

静力触探在莱州湾冰后期三角洲层序地层学 研究中的应用

徐建国, 刘中业, 陶有兵, 徐 华, 纪汶龙, 张春池

山东省地质调查院, 山东济南 250013;
山东省土地质量地球化学与污染防治工程技术研究中心, 山东济南 250013

摘 要: 静力触探试验是广泛应用于海岸带地区岩土工程勘察的原位测试手段, 静探数据的连续性、高分辨率在其应用于晚第四纪地层结构研究中具有独特的优势。本文对莱州湾沿岸 249 个工程地质孔-静力触探孔组的岩性编录资料与静探参数资料进行对比研究, 建立了冰后期沉积不同沉积相的静探参数曲线识别模式, 以此为基础配合 ^{14}C 测年、微体古生物鉴定等资料, 开展莱州湾沿岸冰后期三角洲的层序地层学研究, 划分体系域、识别层序边界。研究结果表明: ①莱州湾沿岸晚更新世以来历次海侵均发育河流三角洲, 其中的冰后期三角洲保存最完整, 区域上分为主体区和侧翼区两个沉积分区, 二者在沉积岩性上有明显差异。②莱州湾沿岸冰后期沉积体系域类型包括由末次冰盛期至冰后期早期的河流相、滨海湖沼相沉积组成的低水位体系域, 由冰后期中期三角洲前缘、潮坪沉积组成的海侵体系域, 由冰后期晚期三角洲前缘、潮坪和三角洲平原沉积组成的高水位体系域。③莱州湾沿岸冰后期海侵区沉积环境为潮坪环境, 整个海侵过程中最大古水深小于 10 m。

关键词: 静力触探; 冰后期三角洲; 粒序结构; 层序地层学; 古水深

中图分类号: P539.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2021.042301

The Application of CPT to the Study of Post Glacial Delta Sequence Stratigraphy in Laizhou Bay

XU Jian-guo, LIU Zhong-ye, TAO You-bing, XU Hua, JI Wen-long, ZHANG Chun-chi

Shandong Institute of Geological Survey, Jinan, Shandong 250013;
Shandong Technology Research Center of Land Quality Geochemistry and Pollution Prevention Engineering, Jinan, Shandong 250013

Abstract: Cone penetration test (CPT) is an in-situ test method that is widely used in geotechnical investigation of the coastal zone. The continuity and high resolution of static sounding data have unique advantages in its application to the study of the Late Quaternary stratigraphic structure. In this study, the lithologic logging data and static sounding parameter data of 249 engineering geological holes and cone penetration test hole groups along the coast of Laizhou Bay were comparatively analyzed, and the identification model of static sounding parameter curve for different sedimentary facies of post glacial sedimentation was established. On such a basis and in combination with ^{14}C dating, micropaleontological identification and other data, the sequence stratigraphy of post glacial delta along Laizhou Bay was studied, and system tracts as well as sequence boundaries were identified. This research shows the following phenomena: ① River deltas were developed in all the transgressions along the Laizhou Bay in the late Pleistocene, and the post glacial deltas were the most well-preserved ones with important research value. The coastal post glacial delta area of Laizhou Bay could be divided into two sedimentary zones: the main area and the flanking area, which are obvious different in lithologic characteristics. ② In sequence stratigraphy, the post glacial depositional system tracts along the coast of Laizhou

本文由中国地质调查局地质调查项目(编号: 1212011220001; 12120114033801)资助。

收稿日期: 2021-02-17; 改回日期: 2021-04-02; 网络首发日期: 2021-04-23。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 徐建国, 男, 1965 年生。研究员。长期从事水工环地质、第四纪地质方面调查研究。通讯地址: 250014, 济南市历下区荆山路 17 号。E-mail: xujianguo2008@126.com。

Bay might be divided into the following components: low water level system tracts composed of fluvial facies and littoral lacustrine facies deposits from the last glacial maximum to the early post glacial stage, the positive grain sequence transgressive system tract composed of delta front and tidal flat deposits in the middle of post glacial period, and the high water level system composed of delta front, tidal flat and delta plain deposits in the late post glacial period. ③ The sedimentary environment of the post glacial transgressive area along the coast of Laizhou Bay was tidal flat, and the maximum paleo water depth was less than 10 m during the whole transgression process.

Key words: cone penetration test; post-glacial delta; grain structure; sequence stratigraphy; paleo water depth

莱州湾沿岸冰后期沉积是工程建设的主要利用层,也是与该区咸水入侵、土地盐渍化、软土地基、砂土液化等地质环境问题密切相关的地层,1970 年以来有关学者对该沉积层作了大量的古生物、 ^{14}C 测年等分析测试,对冰后期沉积环境演变作了较系统的研究,但这些工作大多是对局部地区、少量第四纪地质孔的分析研究(郑守仪等, 1978; 庄振业和李建华, 1986; 林防等, 2005; Yi et al., 2015; 郭飞等, 2016; 姜兴钰等, 2016; 李守军等, 2017), 区域性研究工作较少。薛春汀和丁东(2008)首次对莱州湾南岸全新世沉积开展系统研究,提出了莱州湾南岸发育典型河流三角洲的观点,并指出该三角洲是由多条河流共同塑造的集群河流三角洲,但受钻孔资料限制,并未对海平面变化背景下冰后期三角洲的沉积结构进行更深入的研究;徐建国等(2018, 2019)基于研究区 1:5 万第四纪地质、工程地质调查中形成的大量钻孔岩芯、微体古生物、 ^{14}C 测年等资料,证实莱州湾沿岸晚更新世以来历次海侵中均发育河流三角洲,并对冰后期三角洲开展了岩石地层、生物地层、年代地层和气候地层研究,但并未开展三角洲的沉积层序研究。

静力触探试验(CPT)是用静力将一定规格的圆锥探头以一恒定的贯入速率压入土中,并测定探头阻力的原位测试方法,自 1950 年以来被广泛应用于工程地质调查,主要用于岩性划分和地基承载力计算。由于泥质海岸带第四纪沉积物大多为岩性变化较小的细颗粒堆积,在钻孔岩芯编录中通过肉眼识别岩性变化有时难度较大,但静力触探试验参数对岩性较敏感,可以反映岩性的细微变化,在岩性剖面划分上有其独特优势,近些年也被应用于海岸带晚第四纪沉积地层学研究。林春明(1995)将静力触探数据应用于钱塘江口全新统超浅层天然气勘探,利用触探曲线划分岩性、判别古河口湾的存在;Styllas(2014)通过对希腊阿克蒙河全新世三角洲平原静力触探试验资料与相邻钻孔编录资料的对比分析,划分了该三角洲沉积体的层序地层单位,建立了晚第四纪地层模型;但这两项研究仅限于通过静探参数值大小识别岩性,进而开展海岸带沉积相分析,可能受所利用静探和岩芯资料不足的影响,并

未建立起不同沉积相的静探参数曲线形态识别模式。

本文充分利用研究区 249 个全取芯钻孔-静力触探孔组资料,结合对微体古生物、 ^{14}C 测年资料的分析,针对莱州湾冰后期三角洲开展层序地层学研究,建立冰后期沉积环境的静力触探参数曲线识别模式,该研究成果在同类地区具有潜在应用价值。

1 研究区地质背景

莱州湾沿岸发育一系列入海河流,自东往西主要有胶莱河、潍河、白浪河、弥河、小清河等,径流量、输沙量以潍河最高,弥河次之。地势上总体表现为向海倾斜的缓坡地形,地形起伏受到地貌类型影响,潍河、白浪河、弥河冲积扇以及近代黄河三角洲呈扇形高地,而滨海低地、冲积扇前缘和扇间地带表现为低平洼地(图 1)。

研究区在大地构造分区上横跨济阳拗陷、鲁西隆起和鲁东隆起三个Ⅲ级构造单元,济阳拗陷与鲁西隆起以柳疃断裂—侯镇北断裂(齐广断裂)为界,安丘—莒县断裂为鲁东隆起与济阳拗陷分界线。济阳拗陷本区第四系厚度 130~230 m,说明拗陷区第四纪构造运动以继承性沉降为主,沉降幅度 130 m 以上;鲁西隆起、鲁东隆起第四系厚度 0~130 m,变化较大,向拗陷区方向厚度增大,说明第四纪时期也发生了一定程度的沉降,沉降幅度向拗陷区逐渐增加。

研究区大部分地区为全新世海侵区,最大海侵线大致与 4 m 高程线(国家 1985 高程)吻合,海侵范围内地面高程一般 1~4 m,海侵线以南的山前倾斜平原高程一般 4~78 m,与 1947 年希腊人克雷陀普(P. Christopoulos)在其“华北大平原的生成”一文提出的 4 m 等高线可作为史前海岸线的观点相吻合(赵松龄, 1986)。

2 冰后期三角洲沉积结构

莱州湾冰后期三角洲南界位于寒桥—固堤—昌邑一线,东界位于官庄—土山一带,西界可达研究区外的广饶县花官一带,北界靠近现代黄河入海口(薛春汀和丁东, 2008),依据沉积条件差异可划分为

