



## 粤东汕头近岸海域灾害地质风险综合评价

左瀚穹, 刘 胜, 汪 洋, 郭依群, 王万虎, 王 洋

### **Comprehensive assessment of disaster geological risk in Shantou coastal waters in eastern Guangdong**

ZUO Hanqiong, LIU Sheng, WANG Yang, GUO Yiqun, WANG Wanhua, and WANG Yang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022072101>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 莱州湾表层沉积物重金属分布特征、污染评价与来源分析

Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay and their sources and pollution assessment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 67

#### 海洋地质与第四纪地质的结合

Marine geology and Quaternary geology: A combination

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 1

#### 渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194

#### 科学计量：中国海洋地质40年发展历程与研究热点分析

Forty years development of marine geology in China: Evidence from scientometrics

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 1

#### 澳大利亚波拿巴盆地N区块岩性圈闭识别探讨

Identification of lithologic traps in block N of Bonaparte Basin, Australia

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 183

#### 基于模型优化的广义自由表面多次波压制技术在印度洋深水海域的应用

Generalized free surface multiple suppression technique based on model optimization and its application to the deep water of the Indian Ocean

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 221



关注微信公众号，获得更多资讯信息

左瀚穹, 刘胜, 汪洋, 等. 粤东汕头近岸海域灾害地质风险综合评价[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 119-127.

ZUO Hanqiong, LIU Sheng, WANG Yang, et al. Comprehensive assessment of disaster geological risk in Shantou coastal waters in eastern Guangdong[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(2): 119-127.

## 粤东汕头近岸海域灾害地质风险综合评价

左瀚穹<sup>1,2</sup>, 刘胜<sup>1</sup>, 汪洋<sup>2</sup>, 郭依群<sup>1</sup>, 王万虎<sup>1</sup>, 王洋<sup>1</sup>

1. 中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海口 570312

2. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 武汉 430074

**摘要:** 基于粤东汕头近岸海域地质和地球物理资料, 通过对物探数据进行解译, 查明了该区域内主要有活动断层、埋藏古河道、浅层气、不规则浅埋基岩等灾害地质类型, 并结合层次分析法和模糊数学法建立了以断层、埋藏古河道、浅层气、浅埋基岩为评价指标的风险评价体系, 得出海域内的不同区块的风险性等级, 共分低、较低、中、较高、高 5 个等级。研究区超过 70% 的区域灾害风险不高, 高风险区分布在榕江外河口、海门湾南部, 主要受埋藏古河道和断层影响。较高—高风险区工程地质条件较差, 存在的不良地质条件可能会给海上工程建设带来风险, 选址时应尽量避开此类区域。评价结果与已查明的灾害分布特点吻合, 对以后海上工程项目施工有一定的参考价值。

**关键词:** 灾害地质; 风险评价; 模糊数学; 汕头近岸海域

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022072101

### Comprehensive assessment of disaster geological risk in Shantou coastal waters in eastern Guangdong

ZUO Hanqiong<sup>1,2</sup>, LIU Sheng<sup>1</sup>, WANG Yang<sup>2</sup>, GUO Yiqun<sup>1</sup>, WANG Wanhu<sup>1</sup>, WANG Yang<sup>1</sup>

1. Haikou Marine Geological Survey Center, China Geological Survey, Haikou 570312, China

2. China University of Geosciences (Wuhan), the Institute of Geological Survey, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The geological and geophysical data in the coastal area of Shantou, eastern Guangdong were interpreted and analyzed for geohazard assessment. Results show that there are mainly active faults, buried ancient rivers, shallow gas, and irregular shallow bedrock in this area. The geohazard was quantitatively assessed by using the analytic hierarchy process and fuzzy mathematics method. A risk assessment system was built, in which faults, buried ancient rivers, shallow gas, and shallow bedrock were used as assessment indicators, and different weights of them were assigned. According to the principle of maximum membership degree, risk levels of different blocks of the study area were calculated from which five risk levels were divided: very low, low, medium, high, and very high. More than 70% of the study area was in low risk, and the high-risk area was distributed in the Rongjiang River outer estuary and the southern part of Haimen Bay, affected mainly by buried ancient rivers and faults. The engineering geological conditions in the high, and very-high risk areas are poor due to unstable geological setting that should be avoided for site selection. The assessment results are consistent with known distribution of geohazards in the coastal waters of Shantou, indicating that the assessment method is reasonable and feasible, and shall have reference values for future development and disaster prevention in sea areas.

**Key words:** hazardous geology; risk assessment; fuzzy mathematics; Shantou coastal waters

国土资源“十三五”规划明确提出要加大海洋地质调查力度, 加强陆地与海洋在防灾减灾方面协同共治。20 世纪 80 年代, 广州海洋地质调查局在南海北部进行了大规模的综合海洋工程地质调查, 主要以灾害地质因素为依据, 查明了分布在海底的潜在地质灾害类型。陆架常见的海洋灾害如浅层

气、断层、海岸侵蚀以及浅埋基岩、陡坎、沟槽和埋藏古河道等, 它们可能对海底构筑物(如钻井平台、海底管道)造成直接破坏, 而活动断层更是有引发地震从而引起海啸、砂土液化等灾害的风险<sup>[1-5]</sup>。张虎男<sup>[6-7]</sup>、詹文欢等<sup>[8-9]</sup>、周英<sup>[10]</sup>对研究区的地震及海啸灾害做过研究, 广东省海岸带和海涂资源综合调

资助项目: 中国地质调查局地质调查二级项目“潮汕海岸带综合地质调查”(DD20208013)

作者简介: 左瀚穹(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为地质灾害防治, E-mail: 499837216@qq.com

通讯作者: 刘胜(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋基础地质研究, E-mail: 3034928902@qq.com

收稿日期: 2022-07-21; 改回日期: 2022-08-22. 文凤英编辑

查大队对研究区的河口港湾淤积情况做过调查<sup>[11]</sup>, 吴正等对区内的风暴潮灾害和风沙灾害做过分析<sup>[12]</sup>, 黄镇国等对区内的埋藏古河道做过研究分析<sup>[13]</sup>。

