

埕北海域工程地质分区及模糊数学稳定性评价

姜波¹, 冯秀丽^{1,2}, 田动会¹, 王晓明¹, 姜建新¹, 滕珊¹

(1. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100; 2. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东青岛 266100)

摘要: 通过土工试验和粒度分析, 发现埕北海域沉积物主要以粉土和粉质黏土为主, 局部地区分布有粉砂和淤泥质土。综合考虑研究区沉积物、水深地形、地貌、地质灾害等因素, 可将研究区划分为 4 个工程区: I 区、II 区、III 区和 IV 区。针对 4 个工程区, 采用模糊数学的方法, 选择直接影响工程稳定性的 5 个主要因素即: 沉积物类型、主要持力层埋深、主要持力层承载力、地形地貌和地质灾害类型作为评价因子定量对各区稳定性进行评价, 发现 4 个工程地质区的稳定性分别为: I 区(稳定区)、II 区(不稳定区)、III 区(较不稳定区)和 IV 区(较稳定区)。以此为研究区的工程建设提供设计依据。

关键词: 埕北海域; 工程地质分区; 模糊评判; 区域稳定性评价

中图分类号: P75 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2018)04-0018-10

DOI: 10.11759/hyxx20170117004

埕北海域地处渤海的西南部, 东营市北部的近岸浅海海域^[1], 是胜利油田的主力开发区块, 蕴藏丰富的油气资源。自 1976 年黄河改道以来, 本区泥沙来源断绝, 沉积环境发生明显改变, 波浪等水动力因素对研究区的影响更加显著, 地貌单元遭受破坏, 使得研究区浅层形成了复杂的工程地质环境^[2]。随着港口建设和海上油气田开采, 研究区海洋工程建设逐渐增多, 故极有必要对研究区的海底工程地质条件及海底稳定性进行系统的调查与分析, 这对该地区的海洋工程建设和防灾减灾具有十分重要的经济意义和战略意义。

该海域的研究起步较早, 资料繁多, 如冯秀丽等^[3]根据 10 个站位的同步海流和悬浮泥沙的观测资料, 对研究区泥沙输运方式进行了分析; 刘效国等^[4]依据埕岛海域水深地形特征和地质勘查资料将研究区分为了 5 个区和 3 个冲淤调整阶段; 张衍涛等^[5]依据地质调查资料, 分析了埕岛海区物理力学性质、地基承载力和土层类型的分布特征; 张卫明等^[6]依据前人研究成果总结了研究区海底地貌形态、沉积物的物理力学性质、海底沉积特征和工程地质性质; 林霖等^[7]根据室内试验和数据分析的结果, 针对不同地震烈度, 对研究区土层液化情况进行了分区, 等等。但前人研究成果多集中于某一方面的研究, 综合考虑该海域土体特性、水深地形、地貌、地质灾害等特征的研究相对较少, 张朋等^[8]通过钻井资料,

综合考虑研究区水深地形、沉积物特征及地质灾害对研究区进行分区并对各区的稳定性进行了评价, 但此研究仅停留在定性分析上, 本文在前人研究成果的基础上, 利用获得的研究区水深、钻孔土体性质等新的资料从土体性质和工程环境两方面对埕北海域进行综合的工程地质分区, 并对研究区工程地质稳定性进行半定量评价, 以期对油气开发和桩基平台的选址与施工提供依据。

1 资料来源及方法

1.1 资料来源

样品为中国海洋大学于 1999—2014 年在埕北海域采集的 CB11D、CB25A 等 23 个钻孔柱状样及 100 个表层样, 同时又搜集前人采集的 11 个钻孔柱状样资料。柱状样品长度最长为 60 m, 最短为 10 m, 10 m 的钻孔共有 8 个, 占总钻孔数量的 23.5%; 60 m 的钻孔共有 3 个, 占总钻孔数量的 8.8%; 其余钻孔长度均在 10~40 m, 钻孔分布如图 1 所示。

收稿日期: 2017-01-17; 修回日期: 2017-04-10

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(201005009)

[Foundation: Research Project of Marine Public Welfare Industry, No.201005009]

作者简介: 姜波(1993-), 男, 吉林白山人, 在读硕士, 主要从事海洋工程环境研究工作, E-mail: 1035368359@qq.com; 冯秀丽(1962-), 通信作者, 女, 教授, 主要从事海洋工程环境研究工作, E-mail: fengxiuli@ouc.edu.cn

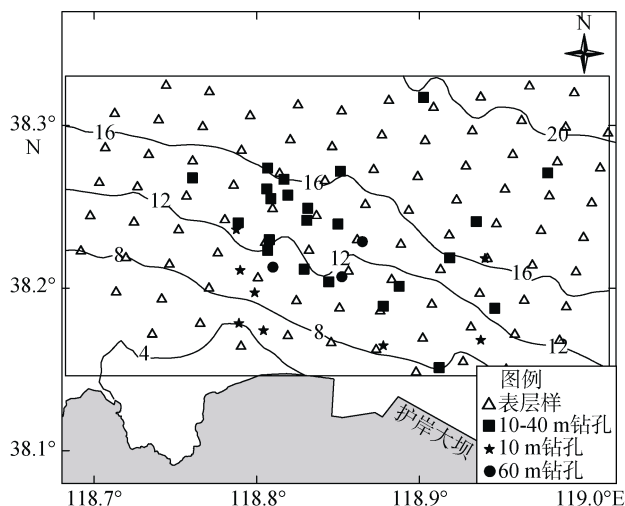


图1 样品位置分布图

Fig. 1 Position of the sample distribution

1.2 研究方法

样品处理分为2个阶段：室内试验阶段和数据分析阶段。

室内试验阶段：依据土体性质不同对分段样品分别进行了含水率、湿密度、液塑限、直剪、压缩等基本的土工试验，针对黏性土，又进行了静三轴压缩试验(UU)，实验方法与标准依据《土工试验规程》(SL237-1999)。并对分段样品于中国海洋大学采用 Mastersizer-2000 型激光粒度分析仪进行粒度分析工作。命名规范参照《海洋调查规范第 11 部分：海洋工程地质调查》(GB/T12763.11-2007)。