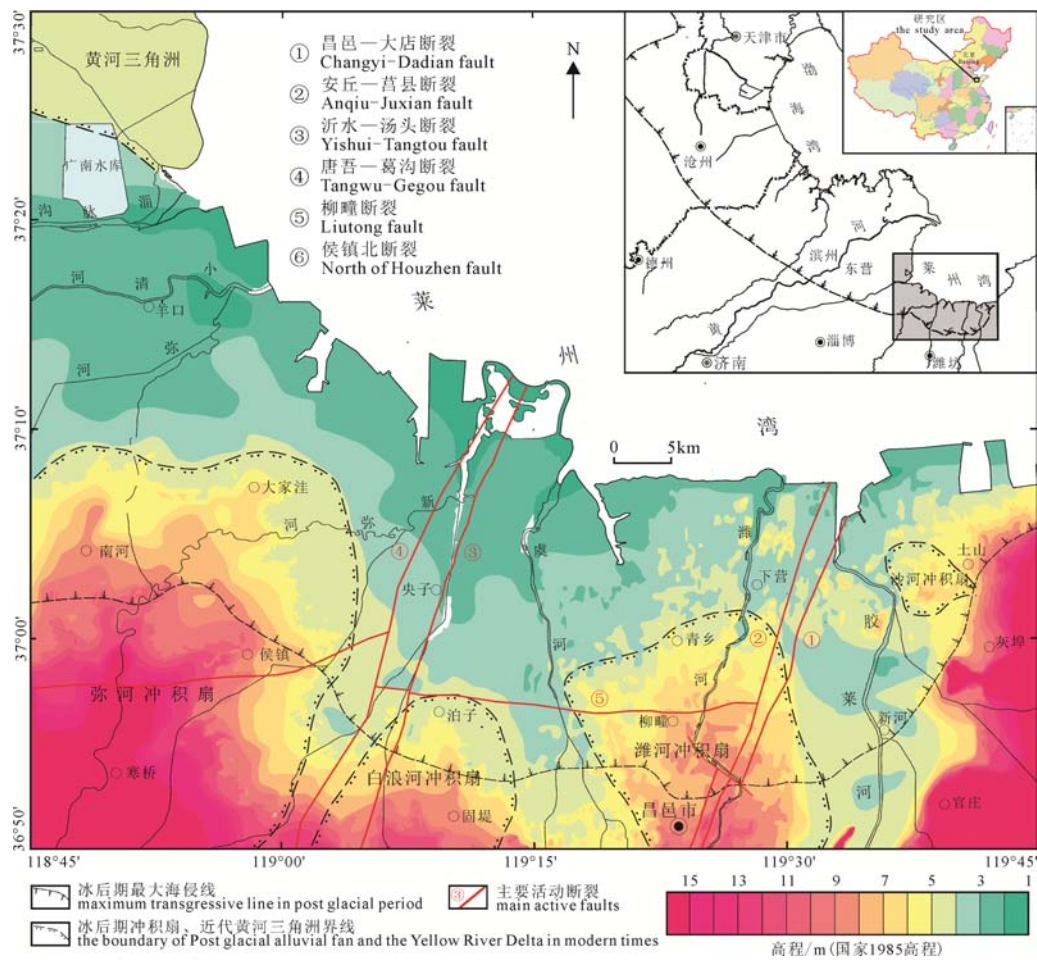


图1 研究区地势及冰后期冲积扇分布图

Fig. 1 Topography and distribution of Holocene alluvial fans in the study area

三角洲主体区和侧翼区两个地层分区(图 2), 主体区位于莱州湾南岸, 北以老弥河为界, 南到冰后期沉积边界, 侧翼区位于莱州湾西岸, 主体区外围。垂向上冰后期三角洲沉积由下而上分为前三角洲、三角洲前缘(潮坪)和三角洲平原三个沉积单元。

(1) 前三角洲沉积单元

沉积厚度 0~13.7 m。由下而上依次为河流相、滨海湖沼相, 岩性主要为黏性土、粉土、粉砂。河流相沉积一般不含或含极少量有孔虫、介形类, 壳体显示出搬运再堆积特征; 滨海湖沼相沉积咸水、半咸水种有孔虫含量变化较大(0~555 枚/(20 g 干样)), 种数 0~16, 介形类含量 0~210 枚/(20 g 干样)。

(2) 三角洲前缘(潮坪)沉积单元

沉积厚度 0~14.7 m。三角洲主体区发育三角洲前缘席状砂体, 厚度 0~12 m, 岩性以粉砂、粉土为主, 仅在昌邑市柳疃东侧潍河古河口附近为中粗砂、砾砂; 潮坪沉积发育于三角洲侧翼区, 岩性为黏性土与粉土、粉砂互层, 纹层发育, 类似于“千层饼”构造。该沉积单元含丰富的微体古生物壳体, 其中咸水、半咸水种有孔虫 12~2672 枚/(20 g 干样), 种数 3~37; 介形类为咸水种和淡水种混杂, 含量

11~1280 枚/(20 g 干样), 种数 2~22。

(3) 三角洲平原沉积单元

沉积厚度 0~8.5 m。三角洲主体区、侧翼区分别发育河流相和近代黄河三角洲沉积, 岩性主要为黏性土、粉土、粉砂。该沉积单元不含或含极少量微体古生物壳体, 其中有孔虫 0~8 枚/(20 g 干样), 介形类 0~8 枚/(20 g 干样)。

3 研究方法

本文利用了近年施工的 249 个工程地质钻孔-静力触探试验孔组的资料, 每个孔组由 1 个工程地质钻孔和 1 个静力触探孔组成, 孔距 2~5 m。工程地质钻孔均为全取芯孔, 部分钻孔开展了生物地层学、年代地层学研究; 静力触探试验孔主要揭露全新世和晚更新世地层, 提供的参数包括双桥探头的锥尖阻力值 q_c (单位 MPa)、侧壁摩阻力值 f_s (单位 kPa)和摩阻比 R_f (以%表示), 其中 q_c 、 f_s 为实测参数, R_f 为计算参数, 计算公式如下:

$$R_f/\% = 0.1(f_s/q_c)$$

静力触探试验参数在岩性划分上具有独特的优势, 可进行岩性剖面分析, 将其应用于沉积相

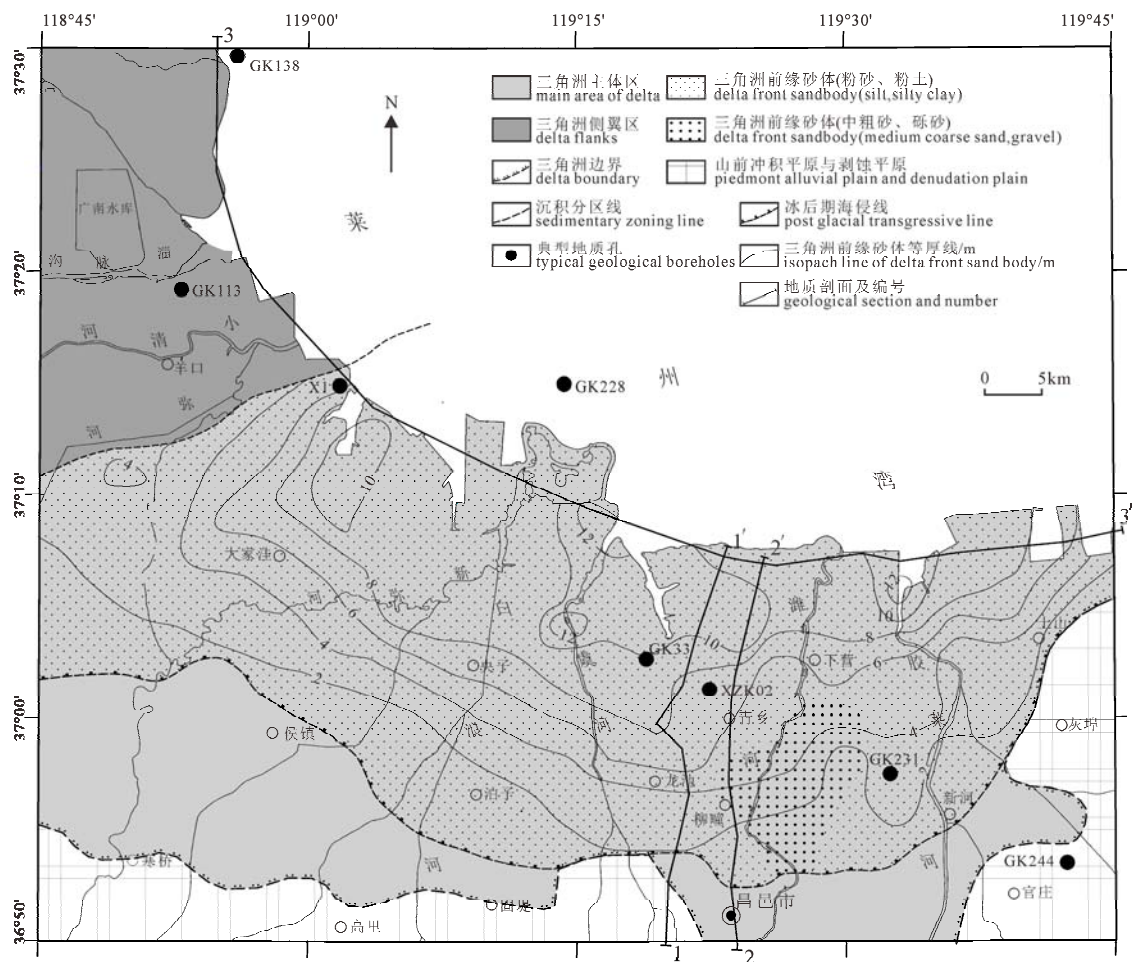


图2 莱州湾沿岸冰后期三角洲沉积分区图

Fig. 2 Zoning map of post glacial delta deposits along the coast of Laizhou Bay

研究的基本依据是岩性特征及其在垂向上的各种组合所构成的不同旋回、韵律特征,而这些特征可以反映同一地区不同时期的古沉积环境,所以在沉积相分析中旋回、韵律分析具有举足轻重的作用(潘懋和徐建红, 1993)。

本文的研究思路是以岩芯编录、微体古生物鉴定、 ^{14}C 测年数据的综合分析为基础,首先建立莱州湾冰后期沉积相的静探参数曲线划分模式,然后通过静探参数曲线形态识别进行细分沉积相的研究,划分冰后期三角洲沉积序列,建立沉积旋回、重要地质界面的空间格架。

本文中 ^{14}C 测年数据引自近年莱州湾地区第四纪地质研究成果(田立柱等, 2016; 徐建国等, 2018, 2019)。

4 研究结果

4.1 岩性识别

研究区工程地质孔-静力触探孔组的岩性、静探参数值的对比分析表明,三个静探参数中, q_c 、 R_f 受岩性影响较明显,而 fs 值则影响不大(图 3)。以中粗砂、砾砂和一般黏性土为例,前者的 q_c 平均值是

后者的 8.7 倍,后者的 R_f 平均值是前者的 6.9 倍,而 fs 平均值前者仅为后者的 1.5 倍(表 1),所以在岩性划分中 q_c 、 R_f 是两个常用参数。

一般情况下, q_c 的增大代表土的粒度变粗,而 R_f 增大则主要反映黏粒含量的增高,总体上砂土一般具有较高的 q_c 值和较低的 R_f 值,而黏性土则相反(图 4)。

研究区软土是具有高含水率、大孔隙比、高压缩性和低强度等特点的特殊性土(杜东菊等, 2012),岩性以黏性土为主,软土的 q_c 值一般小于 0.7 MPa (铁道第四勘察设计院, 2003)。软土与一般黏性土的静探参数值不同,饱和状态下 q_c 、 fs 、 R_f 值均呈现低值,而非饱和带则表现为 q_c 值低而 fs 、 R_f 值相对较高的特点(图 5)。

4.2 沉积相识别

(1) 静探参数曲线基本形态

① 锥尖阻力值曲线形态

q_c 曲线基本形态主要有钟型、漏斗型、箱型、平直型和齿型 5 种。钟型曲线反映粒度自下而上逐渐变细,属正粒序结构、退积型沉积序列,曲线底部往往出现参数值突变,说明沉积过程中水动力能

