu et al., 2016)。粒度样品按10 cm间隔取样,共测试样品1733个,本文选取钻孔上部55.62 m开展研究。对该孔的岩石磁学和古地磁学研究表

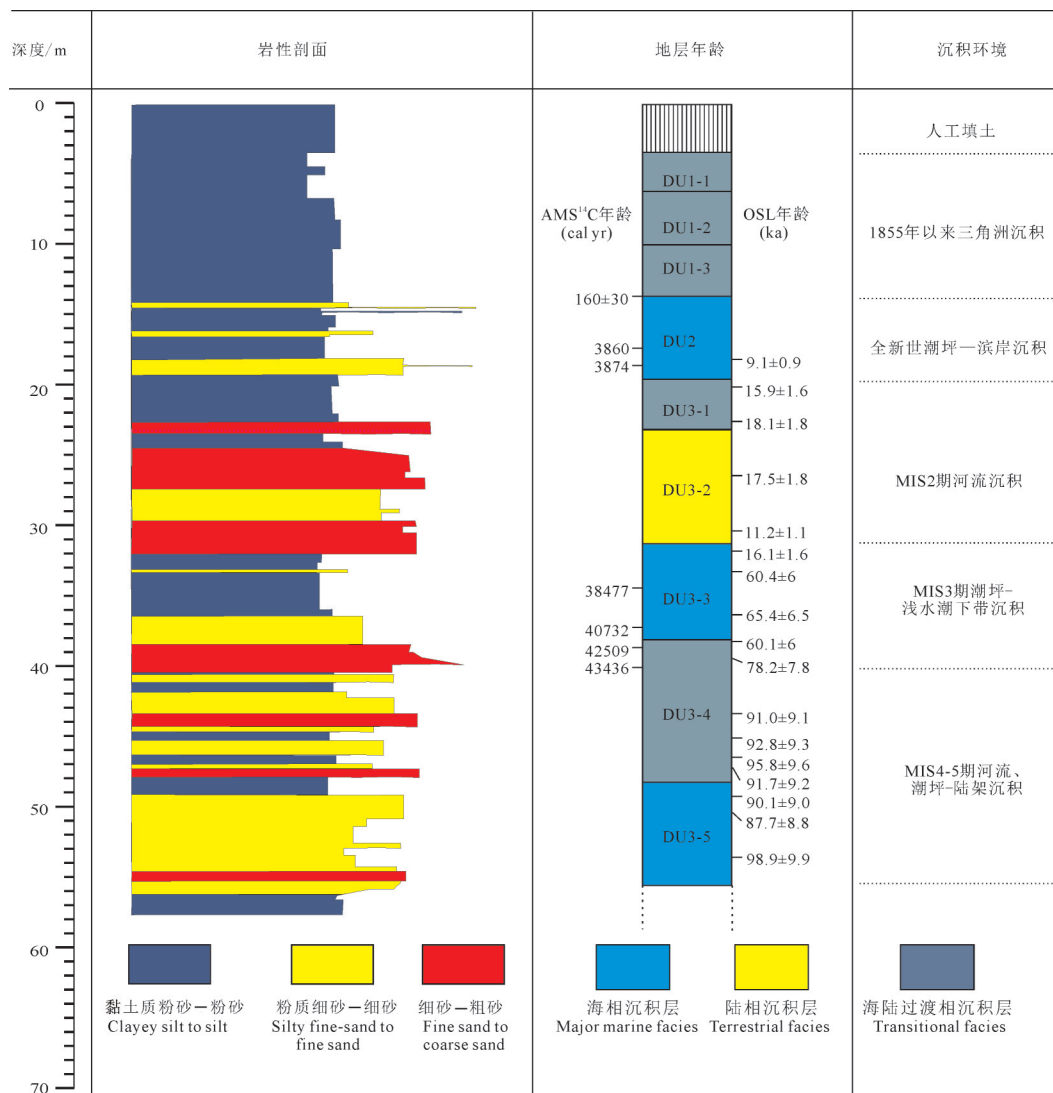


图2 YRD-1101孔岩性特征及地层划分(据 Liu et al.,2016 修改)

Fig. 2 Lithology and depositional sequences of core YRD-1101 (modified from Liu et al., 2016)

明,早、中更新世界线,即布容正极性时/松山负极性时界限(B/M)位于该孔 123.33 m 处,松山负极性时的 Jaramillo 正极性亚时位于 136.21~140.05 m,该孔还记录了不完整 Olduvai 正极性亚时(191.78~200.3 m),根据沉积速率推测该孔底部 200.3 m 的年代为 1.885 Ma(孙丽莎等,2014)。此外,根据光释光、AMS<sup>14</sup>C 测年及地层对比研究(Liu et al.,2016),该孔 55.62 m 以上的地层对应于晚更新世以来的沉积(图 2,图 3),其中:

DU1 层(埋深 3.36 ~ 13.85 m)为 1855 年以来形成的黄河三角洲沉积,由灰黄色黏土质粉砂与黄灰色粉砂互层,夹粉砂质线理,水平层理清晰,底部暗色含有有机质及少量透镜体。本层有孔虫和介形虫

数量较少且种类相对简单,主要为近岸浅水种,反映了黄河沉积物的高沉积速率。

DU2 层(埋深 13.85 ~ 19.69 m)为全新世沉积,由深灰色与褐黄色黏土质粉砂组成,以深灰色与褐黄色黏土质粉砂为主,深灰与绿灰色黏土质粉砂与粉砂密集互层,中下部有棕色锈斑,见贝壳碎屑。本层有孔虫和介形虫主要为近岸浅水种,均系现代渤海滨、浅海常见属种,数量和种类较 DU1 层显著增多。

DU3 层(埋深 19.69 ~ 55.62 m)为 MIS5 期一早全新世河流与海相交替沉积,由深黄色、灰绿色黏土质粉砂、粉砂、细砂组成,含少量中砂层,分选较好,见水平层理及交错层理,局部黑褐色黏土富含有机质。本层有孔虫和介形虫由 A、B 两相互层,A



相以广盐到咸水种、滨海种为主(*A. beccarii* vars.、*E. magellanicum*、*P. tuberculatum* 和 *C. subincertum*, 图 3), 指示潮坪-滨海相环境; B相不含深水有孔虫, 含陆相和广盐性介形虫, 指示河流沉积环境。DU3 深水有孔虫和介形虫种类较 DU2 显著增加, 在 31.43~38.29 m 和 48.31~55.62 m 出现丰度极值, 对应海相沉积层, 分别为 MIS5 早期到中期的沉积和 MIS3 早期形成; 河流沉积出现在 23.06~31.43 m, 为 MIS3 晚期到末次盛冰期(LGM)形成, 由两个向上变细序列组成, 在 26.89 m 隔开, 这一位置基本没有深水有孔虫。

粒度测试在国土资源部海洋地质实验检测中心完成, 原始样品加入 5 mL 10% 的  $H_2O_2$  和 5 mL 0.1 mol/L 的 HCl, 静置 24 h, 以便去除样品中的有机质。经六偏磷酸钠溶液和超声波分散后, 经六偏磷酸钠溶液和超声波分散后, 用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪(测量范围 0.02~2000  $\mu m$ , 偏差 <1%, 重现性  $\Phi 50 < 1\%$ ) 进行粒度测试。粒度等级分类采用尤登-温德

华粒度标准, 粒度参数的计算和等级划分均采用福克和沃德(Folk and Ward, 1957)提出的方法。

## 4 结果

为了反映局部水动力条件和沉积环境的变化特点, 根据高分辨率粒度变化特征, 将上部岩心的 3 个沉积单元(DU1、DU2、DU3)又进行了细分(图 2), 其中 DU1 层分为 3 个亚沉积单元(DU1-1、DU1-2、DU1-3); DU3 层分为 5 个亚沉积单元(DU3-1、DU3-2、DU3-3、DU3-4、DU3-5), DU3-1 为 MIS2 期河流沉积层与全新世海侵(DU2)之间的过渡地层, DU3-2 为 MIS2 期河流沉积层, DU3-3 为 MIS3 期海相层, DU3-5 为 MIS5 期海相层, DU3-4 为两个海相层之间过渡地层。各层段粒度基本参数统计表 2, 各层粒度特征见图 4, YRD-1101 孔各沉积单元典型样品概率累积曲线和频率分布曲线分别见图 5 和图 6。