海洋灾害地质类型(要素)就是对海底工程建设和海洋工程构筑物安全有直接危害或潜在影响的各种地质条件或地质现象<sup>[14]</sup>。本文结合地质钻孔资料,对单道地震剖面进行了解译,提取出了研究区4种典型的灾害地质类型:断层、埋藏古河道、浅层气、浅埋基岩,探讨了这4种典型灾害地质类型在研究区的展布特征,编制了灾害地质分布图,最后基于层次分析法与模糊数学,对研究区进行了地质灾害风险评价。关于灾害地质评价的方法,前人已做过许多研究,如宋亚娅基于加权模糊概率指数模型进行地质灾害易发性评价<sup>[15]</sup>,陈哲锋运用层次分析与模糊数学综合评价法对研究区环境进行评价<sup>[16]</sup>,宋玉鹏基于层次分析法开展了渤海海域海底地质灾害评价<sup>[17]</sup>,杨康提出一种信息量融入遗传算法优化支持向量机模型的地质灾害易发性评价方法<sup>[18]</sup>,陈水满基于人工神经网络模型做了滑坡危险性评价<sup>[19]</sup>。

### 1 区内灾害地质类型

通过在研究区海域布置物探测线1700余千米(测线布置见图1)得到原始数据,收集的数据再经过滤波、去大值干扰、SRME技术压制海底多次波等处理手段得到用于解译的单道地震剖面,通过使用Geosuite软件对单道地震剖面进行解译。首先结合研究区的地质钻孔测年得到全新统界面以及基岩面,再解译出4种灾害地质类型:断层、埋藏古河道、浅层气、浅埋基岩。

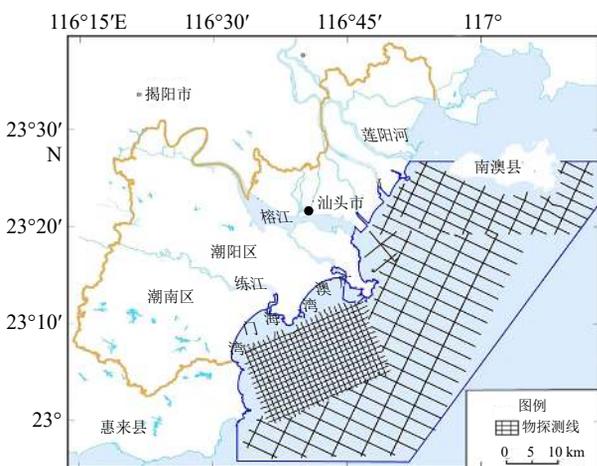


图1 测线分布  
Fig.1 Distribution of survey lines

### 1.1 断层

经过对单道地震剖面的解译,根据断层在剖面上的特征,将研究区目前解译得到的断层分成两种类型(图2):

(1) 晚更新世有较强活动并从基岩开始错动的生长断层。此种断裂全新世后基本被沉积层覆盖或者在之上发育下切河谷。断层在基岩的错动很大,但在全新世活动基本停止,断距具有深度越大、断距越大的特点。由于此种断层之上的全新世地层覆盖较厚,一般情况下土体较为稳定。

(2) 晚更新世有强烈活动,并在全新世仍有较强活动的从基岩开始错动的生长断层。在此之上更容易发育河道,河道下切从而发育下切河谷。断距具有深度越大、断距越大的特点。这种全新世仍在活动的断层,上覆的地层相对较薄,错动两盘地层物理性质有明显差异。

活动断裂作为一种地质灾害,存在引发地震的潜在风险。位于断裂带附近的地层变形较为严重,土体破碎,不宜在断裂带上或跨断裂带修建工程。参考前人对于重大工程与活动断裂安全距离的研究<sup>[19]</sup>,对于核电、水电等项目,有必要考虑过去10万年(晚更新世)内活动的断层,重大项目应避开全新世活动强烈的断层带约3000 m。

### 1.2 埋藏古河道

埋藏古河道本文特指全新统以上的埋藏古河道。玉木冰期引起海平面降低,地表发育河道。晚更新世以后冰期结束,海平面快速上升,原古河道

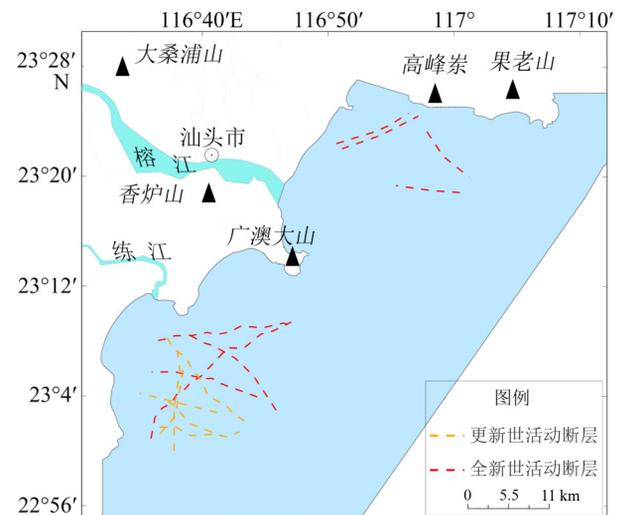


图2 海域断裂分布  
Fig.2 Distribution of faults in sea area

上发育泥质沉积<sup>[20-24]</sup>。区内有的古河道下切深度较大,最大的下切深度超过 20 m。

第四纪冰期,研究区呈陆域出露,连江、榕江、韩江等流经研究区入海,研究区内发育了大量古河道(图 3)。全新世以来,海面迅速上升,淹没之前的河道,河道被新的沉积物充填,新的沉积物固结压实效果差。古河道沉积物通常比周围地层软,含水量高,强度低,承载力弱。在古河道地区打桩时,也可能发生不均匀沉降,影响平台施工。