量由强而弱、水深加大, 物源供给逐渐减少; 漏斗型曲线反映粒度由下而上逐渐变粗, 属逆粒序结构、进积型沉积序列, 曲线顶部往往出现参数值突变, 说明沉积过程中水动力能量由弱而强、水深变浅, 物源供给逐渐增多; 箱型曲线反映粒度由下而上变化不大, 属均质粒序结构、加积型沉积序列, 曲线顶底界均出现参数值突变, 说明沉积过程中水

动力能量稳定、物源补给较丰富; 平直型曲线幅值整体偏低, 曲线平直, 偶尔出现小峰, 反映粒度整体偏细且土质均匀, 属均质粒序结构, 说明沉积过程处于低能量环境且物源供给条件差; 齿型曲线反映粒度由下而上呈韵律性变化, 说明其沉积过程中水动力条件频繁交替变化。

qc 曲线幅度是曲线形态的重要特征之一, 幅度

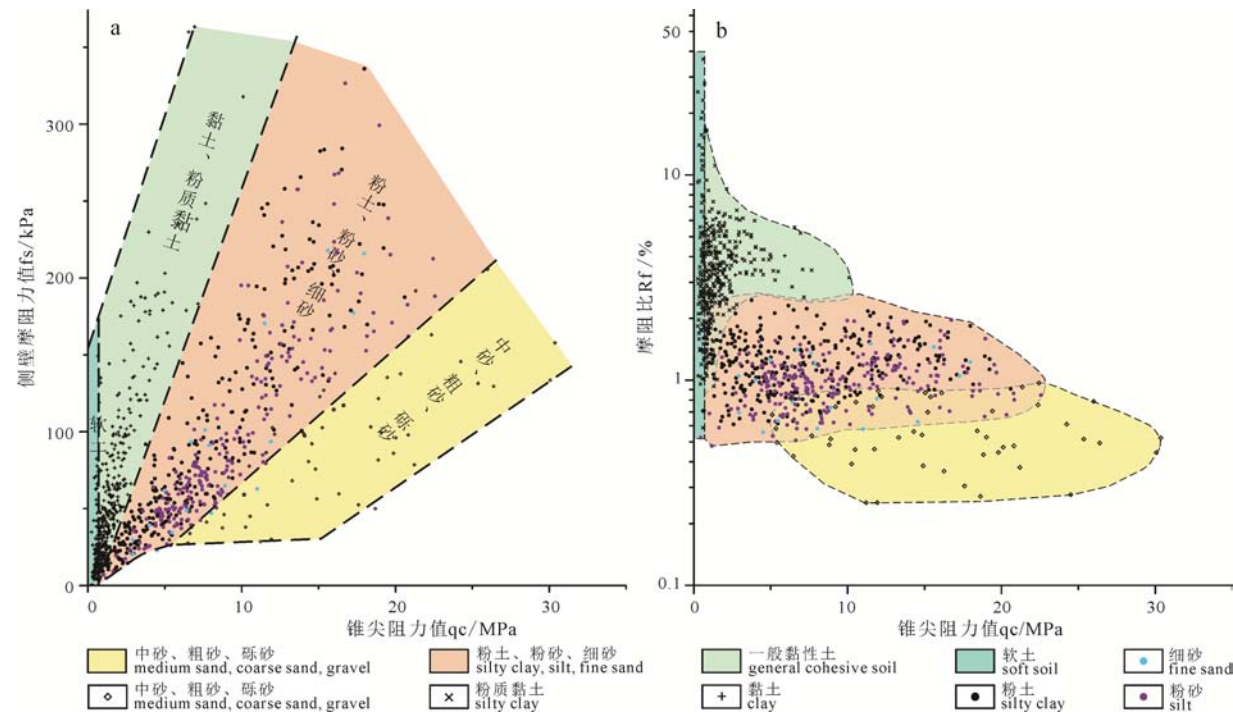


图 3 莱州湾沿岸晚第四纪沉积不同岩性的静探参数分布图
Fig. 3 Distribution of static sounding parameters for different lithologic characteristics of Late Quaternary sediments along Laizhou Bay

表 1 不同岩性静力触探参数值统计表
Table 1 Statistical table of static sounding parameters of different lithologic characteristics

岩性	锥尖阻力值 qc/MPa		侧壁摩阻力值 fs/kPa		摩擦比 Rf/%	
	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值
软土	0.16~0.70	0.52	0.3~180	16	0.1~46.2	3.20
一般黏性土	0.70~7.66	1.92	9~360	73	1.1~16.4	3.73
粉土、粉砂、细砂	0.96~20.83	8.26	7~327	94	0.5~2.5	1.14
中粗砂、砾砂	6.51~30.07	16.74	32~316	112	0.2~0.8	0.54

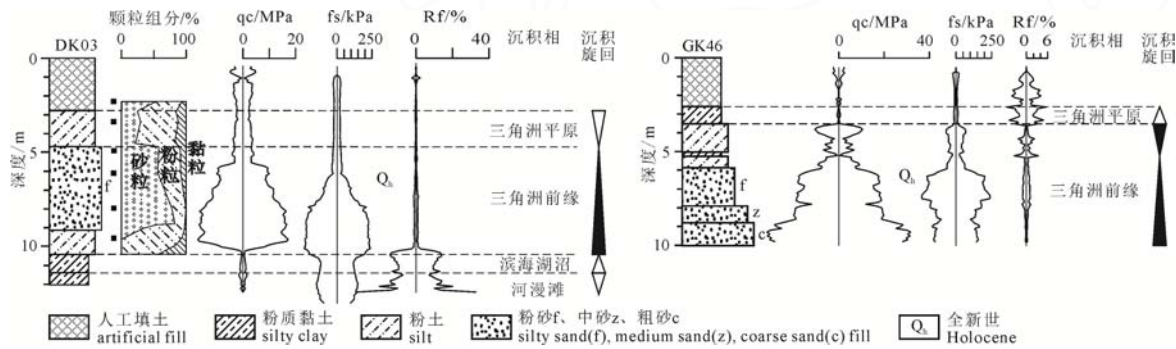


图 4 静探参数随岩性变化的典型钻孔剖面
Fig. 4 Typical borehole profile for variation of static sounding parameters with lithology

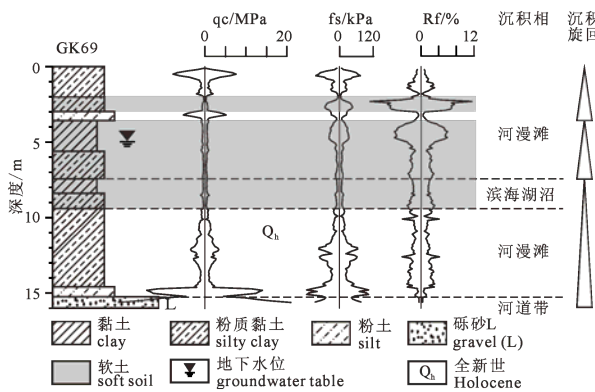


图 5 软土静探参数的典型钻孔剖面
Fig. 5 Typical borehole profile for static parameters of soft soil

的大小可以反映沉积过程中水动力条件的强弱，幅度大说明沉积环境水动力能量强，物源供给充沛，颗粒较粗，黏粒含量低；幅度小说明沉积过程中水动力能量低，物源供给不足，颗粒较细，黏粒含量高。幅度可以采用砂土的 qc 峰值与黏性土基线 qc 值的差值(Δ)表示，根据莱州湾地区统计数据，按差值大小分为低幅($\Delta < 5$ MPa)、中幅($5 < \Delta < 15$)和高幅($\Delta > 15$)。

②摩阻比曲线形态

Rf 曲线基本形态与 qc 曲线相似。钟型曲线反映黏粒含量由下而上逐渐增高，粒度自下而上逐渐变粗；漏斗型曲线反映黏粒含量由下而上逐渐减小，粒度自下而上逐渐变细；箱型曲线为黏性土特征曲线，幅值较高；平直型曲线为均质砂土特征曲线，幅值偏低，曲线平直齿型曲线反映土的粒度呈韵律性变化。

(2)不同沉积相的静探曲线形态特征

岩相分析对于层序地层研究至关重要，因为它构成了古环境重建的基础，有助于识别地层界线和体系域，不同沉积环境具有不同的水动力特征，在沉积物粒度、黏粒含量等方面存在差异。通过静探曲线与钻孔岩芯资料对比分析可以进行沉积相鉴别(表 2)。

①河流相

研究区河流相主要包括河道带、河漫滩和决口扇亚相，末次冰盛期以来河道带岩性涉及粉砂-砾砂各种粒级的砂，一般表现为粒度向上变细，底部多发育冲刷面；中、厚层河道带砂 qc 曲线一般为中、高幅钟型或箱型， Rf 曲线为平直型(图 6a, b)，薄层河道带砂的 qc 曲线、 Rf 曲线常表现为齿型(图 6c)。河漫滩亚相岩性通常为黏性土和粉土，总体上粒度向上变细， qc 曲线常为中、低幅齿化平直型，幅度由下而上渐小， Rf 曲线常为齿化箱型(图 6c, d)。决口扇亚相岩性主要为粉土、黏性土，粒度向上变粗， qc 曲线为中、高幅齿化漏斗型， Rf 曲线为齿化钟型(图 6d)。

②三角洲相

研究区三角洲前缘亚相为大型席状砂体，岩性以粉砂、粉土为主， qc 曲线形态通常为中、高幅钟型、漏斗型和箱型，箱型曲线常与钟型、漏斗型曲线构成组合曲线； Rf 曲线一般为平直型(图 7a, b)。

三角洲平原亚相岩性较复杂， qc 曲线一般呈低、中幅齿型，与其下的三角洲前缘砂体曲线呈突变或渐变性接触； Rf 曲线以齿化钟型、漏斗型常见(图6d, 图7b)。

潮坪亚相沉积较三角洲前缘亚相粒度更细，多为细粒砂土(粉土、粉砂)与黏性土互层沉积，其中砂土形成于大潮期，黏性土则形成于小潮期(李铁松和李从先, 1995)。潮坪沉积 qc 曲线一般为低、中幅齿型，反映出潮汐环境中水动力条件频繁交替变化的特点，根据沉积序列的幅值变化可划分为正粒序齿型、逆粒序齿型，分别对应海进和海退序列(图8a, b)。 Rf 曲线以齿化箱型、齿型常见，说明潮坪沉积黏粒含量较高。

③滨海湖沼相

研究区滨海湖沼相一般由灰色调软黏性土组成， qc 曲线为低幅平直型曲线，局部出现小的齿峰，曲线形态与河漫滩相相似，但幅值较后者稍低； Rf 曲线则为齿化箱型(图8a)。

表 2 不同沉积相静探曲线要素特征表
Table 2 Features of static cone penetration curve of different sedimentary facies