DU1-1 层(3.42~6.78 m)主要成分为粉砂(平均含量 67.0%, 下同), 其次为黏土(30.3%), 砂含量

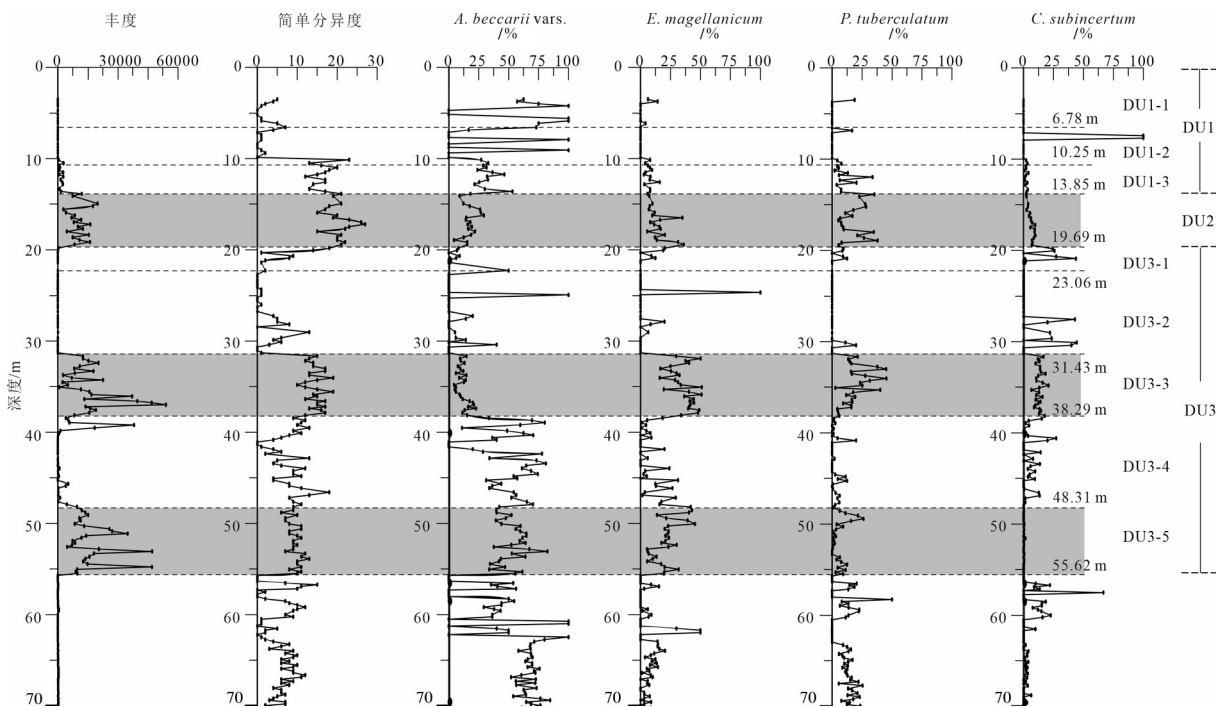


图3 YRD-1101孔上部70 m 有孔虫丰度、简单分异度和主要属种变化(据 Liu et al., 2016 修改)

灰色阴影代表晚更新世和全新世三个主要海相沉积层

Fig.3 Downcore changes in foraminiferal abundance and simple diversity, and the relative abundance of the main foraminiferal species in the uppermost 70 m of core YRD-1101(modified from Liu et al., 2016)

The grey shading indicates the three major marine sedimentary beds during the Late Pleistocene and Holocene

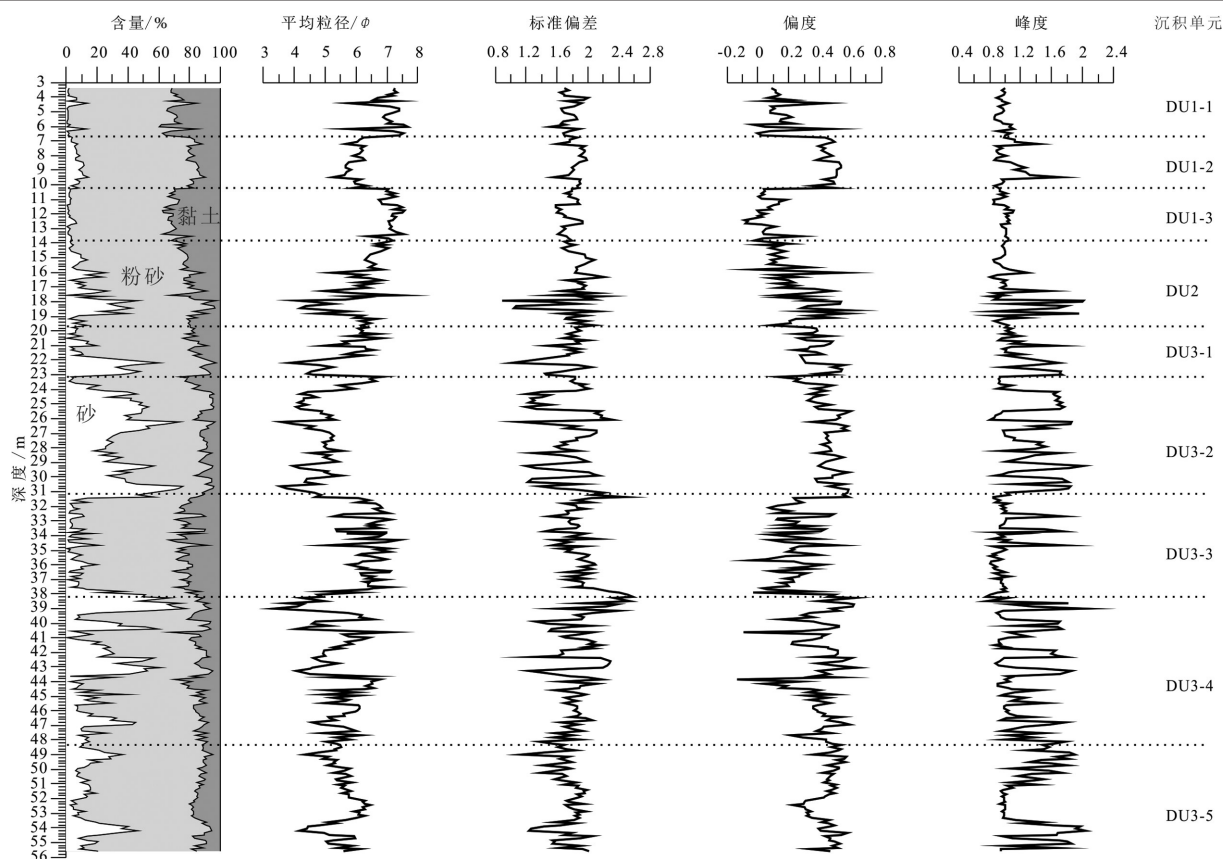


图4 YRD-1101孔上部粒度分布特征

Fig. 4 Vertical distribution of the grain sizes in core YRD-1101

很少(2.7%)。该段各参数变化幅度不大,平均粒径介于 $5.7 \sim 7.7\phi$ ,以中细粉砂为主;分选系数 $1.5 \sim 2.0$ ,分选差;偏态 $0 \sim 0.5$ ,为正偏和极正偏的分布形态;峰度值 $0.9 \sim 1.1$ ,属中等,见表2和图4。频率分布曲线(图5)主要呈宽缓的单峰特征,主峰众数在 $5 \sim 7\phi$ ,主要是中细粉砂等细粒沉积物组分,部分样品呈双峰型曲线,主峰尖锐,众数 $5\phi$ ,次峰不突出,众数 $1\phi$ ,对应砂组分沉积物;概率累积曲线(图6)主要呈一段式和两段式曲线,以悬浮组分为主,含量在90%以上,跃移组分含量较少,整体水动力较弱,但个别层位(如6.2 m)跃移组分含量较高,说明局部存在较强扰动。

DU1-2层(6.78~10.25 m)主要成分为粉砂(平均含量75.0%,下同),其次为黏土(17.5%),砂含量较少(7.6%)。该段各参数变化幅度不大,平均粒径介于 $5.3 \sim 6.4\phi$ ,以中细粉砂为主;分选系数 $1.6 \sim 2.0$ ,分选差;偏态 $0.4 \sim 0.5$ ,为正偏的分布形态;峰度值 $0.9 \sim 1.7$ ,属中等、尖锐、很尖锐,见表2和图4。频率分布曲线(图5)主要呈双峰特征,主峰尖锐,众

数介于 $4.5 \sim 5\phi$ ,主要是粗粉砂组分,次峰近于平坦,不突出,众数 $7\phi$ ,对应极细粉砂组分;概率累积曲线(图6)主要呈两段式,以跃移组分为主,含量在50%~80%,说明该段水动力环境较强。