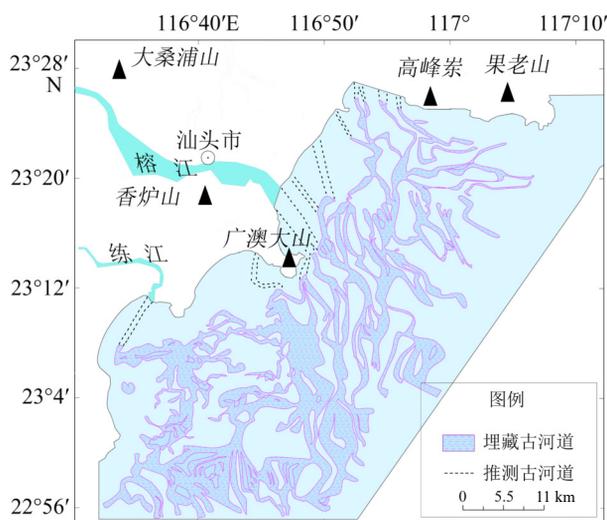


图 3 研究区埋藏古河道分布  
Fig.3 Distribution of buried ancient river channels in the study area

### 1.3 浅层气

浅层气是指埋藏较浅、储量较小的天然气资源。在近岸海域的浅层沉积地层中,以生物气为基础的浅层天然气以气穴、气柱和气层的形式发育<sup>[25-29]</sup>。研究区浅层气区多达 58 个,特征明显。最大的载气面积可达 4.18 km<sup>2</sup>,最小的仅为 0.01 km<sup>2</sup>。延伸宽度从 200 m 到 3400 m 不等,埋藏浅,分布分散,压力低。如图 4 所示,研究区浅层天然气主要分布在莲阳河和外沙河外河口、南澳岛南部近岸海域以及埋藏古河道周围地层。浅层天然气作为地质灾害因素之一,可导致平台倾斜甚至倾覆;桩施工过程中钻孔也可能出现浅层气,气体突然释放,甚至发生强烈井喷。周围泥沙涌入孔内,孔壁坍塌、地基砂土液化等事故对周围海洋工程造成破坏,这是一种值得注意的不良工程地质现象<sup>[30]</sup>。

### 1.4 浅埋基岩

浅埋基岩是指距海床 15 m 之内的不规则基

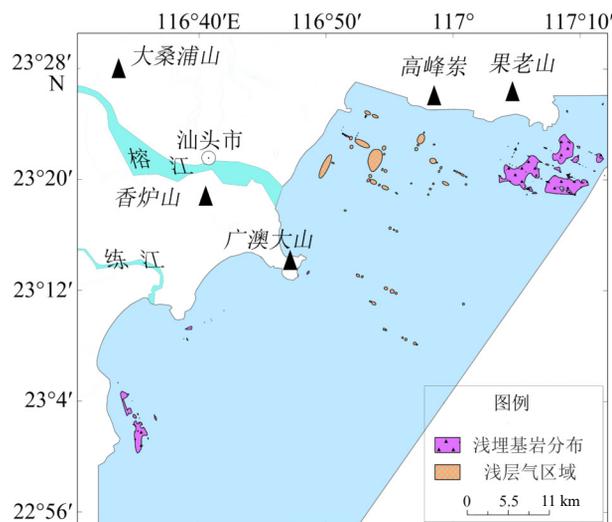


图 4 研究区浅层气及浅埋基岩分布  
Fig.4 Distribution of shallow gas and shallow bedrock in the study area

岩。不规则的浅基岩及其露头经常在基岩海岸发展。对于工程构建,基岩是一个很好的持力层。但是,如果基岩表面由于其与周围岩石的岩性不平衡而波动不均匀,则承载能力将有所不同,这不利于选择工程基础和持力层。因此在进行海上工程项目时,应注意排查是否存在不规则浅埋基岩。

研究区近岸不规则浅埋基岩分布如图 4 所示,主要分布在沿岸区域和岛屿附近,特别是南澳岛偏东南部近岸海域,有成片的不规则浅埋基岩。

## 2 研究区灾害地质风险评价

### 2.1 评价思路及依据

地质灾害的诱发因素具有模糊性,通过模糊数学与层次分析相结合的方式,可以较好地量化研究区发生地质灾害的概率。首先通过专家打分法构造权重矩阵,再进行隶属度函数计算构造隶属度矩阵,最后通过构造矩阵\*隶属度矩阵得到综合评价矩阵,从而得到区域的风险程度。

### 2.2 评价流程

#### 2.2.1 权值确定

依据各指标两两对比的相对重要性,在 1—9 之间赋上相应的整数标值,其中奇数 1、3、5、7、9 分别代表指标 A 相对指标 B 具有同等重要、稍微重要、明显重要、强烈重要以及极端重要性,偶数 2、4、6、8 即代表奇数值相邻判断的中间值。

根据经验两两判断得到断层断距、古河道埋深等6个评价指标的相对重要性(表1)。

表1 评价指标权值判别  
Table 1 Evaluation index weight discrimination

	断层断距	断层活动时期	古河道埋深	古河道厚度	浅层气	浅埋基岩
断层断距	1	3	3	5	8	8
断层活动时期	1/3	1	1	3	6	6
古河道埋深	1/3	1	1	3	6	6
古河道厚度	1/5	1/3	1/3	1	4	4
浅层气	1/8	1/6	1/6	1/4	1	1
浅埋基岩	1/8	1/6	1/6	1/4	1	1

通过表1的值,得到权值矩阵 $P$ :

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 & 5 & 8 & 8 \\ 1/3 & 1 & 1 & 3 & 6 & 6 \\ 1/3 & 1 & 1 & 3 & 6 & 6 \\ 1/5 & 1/3 & 1/3 & 1 & 4 & 4 \\ 1/8 & 1/6 & 1/6 & 1/4 & 1 & 1 \\ 1/8 & 1/6 & 1/6 & 1/4 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