沉积相		主要岩性	粒序结构	锥尖阻力值曲线				摩阻比曲线形态
				幅度	形态	接触关系		
						底部	顶部	
河流相	河道带	粉砂-砾砂	N、H	中-高幅	钟型、箱型、齿型	突变	渐变、突变	平直型、齿型
	河漫滩	黏性土、粉土	N	低-中幅	齿化平直型	渐变、突变	渐变、突变	齿化箱型
	决口扇	粉土、黏性土	A	中-高幅	齿化漏斗型	渐变	突变	齿化钟型
三角洲相	三角洲前缘	粉砂、粉土	N、A、H	中-高幅	钟型、箱型、漏斗型	突变	渐变、突变	平直型
	潮坪	黏性土、粉土、粉砂	N、A	低-中幅	齿型	渐变、突变	渐变、突变	齿化箱型、齿型
	三角洲平原	黏性土、粉土、粉砂	N	低-中幅	齿型	渐变、突变		齿化钟型、漏斗型
滨海湖沼相		黏性土	N、H	低幅	平直型	渐变、突变	突变	齿化箱型

注：粒序结构代码：N—正粒序；A—逆粒序；H—均质粒序。

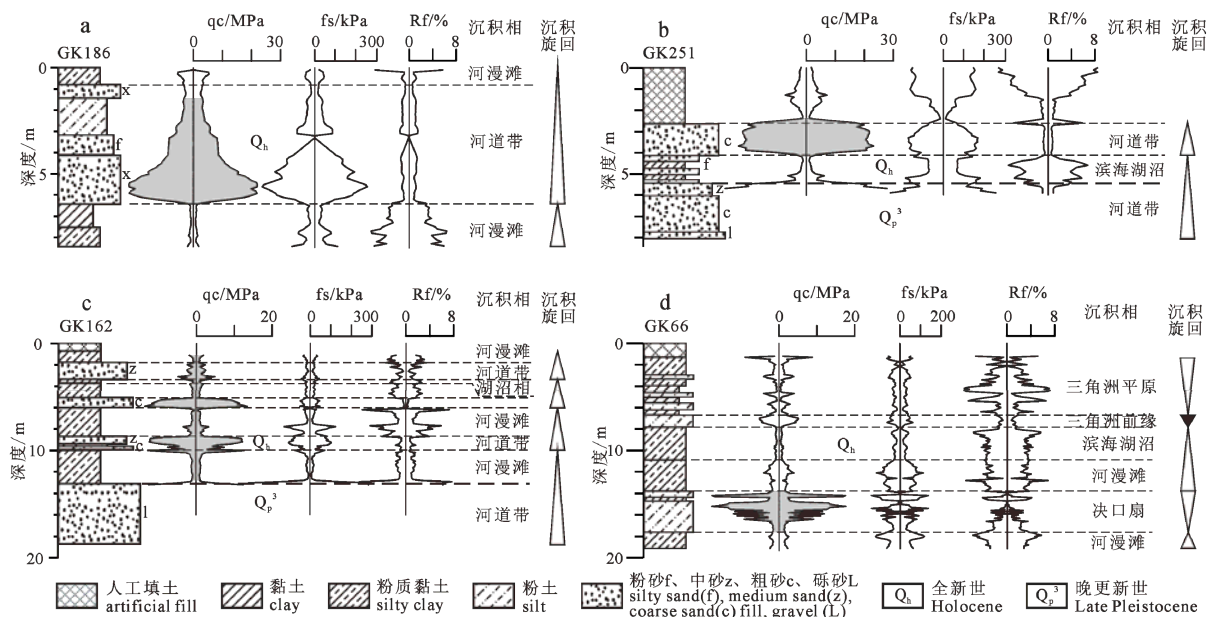


图 6 河流相沉积静探曲线典型钻孔剖面

Fig. 6 Typical borehole profile for static sounding curve of fluvial facies deposit

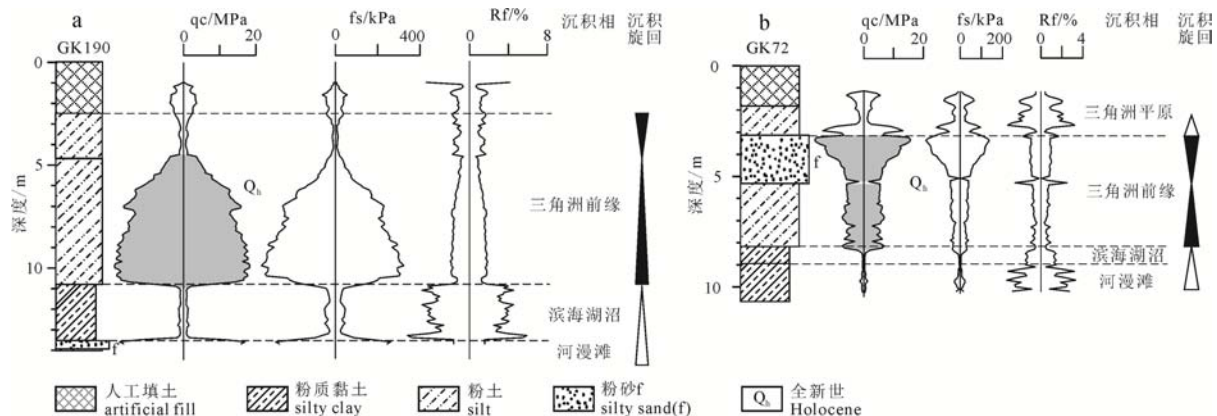


图 7 三角洲前缘亚相静探曲线典型钻孔剖面

Fig. 7 Typical borehole profile for static sounding curve of delta front subfacies

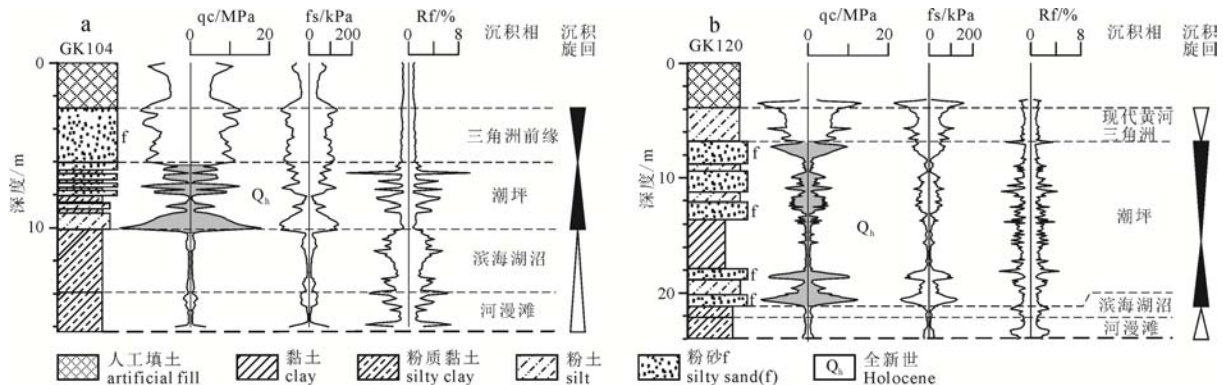


图 8 潮坪亚相静探曲线典型钻孔剖面

Fig. 8 Typical borehole profile for static sounding curve of tidal flat subfacies

4.3 层序界面识别

层序界面识别是层序地层学研究的重要内容之一,也是建立层序格架的难点,在界面识别中单纯依据某一方面的资料或某一地段的资料都不是合理有效的方法,本文采用钻孔岩芯与静探试验资料相结合的方法判别层序界面。

(1)层序底界面(SB)

末次冰盛期(MIS2)全球气温降低,海水退出渤海,海平面下降约130 m,整个渤海陆架变为陆地(李培英等, 2008),其间莱州湾地区古地貌类型为向渤海盆地缓倾的泛滥平原地貌,地形坡度变化小,第Ⅱ海侵层(MIS3a)砂体地表裸露,受末次冰盛期古风暴的强烈吹蚀,第Ⅱ海侵层砂体上部大部被侵蚀,形成沉积间断面,该间断面为末次冰盛期的泛滥平原面,在空间上具有可追索性,总体上由南往北埋深逐渐增大,构成冰后期三角洲的层序底界面,该界面在钻孔岩芯和静探参数曲线上均有所体现。

在钻孔岩芯上,第Ⅱ海侵层的三角洲前缘砂普遍呈氧化色,显示曾出露或接近地表;顶部常见针状大孔隙、钙质结核及网纹状铁质锈染,应为古土壤层,可作为末次冰盛期沉积间断面的判断标志。以GK231孔为例,该界面以上为还原色且含腐植质的粉质黏土, ^{14}C 年龄(5390 ± 30) a B.P.,界面以下为氧化色且含海相贝壳碎片的粉砂, ^{14}C 年龄($40\,930 \pm 620$) a B.P.,说明在第Ⅱ海侵层与全新世中

期滨海湖沼相沉积间存在沉积间断(图9)。

在静力触探参数方面,由于层序底界面上、下出现沉积环境突变,岩性变化使得静探曲线形态、参数值大小出现突变。界面以上滨海湖沼、河漫滩相沉积,岩性以黏性土为主,qc曲线一般为低幅平直型形态,Rf曲线一般为齿化箱型或齿化钟型形态;界面以下第Ⅱ海侵层三角洲前缘相砂体 qc曲线一般为中、高幅钟型或箱型形态,Rf曲线一般为低幅平直型形态,显示为海进型三角洲前缘砂,上覆的海退型三角洲砂体在沉积间断期被侵蚀。

(2)初始海泛面(FFS)

距今 8.0 ka 开始,海水抵达莱州湾现今海岸线位置并向陆地持续推进,首先在高潮位附近形成滨海湖沼相沉积,其后很快被三角洲前缘相或潮坪相砂层覆盖(徐建国等, 2018),在海侵砂与滨海湖沼相沉积间存在海侵冲刷面,该界面即为初始海泛面,是低水位体系域和海侵体系域的分界面。初始海泛面在钻孔岩芯上特征明显,界面以下为滨海湖沼相暗色调黏性土沉积,常见淡水螺壳和植物腐根;界面以上为含海相贝壳的三角洲前缘或潮坪沉积,界面处可见圆砾、姜石状砾石及牡蛎壳碎片。

初始海泛面在静探参数上往往表现为曲线形态的改变和参数值大小的突变。界面以下以黏性土为主的滨海湖沼相、泛滥平原相沉积的 qc曲线形态通常为低幅平直型,Rf曲线形态一般为齿化箱型或齿