DU1-3层(10.25~13.85 m)主要成分为粉砂(平均含量66.2%,下同),其次为黏土(31.3%),砂含量很少(2.6%)。该段各参数变化幅度不大,平均粒径介于 $6.4 \sim 7.6\phi$ ,以细粉砂为主;分选系数 $1.6 \sim 1.9$ ,分选差;偏态 $-0.1 \sim 0.3$ ,为近于对称、正偏的分布形态;峰度值 $0.9 \sim 1.1$ ,属中等,见表2和图4。频率分布曲线(图5)主要呈单峰特征,主峰众数 $5\phi$ 曲线较尖锐,主峰众数 $7\phi$ 曲线较宽缓,主要是粉砂组分,部分样品呈双峰特征,主峰较尖锐,众数 $4.5\phi$ ,次峰不突出,众数 $7\phi$ ;概率累积曲线(图6)主要呈两段式,悬浮组分含量85%以上,水动力较弱。

DU2层(13.85~19.69 m)主要成分为粉砂(平均含量66.2%,下同),其次为黏土(18.9%),砂含量少(14.9%)。该段各参数变化幅度很大,平均粒径介于 $4.1 \sim 7.4\phi$ ,以细粉砂为主,含部分中粗粉砂和少

表2 YRD-1101孔DU1-3岩心段沉积物粒度参数统计  
Table 2 Statistics of grain size parameters of the DU1-3 in core YRD-1101

层位	统计量	砂/%	粉砂/%	黏土/%	平均粒径/ $\Phi$	分选系数	偏态	峰态	中值粒径/ $\Phi$
DU1-1	最小值	0.5	58.7	15.2	5.7	1.5	0.0	0.9	5.2
	最大值	13.7	73.3	39.6	7.7	2.0	0.5	1.1	7.6
	平均值	2.7	67.0	30.3	7.1	1.8	0.1	1.0	6.9
DU1-2	最小值	3.1	71.4	10.0	5.3	1.6	0.4	0.9	4.9
	最大值	14.2	81.0	22.3	6.4	2.0	0.5	1.7	5.9
	平均值	7.6	75.0	17.5	6.0	1.9	0.5	1.1	5.4
DU1-3	最小值	0.5	60.0	18.9	6.4	1.6	-0.1	0.9	6.7
	最大值	6.6	77.7	38.0	7.6	1.9	0.3	1.1	7.5
	平均值	2.6	66.2	31.3	7.1	1.8	0.1	1.0	7.1
DU2	最小值	0.7	50.8	3.2	4.1	0.9	0.0	0.8	4.1
	最大值	46.0	80.6	32.7	7.4	2.2	0.6	2.0	7.3
	平均值	14.9	66.2	18.9	6.1	1.8	0.3	1.1	5.8
DU3-1	最小值	0.6	36.2	3.3	3.9	1.0	0.2	0.9	3.8
	最大值	60.6	80.3	24.5	6.9	2.0	0.6	1.7	6.6
	平均值	17.6	67.3	14.9	5.7	1.7	0.4	1.2	5.3
DU3-2	最小值	2.2	20.6	3.5	3.5	1.1	0.1	0.8	3.3
	最大值	75.3	75.2	26.5	6.8	2.5	0.6	2.0	6.7
	平均值	37.1	52.0	10.9	4.9	1.7	0.4	1.3	4.5
DU3-3	最小值	0.7	33.7	8.7	4.8	1.4	-0.1	0.7	3.9
	最大值	51.5	81.6	33.3	7.4	2.6	0.5	1.8	7.3
	平均值	9.3	68.8	31.9	6.4	1.9	0.2	1.0	6.1
DU3-4	最小值	0.8	16.1	5.1	3.3	1.2	-0.1	0.8	3.1
	最大值	77.4	84.2	32.8	7.0	2.5	0.6	2.0	7.2
	平均值	25.8	60.4	13.9	5.4	1.9	0.4	1.2	5.0
DU3-5	最小值	2.9	47.9	5.2	4.2	1.1	0.2	0.9	4.1
	最大值	46.4	82.3	20.3	6.4	2.1	0.6	2.0	6.3
	平均值	15.6	71.2	13.2	5.5	1.7	0.5	1.3	5.1

量极细粉砂;分选系数0.9~2.2,分选中等、差、较差;偏态0~0.6,为近于对称、正偏、极正偏的分布形态;峰度值0.8~2.0,属平坦、中等、尖锐、很尖锐,见表2,图4。频率分布曲线(图5)主要呈单峰特征,主峰平坦,众数介于5~7 $\Phi$ ,部分样品呈双峰特征,主峰有的尖锐有的宽缓,众数3.8 $\Phi$ 和6 $\Phi$ ,次峰宽缓不突出,众数7 $\Phi$ 和1 $\Phi$ ,沉积物组分变化复杂,说明该层分选很差,物源复杂;概率累积曲线(图6)主要呈两段式,上部悬浮组分为主,含量90%以上,下部跃移组分含量增加,在60%~90%,说明水动力自下而上由强变弱。

DU3-1层(19.69~23.06 m)主要成分为粉砂(平均含量67.3%,下同),其次为砂(17.6%),黏土含量很少(14.9%)。该段各参数变化幅度较大,平均粒径介于3.9~6.9 $\Phi$ ,以细粉砂为主,含部分中粗砂和少量极细砂;分选系数1.0~2.0,分选差;偏态0.2~0.6,为正偏、极正偏的分布形态;峰度值0.9~1.7,属中等、尖锐,见表2,图4。频率分布曲线(图5)主要呈双峰特征,主峰尖锐,众数介于3~4.2 $\Phi$ ,次峰

不明显,众数7 $\Phi$ ,少数呈单峰特征,主峰宽缓,众数介于5~5.5 $\Phi$ ,该层沉积物组分变化较大;概率累积曲线(图6)主要呈两段式,上部悬浮组分为主,含量50%以上,下部跃移组分含量增加,在50%~90%,说明水动力自下而上由强变弱。

DU3-2层(23.06~31.43 m)主要成分为粉砂(平均含量52.0%,下同),其次为砂(37.1%),黏土含量很少(10.9%)。该段各参数变化幅度很大,平均粒径介于3.5~6.8 $\Phi$ ,以粗粉砂为主,含部分中细粉砂和少量极细砂;分选系数1.1~2.5,分选差、较差;偏态0.1~0.6,为正偏、极正偏的分布形态;峰度值0.8~2.0,属平坦、中等、尖锐、很尖锐,见表2和图4。频率分布曲线(图5)主要呈双峰特征,主峰尖锐,众数介于3~4.5 $\Phi$ ,次峰宽缓不突出,众数7 $\Phi$ ,上部呈宽缓的单峰特征,众数6 $\Phi$ ,说明该层沉积物变化较大;概率累积曲线主要呈两段式,以跃移组分为主,含量在50%以上,自下而上含量逐渐降低,顶部基本都是悬浮组分,说明水动力自下而上由强变弱。