数据分析阶段：利用统计分析法分析土工试验所获得的数据，总结研究区土体特性；利用 surfer 软件及中国海洋大学 2015 年在研究区的实测水深值绘制研究区水深等值线；通过整理前人研究成果重绘研究区海底微地貌图并对研究区地质灾害进行定性分析；在以上工作的基础上综合研究区土体特性、水深地形、海底地貌以及地质灾害特征对研究区进行性质分区；建立模糊评判模型，利用模糊评判法定量分析各分区的稳定性并进行评价，以期海洋工程建设提供一定的参考。

2 分区及评价

2.1 研究区土体工程地质特征

2.1.1 表层沉积物性质

粒度分析和土工试验结果表明：研究区表层沉积物主要由粉土(包括砂质粉土和黏质粉土)、粉质黏土、淤泥和粉砂构成。其中粉质黏土和粉土分布范围比较广泛，淤泥仅分布在研究区东北部水深较深的部分地区，粉砂则主要出现在研究区西北部近岸区域，这可能是由于此区水动力较强所致。分布范围如图 2 所示。

表层沉积物的物理力学性质方面，粉土含水率 23.5%~28.6%，平均值为 25.7%，压缩系数 0.04~0.278 MPa⁻¹，平均值为 0.17 MPa⁻¹，属中低压缩性土；粉质黏土含水率 27.5%~33.9%，平均值为 30.6%，压缩系数 0.21~0.63 MPa⁻¹，平均值为 0.40 MPa⁻¹，属中高压

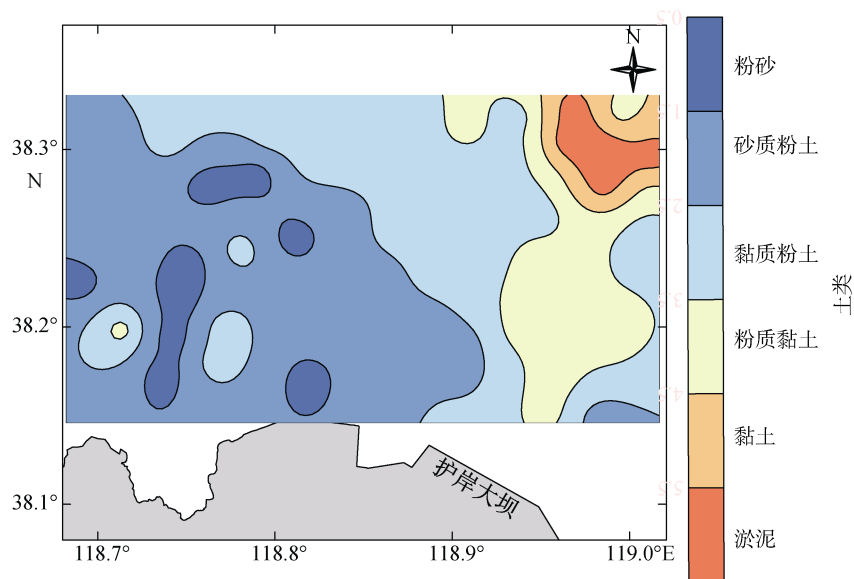


图2 研究区表层沉积物分布图

Fig. 2 Surface sediment distribution in the study area

缩性土, ; 淤泥含水率 39.4%~84.3%, 平均值为 61.9%, 压缩系数 0.59~1.32 MPa⁻¹, 平均值为 0.95 MPa⁻¹, 属高压缩性土。

2.1.2 研究区垂向土体性质

(1) 垂向土体物理力学特征

根据 34 个钻孔土体的物理力学性质测试结果, 运用统计分析法给出不同类型土体的物理力学性质

指标(表 1、表 2), 为工程分区奠定基础。

研究区柱状样的岩性以粉土和黏土为主, 部分层位发育粉砂和淤泥质土。一般来说淤泥质土的含水率最高, 平均为 45.8%; 黏土次之, 平均为 38.9%; 其次为粉质黏土, 平均值为 29.9%; 含水率最少的为粉砂, 平均为 21.7%。由此, 可看出黏粒含量越高, 一般来说含水率越大, 孔隙比也越大。

表 1 各类土的基本物理性质

Tab. 1 Physical properties of the different kinds of soil

土类	样品数	含水率/%		液限/%		塑限/%		塑性指数		液性指数	
		平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围
淤泥质土	14	45.8	39.4~50.2	43.6	35.0~47.7	25.1	22.6~28.0	18.4	13.2~20.9	1.11	0.69~1.42
黏土	5	38.9	37.8~39.9	40.8	33.4~44.6	23.7	21.8~27.0	17.1	11.6~19.4	0.76	0.69~0.88
粉质黏土	56	29.9	21.0~54.9	34.7	26.7~52.6	21.7	15.7~35.4	13.3	9.9~28.5	0.65	0.03~1.23
黏质粉土	32	24.3	18.4~28.5	28.0	27.0~30.2	19.5	17.6~21.1	8.2	6.4~10.1	0.61	0.13~0.96
砂质粉土	8	23.9	21.5~26.8	/	/	/	/	/	/	/	/
粉砂	18	21.7	18.0~25.5	/	/	/	/	/	/	/	/