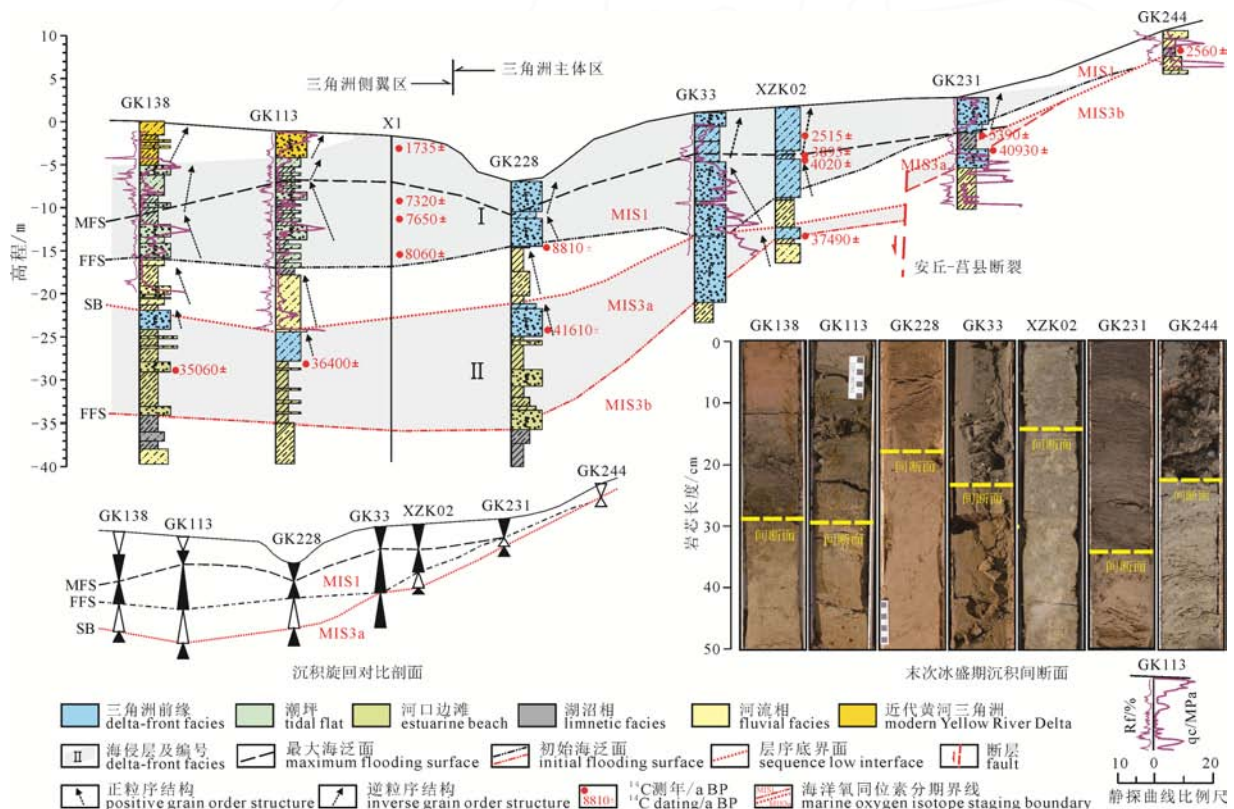


图9 莱州湾沿岸冰后期三角洲层序界面典型钻孔对比剖面

Fig. 9 Typical borehole correlation profile of delta sequence boundary along Laizhou Bay in post glacial period

化钟型。界面以上三角洲前缘砂性土沉积的 qc 曲线形态一般为中、高幅钟型、箱型, Rf 曲线形态一般平直型; 界面以上潮坪沉积的 qc 曲线形态一般为中、低幅齿型, Rf 曲线形态一般为齿型。

初始海泛面具有穿时性。图 10 是利用近年莱州湾地区全新统 ^{14}C 测年数据绘制的冰后期三角洲主体区沉积物年龄与高程关系图, 显示在滨海湖沼和三角洲前缘沉积间存在分界线(初始海泛面), 其形成时间为距今 8.0 ~ 5.0 ka, 由老到新高程由 -16 m 增加到 4 m, 反映出随着海岸线向陆地推进, 滨海湖沼沉积环境不断向陆地方向迁移, 初始海泛面标高也随之增加。

(3)最大海泛面(MFS)

距今 6.0~4.0 ka 为冰后期海平面高位稳定期(王强等, 1986), 是整个海侵过程中水深最大、沉积速率最低、沉积物颗粒最细的阶段, 该沉积层厚度不大, 其中部即为最大海泛面, 是分隔海侵体系域和高水位体系域的物理界面。

最大海泛面在钻孔岩芯上较细的粒级和较高的黏粒含量, 虽然在三角洲前缘砂体中界面附近有时会出现海相贝壳碎片富集层, 但多数情况下仅通过钻孔岩芯确定界面位置难度较大, 而配合静探参数曲线则可以显著提高最大海泛面识别的准确性。

随着冰后期海岸线的进退, 水深经历了“浅—深—浅”的变化过程, 沉积物粒度相应地发生了“粗—细—粗”的变化, 最大海泛面是正粒序结构向逆粒序结构转换的分界面, 在静探参数曲线上特征明显。qc 曲线自下而上由钟型(或齿化钟型)、箱型(或齿化箱型)向漏斗型(或齿化漏斗型)转换, 转换界面附近表现为较低的 qc 值和较高的 Rf 值(图 7, 图 8), 该界面即为最大海泛面。

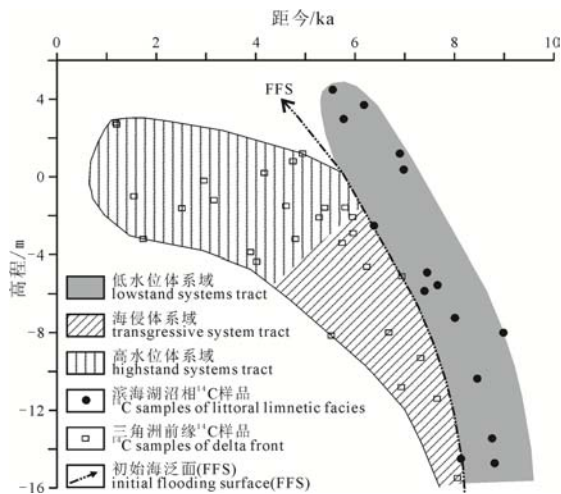


图 10 莱州湾沿岸冰后期三角洲主体区沉积年龄-高程关系图

Fig. 10 Relationship between sedimentary age and elevation in the main area of Laizhou Bay coastal delta in post glacial period

4.4 体系域的确定

(1)低水位体系域(LST)

末次冰盛期至冰后期早期(距今 23 ~ 8 ka), 是海平面持续低位—快速上升阶段, 其间海水尚未抵达莱州湾现代海岸线位置, 研究区处于陆相沉积环境, 该阶段的河流相、湖沼相沉积构成冰后期三角洲低水位体系域, 上、下界面分别为初始海泛面和冰后期三角洲层序底界面。

低水位体系域沉积物组成及厚度随古地形起伏而变化, 研究区东部的鲁东隆起区, 由于古地形较高, 沉积物可容空间较小, 以侵蚀或过路沉积为主, 一般仅保留薄层滨海湖沼相沉积或沉积物完全缺失(图 11); 西部的济阳拗陷区由于古地形保持在相对较低位, 沉积物可容空间相对较大, 沉积厚度相对较大, 一般在 2~14 m。

在静探参数上, 低水位体系域静探曲线形态符合河漫滩相、湖沼相沉积特征, qc 值普遍较低, 范围值 0.31~3.73 MPa, 平均值 1.11 MPa(表 3), 其中河漫滩相沉积中的粉土、粉砂夹层常表现为 qc 值的小峰; Rf 值离散性较大, 范围值 0.93%~11.1%, 平均值 3.14%, 其大小与黏性土含水率有关, 软土的 Rf 值偏低。

(2)海侵体系域(TST)

冰后期中期(距今 8~6 ka)为全球海平面低速上升阶段, 莱州湾沿岸海陆过渡相沉积的形成标志着该区进入海水淹没阶段。随着海岸线逐步向陆地迁移, 滨海湖沼相沉积和三角洲前缘、潮坪沉积也同步向陆地推进, 形成向陆域退积的海侵体系域。

从海陆过渡相沉积的空间分布看, 其沉积标高由 -16 m 左右快速升至 -4 m 左右, 反映出河流入海沉积物的分布随海岸线向陆地方向推移而变化(图 10); 从垂向粒序变化看, 该体系域无论是三角洲前缘还是潮坪沉积, 总体上都表现出向上细化的正粒序结构, 顶部沉积物以颗粒偏细、富含有机质、海相贝壳含量较高为特征。

在静探参数上, 静探曲线形态随沉积部位的不同而变化。三角洲主体区的三角洲前缘相 qc 曲线形态通常为中、高幅的钟型、箱型或齿化钟型、箱型, qc 值一般较高, 范围值 1.83~18.58 MPa, 平均值 8.61 MPa, 呈向上减小趋势; Rf 曲线形态一般为低幅平直型, Rf 值普遍较低(0.47%~2.62%)。三角洲侧翼区的潮坪相 qc 曲线形态一般为由下而上由中幅向低幅转化的齿型, qc 值一般较低, 范围值 0.8~7.55 MPa, 平均值 3.81 MPa, 总体上呈向上减小趋势; Rf 值亦总体较低(1.01%~2.07%), 曲线形态一般为齿型。

(3)高水位体系域(HST)