DU3-3层(31.43~38.29 m)主要成分为粉砂(平

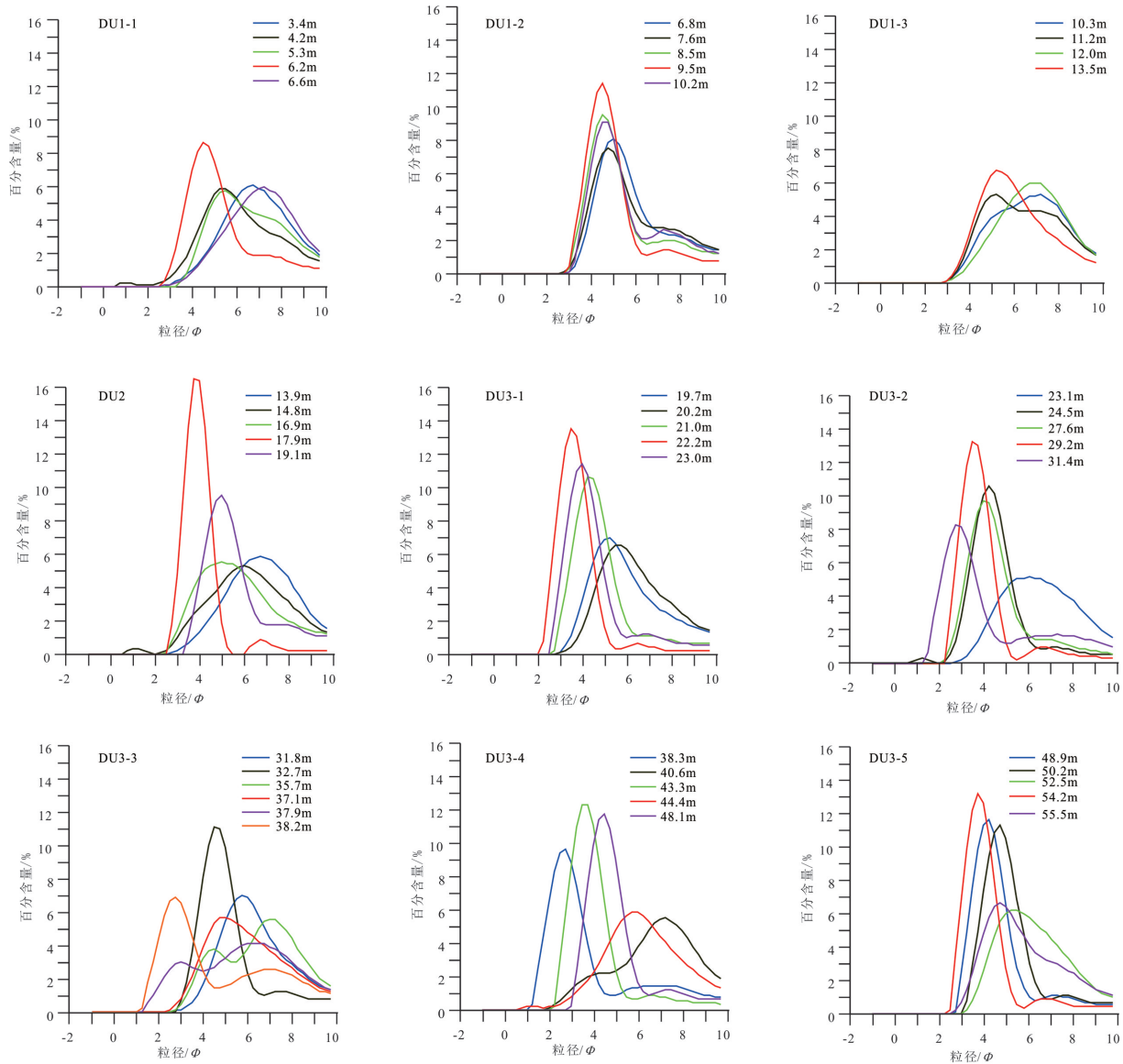


图5 YRD-1101孔各沉积单元典型样品频率分布曲线

Fig.5 The frequency distribution curves of typical sediment samples from each sedimentary unit in core YRD-1101

均含量 68.8%，下同)，其次为黏土(31.9%)，砂含量很少(9.3%)。该段各参数变化幅度较大，平均粒径介于  $4.8 \sim 7.4\phi$ ，以细粉砂为主，含部分极细砂、中粉砂和少量粗粉砂；分选系数  $1.4 \sim 2.6$ ，分选差、较差；偏态  $-0.1 \sim 0.5$ ，为近于对称、正偏、极正偏的分布形态；峰度值  $0.7 \sim 1.8$ ，属平坦、中等、尖锐、很尖锐，见表 2 和图 4。频率分布曲线(图 5)上段主要呈尖锐单峰特征，主峰众数介于  $4 \sim 5\phi$ ，主要为粗粉砂组分，下段呈双峰特征，主峰众数差别显著，众数  $3\phi$  的主峰较尖锐，众数  $6 \sim 7\phi$  的主峰宽缓，次峰不突出，众数  $7\phi$  和  $3 \sim 4\phi$ ，说明该层下段(35~38 m)

沉积物组分变化复杂。概率累积曲线(图 6)主要呈两段式，以悬浮组分为主，含量在 50%~95%，上部悬浮组分含量降低，不足 30%，说明水动力在该段整体较弱，仅在上部又有所加强。

DU3-4 层(38.29~48.31 m)主要成分为粉砂(平均含量 60.4%，下同)，其次为砂(25.8%)，黏土含量很少(13.9%)。该段各参数变化幅度较大，平均粒径介于  $3.3 \sim 7.0\phi$ ，以细中粗粉砂为主，少量极细砂和极细粉砂；分选系数  $1.2 \sim 2.5$ ，分选差、较差；偏态  $-0.1 \sim 0.6$ ，为近于对称、正偏、极正偏的分布形态；峰度值  $0.8 \sim 2.0$ ，属平坦、中等、尖锐、很尖锐，见表 2



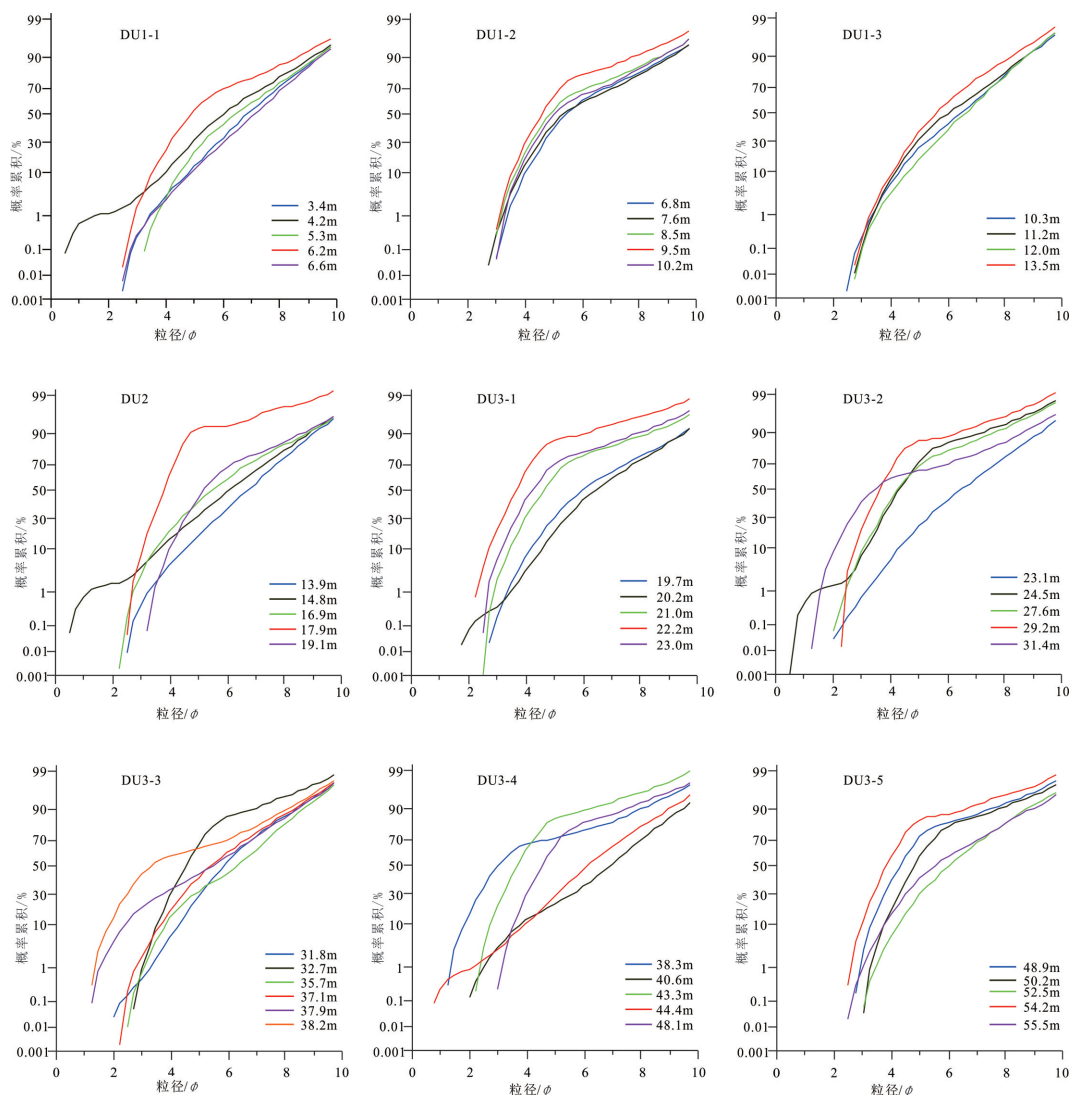


图6 YRD-1101孔各沉积单元典型样品概率累积曲线

Fig. 6 The probability accumulative curves of typical sediment samples from each sedimentary unit in Core YRD-1101

和图4。频率分布曲线(图5)上段主要呈单峰特征,主峰众数差别显著,大部分样品峰度值介于 $2.5 \sim 5\phi$ ,尖锐,少数样品峰度值介于 $5 \sim 7\phi$ ,宽缓,沉积物组分变化复杂。概率累积曲线(图6)呈两段式,上部以跃移组分为主,含量占 $70\% \sim 85\%$ ,下部水动力变弱,悬浮组分含量有所增加。

DU3-5层(48.31~55.62 m)主要成分为粉砂(平均含量 $71.2\%$ ,下同),其次为砂( $15.6\%$ )和黏土( $13.2\%$ )。该段各参数变化幅度不大,平均粒径介于 $4.2 \sim 6.4\phi$ ,以中粉砂为主,少量粗粉砂和细粉砂;分选系数 $1.1 \sim 2.1$ ,分选差、较差;偏态 $0.2 \sim 0.6$ ,为正偏、极正偏的分布形态;峰度值 $0.9 \sim 2.0$ ,属中等、尖锐、很尖锐,见表2和图4。频率分布曲线