在软件 MATLAB 中将矩阵  $P$ , 通过  $[X, D]=\text{eig}(P)$  求得矩阵  $P$  的所有特征值, 构成对角矩阵  $D$ , 并产生矩阵  $X$ ,  $X$  各列是相应的特征向量, 最后将最大特征值所对应的特征向量  $W$  标准化, 即:

$$W_i = W_i / \left( \sum_{i=1}^6 W_i \right) \quad (1)$$

从而得到其特征向量, 作为各项指标的权值。

经过计算得到各项指标权值如表2。

表2 各项指标权值  
Table 2 Weight of each indicator

断层断距	断层活动时期	古河道埋深	古河道厚度	浅层气	浅埋基岩
0.43	0.21	0.21	0.09	0.03	0.03

最大特征值:  $\lambda_{\max}=6.1955$

得到的权值需要进行一致性检验, 根据检验公式得到的指标 CR 为 0.032, 符合要求, 结果具有合理性。

各项指标权值分配集  $A$ :

$$A = (0.43, 0.21, 0.21, 0.09, 0.03, 0.03)$$

## 2.2.2 隶属度矩阵的建立

当赋予各评价指标权值之后, 根据研究区海岸带范围, 综合考虑了整个研究区物探测线的分布间隔, 海门湾—广澳湾海域为  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ , 而南澳岛近岸海域为  $2 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ , 对于南澳岛附近的海域, 如果栅格像元大小小于  $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$  将没有意义, 因此建立  $2000 \text{ m} \times 2000 \text{ m}$  的栅格单元。在上述工作基础

上, 建立隶属度矩阵。

首先根据模糊数学原理以及上述的6个评价指标得到综合评价因素集:

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\} \quad (2)$$

断层断距、断层活动时期、古河道埋深、古河道厚度、浅层气、浅埋基岩依次对应  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$ 、 $u_4$ 、 $u_5$ 、 $u_6$ 。再根据从低到高5个风险等级给出评价风险集:

$$V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} \quad (3)$$

低风险、较低风险、中风险、较高风险、高风险等级依次对应  $V_1$ — $V_5$ 。

由于海上灾害地质环境复杂, 有的指标属于非连续性影响因子, 所以需要设置一组数值来量化这种因子的影响程度。对于连续性影响因子则采用正态性隶属函数来确定, 此种函数能恰当地将信息模糊化。同时根据前人的经验, 在断层附近设置缓冲区以表示断层的影响范围, 全新世活动断层的缓冲区为  $3 \text{ km}$ , 更新世活动断层为  $1 \text{ km}$ 。各评价指标预分级标准见表3。

表3 评价指标分级  
Table 3 Grading of assessment indices

评价指标	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$
$u_1/\text{m}$	0~2	2~8	8~14	14~24	>24
$u_2$	0	1	2~3	4~5	6
$u_3/\text{m}$	>24	19~24	15~19	12~15	0~12
$u_4/\text{m}$	0~1	1~4	4~7	7~11	>11
$u_5/\text{km}^2$	0~0.08	0.08~0.28	0.28~0.58	0.58~1.30	>1.30
$u_6/\text{m}$	>13	12~13	10~12	5~10	<5

评价指标体系中主要的3个连续性因子(断层断距、古河道埋深、古河道厚度)在研究区的分布情况见图5—7, 等值区间按表3取值, 另外断层重叠部分会叠加每条断层的断距。断距分布范围主要在海门湾—广澳湾海域以及南澳岛西南附近海域, 研究区大部分区域断距在  $2 \text{ m}$  以内, 其次为  $2 \sim 14 \text{ m}$ , 断距大于  $14 \text{ m}$  的区域主要靠近海门湾—广澳湾中心, 断距最大为  $36 \text{ m}$ ; 研究区河道厚度大部分在  $4 \text{ m}$  以内, 厚度较大的区域大致在广澳大山向海的延伸线上, 以 NNW-SSE 向展布, 最大厚度  $30 \text{ m}$ ; 研究区大部分区域河道埋藏深度超过  $24 \text{ m}$  或者无河道埋藏, 其次为埋深在  $0 \sim 15 \text{ m}$  (不包括  $0$ ) 的区域, 埋深在  $15 \sim 19 \text{ m}$  的区域同样以 NNW-SSE 向大致处在广澳大山向海的延伸线上, 这部分区域与