注: /表示该类土无此方面性质, 后同。

表 2 各类土的土力学性质

Tab. 2 Mechanical properties of the different kinds of soil

土类	样品数	凝聚力/kPa		摩擦角/(°)		压缩系数/MPa ⁻¹		压缩模量/MPa	
		平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围
淤泥质土	14	11.9	5.2~15.8	7.9	4.1~13.6	0.84	0.44~1.10	3.2	2.3~6.5
黏土	5	29.6	29.0~30.4	18.9	18.4~19.9	0.55	0.33~0.67	4.3	3.1~6.3
粉质黏土	56	25.0	4.6~59.1	15.2	7.7~28.7	0.38	0.07~0.70	6.0	3.1~21.4
黏质粉土	32	12.6	2.1~57.8	26.7	15.6~37.3	0.16	0.03~0.51	17.0	5.3~53.0
砂质粉土	8	/	/	/	/	0.11	0.04~0.14	19.4	8.8~46.7
粉砂	18	/	/	/	/	0.08	0.04~0.15	22.6	11.2~41.0

土的可塑性方面, 本区淤泥质土的液限、塑限和塑性指数的平均值分别为 43.6%、25.1%和 18.4%; 黏土的液限、塑限和塑性指数的平均值分别为 40.8%、23.7%和 17.1%; 黏质粉土的液限、塑限和塑性指数的平均值分别为 28.0%、19.5%和 8.2%。由此可看出, 各类土的可塑性与黏粒含量密切相关, 一般来说黏粒含量越大, 可塑性越好。

土的抗剪强度和压缩性方面, 本区淤泥质土、黏土和黏质粉土的凝聚力(快剪)的平均值分别为 11.9、29.6 和 12.6 kPa; 摩擦角(快剪)的平均值分别为 7.9°、18.9°和 26.7°; 本区淤泥质土、黏土、黏质粉土和粉砂的压缩系数的平均值分别为 0.84、0.55、0.16 和 0.08 MPa⁻¹。由此可看出, 淤泥质土的压缩性最高, 属

高压缩性土; 粉砂的压缩性最低, 属低压缩性土。这是由于粉砂的颗粒较粗, 含水率较低缘故。这一特点也使得黏性土较粉砂类土的凝聚力较大但摩擦角较小。

(2) 垂向土体的结构特征

依据所获得的钻孔土体结构, 通过典型钻孔对比(如图 3 所示), 发现研究区土体可大致分为 3 层。

第一层为三角洲相和海相沉积物, 以黄褐色淤泥质土、粉质黏土和粉土为主。此层土体含水率 21.5%~27.6%, 孔隙比 0.58~1.34, 压缩系数 0.06~1.03 MPa⁻¹, 土体物理力学性质差异较大, 近岸地区以低含水率、低孔隙比和低压缩系数的粉土和粉砂为主, 远岸则以高含水率、高孔隙比和高压缩系数的淤泥质土和粉质黏土为主。

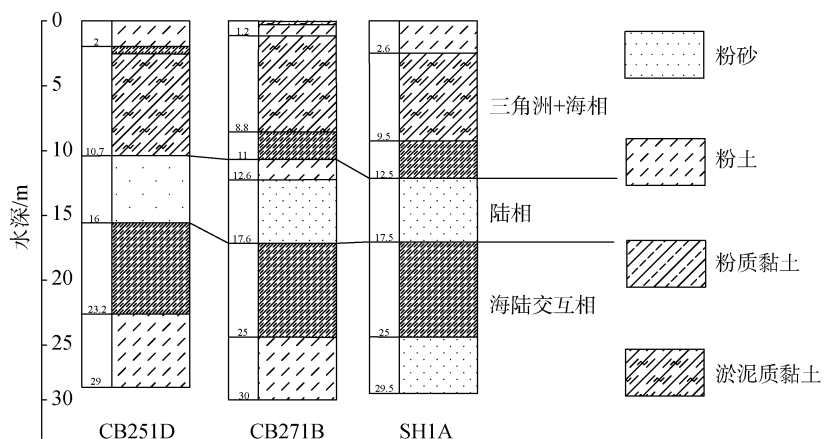


图3 典型钻孔对比图

Fig. 3 The contrast of the typical boreholes

第二层为河湖相等陆相层，以灰黄色粉砂为主。此层土体含水率 18.0%~24.7%，孔隙比 0.48~0.66，压缩系数 0.07~0.13 MPa⁻¹，研究区内此层土体也较为稳定(部分区域缺失此层)，以低含水率、较低孔隙比和低压缩系数的粉砂为主。可作为本区工程建设的有利持力层来考虑。

第三层为多次海侵海退作用形成的海陆交互层，以黄褐色粉土、粉砂和灰褐色粉土、粉砂及粉质黏土相间组成。此层土体因埋深较深，受到上覆土体的压力作用，通常具有较低的含水率、较小的孔隙比和较低的压缩系数，工程性质较为稳定，在第二层土体工程性质一般的情况下，可考虑代替第二层作为本区工程建设的持力层。

这一研究成果与杨作升等^[9]的研究成果类似。杨作升等根据详细的钻孔资料将埕北地区的地层结构分为 4 层：第一层为现代黄河三角洲沉积；第二层为渤海浅海陆架沉积；第三层为河流相、滨浅海相沉积；第四层为海陆相交替存在的沉积。

2.2 研究区工程环境特征

2.2.1 研究区水深地形特征

总体来说，现代黄河三角洲地势极为平缓，自西南向东北倾斜，地面坡降 1/10000 左右^[10]。根据中国海洋大学 2015 年的实测水深绘制的研究区水深等值线图(图 4)可看出，研究区等深线呈 NW-SE 向延展，其趋势基本与岸线形态保持一致，水深由岸向海呈台