(图5)上段主要呈单峰特征,主峰众数介于 $3 \sim 5\phi$ ,说明该层沉积物较粗;概率累积曲线(图6)呈两段式曲线,中部悬浮组分含量较高,在 $80\%$ 以上,上部和下部跃移组分含量较高,可占 $60\%$ 以上,说明水动力变化复杂。

## 5 讨论

### 5.1 动力环境分析

标准偏差-粒径散点图( $\sigma_s-M_d$ )和C-M图可以有效地判断不同的水动力条件和沉积环境(刘世昊等,2015),将YRD-1101孔DU1-DU3各沉积单元样品分别作 $\sigma_s-M_d$ 图和C-M图(图7)。从 $\sigma_s-M_d$ 图(图7a)来看,DU1-1层和DU1-3层大部分样品落在中

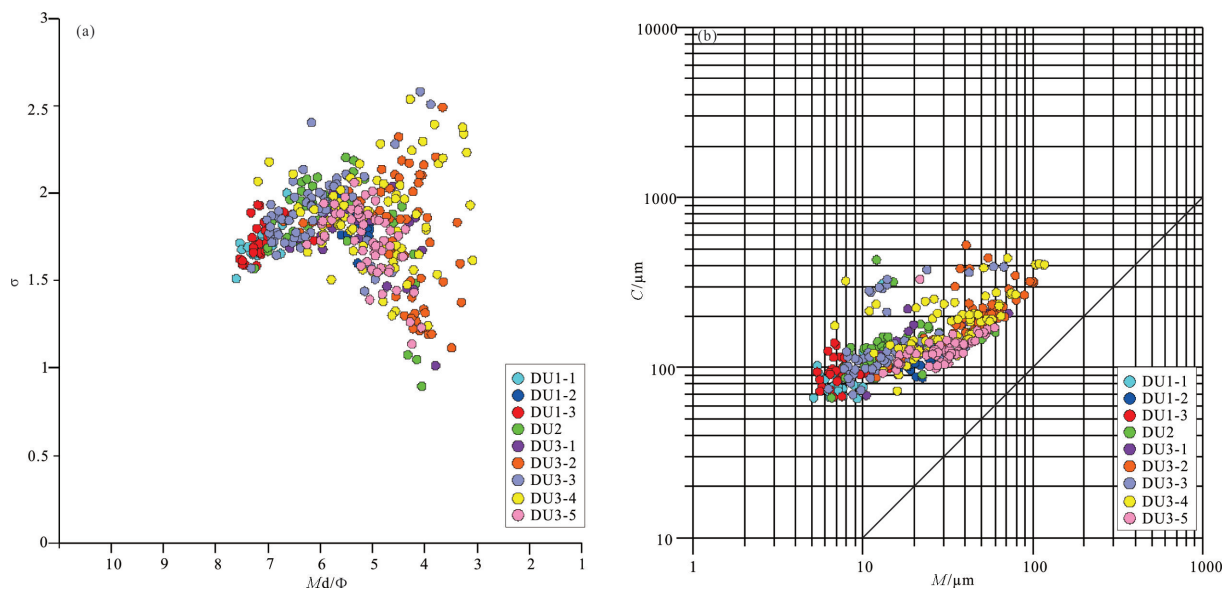


图7 YRD-1101孔粒度标准偏差 $\sigma$ -粒径 $M_d$ 散点图(a)和C-M图(b)  
Fig. 7 The grain size  $\sigma$ - $M_d$ (a) and C-M(b) maps of sediment samples in core YRD-1101

值粒径7.0~8.0 $\Phi$ ,分选系数1.5~2.0的范围,沉积物粒度分布集中,但分选差,表明其动力环境弱而稳定。DU1-2层、DU2层和DU3-3层大部分样品落在中值粒径5.0~7.0 $\Phi$ ,分选系数1.5~2.25的范围,沉积物粒度较上部粗,分选较差,表明其动力环境弱,但比上部水动力强。DU3-1、DU3-2、DU3-4和DU3-5层大部分样品落在中值粒径3.0~6.0 $\Phi$ ,分选系数1.0~2.5的范围,沉积物粒度更加分散,粒度变粗,分选差,表明其动力环境相对动荡。

从C-M图(图7b)来看,DU1-1层、DU1-2层、DU1-3层、DU2层、DU3-1层、DU3-3层和DU3-5层多数样品落在 $5 < M < 100 \mu\text{m}$ 和 $100 < C < 200 \mu\text{m}$ 的范围,为均匀悬浮区域,说明这些沉积层主要以动力较弱的静水沉积为主。但DU3-2和DU3-4样品多数落在C值200~600 $\mu\text{m}$ ,主要为递变悬浮组分,说明其沉积动力有所加强。此外,DU3-2层也有部分落在均匀悬浮区域,表明DU3-2层动力环境发生了变化。

## 5.2 YRD-1101孔沉积地层与全球海平面变化关系

晚第四纪以来,渤海地区经历多次海陆变迁,形成了海相与陆相沉积物交替出现的地层。根据前人研究,渤海及周边海岸地区自上而下普遍存在3个海相层:第一海相层(T-1)、第二海相层(T-2)和第3海相层(T-3),依次对应本孔的DU2层、DU3-3层和DU3-5层,为了进一步探讨海相地层

对海平面变化的响应,将YRD-1101的沉积地层与MIS5期以来黄海及其邻近海区海平面变化曲线进行对照,见图8。

DU3-5(MIS5c期,对应沧州海侵),距今98.9~90 ka时,研究区被海水覆盖,处于浅海陆架区,接受波浪和潮流作用改造,因此,沉积物颗粒相对较粗,反映了中等水动力环境。

DU3-4(MIS4期),出现短暂的海退,研究区处于潮坪-陆架交替沉积环境,沉积单元的粗颗粒物显著增多,水动力环境较DU3-5沉积单元增强。物质来源与DU3-5类似,比较单一。

DU3-3(MIS3期,对应献县海侵),MIS3时期全球海平面高度在现今海平面以下30~70 m(Chappell et al.,1996;Lambeck et al.,2002),其中,海平面在MIS3早期达到最高,在中国东部沿海地区约为-30 m(Liu et al.,2010)。研究区又一次被海水覆盖,中国东部沿海地区降水量普遍高于现代,气候温暖湿润,水较浅(秦蕴珊等,1985),粒度数据显示DU3-3沉积单元的沉积物较细,形成于较弱的水动力环境,对应潮坪-浅水潮下带沉积,多峰曲线和多段型概率累积曲线表明这一时期研究区受到多股水流的作用,或可能接受多种物源补给。

DU3-2(MIS2期),沉积物粗颗粒物增多,含砂量是上部岩心最高的层段,形成于较强的水动力环境,这一时期同样受到多股水流作用影响或接受

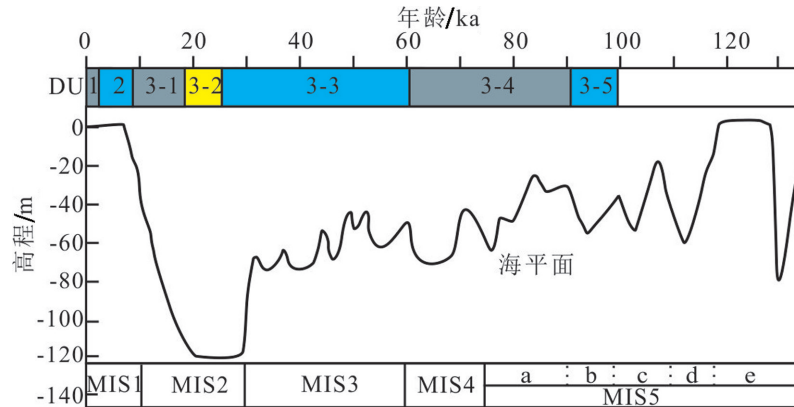


图8 MIS5期以来黄海及其邻近海区海平面变化曲线(根据文献Chappell et al.,1996; Lambeck et al.,2002; Liu et al.,2010修改)与YRD-1101孔沉积序列对应关系

Fig.8 Curve of sea-level changes of Yellow Sea and adjacent areas since 120 ka (modified from Chappell et al., 1996; Lambeck et al., 2002; Liu et al., 2010) and its relationship with the depositional sequences of core YRD-1101

多种物源补给,本段为陆相河流沉积。献县海侵之后,进入末次冰期盛冰期,气候变冷,海平面下降至现今海平面120 m以下,本区裸露出平原,并且分布很多浅湖和河流,渤海海底出现沙漠化,长期接受风化剥蚀的地区出现沉积间断(李凤林等,2004)。

DU3-1为海陆相过渡沉积,冰期之后,海平面快速上升,海水开始到达本区,沉积了一层潮坪沉积,沉积物颗粒较DU3-2明显变细,水动力环境复杂,研究区受到波浪、潮流以及河流的多种影响,沉积物来源较DU3-2减少,但仍然接受多种物源补给。