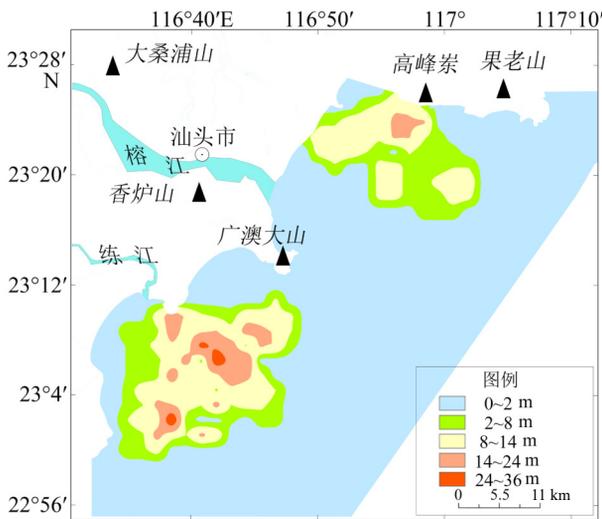


图 5 断层断距分布

Fig.5 Distribution of fault offset

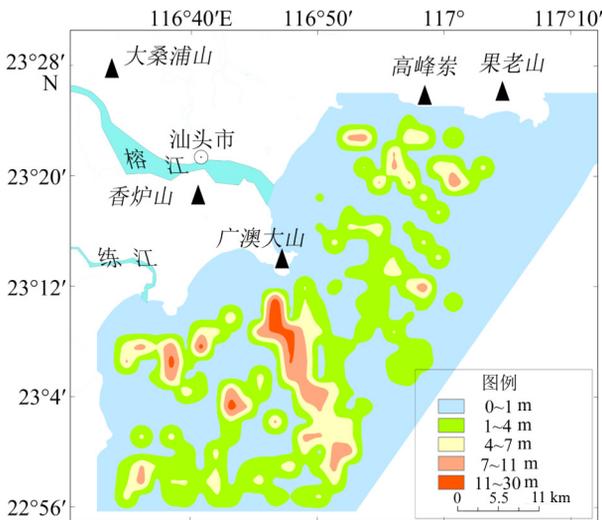


图 6 河道厚度分布

Fig.6 Distribution of channel thickness

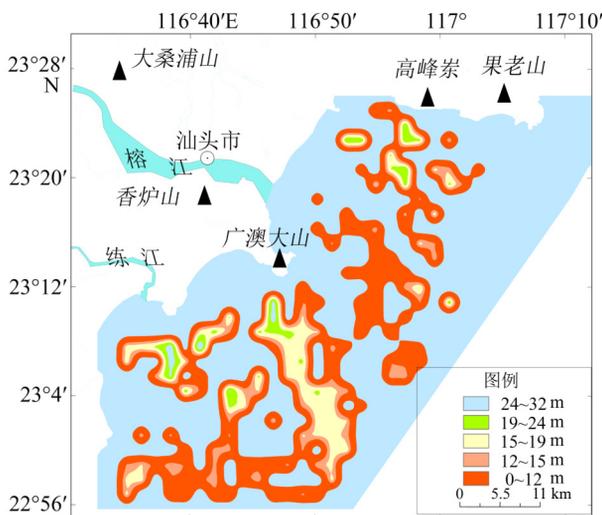


图 7 河道埋深分布

Fig.7 Distribution of river burial depth

河道厚度较大的区域基本重合。

评价指标中连续性影响因子有 5 个, 非连续性影响因子 1 个。根据研究区非连续影响因子的特点, 分别作了适合于评价方法的调整。断层活动时期分为在全新世有活动的生长断层与在全新世无活动的生长断层, 由于这属于定性的指标, 进入评价模型首先需要将其量化, 所以根据经验将全新世活动的断层赋值 2, 全新世无活动的生长断层赋值 1, 在断层重叠的区域, 将赋值叠加。经过叠加, 得到断层活动时期在研究区的定量指标(图 8), 整体数值为 0~6, 将其分为 5 个等级, 同时设置一组满足模糊数学条件的数值来表示每个区间指标对各等级的隶属度, 如表 4 所示。

计算隶属度的正态分布函数:

$$f(X) = e^{-\frac{0.693(\mu_i - 2x + \mu_{i-1})^2}{(\mu_i - \mu_{i-1})^2}} \quad (4)$$

式中,  $X=(1,2,3,4,5)$ ,  $(\mu_i + \mu_{i-1})/2$  为各等级的界限值,  $x$  为某一评价因子在像元的实际值, 当  $x = \mu_i$  时,  $f(X) = 0.5$ , 则各评价指标属于各评价级别的隶属度函数分别为:  $f(1)$ 、 $f(2)$ 、 $f(3)$ 、 $f(4)$ 、 $f(5)$ 。

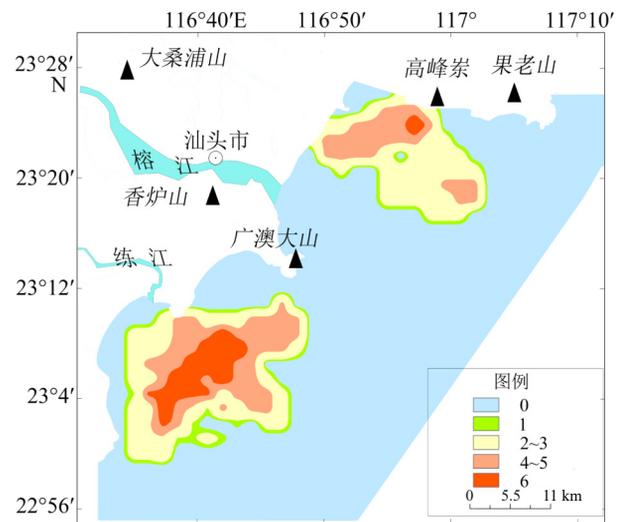


图 8 断层活动时期定量取值分布

Fig.8 Quantitative value distribution of fault activity period

表 4 断层活动时期影响因子

Table 4 Influence factors of fault action period

风险级别	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$
0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0
2~3	0	0	1	0	0
4~5	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	1

在建立评价矩阵的过程中,由于各评价指标在研究区都有较多的空白区,即值为0的区域,如将其直接计入 $f(1)$ ,因其 $f(1)$ 的隶属度为1,大概率大于其他等级的隶属度,会导致评价结果存在大量低风险区,无法将完全无灾害类型的区域与存在相对较低权重的灾害类型而缺失权重相对高的灾害类型的区域区分开。因此针对这一状况对隶属度函数作了调整,具体调整:

$$f(1) = \begin{cases} 1, & 0 < x < (\mu_1 + \mu_0) / 2 \\ e^{-0.693 \frac{(\mu_1 + \mu_0 - 2x)^2}{(\mu_1 - \mu_0)^2}}, & (\mu_1 + \mu_0) / 2 \leq x < \mu_1 \\ 1 - f(2), & \mu_1 \leq x < (\mu_1 + \mu_2) / 2 \\ 0, & x \geq (\mu_1 + \mu_2) / 2 \text{ 或 } x = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$f(2)$ 、 $f(3)$ 、 $f(4)$  不变,去掉 $f(5)$ 。为了能更直观地反映这种调整,本文以河道厚度因子为例:

$$f(1) = \begin{cases} 1, & 0 < x \leq 1 \\ e^{-0.693 \frac{(2-2x)^2}{4}}, & 1 < x \leq 2 \\ 1 - f(2), & 2 < x \leq 4 \\ 0, & x > 4 \text{ 或 } x = 0 \end{cases}$$