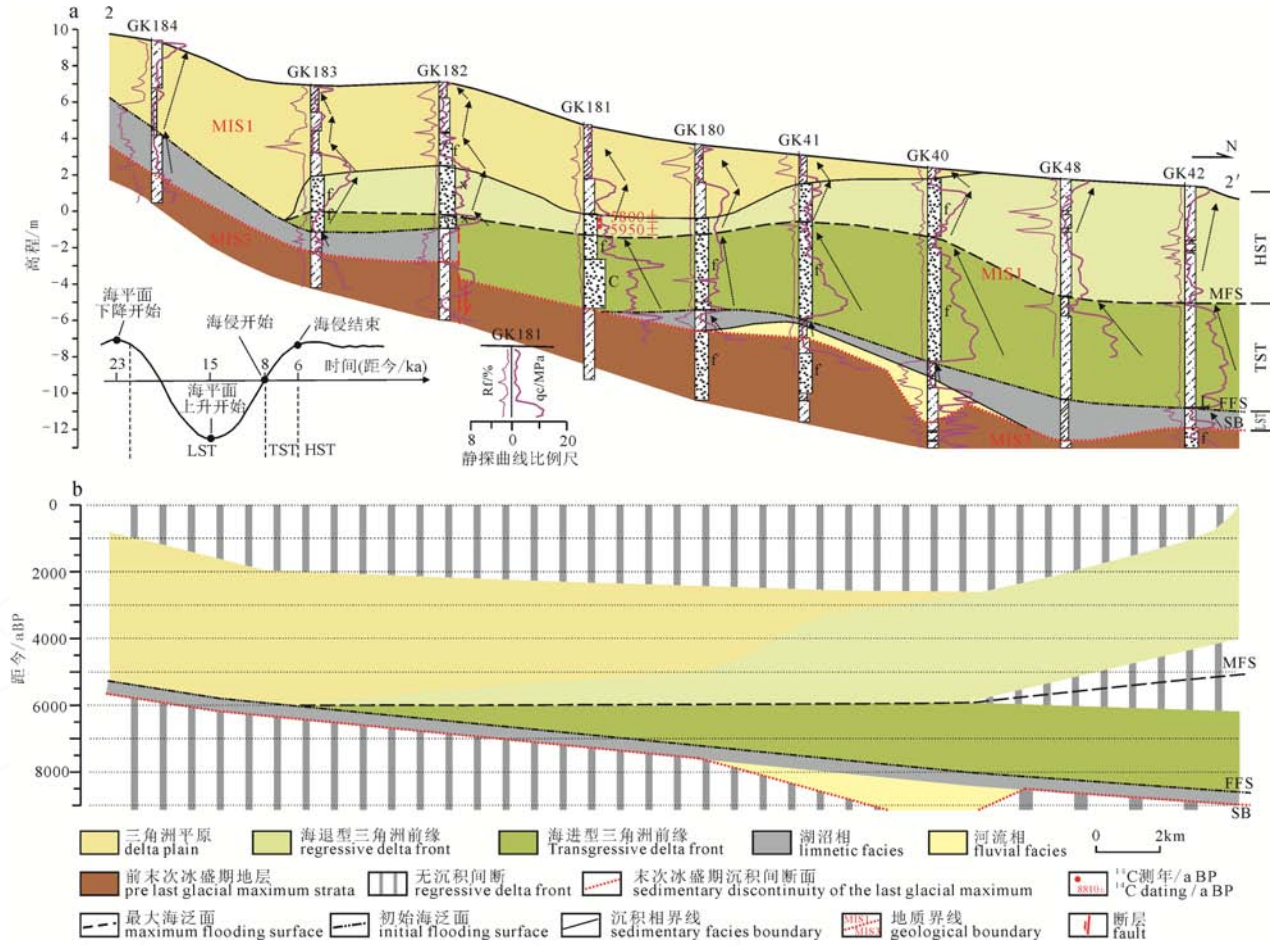
冰后期晚期(距今 6 ka 后)为全球海平面高位稳

定一小幅下降阶段。距今 6.0~4.0 ka 海平面保持在 3.0 m 左右的高位,为海平面高位稳定期;距今 4.0 ka 后海平面小幅下降并波动于现代海平面上下(韩有松和孟广兰, 1984),为海平面小幅下降期。从高位稳定期开始河流进积作用逐渐增强,形成向海域进积的高水位体系域,该体系域主要发育三角洲前缘、潮坪和三角洲平原三个沉积亚相。

从高水位体系域沉积物的空间分布看,海陆过渡相沉积标高均在-4 m 以上,平均标高在 0 m 上下,相较于海侵体系域标高变化不大,说明该体系域沉

积体在整体三角洲区大致水平展布(图 10)。从沉积物垂向粒序变化看,整体表现出向上粗化的逆粒序结构,说明沉积过程中水深逐渐变浅。

在静探参数上,静探曲线形态随沉积相的不同而变化。三角洲主体区的三角洲前缘相 qc 曲线形态一般为中、高幅漏斗型或齿化漏斗型, qc 值一般较高,范围值 1.19~15.27 MPa, 平均值 6.40 MPa, 呈向上增大趋势; Rf 曲线形态一般为低幅平直型, Rf 值普遍较低(0.56%~3.02%)。三角洲侧翼区的潮坪相 qc 曲线形态一般为中、低幅齿型, qc 值范围值 1.26~4.68 MPa,



a—冰后期沉积体系结构剖面; b—冰后期年代地层剖面。
a—structural section of sedimentary system of Post Glacial Period; b—chronostratigraphic section of Post Glacial Period.

图 11 莱州湾沿岸冰后期三角洲主体区沉积层序及年代地层剖面(2-2')
Fig. 11 Sedimentary sequence and chronostratigraphic section (2-2') in the main area of Laizhou Bay coastal delta in post glacial period

表 3 冰后期三角洲沉积层静力触探参数值统计表
Table 3 Statistics of static sounding parameters of delta deposits in post glacial period

层序划分	层序界面	体系域	沉积相	qc/MPa		Rf/%	
				范围值	平均值	范围值	平均值
冰后期三角洲层序	—最大海泛面—	高水位体系域	三角洲平原相	0.50~6.76	2.47	0.84~5.11	2.69
			三角洲前缘相	1.19~15.27	6.40	0.56~3.02	1.05
			潮坪相	1.26~4.68	2.82	1.15~1.95	1.46
	—初始海泛面—	海侵体系域	三角洲前缘相	1.83~18.58	8.61	0.47~2.62	1.19
			潮坪相	0.80~7.55	3.81	1.01~2.07	1.47
MIS3a阶段三角洲层序	—层序底界面—	低水位体系域	湖沼相、河漫滩相	0.31~3.73	1.11	0.93~11.1	3.14
		海侵体系域	三角洲前缘相	5.01~22.57	12.39	0.54~2.45	1.26

平均值 2.82 MPa, 总体上呈向上增大趋势; Rf 曲线形态一般为低幅齿型, Rf 范围值 1.15%~1.95%。

高水位体系域上部的三角洲平原相 qc 值一般较下伏的三角洲前缘相低, 其范围值 0.50 ~ 6.76 MPa, 平均值 2.47 MPa, 由于黏粒含量较高, 其 Rf 值较三角洲前缘相高, 范围值 0.84%~5.11%。

5 讨论

5.1 冰后期海侵的沉积层序

尽管莱州湾海岸线弯曲度较小且没有向海突出的形态, 三角洲形态不明显, 但近年来大量的钻孔岩芯和微体古生物资料均表明, 区内晚更新世以来历次海侵中均发育河流三角洲, 其中冰后期沉积为一套完整的海侵序列, 主要由海水自浅到深的海进序列和由深到浅的海退序列组成。由于沉积物粒序具有记录沉积环境中水动力条件、水体深度、沉积物物源供给能力变化的能力, 莱州湾沿岸冰后期滨海沉积物粒序所呈现出的“粗—细—粗”的变化规律正是海平面变化的物理表现(图 12)。

鉴于静探试验参数值对沉积物粒度敏感性高, 研究区静探参数数据在冰后期沉积物粒序变化规律的分析中具有钻孔岩芯无法替代的优势。以莱州湾南岸三角洲前缘砂体为例, 该砂体岩性主要为粉砂、粉土, 由下而上沉积物粒度变化不大, 岩芯编录中对岩性变化的识别难度大, 而在较多的钻孔中开展颗粒分析的密集采样又面临成本过高的问题, 利用静探参数数据进行沉积层序分析成效明显。三角洲前缘砂体 qc 曲线多为漏斗型、钟型曲线的组合型即“哑铃型”曲线, 下部的钟型曲线表现为向上变细的正粒序结构, 为海进型三角洲前缘砂体(海侵体系域), 上部的漏斗型曲线则表现为向上变粗的逆粒序结构, 为海退型三角洲前缘砂体(高水位体系域), 漏斗型与钟型曲线的交接部位即为最大海泛面(MFS)(图 13)。

与三角洲主体区的前缘相砂体不同, 三角洲侧翼区潮坪相砂泥互层沉积的 qc 曲线为一般为齿型, 但 qc 参数的垂向变化规律与三角洲主体区是同步的(图 14), 即下部为参数值向上减小的齿型曲线, 为海进型潮坪沉积(海侵体系域), 上部为参数值向上增大的齿型曲线, 为海退型潮坪沉积(高水位体系域), 二者的交接部位即为最大海泛面。

由此可见, 静探参数数据很好地记录了莱州湾冰后期海侵沉积的粒序变化规律, 该地层存在“海进—海退”的完整沉积旋回, 但在冰后期三角洲的边缘地带, 如图 14 中的静探孔 J200、J223, 由于海侵影响滞后, 海侵层下部的海进型沉积缺失, qc 参数曲线仅保留漏斗型或似漏斗齿型曲线段。

5.2 冰后期海侵最大古水深估算

(1) 估算方法

古水深确定是沉积学分析中的难点问题, 目前古水深研究应用较多的是以遗迹化石、微体古生物化石为代表的古生物学方法, 即主要依据遗迹化石、有孔虫、介形类与水深的对应关系, 而这一方法存在很大的不确定性, 因为对于某些生物而言, 其生存的水深空间也可以变化很大(Ekdale, 1988), 因此该方法估算精度偏低。

由于最大海泛面是三角洲沉积层序的关键地质界面, 也是通过静探参数曲线和钻孔岩芯比较容易识别的物理界面, 该界面具有近等时性, 形成于海侵高海面期, 大体相当于高海面期海底地形面, 最大海泛面在空间形态上随沉积部位的不同而起伏变化。以沿现海岸线静探孔参数曲线编制的层序结构剖面为例(图 14), 高海面期三角洲轴部海底地形最高, 而三角洲侧翼区海底地形相对偏低。

海侵期间高海面期水深即为最大古水深, 可以利用不同地段最大海泛面资料估算最大古水深。在估算最大古水深时除了要考虑最大海泛面标高和形成时间外, 还需评估高海面期以来地壳沉降速率, 可采用以下公式估算:

$$S = H - M - v \cdot A$$

式中: S—最大古水深(m);

H—高海面期海平面标高(m);

M—最大海泛面标高(m);

v—冰后期地壳沉降速率(m/ka);

A—最大海泛面形成年龄(ka)。

距今 6.0~4.0 ka 为海平面高位稳定期(施雅风等, 1992), 也是莱州湾冰后期三角洲最大海泛面形成期, 不同沉积部位最大海泛面形成时间略有变化, 总体上由陆向海方向形成时间呈由老渐新的

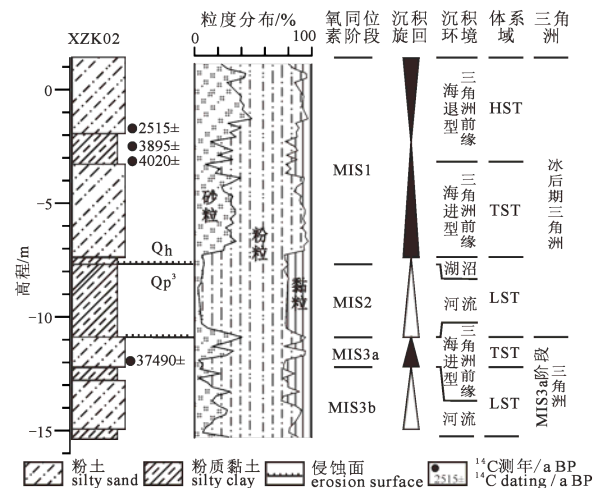


图 12 莱州湾沿岸三角洲典型钻孔粒序结构剖面
Fig. 12 Grain size structure profile of typical boreholes in the coastal delta of Laizhou Bay