DU2(MIS1期,对应黄骅海侵)为滨、浅海沉积环境,自8.5 ka B.P以来,海平面进一步上升,海水淹没了本区,结合多峰曲线与多段型概率累积曲线表明这一时期研究区可能受到多股水流的作用,或接受多种物源补给,动力环境整体较强,相对比较稳定。

DU1(13.85~3.36m)为1855年至今形成的黄河三角洲沉积,粒度数据表示其形成于较弱到中等水动力强度三角洲环境中。1855年黄河在河南兰阳铜瓦厢决口,在山东利津、宁海东北入渤海,形成现代黄河三角洲。DU1层沉积物由下至上表现为细-粗-细的变化特征,DU1-2层较DU1-3层水动力环境略有增强,向上到DU1-1层又有所减弱,但沉积环境较之前更加复杂,与黄河尾间摆动有关。YRD-1101孔与ZK3孔位置接近,根据赵广明等(2014)对ZK3孔的地层划分,认为DU1-3层为现代黄河三角洲的前三角洲沉积;DU1-2层具有黏土含量低,砂和粉砂组分显著增加的特点,较下层前三角洲沉积相粒度变粗,根据水下三角洲的上下叠置

关系应为三角洲前缘沉积;DU1-1层沉积物粒度较DU1-2层的三角洲前缘沉积相变细,黏土含量高,推测为现代黄河三角洲的侧缘沉积、河口沙坝沉积和三角洲平原沉积。

渤海湾第四纪一直处于沉降过程中,不同的构造单元沉降速率略有差异,晚更新世沉降速率小于全新世沉降速率(段永侯,1998)。当海平面处于上升期和稳定期,叠加地面沉降影响,形成显著进积,而海平面下降大于沉降速率时形成退积。全球变化曲线(Chappell et al.,1996)表明,MIS5早-中期的海平面要高于MIS3期和全新世,但YRD-1101孔中所记录的中期为潮坪沉积且含褐红-棕色锈斑,底栖有孔虫组合以滨岸低盐种为主,而MIS3早期和全新世-中晚期的海侵沉积则为滨岸-近岸陆架沉积,陆架种的比例高于MIS5期海侵层。因此,在本区MIS5c、MIS3和MIS1时期发生的3次海侵,MIS5c期海侵强度较弱,MIS3期和MIS1期海侵相似,较MIS5c期增强,这与YRD-1101孔相应层位有孔虫与介形虫优势属种与峰度记录也一致(Liu et al.,2016)。本文认为上述海侵性质反映了自MIS5以来海平面变化和连续的构造沉降共同作用的结果。这种构造沉降会增加庙岛群岛之间水道的深度,并导致渤海湾盆地地势区域性降低,从而使得渤海地区能够发生较强的海侵。虽然构造沉降作用在继续进行,但在全新世中期(~8.5 cal kyr BP),黄河开始从渤海入海(Xu et al.,2015),在渤海的西海岸注入了大量沉积物,从而补偿了自MIS3早期以来构造沉降和全新世中-晚期海平面上升所增加的沉积空



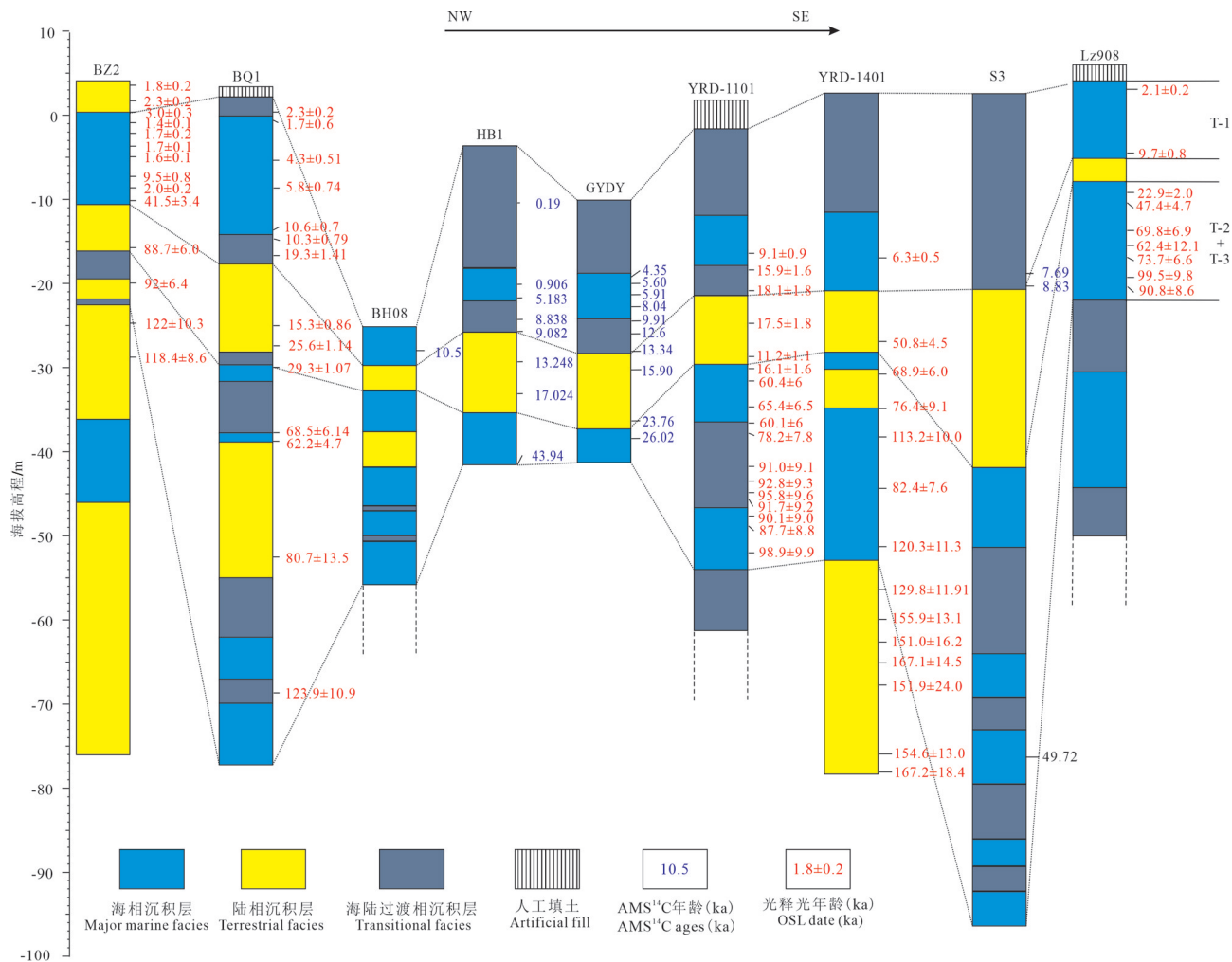


图9 渤海西岸晚更新世和全新世以来沉积序列对比(据庄振业等,1999;阎玉忠等,2006;陈宇坤等,2008;Liu et al.,2009;赵广明等,2014;刘世昊等,2015;Yi et al.,2015;Liu et al.,2016;张欣等,2016;Shi et al.,2016)

Fig.9 Regional correlation of sedimentary sequence during the Late Pleistocene and Holocene near the west coast of the Bohai Sea (after Zhuang et al., 1999; Yan et al., 2006; Chen et al., 2008; Liu et al., 2009; Zhao et al., 2014; Liu et al., 2015; Yi et al., 2015; Liu et al., 2016; Zhang et al., 2016; Shi et al., 2016)

间,因此这两次海侵在强度上相似。

### 5.3 渤海西缘地区沉积地层对比

受新构造运动的影响,MIS3海侵在渤海地区并非普遍存在,具有明显的区域特点,不同区域钻孔揭示的MIS3海侵层差异明显。针对渤海湾西岸部分钻孔的研究揭示出的第二海相层对应MIS5而并未对应MIS3(胥勰勉等,2011;陈永胜等,2012;商志文等,2016);但Yi et al.(2015)对莱州湾南部Lz908孔的研究表明,T-2属于MIS3-5;张欣对本钻孔YRD-1101附近的YRD-1401孔,YRD-1402孔和YRD-1403孔综合研究认为第二海相层形成于MIS3(张欣,2016)。将本文YRD-1101孔与渤海西

缘地区其他钻孔进行综合对比,发现它们之间的沉积单元能够很好的对应(图9)。晚更新世以来,不同钻孔的海相层厚度和沉积特征存在明显差异,这是海平面变化、沉积物供给和地层连续性等多种因素共同作用的结果。前人提出的3次海侵(沧州海侵、献县海侵、黄骅海侵),可分别与深海氧同位素(MIS)第5、3和1阶段相对应(秦蕴珊等,1985)。受庙岛隆起和渤海盆地的持续沉降,MIS3早期的海平面高度足以在渤海地区形成海相沉积,但部分钻孔揭示该沉积层被随后发育的河流沉积所侵蚀。由图9可见,凹陷区晚更新世沉积厚度大,沉积速率高;凸起区沉积厚度小,沉积速率低;进入全新世