$$f(2) = \begin{cases} 0, & x \leq 1 \\ 1 - f(1), & 1 < x \leq 2 \\ e^{-0.693 \frac{(8-2x)^2}{16}}, & 2 < x \leq 6 \\ 1 - f(3), & 6 < x \leq 7 \\ 0, & x > 7 \end{cases}$$

$$f(3) = \begin{cases} 0, & x \leq 4 \\ 1 - f(2), & 4 < x \leq 6 \\ e^{-0.693 \frac{(14-2x)^2}{4}}, & 6 < x \leq 8 \\ 1 - f(4), & 8 < x \leq 11 \\ 0, & x > 11 \end{cases}$$

$$f(4) = \begin{cases} 0, & x \leq 7 \\ 1 - f(3), & 7 < x \leq 8 \\ e^{-0.693 \frac{(22-2x)^2}{36}}, & 8 < x \leq 11 \\ 0, & x > 11 \end{cases}$$

评价集  $c_i = \{c_{i1}, c_{i2}, c_{i3}, c_{i4}\}$  为评价集  $V$  的模糊子集,  $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。

各经过划分的单元格的评价矩阵  $C$ :

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{61} & \cdots & c_{64} \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 2.2.3 模糊综合评价

$$R = A * C = (r_1, r_2, r_3, r_4) \quad (7)$$

其中 $*$ 为模糊变换算子, $R$ 为综合评价结果。

上式结果是一组分别对应4个等级的隶属度值。取其中最大的值对应的等级作为该单元格的风险等级。同时,由于在隶属度函数上作了修改,研究区存在 $r_1, r_2, r_3, r_4$ 皆为0的情况,本文决定将满足这种条件的作为一个风险等级。所以5个灾害地质风险等级按此规则划分:矩阵 $R$ 为零矩阵的为低风险等级;若 $r_1, r_2, r_3, r_4$ 其一为最大值,则按较低风险、中风险、较高风险、高风险等级依次对应。

本文以区块D325为例,该区块的评价结果 $R=(0, 0, 0.24, 0.40)$ ,因此根据规则,该区块的风险等级为高风险等级。

### 2.2.4 评价结果讨论

结合图9和表5可以看出,汕头市近岸海域接近一般的海域属于低风险区,这些区域为不含任何一种参与评价的灾害地质类型的地区。超过研究区20%的区域为中风险区,为占比第二高的风险区,集中分布在研究区的东北部,此区域有多条全新世活动的生长断层,也有多条全新世的埋藏古河道。此外在研究区西南部的海门湾—广澳湾也有零散分布,主要受埋藏古河道影响。较高风险与高风险的区域大小接近,分布的区域也较为一致,一部分集中在研究区中部,沿着榕江入海口展布,一部分集中于海门湾—广澳湾内,还有一部分分布在研究区最南部。研究区中部以及南部的高风险区主要受埋深浅的埋藏古河道控制,海门湾—广澳湾内的高风险区则是受全新世活动的生长断层控制,

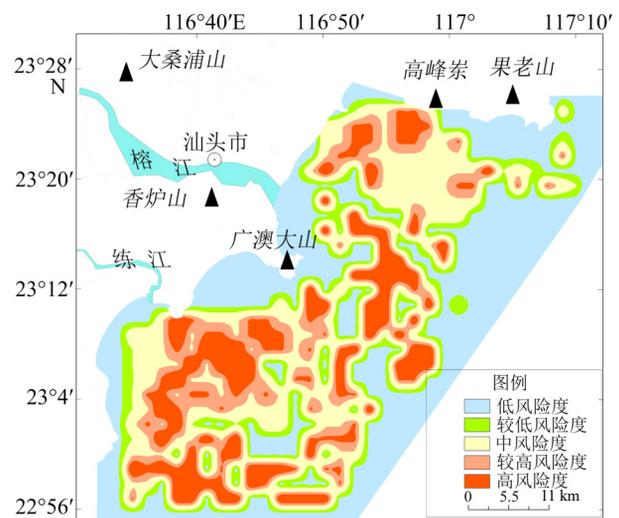


图9 评价结果

Fig.9 Assessment results

表 5 各风险等级评价单元个数及占比  
Table 5 Number and proportion of risk assessment units

风险等级	评价单元/个	百分比/%
低风险	233	46.05
较低风险	19	3.75
中风险	107	21.75
较高风险	72	14.23
高风险	75	14.82

分布在断层活动强、断距大的区域。风险较低的区域在整个研究区分布最少,一部分为河道埋深浅、厚度小,断距很小的区域,另一部分为只含有一定浅层气或只有浅埋基岩发育的区域,零星分布在研究区。

断层断距(图 10)和河道埋深(图 11)单因子分级分别根据隶属度函数和最大隶属度原则得到的各自单因子的评价分级。从这两个图可以更直观地看出断距以及河道埋深单因子对于研究区整体风险的影响,风险较高的区域主要受断层、埋藏古河道灾害地质因素的影响,位于断距较大、河道埋深较浅的区域。活动断层断距较大的区域工程地质条件较差,有潜在的地震风险;埋深较浅的埋藏古河道造成区域地层承载力不均等不良工程地质环境,故这两种区域成为研究区内风险最高的区域。

通过统计断距及河道埋深单因子高风险等级区块的个数,再提取出各自与综合评价结果一致为高风险等级的区块(统计结果如表 6 所示),经过计算,断距及河道埋深单因子分级结果与综合评价结果一致为高风险等级单元的个数分别占各自单因