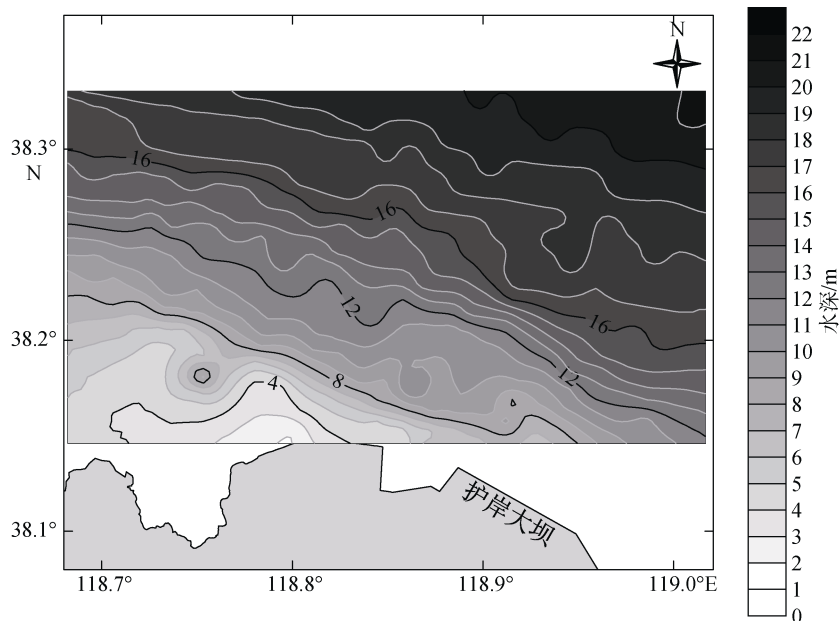


图4 埕北海域水深等值线图

Fig. 4 The water depth contour map of Chengbei sea area

阶式加深^[11]。大致可以分为三段。第一段水深 2~4 m, 水深等值线较为稀疏; 第二段水深 4~16 m, 水深等值线比较密集, 地形变化较大; 第三段水深大于 16 m, 给施工增加了难度, 但水深等值线比较稀疏, 地形平缓。

2.2.2 研究区海底微地貌特征

埕北海域水动力条件强烈而复杂, 加之黄河的

改道, 此区域的沉积物性质差异极大, 分布不均, 微地貌形态也千差万别, 严重影响着海洋工程的稳定性。冯秀丽等^[12]根据 1999 年的水深测量及旁扫声呐的反射图, 将研究区海底微地貌划为 5 种类型, 分别为冲刷地貌区、滑动挤压脊和塌陷凹坑地貌区、侵蚀残留岗丘或台地、斑状海底地貌区、粗糙和平滑海底。分布如图 5 所示。

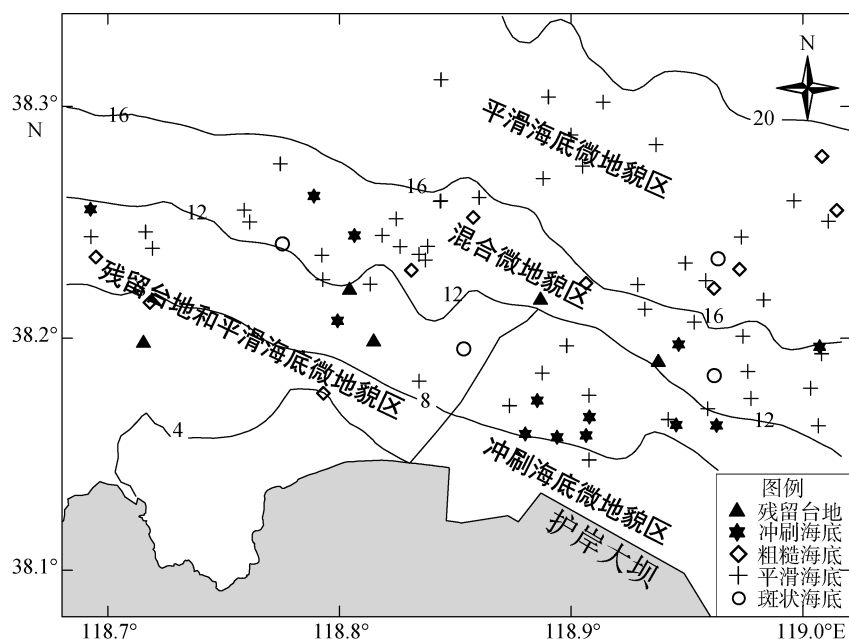


图 5 埕北海域微地貌分布图(改绘自文献[20])

Fig. 5 Micro landscape type of Chengbei sea area (change from literature [20])

2.2.3 研究区灾害性地质特征

冯秀丽等^[13]根据多次调查总结了埕北海域主要的几种地质灾害。分别是厚度不等的铁板砂及下卧软土层、较强的差异性侵蚀、埋藏台地冲沟和古河道、海底管线和平台地基冲刷、沉积物块体运动、表层扰动体。这些不良地质灾害如果不仔细勘察均会对海上构筑物的安全产生巨大的隐患^[8]。总结前人研究成果发现, 本区地质灾害主要集中在 8~16 m 水深等值线较为密集的区域^[8, 12, 14-15]。其中海底滑坡主要集中在研究区 15 m 水深等值线处; 表层扰动体在研究区分布较为广泛; 冲刷掏空则主要集中于 8~10 m 水深带; 埋藏沟谷和古河道则主要分布于研究区的西部、中部和东南部。

2.3 埕北海域工程地质分区及特征

工程地质分区是在综合归纳各种工程地质特征的基础上, 根据差异性和相似性原则进行的单元划分^[16]。本文选择研究区土体特性、水深地形、地貌

和地质灾害等因素将研究区划分为 4 个工程地质区: I 区、II 区、III 区和 IV 区。分区结果如图 6 所示。

I 区: 分布在研究区西南近岸区域, 该区土体以粉土和粉砂为主; 本区土体含水率 21.50%~39.90%, 平均值为 29.04%; 液性指数 0.40~1.05, 平均为 0.70; 塑性指数 7.40~20.90, 平均为 13.66; 压缩模量 0.46~56.52 MPa, 平均值为 10.43 MPa; 凝聚力 3.20~30.40 kPa, 平均为 15.71 kPa; 摩擦角 15.10°~38.40°, 平均为 25.82°。此区水深较浅, 小于 12 m, 地形变化较小, 较平坦, 以平滑海底为主, 约占区域总面积的 62.50%, 偶见残留台地和粗糙海底, 地质灾害较少, 主要为冲刷掏空。