后,两个次级单元间的差异性减弱,相对平稳的整体沉积开始占主导地位。

## 6 结 论

综合岩性、粒度、测年和微体古生物数据,将 YRD-1101 孔划分为 3 个沉积单元(DU3、DU2 和 DU1),分别对应晚更新世—早全新世河流与海相交替沉积,全新世滨、浅海沉积和 1855 年至今形成的黄河三角洲沉积。

对主要沉积单元进一步研究表明,沉积动力条件自下而上依次经历了 DU3-5(MIS5c 期浅海相)中等,DU3-4(MIS4 期海陆过渡相)增强,DU3-3(MIS3 期滨海相)变弱,DU3-2(MIS2 期河流相)增强,DU3-1(MIS2 晚期—MIS1 早期海陆过渡相)动荡,DU2(MIS1 晚期滨、浅海相)增强,DU1(三角洲相)变弱等阶段。

本区沉积环境主要受海平面变化和构造沉积影响,MIS 3 早期的海平面高度足以在渤海地区形成海相沉积,但 MIS 3 海侵在渤海地区并非普遍存在,具有明显的区域特点,部分钻孔揭示该沉积层被随后发育的河流沉积所侵蚀。全新世中期以来,黄河开始从渤海入海,大量泥沙物质输入显著影响了海侵强度。

渤海地区普遍存在的海侵记录在不同地区存在明显差异,这可能是海平面变化、沉积物供给和构造运动等多种因素共同作用的结果,需要更深入的研究来揭示。同时,研究如何建立更为精准的适于渤海及邻区海平面变化的曲线将十分有意义。

## References

- Chappell J, Omura A, Esat T, McCulloch M, Pandolfi J, Ota Y, Pillans 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.
- Chen L, Cheng C, Wei Z. 2009. Seismic evidence for significant lateral variations in lithospheric thickness beneath the central and western North China Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 286(1): 171–183.
- Chen Xiaoying, Liu Dahai, Yin Ping, Liu Jinqing, Cao Ke, Gao Fei, 2019. Temporal and spatial evolution of surface sediments characteristics in the Dagu River estuary and their dynamic response mechanism[J]. *China Geology*, 2, 325–332. doi: 10.31035/cg2018092.
- Chen Yukun, Li Zhenhai, Shao Yongxin, Wang Zhisheng, Gao Wuping, Yang Xulian. 2008. Study on the Quaternary chronostratigraphic section in Tianjin Area[J]. *Seismology and Geology*, 30 (2): 483–493 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yongsheng, Wang Hong, Pei Yandong, Tian Lizhu, Li Jianfen, Shang Zhiwen. 2012. Division and its geological significance of the late Quaternary marine sedimentary beds in the west coast of Bohai Bay, China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(3): 747–759 (in Chinese with English abstract).
- Ding Dalin, Zhang Xunhua, Yu Junjie, Wang Liyan, Wang Feng, Shang Shouwei, 2019. Sediment grain size distribution patterns of the late Quaternary on the back side of northern Yangtze River Delta and their environmental implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 39(4): 34–45 (in Chinese with English Abstract).
- Dou Yanguang, Chen Xiaohui, Li Jun, Cai Feng, Wen Zhenhe, Xu Gang, Zou Liang, 2018. Origin and provenance of the surficial sediments in the subenvironments of the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 38(4): 21–31 (in Chinese with English Abstract).
- Duan Yonghou. 1998. New tectonic movement and the formation and evolution of the Bohai Sea and their effects on the current geological environment[J]. *The Chinese Journal of Geological hazard and control*, 9(S1): 106–113.
- Fang Jingtao. 2020. Comprehensive evaluation on the geo-environment of coastal zones in Liaoning Province[J]. *Geology and Resources*, 29(1): 85–90, 100 (in Chinese with English abstract).
- Fang Wenli, Yao Zhengquan, Shi Xuefa, Ge Chendong, Qiao Shuqing, Li Xiaoyan, Dong Zhi, Wang Ying, 2019. Millennial-scale paleoenvironment and paleoclimate changes recorded in the Bohai Seas. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 39(3): 61–71. (in Chinese, with English Abstract).
- Folk R L, Ward W C. 1957. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1): 3–26.
- 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).
- Guo Haipeng, Bai Jinbin, Zhang Youquan, Wang Liya, Shi Jusong, Li Wenpeng, Zhang Zuozhen, Wang Yunlong, Zhu Juyan, Wang Haigang. 2017. The evolution characteristics and mechanism of the land subsidence in typical areas of the North China Plain[J]. *Geology in China*, 44(6): 1115–1127 (in Chinese with English abstract).
- Huang Xiaoxuan, Wang Rujian, Xiao Wenshen, Zhang Taoliang, 2018. Transportation mechanism of terrigenous sediment and its paleoenvironmental implications on the Chukchi Plateau, western Arctic Ocean during the late Quaternary[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 38(2): 52–62 (in Chinese with English Abstract).
- Lambeck Kurt, ESAT, Tezer M, Potter Emma–Kate. 2002. Links

- between climate and sea levels for the past three million years[J]. *Nature*, 419.6903: 199–206.
- Li Fenglin, Wang Hong, Yan Yuzhong, Wang Yunsheng, Zhang Jinqi, Zhao Changrong, Zhang Yufa, Li Jianfen, Lin Fang. 2004. The significance of the depositional hiatuses on the coastal plain of West Bohai Bay since the Late Quaternary period[J]. *Geological Survey and Research*, 27(3):177–183 (in Chinese with English Abstract).
- Liu J, Saito Y, Wang H, Zhou L Y, 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.
- Li Jie, Li Rihui, Yang Shixiong, Chen Xiaohui, Chen Shanshan, 2018. Pollen spore assemblages and induced palaeoenvironmental changes in the western Bohai Sea since Late Pleistocene[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 38(2):115–128 (in Chinese with English Abstract).
- 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, Wang H, Wang F F, Qiu J D, Saito Y, Lu 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 Shihao, Feng Aiping, Li Peiying, Du Jun, Li Ping, Gao Wei. 2014. Evolution of the buried channel systems under the modern Yellow River delta since the Last Glacial Maximum[J]. *Quaternary International*, 349(3):327–338.
- Liu Shihao, Feng Aiping, Li Peiying, Du Jun, Li Ping, Gao Wei. 2015. High-resolution grain size distribution and evolution of the sediment-dynamic environment in the modern yellow river delta since the latest Pleistocene[J]. *Quaternary*, 35(2):291–306 (in Chinese with English Abstract).
- Liu S H, Li P Y, Feng A P, Du J, Gao W, Xu Y Q, Yu X X, Li P, Nan X L. 2016. Seismic and core investigation on the modern Yellow River Delta reveals the development of the uppermost fluvial deposits and the subsequent transgression system since the postglacial period[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 128:158–180.
- Mei Xi, Li Rihui, Zhang Xunhua, Wang Zhongbo, Zhang Yong, 2019. Reconstruction of phytoplankton productivity and community structure in the South Yellow Sea[J]. *China Geology*, 2, 315–324. doi: 10.31035/cg2018091.
- Mi Beibei, Wang Zhongbo, Qiu Xiaohua, Zhang Yong, Lan Xianhong, 2019. Reconstruction of the redox environment in Okinawa Trough and its climatic implications since mid-Holocene[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 39(04):107–115 (in Chinese with English Abstract).
- Qin Yunshan, Zhao Yiyang, Zhao Songling(eds.). 1985. *Geology of Bohai Sea*[M]. Beijing: Science Press, 212–223 (in Chinese with English Abstract).
- Saito Y, Yang Z, Hori K. 2001. The Huanghe(Yellow River) and Changjiang (Yangtze River) deltas: a review on their characteristics, evolution and sediment discharge during the Holocene[J]. *Geomorphology*, 41(2):219–231.
- Shang Zhiwen, Wang Fu, Li Jianfen, Jiang Xingyu, Chen Yongsheng, Wang Hong. 2016. The age of the second marine layer in coastal lowland of Bohai Bay revealed by AMS<sup>14</sup>C dating method (II)[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(10):1591–1595(in Chinese with English abstract).
- Shi X F, Yao Z Q, Liu Q S, Larrasoana J C, Bai Y Z, Liu Y G, Liu J H, Cao P, Li X Y, Qiao S Q, Wang K S, Fang X S, Xu T Y. 2016. Sedimentary architecture of the Bohai Sea China over the last 1Ma and implications for sea-level changes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 451:10–21.
- Sun L S, Liu J, Qiu J D, Li G T, Xiang L H. 2014. Studies on magnetostratigraphy of core YRD-1101 sediments on the north shore of modern Yellow River Delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 34(4):31–40 (in Chinese with English abstract).
- Vandenbergh J. 2013. Grain size of fine-grained windblown sediment: A powerful proxy for process identification[J]. *Earth-Science Reviews*, 121(3):18–30.
- Wang Y P, Gao S, Jia J J, Thompson C E L, Gao J H, Yang Y. 2012. Sediment transport over an accretional intertidal flat with influences of reclamation, Jiangsu coast, China[J]. *Marine Geology*, 291–294:147–161.
- Wang Zhongbo, Li Rihui, Yang Shouye, Bai Fenglong, Mei Xi, Zhang Jian, Lu Kai, 2019. Comparison of detrital mineral compositions between stream sediments of the Yangtze River (Changjiang) and the Yellow River (Huanghe) and their provenance implication[J]. *China Geology*, 2, 169–178. doi: 10.31035/cg2018065.
- Wu Tong, Yang Zhenjing, Wang Yiming, Wang Pan, Peng Peihao, Zhang Peixin, 2019. Marine stratigraphy since Late Pleistocene on Wenzhou coastal plain[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 39(04):148–162 (in Chinese, with English abstract).
- Xu Qinnian, Yuan Guibang, Zhang Jinqi, Qin Yafei. 2011. Stratigraphic division of the late Quaternary strata along the coast of Bohai Bay and its geology significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(8): 1352–1367(in Chinese with English abstract).
- Xu Q, Yang J, Yuan G, Chu Z X, Zhang Z K. 2015. Stratigraphic sequence and episodes of the ancient Huanghe Delta along the southwestern Bohai Bay since the LGM[J]. *Marine Geology*, 367: 69–82.
- Xue C T. 1993. Historical changes in the Yellow River delta, China[J]. *Marine Geology*, 113(3/4):321–329.
- Yao Z Q, Guo Z T, Xiao G Q, Wang Q, Shi X F, Wang X Y. 2012. 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*, 54–55(4):192–202.
- Yan Yuzhong, Wang Hong, Li Fenglin, Li Jianfen, Zhao Changrong, Lin Fang. 2006. Sedimentary environment and sea-level fluctuations revealed by Borehole BQ1 on the west coast of Bohai