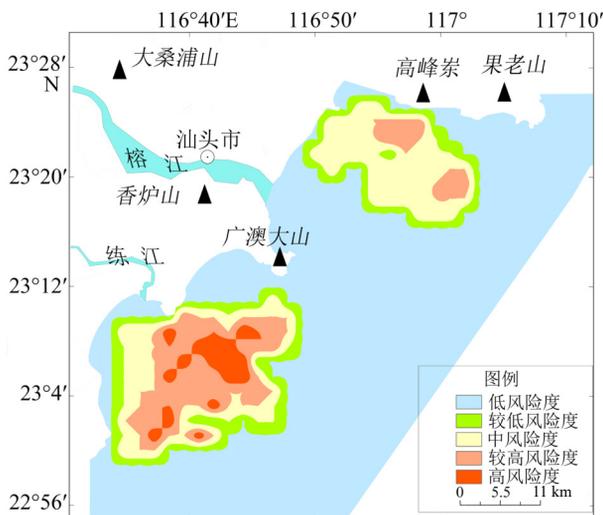


图 10 断层断距单因子分级

Fig.10 Single-factor classification of fault distance

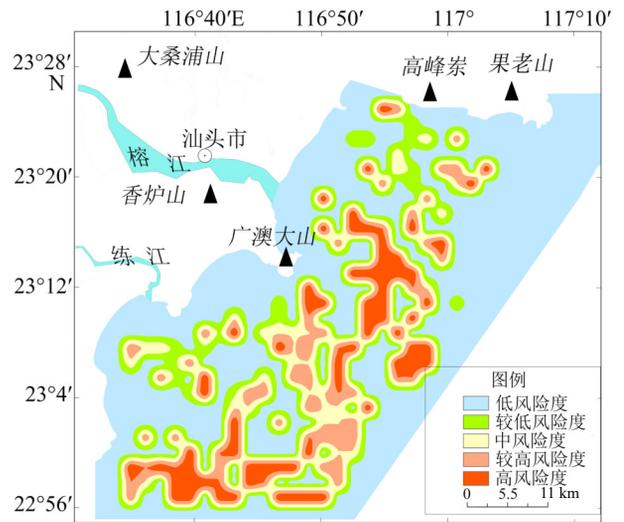


图 11 河道埋深单因子分级

Fig.11 Single-factor classification of river burial depth

表 6 断距及河道埋深单因子高风险等级单元个数

Table 6 The number of single factor high risk grade units of fault distance and river buried depth

风险等级	断距单因子	河道埋深单因子
高风险等级	16个	68个
与综合评价一致为高风险等级	13个	60个

子高风险等级单元总数的 81.25% 与 88.24%, 显示出这两个单因子对综合评价下的高风险区域有良好的相关性,因此海上工程灾害地质风险防控需要格外注意河道埋深浅、断层断距大的区域。另外,河道埋深单因子与综合评价一致为高风险等级的单元为 60 个,综合评价高风险等级单元总数为 75 个,占比为 80%,是控制研究区高风险区域分布的第一因素。而断距单因子此项的占比为 17.33%,是影响研究区高风险区域分布的较次要因素,其影响受限于断层的分布,集中在断层较多的海门湾—广澳湾内。风险分区整体受断层和古河道影响较大,在多种灾害因素作用的区域,风险度基本与断距的分级吻合。总的来说,汕头市近岸海域的工程地质条件较好,灾害地质低风险区的工程适宜性良好,而高风险区则需要先做更详细的勘察或避开此类区域。

### 3 结论

(1) 基于单道地震数据资料,将识别的断层按活动时期和断层性质分成两种类型:全新世仍有活动的生长断层、晚更新世有活动的生长断层。

(2) 活动断层与埋藏古河道是研究区灾害地质

风险的两个主控类型,断层断距与古河道埋深是风险性评价的两个主要指标,断距越大,古河道埋深越浅,灾害地质风险越高。

(3) 汕头市近岸大部分海域属于工程地质条件低风险区或中风险区,在榕江外河口、海门湾—广澳湾内的全新世活动断层附近以及研究区南部早期三角洲发育的区域属于较高—高风险区。