II 区: 分布在研究区东南近岸区域, 表层沉积物以粉土和粉质黏土为主; 垂向上以粉土和粉质黏土为主, 局部层位发育粉砂和淤泥质土。该区土体含水率 19.10%~67.80%, 平均为 29.85%; 液性指数 0.02~1.33, 平均为 0.49; 塑性指数 4.10~31.50, 平均为

14.01; 压缩模量 2.35~23.61 MPa, 平均为 11.12 MPa; 凝聚力 8.00~72.30 kPa, 平均为 29.38 kPa; 内摩擦角 1.70°~40.90°, 平均为 20.97°。此区水深较浅, 4~12 m, 地形变化较大, 较陡峭; 以冲刷海底和平滑海底为主,

平滑海底约占区域总面积的 33.33%; 地质灾害发育, 区内 8~10 m 水深带是冲刷掏空地质灾害的多发地带且此区的东南部发育埋藏沟谷且此区局部地区还发育海底滑坡、表层扰动体和刺穿破坏等地质灾害。

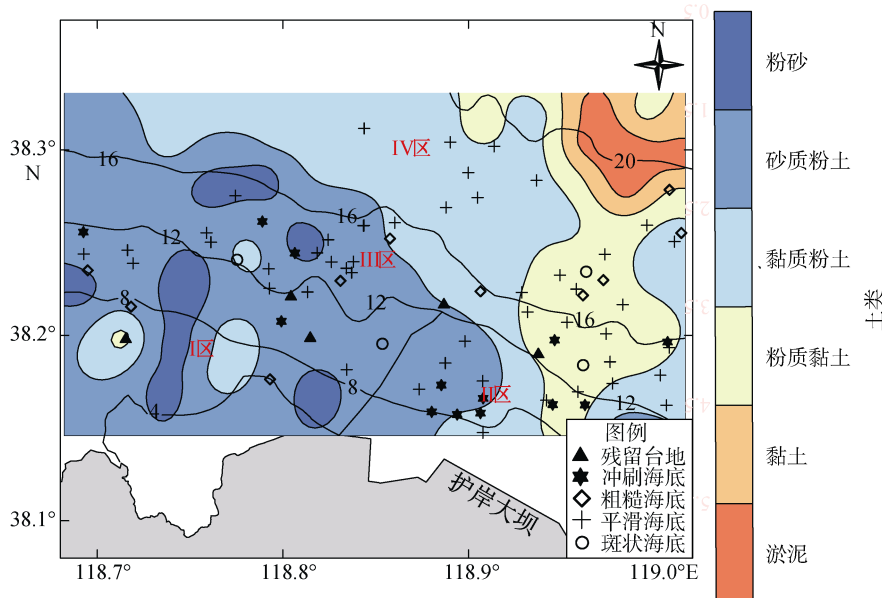


图 6 综合分区图

Fig.6 Comprehensive partition

III区: 分布在研究区中部 12~16 m 等深线的区域, 该区表层沉积物差异较大, 以粉土和粉质黏土为主, 部分区域出露粉砂层。垂向上以粉土、粉质黏土、粉砂和淤泥质土为主。该区土体含水率 21.40%~47.60%, 平均为 28.55%; 塑性指数 7.60~20.70, 平均为 13.35; 液性指数 0.37~1.36, 平均为 0.79; 压缩模量 2.04~50.49 MPa, 平均为 11.14 MPa; 凝聚力 3.46~59.10 kPa, 平均为 15.20 kPa; 摩擦角 4.10°~37.70°, 平均为 24.75°。此区水深较深, 12~16 m, 地形变化较大, 起伏较明显; 以平滑海底为主, 并有较多的斑状海底和残留台地, 平滑海底约占区域总面积的 54.17%; 地质灾害发育, 研究区 15 m 水深等值线处是海底滑坡的多发地带, 此区中部还发育埋藏沟谷和古河道且此区还发育表层扰动体和刺穿破坏。

IV区: 分布在研究区北部远岸区域。表层沉积物差异较大, 以粉土、黏土为主, 部分区域分布有淤泥质土。垂向上以淤泥质土、粉土和黏土为主。该区土体含水率 18.20%~80.00%, 平均为 29.92%; 塑性指数 4.40~28.90, 平均为 10.88; 液性指数 0.15~2.16, 平均为 0.85; 压缩模量 1.90~33.20 MPa, 平均为 11.10 MPa; 凝聚力 3.00~80.00 kPa, 平均为 25.83 kPa; 内摩擦角

0.40°~32.30°, 平均为 17.28°。此区水深较深, 多大于 16 m, 地形变化小, 较平坦; 以平滑海底为主, 偶见粗糙海底和斑状海底, 平滑海底约占区域总面积的 82.14%; 地质灾害较少, 以海底滑坡和表层扰动体为主。

2.4 分区稳定性模糊数学评价

为定量评价上述 4 个工程地质区的稳定性, 本文采用模糊数学的方法。其优点是能兼顾影响海域工程地质稳定性的诸多因素, 且能够较为清晰地反映各因素对研究区稳定性的影响关系。

2.4.1 评价因子选取与隶属度确定

选取表层沉积物类型、主要持力层埋深、主要持力层承载力、平滑海底比例和地质灾害种类数量 5 个比较重要的指标对研究区进行综合评价。其中, 对于地质灾害, 因为本区无大范围不良地质灾害出露, 地质灾害多呈零星状分布, 故此处选择地质灾害类型作为参评因子。因子的选择和分级标准是依据《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2011)及专家经验确定的, 如表 3 所示。