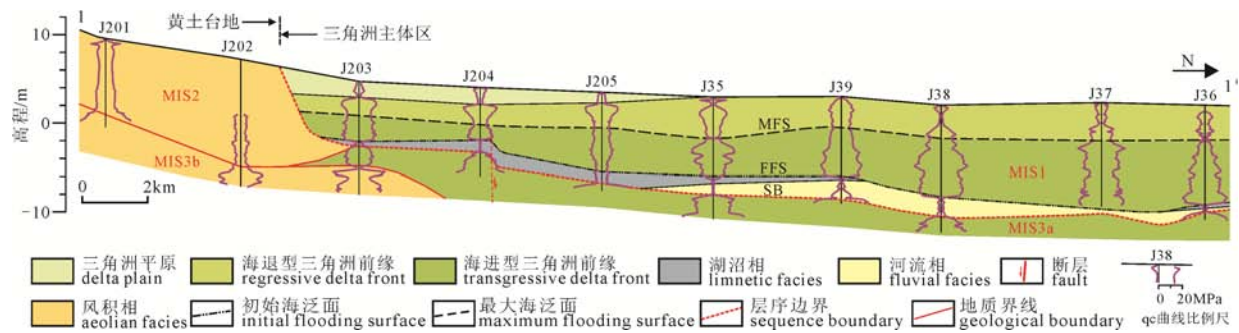


图 13 莱州湾南岸晚第四纪地质剖面(1-1')

Fig. 13 Late Quaternary geological section (1-1') on the south bank of Laizhou Bay

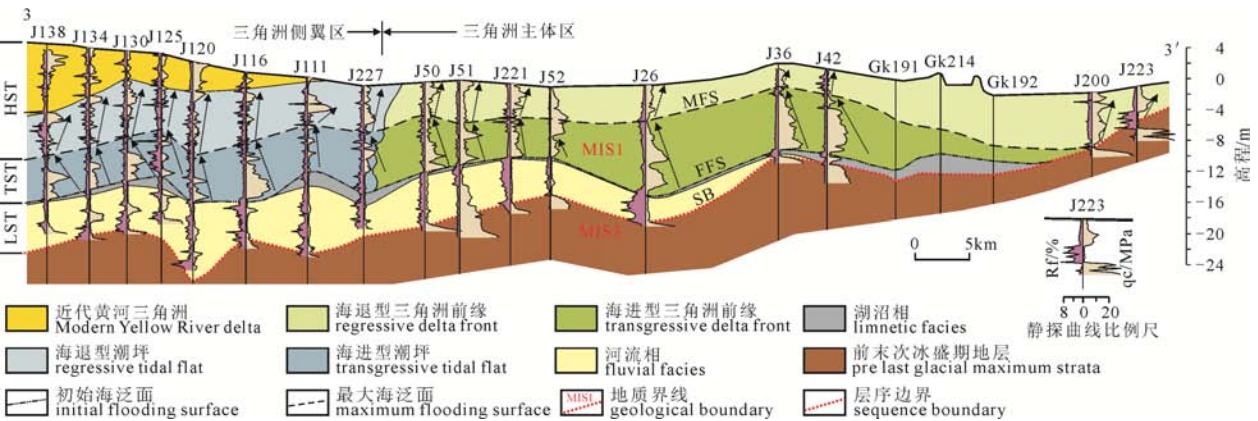


图 14 莱州湾海岸线层序地层结构剖面(3-3')

Fig. 14 Sequence stratigraphic structure profile (3-3') of Laizhou Bay

表 4 典型钻孔冰后期海侵最大古水深估算表

Table 4 Estimation table for maximum paleodepth of post glacial transgression in typical boreholes

钻孔编号	静探孔 编号	经度	纬度	地面 高程/m	最大海泛面 标高/m	最大海泛面 形成年龄/ka	地壳沉降速率 /(m/ka)	高海面期 古水深/m
GK138	J138	118°54'52"	37°29'47"	4.58	-9.92	4.0	1.65	6.3
GK113	J113	118°52'04"	37°19'17"	1.92	-9.07	4.5	1.42	5.7
GK222	J222	119°14'11"	37°12'08"	3.84	-7.16	4.0	1.20	5.4
GK231	J231	119°32'14"	36°58'21"	2.85	-1.25	5.4	0.20	3.2
XZK02		119°22'05"	37°01'57"	1.70	-2.01	4.0	0.70	2.2
GK181	J181	119°23'29"	36°57'10"	5.37	-2.62	6.0	0.60	2.0
GK63	J63	118°52'51"	37°04'45"	6.63	0.18	5.9	0.30	1.1
GK209	J209	119°26'28"	36°52'51"	8.69	2.44	6.0	0.08	0.1

趋势(图 11); 对于不同部位最大海泛面形成时间可以充分利用研究区冰后期沉积物测年资料, 结合钻孔地质剖面综合标定。关于冰后期地壳沉降速率, 在莱州湾地区通过对滨海湖沼相沉积的空间分布和年龄测试资料的对比分析, 可以对冰后期地壳沉降速度进行估算(徐建国等, 2018)。关于冰后期最大海平面标高, 1980 年代以来有关学者通过在我国东部不同地区的研究工作都给出了高出现代海平面 3 m 左右的相似结论(王靖泰和汪品先, 1980; 韩有松等, 1992; 赵希涛和王绍鸿, 1992; 李广雪等, 2014; 田立柱等, 2016), 本次估算取 3 m。

(2)估算结果

选取 8 个代表性工程地质孔-静探孔孔组采用上式进行最大古水深估算, 结果表明研究区冰后期高海面期古水深在 0.1~6.3 m, 由陆地向海岸线方向古水深加大, 最大古水深最高值出现在研究区西北的滨岸钻孔 GK138 孔(表 4)。GK209 孔位于全新世最大海侵线附近, 计算结果为该位置高海面期古水深为 0.1 m, 由于最大海侵线是 0 m 古水深线, 说明计算结果与全新世古地理研究成果相符, 本估算方法可靠。

由此可以判定, 冰后期海侵过程中莱州湾沿岸

最大古水深不超过 10 m, 较前人估计的 10~20 m 浅(郑守仪等, 1978; 王绍鸿, 1979), 说明海侵区沉积环境始终为潮坪环境, 与目前莱州湾海域沉积环境相似, 因为现状莱州湾海域水深大部分小于 10 m(中国海湾志编纂委员会, 1991)。

6 结论

(1)莱州湾冰后期三角洲是多条河流共同塑造的集群三角洲, 形成于 8500 a B.P.以来的海侵过程, 大致以老弥河为界分为三角洲主体区和侧翼区两个沉积分区, 二者沉积物岩性差异明显。冰后期三角洲堆积体厚度 2.0~29.0 m, 垂向上分为前三角洲、三角洲前缘(潮坪)、三角洲平原三个沉积单元。

(2)综合研究莱州湾沿岸钻孔岩芯、微体古生物资料与静力触探试验数据, 建立了冰后期三角洲地区河道带、河漫滩、决口扇、三角洲前缘、潮坪、三角洲平原和滨海湖沼相的静探曲线沉积相识别模式, 并将静探参数数据分析应用于冰后期三角洲沉积层序划分, 建立了三角洲层序地层空间格架, 取得了理想的效果。

(3)莱州湾沿岸冰后期海侵开始于距今 8.5 ka, 其后海平面继续上升, 沿海低平原逐渐为海水淹没, 在距今 5 ka 左右海平面达高位稳定期, 其间海侵区水深不足 10 m, 属于潮坪环境。

(4)静力触探试验用于编制岩性剖面是应用已久的传统方法, 相较于地质钻探, 静力触探参数对岩性的灵敏度较高, 施工快速高效、费用低廉, 并且常有大量试验数据可供收集利用, 应用于海岸带地区晚第四纪地质研究具有良好的前景。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. 1212011220001 and 12120114033801).

参考文献:

- 杜东菊, 杨爱武, 赵建军, 张建新, 刘举, 赵瑞斌. 2012. 天津滨海软土[M]. 北京: 科学出版社.
- 郭飞, 高茂生, 侯国华, 孔祥淮, 赵金明, 郑懿珉, 赵广明. 2016. 莱州湾 07 钻孔沉积物晚更新世以来的元素地球化学特征[J]. 海洋学报, 38(3): 145-155.
- 韩有松, 孟广兰. 1984. 胶州湾地区全新世海侵及其海平面变化[J]. 科学通报, (20): 1255-1258.
- 韩有松, 孟广兰, 王少青, 庄振业, 许卫东, 徐家声. 1992. 华北沿海中全新世高温期与高海面[C]//施雅风, 孔昭宸. 中国全新世大暖期气候与环境. 北京: 海洋出版社.
- 姜兴钰, 易亮, 田立柱, 施佩歆, 陈永胜, 王宏, 王福, 李建芬, 商志文. 2016. 莱州湾南岸 HLL01 孔磁性地层定年[J]. 地质通报, 35(10): 1669-1678.
- 李广雪, 刘勇, 史经昊, 董贺平, 马妍妍, 李品, 栾光忠. 2014. 胶州湾地质与环境[M]. 北京: 海洋出版社.
- 李守军, 崔肖辉, 徐华, 张卓, 赵秀丽, 高宗军, 刘强, 刘晓. 2017. 渤海莱州湾晚第四纪底栖有孔虫分布特征及古环境

意义[J]. 地质学报, 91(2): 287-301.