- Bay,China[J]. Geological Bulletin of China. 25(3): 357-382(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(3): 101-117.
- Yi L, Deng C L, Xu X Y, Yu H J, Qiang X K, Jiang X Y, Chen Y P, Su Q, Chen G Q, Li P, Ge J Y, Li Y. 2015. Paleo-megalake termination in the Quaternary: Paleomagnetic and water-level evidence from south Bohai Sea, China[J]. Sedimentary Geology. 319:1-12.
- Yin Ping, Lin Liangjun, Chen Bin, Xiao Guoqiang, Cao Ke, Yang Jilong, Li Meina, Duan Xiaoyong, Qiu Jiandong, Hu Yunzhuang, Wang Lei, Sun Xiaoming. 2017. Coastal zone geo-resources and geo-environment in China[J]. Geology in China, 44(5): 842-856 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xin, Liu Jian, Qiu Jiandong, Wang Shuang. 2016. Study of optically stimulated luminescence(OSL) chronology and sedimentary environments of the Yellow River Delta area with core YRD-1402[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, (3): 11-22.(in Chinese with English Abstract).
- Zhao G M, Ye Q, Ye S Y, Ding X G, Yuan H M, Wang J. 2014. Holocene stratigraphy and paleoenvironmental evolution of the northern Yellow river delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 34(5):25-32.
- Zhuang Zhenye, Xu Weidong, Liu Dongsheng, Zhuang Lihua, Liu Baozhu, Cao Youyi, Wang Qiang. 1999. Division and environmental evolution of late Quaternary marine beds of S3 hole in the Bohai Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 19(2): 27-35 (in Chinese,with English Abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈宇坤,李振海,邵永新,王志胜,高武平,杨绪连. 2008. 天津地区第四纪年代地层剖面研究[J]. 地震地质,30 (2):483-493.
- 陈永胜,王宏,裴艳东,田立柱,李建芬,商志文. 2012. 渤海湾西岸晚第四纪海相地层划分及地质意义[J]. 吉林大学学报:地球科学版,42 (3):747-759.
- 丁大林,张训华,于俊杰,王丽艳,王丰,商守卫,2019. 长江三角洲北翼后缘晚第四纪以来的沉积粒度特征及环境演化[J]. 海洋地质与第四纪地质,39(04):34-45.
- 窦衍光,陈晓辉,李军,蔡峰,温珍河,徐刚,邹亮,2018. 东海外陆架-陆坡-冲绳海槽不同沉积单元底质沉积物成因及物源分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 38(04):21-31.
- 段永侯. 1998. 环渤海新构造活动与渤海形成演化对现今地质环境之影响[J]. 中国地质灾害与防治学报,9(S1):106-113.
- 方静涛. 2020. 辽宁省海岸带地质环境综合评价研究[J]. 地质与资源, 29(1):85-90,100.
- 方文丽,姚政权,石学法,葛晨东,乔淑卿,李小艳,董智,王颖,2019. 渤海沉积记录的末次冰期千年尺度古环境与古气候变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 39(3):61-71.
- 高茂生,郭飞,侯国华,仇建东,孔祥淮,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.
- 郭海朋,白晋斌,张有全,王丽亚,石菊松,李文鹏,张作辰,王云龙,朱菊艳,王海刚. 2017. 华北平原典型地段地面沉降演化特征与机理研究[J]. 中国地质, 44(6): 1115-1127.
- 黄晓璇,王汝建,肖文申,章陶亮,2018. 西北冰洋楚科奇海台晚第四纪以来陆源沉积物搬运机制及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质,38(2):52-62.
- 李凤林,王宏,阎玉忠,王云生,张金起,赵长荣,张玉发,李建芬,林防. 2004. 渤海湾西岸滨海平原晚第四纪以来的沉积间断[J]. 地质调查与研究,27(3):177-183.
- 李杰,李日辉,杨士雄,陈晓辉,陈珊珊,2018. 渤海西部海域晚更新世以来的孢粉组合及古环境变化[J]. 海洋地质与第四纪地质,38(2): 115-128.
- 刘世昊,丰爱平,李培英,杜军,李平,高伟. 2015. 现代黄河三角洲地区晚更新世以来高分辨率沉积粒度特征及动力沉积环境演化[J]. 第四纪研究,35(2):291-306.
- 密蓓蓓,王中波,仇晓华,张勇,蓝先洪,2019. 中全新世以来冲绳海槽氧化还原环境重建及其气候效应[J]. 海洋地质与第四纪地质,39(4): 107-115.
- 秦蕴珊,赵一阳,赵松龄主编. 1985. 渤海地质[M]. 科学出版社,212-223.
- 商志文,王福,李建芬,姜兴钰,陈永胜,王宏. 2016. AMS<sup>14</sup>C 测年揭示的渤海湾沿海低地第 II 海相层年龄(II)[J]. 地质通报,35(10):1607-1613.
- 孙丽莎,刘健,仇建东,李国涛,项立辉. 2014. 现代黄河三角洲北岸 YRD-1101 孔岩心磁性地层学[J]. 海洋地质与第四纪地质,34 (4):31-40.
- 吴同,杨振京,王一鸣,王攀,彭培好,张培新,仓飞,2019. 温州沿海平原晚更新世以来的海相地层特征及沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质,39(4):148-162.
- 胥勤勉,袁桂邦,张金起,秦亚飞. 2011. 渤海湾沿岸晚第四纪地层划分及地质意义[J]. 地质学报,85(8):1352-1367.
- 阎玉忠,王宏,李凤林,李建芬,赵长荣,林防. 2006. 渤海湾西岸 BQ1 孔揭示的沉积环境与海面波动[J]. 地质通报,25(3): 357-382.
- 印萍,林良俊,陈斌,肖国强,曹珂,杨吉龙,李梅娜,段晓勇,仇建东,胡云壮,王磊,孙晓明. 2017. 中国海岸带地质资源与环境评价研究[J]. 中国地质, 44(5): 842-856.
- 张欣,刘健,王飞飞,仇建东,王双. 2016. 黄河三角洲地区 yrd-1402 孔沉积物光释光年代学与沉积环境. 海洋地质与第四纪地质, (3):11-22.
- 赵广明,叶青,叶思源,丁喜桂,袁红明,王锦. 2014 黄河三角洲北部全新世地层及古环境演变[J]. 海洋地质与第四纪地质,34(5):25-32.
- 庄振业,许卫东,刘东生,庄丽华,刘宝柱,曹有益,王强. 1999. 渤海南部 S<sub>3</sub> 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,19(2): 27-35.