隶属度反映评价因子隶属于评语集的程度, 一般由专家的经验以及概率分布函数来确定^[17]。

表 3 模糊评价因素的选择及分级

Tab. 3 The selection and grading of fuzzy evaluation factors

分级	沉积物类型	持力层埋深/m	持力层承载力/kPa	平滑海底比例/%	地质灾害种类数量/种
优良级	粉砂	<5	>190	>80	<2
次优良级	粉土	5~10	190~170	60~80	2~3
次不良级	黏土	10~20	170~150	40~60	3~4
不良级	淤泥质土	>20	<150	<40	>4

对于持力层埋深、持力层承载力、地形地貌和地质灾害这 4 个连续型评价指标,其隶属度用隶属函数给出。本文依据前人经验^[18-19]采用正态分布函数计算各指标的隶属度,其函数的一般形式为:

$$\mu(X) = e^{-\frac{(X-S)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

对于沉积物类型这 1 个非连续型的评价因子,本文采用经验法给出赋值。见表 4 所示。

表 4 不同类型沉积物的隶属度^[18]

Tab. 4 Membership degree of different types of sediment

分级	隶属度			
	粉砂	粉土	黏土	淤泥质土
优良级	0.8	0.2	0	0
次优良级	0.2	0.6	0.2	0
次不良级	0	0.2	0.6	0.2
不良级	0	0	0.2	0.8

2.4.2 评价因子权值确定

确定权值的方法有很多种,常见的有专家评分法和公式法,本文采用层次分析法来确定权值。首先利用层次分析构建权值判别表,见表 5。其中 1 表示两指标相比同等重要;3 表示行指标与列指标相比稍重要;5 表示行指标与列指标相比较重要,以此类推,

表 5 评价主要影响因素的等同关系表

Tab. 5 An equivalent relationship table for evaluating the main factors

	沉积物类型	持力层埋深	持力层承载力	平滑海底比例	地质灾害种类数量
沉积物类型	1	1/3	1/5	1/4	1/6
持力层埋深	3	1	1/3	2	1/4
持力层承载力	5	3	1	1/2	2
平滑海底比例	4	2	1/2	1	1/3
地质灾害种类数量	6	4	2	3	1

2.4.4 分区评价结果

综合考虑研究区土体特性、水深地形、地貌和地质灾害以及模糊评判结果,得出埕北海域 4 个工程区的稳定性分别为: I 区(稳定区)、II 区(较不稳定区)、III 区(不稳定区)和 IV 区(较稳定区)。分区结果如

数字越大,表示行指标与列指标相比重要性越强。

依据上表构造判断矩阵,计算上述矩阵的最大特征值及其所对应的特征向量,就可得出各评价指标的加权值,所得的各项指标加权值为沉积物类型 0.04、持力层埋深 0.13、持力层承载力 0.30、平滑海底比例 0.15、地质灾害种数 0.38。

2.4.3 模型验证及结果

(1) 模型验证

以 III 区为例。首先从土体方面,CB11D 为 III 区的典型钻孔,依据 CB11D 孔的钻探资料,浅部地基土层属于全新世以来的海相饱和疏松沉积物。沉积物的类型为中软沉积物,建筑场地类型为 III 类。由于沉积时间短、固结作用差,结构疏松,工程地质条件较差,较不稳定。其次,从工程环境方面,依据实测资料,此区 15 m 水深等值线处广泛发育滑坡,且区域的西部和中部还发育埋藏沟谷等地质灾害,严重影响着工程的稳定性。由此可见实测资料与通过模糊数学模型计算所得的结果有一定的相似性,故运用此模型对埕北海域分区稳定性进行评价是可行的。

(2) 模糊运算结果

依据上述方法,对 4 个区域进行评价,4 个工程区的具体参数取值见表 6,评价结果见表 7。

图 7 所示。

I 区:表层沉积物以粉质黏土为主,局部有粉砂分布;水深较浅,小于 12 m,地形变化较小,较平坦,以平滑海底为主,偶见残留台地和粗糙海底,地质灾害较少。一方面此区土体工程性质良好,这可能与

表 6 工程区参评因子取值

Tab. 6 The value of factors in the study area

区号	沉积物类型	持力层埋深/m	持力层承载力/kPa	平滑海底比例/%	地质灾害种类数量/种
I	粉土、粉砂	15	200	62.50	1
II	粉土、黏土	8.9	180	33.33	5
III	粉土、黏土	14.5	180	54.17	4
IV	粉土、黏土、淤泥质土	25.9	180	82.14	2

表 7 埤北海域分区评价结果

Tab. 7 Partitions evaluation results of Chengbei sea area

区号	隶属度				评价结果
	1 级	2 级	3 级	4 级	
I	0.71	0.11	0.18	0	1 级
II	0.01	0.43	0.07	0.49	4 级
III	0.01	0.34	0.46	0.19	3 级
IV	0.29	0.55	0.02	0.14	2 级

注: 1 级代表稳定; 2 级较稳定; 3 级较不稳定; 4 级不稳定。

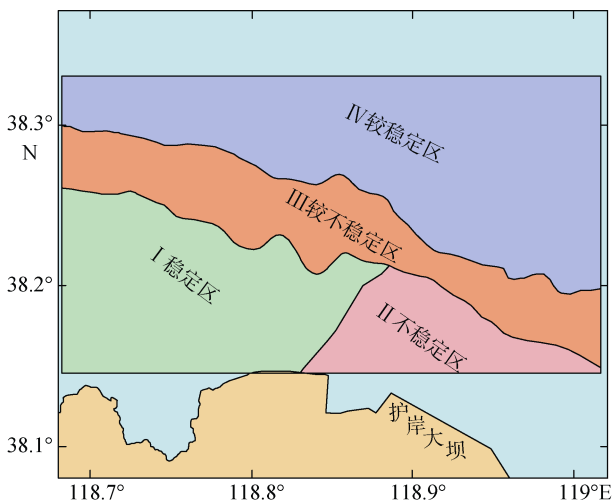


图 7 稳定性分区图

Fig. 7 The stability of partitions

此区土体长期受到冲刷作用使得此区土体压缩性、孔隙比都较低, 且此区土体可作为桩基持力层的土层埋深较浅, 多在 10 m 以浅; 另一方面此区水深较浅, 地形平坦并且地质灾害较少, 这些条件都为平