- 李铁松, 李从先. 1995. 潮坪沉积韵律与沉积间断[J]. 同济大学学报, 23(1): 53-58.
- 李培英, 徐兴永, 赵松龄. 2008. 海岸带黄土与古冰川遗迹[M]. 北京: 海洋出版社.
- 林春明. 1995. 静力触探技术在钱塘江口全新统超浅层天然气勘探中的应用[J]. 南方油气地质, 1(4): 38-45.
- 林防, 王建中, 李建芬, 裴艳东, 康慧. 2005. 渤海莱州湾第四纪晚期以来微体化石组合特征和沉积环境演化[J]. 地质通报, 24(9): 879-884.
- 潘懋, 徐建红. 1993. 埋藏第四系的沉积相研究——地球物理测井解释在第四纪沉积研究中的应用[J]. 第四纪研究, (3): 240-249.
- 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 唐领余, 王富葆, 姚檀栋, 赵希涛, 张丕远, 施少华. 1992. 中国全新世大暖期与环境的基本特征[C]//中国全新世大暖期气候与环境. 北京: 海洋出版社.
- 田立柱, 陶有兵, 姜兴钰, 陈永胜, 施佩歆, 商志文, 李建芬, 王福, 王宏. 2016. 莱州湾南岸全新世相对海平面变化重建[J]. 地质通报, 35(10): 1679-1691.
- 徐建国, 徐华, 张涛, 张卓, 祁晓凡, 纪汶龙. 2018. 山东半岛莱州湾滨海地区黑土湖组地层特征、时代及指示的全新世海岸带变化[J]. 地球学报, 39(2): 133-143.
- 徐建国, 徐华, 张涛, 朱恒华, 侯建华, 卫政润, 刘中业, 张卓. 2019. 山东半岛莱州湾滨海地区第四纪地质与工程地质[M]. 北京: 地质出版社.
- 薛春汀, 丁东. 2008. 渤海莱州湾南岸潍河-弥河三角洲: 沉积序列和沉积格架[J]. 地理科学, 28(5): 672-676.
- 王靖泰, 汪品先. 1980. 中国东部晚更新世以来海面升降与气候变化的关系[J]. 地理学报, 35(4): 299-312.
- 王强, 李凤林, 李玉德, 高秀林. 1986. 十五万年来渤海西、南岸平原海岸线变迁[C]//国际地质对比计划第 200 号项目中国工作组. 中国海平面变化. 北京: 海洋出版社.
- 王绍鸿. 1979. 莱州湾西岸晚第四纪海相地层及其沉积环境的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 10(1): 9-23.
- 赵松龄. 1986. 近百年来中国东部沿海地区海面变化研究状况[C]//国际地质对比计划第 200 号项目中国工作组. 中国海平面变化. 北京: 海洋出版社.
- 赵希涛, 王绍鸿. 1992. 中国全新世海面变化及其与气候变迁和海岸演化的关系[C]//施雅风, 孔昭宸. 中国全新世大暖期气候与环境. 北京: 海洋出版社.
- 郑守仪, 郑执中, 王喜堂, 傅钊先. 1978. 山东省打渔张灌区第四纪有孔虫及其沉积环境的初步探讨, 海洋科学集刊, 第 13 集[M]. 北京: 科学出版社.
- 庄振业, 李建华. 1986. 莱州湾东南岸的全新世海侵[C]//国际地质对比计划第 200 号项目中国工作组. 中国海平面变化. 北京: 海洋出版社.
- 中国海湾志编纂委员会. 1991. 中国海湾志第三分册(山东半岛北部和东部海湾)[M]. 北京: 海洋出版社.
- 铁道第四勘察设计院. 2003. 铁路工程地质原位测试规程 TB10018—2003 J261—2003[S]. 北京: 中国铁道出版社.

References:

- China Gulf Chronicles Compilation Committee. 1991. China Gulf chronicles Volume 3(Northern and eastern gulf of Shandong Peninsula)[M]. Beijing: China Ocean Press(in Chinese).
- China Railway Siyuan Survey and Design Group CO., LTD. 2003. Code for in-situ measurement of railway engineering geology TB10018—2003 J261—2003. Beijing: China Railway Publishing House CO., LTD(in Chinese).
- DU Dong-ju, YANG Ai-wu, ZHAO Jian-jun, ZHANG Jian-xin, LIU Ju, ZHAO Rui-bin. 2012. Tianjin coastal soft soil[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- EKDALE A A. 1988. Pitfalls of paleobathymetric interpretations based on trace fossil assemblages[J]. Palaios, 3(5): 464-472.

- GUO Fei, GAO Mao-sheng, HOU Guo-hua, KONG Xiang-huai, ZHAO Jin-ming, ZHENG Yi-min, ZHAO Guang-ming. 2016. Geochemical characteristics of sediment in Core 07 since the late Pleistocene in Laizhou Bay[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 38(3): 145-155(in Chinese with English abstract).
- HAN You-song, MENG Guang-lan, WANG Shao-qing, ZHUANG Zhen-ye, XU Wei-dong, XU Jia-sheng. 1992. The middle Holocene high temperature and high sea level in north China coastal region[C]//SHI Ya-feng, KONG Zhao-chen. The climates and environments of Holocene megathermal in China. Beijing: China Ocean Press(in Chinese).
- HAN You-song, MENG Guang-lan. 1984. Holocene transgression and sea level change in Jiaozhou Bay area[J]. *Chinese Science Bulletin*, (20): 1255-1258(in Chinese).
- JIANG Xing-yu, YI Liang, TIAN Li-zhu, SHI Pei-xin, CHEN Yong-sheng, WANG Hong, WANG Fu, LI Jian-fen, SHANG Zhi-wen. 2016. Magnetostratigraphic chronology of Borehole HLL01, south coast of Laizhou Bay[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(10): 1669-1678(in Chinese with English abstract).
- LI Guang-xue, LIU Yong, SHI Jing-hao, DONG He-ping, MA Yan-yan, LI Pin, LUAN Guang-zhong. 2014. Geology and environment of Jiaozhou Bay[M]. Beijing: China Ocean Press(in Chinese).
- LI Pei-ying, XU Xing-yong, ZHAO Song-ling. 2008. Loess and ancient glacial relics in coastal zones[M]. Beijing: China Ocean Press(in Chinese).
- LI Shou-jun, CUI Xiao-hui, XU Hua, ZHANG Zhuo, ZHAO Xiu-li, GAO Zong-jun, LIU Qiang, LIU Xiao. 2017. Distribution characteristics of benthic foraminifera of the late Quaternary in Laizhou Bay, Bohai Sea, China and its paleoenvironmental significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(2): 287-301(in Chinese with English abstract).
- LI Tie-song, LI Cong-xian. 1995. Tidal flat depositional rhythm and diastem[J]. *Journal of Tongji University*, 23(1): 53-58(in Chinese with English abstract).
- LIN Chun-ming. 1995. The application of static sounding to the exploration of supershallow gas in the Holocene at the mouth of Qiantang River, Zhejiang[J]. *South China Petroleum Geology*, 1(4): 38-45(in Chinese with English abstract).
- LIN Fang, WANG Jian-zhong, LI Jian-fen, PEI Yan-dong, KANG Hui. 2005. Characteristics of microfossil assemblages and evolution of sedimentary environment since the late Quaternary in the Laizhou Bay, Bohai Sea[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(9): 879-884(in Chinese with English abstract).
- PAN Mao, XU Jian-hong. 1993. Facies study for buried Quaternary strata: application of geophysical logging interpretation in Quaternary research[J]. *Quaternary Sciences*, 3: 240-249(in Chinese with English abstract).
- STYLLAS M. 2014. A simple approach to define Holocene sequence stratigraphy using borehole and cone penetration test data[J]. *Sedimentology*, 61(2): 444-460.
- SHI Ya-feng, KONG Zhao-chen, WANG Su-min, TANG Ling-yu, WANG Fu-bao, YAO Tan-dong, ZHAO Xi-tao, ZHANG Pi-yuan, SHI Shao-hua. 1992. Basic characteristics of Holocene warm period and environment of China [C]//The Climates and Environments of Holocene Megathermal in China. Beijing: China Ocean Press(in Chinese with English abstract).
- TIAN Li-zhu, TAO You-bing, JIANG Xing-yu, CHEN Yong-sheng, SHI Pei-xin, SHANG Zhi-wen, LI Jian-fen, WANG Fu, WANG Hong. 2016. Reconstruction of the Holocene relative sea level change for the south coast of Laizhou Bay[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(10): 1679-1691(in Chinese with English abstract).
- WANG Jing-tai, WANG Pin-xian. 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 Qiang, LI Feng-lin, LI Yu-de, GAO Xiu-lin. 1986. Coastline changes of the plain in the southwest coast of the Bohai Sea since 150,000 years[C]//International Geological Comparison Program Project No. 200 China Working Group. China sea level changes. Beijing: China Ocean Press(in Chinese).
- WANG Shao-hong. 1979. A preliminary study of marine bed and its depositional conditions in late Quaternary off the west coast of Laizhou Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 10(1): 9-23(in Chinese with English abstract).
- XU Jian-guo, XU Hua, ZHANG Tao, ZHANG Zhuo, QI Xiao-fan, JI Wen-long. 2018. Stratigraphic characteristics, age and indicated Holocene coastal variation of Heituhu formation in Laizhou Bay coastal area, Shandong Peninsula[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 39(2): 133-143(in Chinese with English abstract).
- XU Jian-guo, XU Hua, ZHANG Tao, ZHU Heng-hua, HOU Jian-hua, WEI Zheng-run, LIU Zhong-ye, ZHANG Zhuo. 2019. Quaternary geology and engineering geology in Laizhou Bay coastal area, Shandong Peninsula[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- XUE Chun-ting, DING Dong. 2008. Weihe River-Mihe River Delta in south coast of Bohai Sea, China: sedimentary sequence and architecture[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 28(5): 672-676(in Chinese with English abstract).
- 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.
- ZHAO Song-ling, YANG Guang-fu, CANG Shu-xi, ZHANG Hong-cai, HUANG Qing-fu, XIA Dong-xing, WANG Yong-ji, LIU Fu-shou, LIU Cheng-fu. 1978. On Marine strata and coastline in Bohai Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 9(1): 14-25(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Song-ling. 1986. Research status of sea level change in the coastal areas of eastern China in recent centuries[C]//International Geological Comparison Program Project No. 200 China Working Group. China sea level changes. Beijing: China Ocean Press(in Chinese).
- ZHAO Xi-tao, WANG Shao-hong. 1992. Holocene sea level change in China and its relationship with climate change and coastal change[C]//SHI Ya-feng, KONG Zhao-chen. The climates and environments of Holocene megathermal in China. Beijing: China Ocean Press(in Chinese).
- ZHENG Shou-yi, ZHENG Zhi-zhong, WANG Xi-tang, FU Zhao-xian. 1978. A Preliminary discussion of the Quaternary foraminifera and its sedimentary environment in dayuzhang Irrigation District, Shandong Province, *Studia Marina Sinica*, Vol.13[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- ZHUANG Zhen-ye, LI Jian-hua. 1986. Holocene transgression in the southeast coast of Laizhou Bay[C]//International Geological Comparison Program Project No. 200 China Working Group. China sea level changes. Beijing: China Ocean Press(in Chinese).
- ZHUANG Zhen-ye, XU Wei-dong, LIU Dong-sheng, ZHUANG Li-hua, LIU Bao-zhu, CAO You-yi, WANG Qiang. 1999. Division and environmental evolution of Late Quaternary Marine beds of S3 hole in the south coast of Bohai Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 19(2): 27-35(in Chinese with English abstract).