### 参考文献 (References)

- [1] 马胜中. 北部湾广西近岸海洋地质灾害类型及分布规律[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2011. [MA Shengzhong. Marine geological disaster factors in Beibu Gulf inshore of Guangxi Province[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2011.]
- [2] Carpenter G B, Mccarthy J C. Hazards analysis on the Atlantic outer continental shelf[C]//Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference. Houston: OTC, 1980: 419-424.
- [3] 李平. 黄河三角洲近岸海底浅表层典型灾害地质类型发育机制及其分区[D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2015. [LI Ping. Formation mechanism of typical geological hazards and division in the seabed surface and sub-bottom of the yellow river delta inshore[D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2015.]
- [4] 刘守全, 刘锡清, 王圣洁, 等. 南海灾害地质类型及分区[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(4): 39-44. [LIU Shouquan, LIU Xiqing, WHANG Shengjie, et al. Kinds of hazardous geology and division in South China Sea [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2000, 11(4): 39-44.]
- [5] 陈俊仁, 李廷桓. 南海地质灾害类型与分布规律[J]. 地质学报, 1993, 67(1): 76-85. [CHEN Junren, LI Tinghuan. Types and distribution of geological hazards in the South China Sea [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1993, 67(1): 76-85.]
- [6] 张虎男, 陈伟光, 黄坤荣, 等. 华南沿海新构造运动与地质环境[M]. 北京: 地震出版社, 1990: 262-264. [ZHANG Hu'nan, CHEN Weiguang, HUANG Kunrong, et al. Neotectonics and Geological Settings of the South China Coasts[M]. Beijing: Seismological Press, 1990: 262-264.]
- [7] 张虎男. 南海地震活动与区域稳定性评价[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 456-493. [ZHANG Hu'nan. Seismicity and Regional Stability Evaluation of South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2002: 456-493.]
- [8] 詹文欢, 钟建强, 刘以宣. 华南沿海地质灾害[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 24-71. [ZHAN Wenhuan, ZHONG Jianqiang, LIU Yixuan. Geological Hazards of South China Coast[M]. Beijing: Science Press, 1996: 24-71.]
- [9] 詹文欢, 张乔民, 孙宗勋, 等. 南澎列岛及邻近海域地质地貌与灾害地质分析[J]. 热带海洋学报, 2002, 21(1): 11-17. [ZHAN Wenhuan, ZHANG Qiaomin, SUN Zongxun, et al. Geologic and geomorphologic characteristics and geological hazards of Nanpeng archipelago and adjacent waters, northeastern South China Sea [J]. *Journal of the Tropical Oceanography*, 2002, 21(1): 11-17.]
- [10] 周英. 汕头市大陆海岸的主要地质灾害[J]. 热带地理, 2008, 28(4): 331-337. [ZHOU Ying. Primary geological hazards to the continental coast in Shantou [J]. *Tropical Geography*, 2008, 28(4): 331-337.]
- [11] 广东省海岸带和海涂资源综合调查大队. 广东省海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1987: 10-108, 140, 379. [Guangdong Coast and Coast Resources Survey Team. Comprehensive Investigation Report on Coastal Zone and Marine Resources in Guangdong Province[M]. Beijing: China Ocean Press, 1987: 10-108, 140, 379.]
- [12] 吴正, 黄山, 胡守春, 等. 华南海岸风沙地貌研究[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 31-33. [WU Zheng, HUANG Shan, HU Shouchun, et al. Research on the Landforms of the Wind-Drift Sand in South China Coast[M]. Beijing: Science Press, 1995: 31-33.]
- [13] 黄镇国, 谢先德, 范锦春, 等. 广东海平面变化及其影响与对策[M]. 广州: 广东科技出版社, 2000. [HUANG Zhenguo, XIE Xiande, FAN Jinchun, et al. The Sea Level Change in Guangdong and its Influence and Countermeasures[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2000.]
- [14] 张志忠, 顾兆峰, 刘锡清, 等. 南黄海灾害地质及地质环境演变[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(5): 15-22. [ZHANG Zhizhong, GU Zhaofeng, LIU Xiqing, et al. Hazardous geology and marine geologic environmental evolution in the South Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(5): 15-22.]
- [15] 宋亚娅, 张航泊. 基于加权模糊概率的地质灾害易发性评价模型研究[J]. 人民长江, 2020, 51(11): 109-115. [SONG Yaya, ZHANG Hangbo. Study on geological hazards susceptibility assessment based on weighted fuzzy probability exponential model [J]. *Yangtze River*, 2020, 51(11): 109-115.]
- [16] 陈哲锋, 吴静, 郭玉斌, 等. 层次分析与模糊数学综合评价法在矿山环境评价中的应用[J]. 华东地质, 2018, 39(4): 305-310. [CHEN Zhefeng, WU Jing, GUO Yubin, et al. Application of AHP and fuzzy mathematics in comprehensive assessment of mine environment [J]. *East China Geology*, 2018, 39(4): 305-310.]
- [17] 宋玉鹏, 孙永福, 杜星, 等. 渤海海域海底地质灾害危险性区划[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 140-146. [SONG Yupeng, SUN Yongfu, DU Xing, et al. Risk zonation on the submarine geological hazards in Bohai Sea [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(3): 140-146.]
- [18] 杨康, 薛喜成, 李识博. 信息量融入GA优化SVM模型下的地质灾害易发性评价[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(3): 109-118. [YANG Kang, XUE Xicheng, LI Shibo. Geological hazard susceptibility assessment by incorporating information value into GA optimized SVM model [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2022, 29(3): 109-118.]
- [19] 陈水满, 赵辉龙, 许震, 等. 基于神经网络模型的福建南平市滑坡危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 133-140. [CHEN Shuiman, ZHAO Huilong, XU Zhen, et al. Landslide risk assessment in Nanping City based on artificial neural networks model [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(2): 133-140.]
- [20] 董津城. 发震断裂的安全距离规定简介:《建筑抗震设计规范》修订

- 简介(五)[J]. 工程抗震, 1999, 4(2): 14-16. [DONG Jincheng. Brief introduction to the stipulations related safety distance from earthquake causative fault [J]. Earthquake Resistant Engineering, 1999, 4(2): 14-16.]
- [21] Lv H, Bao D, Wang Z, et al. Identification and characterization of Karst Ancient Channel based on Seismic Multi-attribute[C]//Proceedings of the SPG/SEG Nanjing 2020 International Geophysical Conference. Nanjing: Editorial Department of Petroleum Geophysical Exploration, 2020: 836-839.
- [22] Kemp J, Pietsch T, Gontz A, et al. Lacustrine-fluvial interactions in Australia's Riverine Plains [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 166: 352-362.
- [23] Cserkés-Nagy Á, Thamó-Bozsó E, Tóth T, et al. Reconstruction of a Pleistocene meandering river in East Hungary by VHR seismic images, and its climatic implications [J]. *Geomorphology*, 2012, 153-154: 205-218.
- [24] Li G X, Liu Y, Yang Z G, et al. Ancient Changjiang channel system in the East China Sea continental shelf during the last glaciation [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(11): 1972-1978.
- [25] Mullins H T, Nagel D K. High-frequency seismic data detect shallow hydrocarbons [J]. *World Oil*, 1983, 197(6): 133-134, 136, 138.
- [26] Boillot G. Géologie de la Manche Occidentale: Fonds Rocheux, Dépôts Quaternaires, Sédiments Actuels[M]. Paris: Masson, 1964.
- [27] Ren J F, Cheng C, Xiong P F, et al. Sand-rich gas hydrate and shallow gas systems in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 215: 110630.
- [28] Lei Y N, Sun J, Wang G J. Simulation of shallow gas invasion process during deepwater drilling and its control measures [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2022, 21(3): 707-718.
- [29] Marcon L, Sotiri K, Bleninger T, et al. Acoustic mapping of gas stored in sediments of shallow aquatic systems linked to methane production and ebullition patterns [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 876540.
- [30] 王忆非. 辽东湾北部工程地质条件评价[D]. 国家海洋局第一海洋研究所硕士学位论文, 2014. [WANG Yifei. Assessment on engineering geological suitability in northern Liaodong Bay[D]. Master Dissertation of The First Institute of Oceanography, SOA, 2014.]