表 8 研究区工程性质分区综合表

Tab. 8 Engineering properties of partitions in the study area

区号	表层沉积物	水深地形	地貌	地质灾害	评价结果
I	局部有粉砂	水深 2~12 m, 地形较平坦	平滑海底为主	较少	稳定
II	粉土、粉质黏土为主	水深 4~12 m, 地形较陡峭	冲刷海底和平滑海底为主	较多	不稳定
III	差异较大	水深 12~16 m, 地形变化较大	平滑海底为主	一般	较不稳定
IV	发育淤泥质土	水深 > 16 m, 地形变化小	以平滑海底为主	较少	较稳定

台的施工提供了天然有利的环境, 为研究区稳定的区域, 较适合施工选址与建设, 但此区冲刷较为严重, 施工选址与建设需注意。

II 区: 表层沉积物以粉土和粉质黏土为主; 水深较浅, 4~12 m, 地形变化较大, 较陡峭; 以冲刷海底和平滑海底为主, 偶见斑状海底; 区内还存在严重的滑坡、断陷、冲蚀等地质灾害。从土性方面来说, 土体性质差异较大, 这可能与此区较强的水动力有关, 工程性质一般; 从工程环境方面来说, 此区地形变化大, 并且存在大量的冲刷海底地貌, 地质灾害广泛发育, 严重威胁着海洋工程的安全。故此区为不稳定区域, 施工选址与建设需谨慎。

III 区: 该区表层沉积物差异较大, 以粉土和粉质黏土为主, 部分区域出露粉砂层; 水深较深, 12~16 m, 地形变化较大, 起伏较明显; 以平滑海底为主, 并有较多的斑状海底和残留台地; 地质灾害发育, 偶见滑坡、断陷等地质灾害; 从土性方面来说, 土体工程性质较差; 从工程环境方面来说, 此区地形起伏较大, 有较多的斑状海底和残留台地, 并且存在滑坡、断陷等地质灾害, 因此此区为较不稳定区域。

IV 区: 表层沉积物差异较大, 以粉土、黏土为主, 部分区域分布有淤泥质土; 依据模糊评判土体以 2 级土为主; 水深较深, 多大于 16 m, 地形变化小, 较平坦; 以平滑海底为主; 地质灾害较少。从土性和工程环境方面均为较稳定区域。但此区水深较大, 一定程度上来说加大了海洋工程施工的难度。

最后, 综合分区结果及各区性质如表 8 所示。

3 结论

1) 通过粒度分析和土工试验结果, 研究区表层沉积物以粉土和粉质黏土为主, 局部地区分布有粉砂和淤泥质土。

2) 研究区水深 2~22 m; 海底地貌以平滑海底为主, 局部地区发育较为广泛的冲刷海底、残留台地、斑状海底等地貌。

3) 综合考虑研究区沉积物特征、水深地形特征、海底地貌特征、地质灾害特征对研究区进行分区并利用模糊评判对各区稳定性进行评价, 发现研究区可分为 I 区(稳定区)、II 区(不稳定区)、III 区(较不稳定区)和 IV 区(较稳定区)。

参考文献:

- [1] 臧启运. 黄河三角洲近岸泥沙[M]. 北京: 海洋出版社, 1996.
Zang Qiyun. Offshore Sediment in Yellow River Delta[M]. Beijing: China Ocean Press, 1996.
- [2] 成国栋. 现代黄河三角洲的演化与结构[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1987, 7(增刊): 7-18.
Cheng Guodong. Evolution and framework of the modern Yellow River Delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1987, 7(supplement): 7-18.
- [3] 冯秀丽, 吴世强, 林霖, 等. 黄河三角洲埕岛近岸海域悬浮泥沙运动[J]. 海洋科学, 2003, 27(12): 66-70.
Feng Xiuli, Wu Shiqiang, Lin lin, et al. Offshore suspended sediment transport in Huanghe Delta Chengdao marine area[J]. Marine Sciences, 2003, 27(12): 66-70.
- [4] 刘效国, 朱孝强. 埕岛海域水深地形特征及冲淤规律探讨[J]. 黄渤海海洋, 2000, 18(1): 34-39.
Liu Xiaoguo, Zhu Xiaoqiang. Discussion about the features of water-depth and terrain and rules of erosion and siltation in Chengdao sea area[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 2000, 18(1): 34-39.
- [5] 张衍涛, 常方强, 孟祥梅, 等. 黄河口埕岛海域表层沉积物土性的区域变化及其机理分析[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(3): 351-356.
Zhang Yantao, Chang Fangqiang, Meng Xiangmei, et al. Regional variations and their mechanism analysis of soil property of surface sediment in the Chengdao sea area of the Huanghe estuary[J]. Advances in Marine Sciences, 2009, 27(3): 351-356.
- [6] 张卫明, 梁瑞才, 牟晓东, 等. 埕岛油田海域海底沉积特征与工程地质特性[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(3): 305-312.
Zhang Weiming, Liang Ruicai, Mou Xiaodong, et al. Sea bottom sediment characteristics and engineering geologic properties in the Chengdao Oil Field sea area[J]. Advances in Marine Sciences, 2005, 23(3): 305-312.
- [7] 林霖, 冯秀丽, 李安龙, 等. 埕岛海域粉土地震液化分区[J]. 海洋科学, 2003, 27(6): 64-68.
Lin lin, Feng Xiuli, Li Anlong, et al. The liquefaction part of silty strata in Chengdao's sea area on seismic effect[J]. Marine Sciences, 2003, 27(6): 64-68.
- [8] 张朋. 埕岛海域工程地质环境与工程适宜性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
Zhang Peng. Research on engineering geological environment and its suitability in Chengdao sea area[D]. Qingdao: The Ocean University of China, 2012.
- [9] 杨作升, 王涛. 埕岛油田勘探开发海洋环境[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1993.
Yang Zuosheng, Wang Tao. The Marine Environment of Exploration and Development in Chengdao Oilfield[M]. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 1993.
- [10] 秦伟颖, 庄新国, 黄海军. 现代黄河三角洲地区地面沉降的机理分析[J]. 海洋科学, 2008, 32(8): 38-43.
Qin Weiyong, Zhuang Xinguo, Huang Haijun. Mechanism analysis of land surface subsidence in the modern Yellow River Delta[J]. Marine Sciences, 2008, 32(8): 38-43.
- [11] 顾朝杰. 黄河水下三角洲埕北海域工程层序地层学模式研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
Gu Chaojie. A study on engineering sequence stratigraphical pattern of Chengbei area, the Yellow River subaqueous delta[D]. Qingdao: The Ocean University of China, 2012.
- [12] 冯秀丽, 戚洪帅, 王腾, 等. 黄河三角洲埕岛海域地貌演化及其地质灾害分析[J]. 岩土力学, 2004, z1: 18-20.
Feng Xiuli, Qi Hongshuai, Wang Teng, et al. Geomorphological evolution and geological disasters analysis in Chengdao sea area of the Yellow River Delta[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, z1: 18-20.
- [13] 冯秀丽, 杨荣民, 沈渭铨, 等. 现代黄河三角洲东北部(埕北地区)晚更新世及全新世地层的物理力学性质[J]. 海洋湖沼通报, 1990(3): 24-28.
Feng Xiuli, Yang Rongmin, Shen Weiquan, et al. Physical and mechanical properties of late pleistocene and holocene strata in the northeast offshore area of the Huanghe Delta[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1990(3): 24-28.
- [14] 李俊杰, 李广雪, 文世鹏, 等. 黄河三角洲埕岛海域浅地层剖面结构与灾害地质[J]. 海洋地质动态, 2007, 23(12): 8-13.
Li Junjie, Li Guangxue, Wen Shipeng, et al. Shallow geological profile structure and disasters in Chengdao sea area of the Yellow River Delta[J]. Marine Geology Letters, 2007, 23(12): 8-13.

- [15] 张朋, 吴建政, 王楠, 等. 埕岛海域移动式钻井平台桩基适宜性分析[J]. 海洋地质学前沿, 2012, 28(9): 54-60.
Zhang Peng, Wu Jianzheng, Wang Nan, et al. Suitability of pile foundation for mobile drilling platform in Chengdao sea area[J]. Marine Geology Frontiers, 2012, 28(9): 54-60.
- [16] 李京森. 编制中国环境地质图的基本构思[C] // 中国地质学会工程地质专业委员会. 第四届全国工程地质大会论文选集(一). 北京: 海洋出版社, 1992: 178-181.
Li Jingsen. The basic idea of the China environment geology map[C] // Engineering Geology Specialized Committee of the China Geological Society. The Fourth National Conference on Engineering Geology Sinica(1). Beijing: China Ocean Press, 1992: 178-181.
- [17] 吕妍, 魏文普, 张兆康, 等. 海洋石油平台溢油风险评估研究[J]. 海洋科学, 2014, 38(1): 33-38.
Lü Yan, Wen Wenpu, Zhang Zhaokang, et al. Risk assessment of oil spill on the offshore platform[J]. Marine Sciences, 2014, 38(1): 33-38.
- [18] 龚旭东. 辽东湾葵花岛构造区海洋工程地质环境特征及其质量评价[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2007.
Gong Xudong. The marine engineering geological environment characteristic and its quality evaluation in the Kuihuadao structure of Liaodong Bay summary[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2007.
- [19] 王忆非. 辽东湾北部工程地质条件评价[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2014.
Wang Yifei. Assessment on engineering geological suitability in northern Liaodong Bay[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2014.
- [20] 黄忠平, 吴宁. 埕岛海区海底地形地貌及浅层结构分析[J]. 能源与环境, 2013, 13: 116-118.
Huang Zhongping, Wu Ning. Analysis of submarine topography and shallow structure in Chengdao sea area[J]. Energy Environment, 2013, 13: 116-118.

Engineering geological zoning of Chengbei sea area and stability assessment using fuzzy mathematics

JIANG Bo¹, FENG Xiu-li^{1, 2}, TIAN Dong-hui¹, WANG Xiao-ming¹, JIANG Jian-xin¹, TENG Shan¹

(Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education and College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Received: Jan. 17, 2017

Key words: Chengbei sea area; engineering geological zone; fuzzy mathematics; the stability assessment of zones

Abstract: In this paper, through grain-size analysis and geotechnical tests, it was found that the sediments of the Chengbei sea mainly comprise silt and silty clay and relatively low levels of silty sand and muddy soil. According to the sediments components, submarine landform, bathymetric data, and disaster geology, the research area can be divided into four engineering geological zones: Zone I, II, III, IV. Using a fuzzy mathematics method, the most prominent factors which influence the stability of the engineering geological zones were found to be soil type of the site, the depth and bearing capacity of the main bearing layer, the landform, and the types of geological disasters. The stability of the four engineering geological zones are unstable area (II), relatively unstable area (III), relatively stable area (IV), and stable area (I). The research results can provide a design basis for engineering construction in the study area.

(本文编辑: 刘珊珊)