

冲绳海槽中段海底灾害地质类型及 海底稳定性评价

马秀冬^{1,2,3}, 李 萍^{1,2,3*}, 徐元芹^{1,2,3}, 高 珊^{1,2,3}

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061;
3. 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试验室, 山东 青岛 266061)

摘 要:通过分析研究区各类综合调查数据, 识别地质灾害类型, 编制海底灾害地质图; 建立由地震烈度区划指标、海底灾害地质类指标、海底地貌类指标、海底沉积物类型指标组成的评价因素集, 建立与评价因素集匹配的评语集。运用模糊信息化及贴近度分析等综合性方法获得评价因子对风险影响程度的隶属度值, 以层次分析法确定评价因子间权重值。运用模糊数学原理构建模糊综合评价模型, 以 $6' \times 6'$ 为网格大小, 对冲绳海槽中段及附近海域海底 900 个评价单元进行模糊综合运算及评价, 并绘制了海底稳定性区划图。以期今后为该区资源的开发、防灾减灾等提供基础资料。

关键词:海底灾害地质; 评价因素; 模糊评价; 稳定性区划

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2018)01-0079-09

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2018.01.007

在西太平洋边缘海中, 东海是唯一一个至今还未获得天然气水合物样品的边缘海^[1]。而天然气水合物的资源潜力被认为是迄今所有化石能源含碳量的两倍, 具有能量密度高、分布范围广的特点^[2]。现今大量对东海陆坡及冲绳海槽区的研究显示, 该区满足天然气水合物的成藏条件, 包括温度、压力等, 存在天然气水合物的可能性很大^[1-7]。随着陆上资源的日益衰竭, 对海洋资源的勘探与开发的竞争会日趋激烈, 而东海陆坡及冲绳海槽因其特殊的地理位置及蕴含的资源潜力, 将越发引起重视。

国内外许多专家学者对东海陆坡及冲绳海槽进行了大量的调查和研究工作, 主要集中在地形地貌、地球物理、地球化学、构造、沉积及古环境等, 并取得了大量有意义的成果^[8-15], 然而对于海底稳定性的研究则比较少。随着国家海洋战略向着深远海转移、深水油田和深海工程建设的日益增多, 海洋的开发向着深度和广度推进^[16], 海底稳定性研究对海洋开发的意义日趋重要。

1 研究区概况

研究区位于东海外陆架中部和冲绳海槽中段, 包括部分东海外陆架区、冲绳海槽中段西侧槽坡区、冲绳海槽中段和部分冲绳海槽中段东坡(图 1)。研究区内东海外陆架主要为外陆架残留砂平原, 潮流沙脊发育, 外陆架北窄南宽, 等深线走向总体与我国大陆岸线平行。冲绳海槽西侧槽坡(东海陆坡), 坡顶与东海大陆架外缘坡折线相重合, 底界为大陆坡向海槽盆地自然延伸坡度明显转缓的地方^[9]。东海陆坡地貌主要受构造

收稿日期: 2017-03-07

资助项目: 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府海洋科学研究中心联合资助项目——海洋地质过程与环境(U1606401); 全球变化与海气相互作用专项——东亚大陆边缘海底峡谷的物质输运与破坏性浊流沉积(GASI-GEOGE-05-03); 山东省自然科学基金项目——莱州湾海区沉积物的微观结构对其宏观物理力学性质的影响特征研究(BS2015HZ009)

作者简介: 马秀冬(1992-), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事海洋灾害地质和工程地质方面研究。E-mail: maxd92@126.com

* 通讯作者: 李 萍(1972-), 女, 内蒙古赤峰人, 研究员, 博士, 主要从事海洋灾害地质和工程地质方面研究。E-mail: liping@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

的控制,是一个不规则的大陆坡,主要表现为陆坡坡度大、地形变化复杂,属侵蚀堆积型陆坡斜坡。东海陆架坡折线附近有陆架边缘断裂发育,沿陆架边缘断裂往往发育边缘断裂沟,它们沿等深线延伸,位于陆架坡折线之下,剖面上常呈“V”形深切沟谷。在 $27^{\circ}42'N$ 以南陆坡发育了较多海底峡谷,且峡谷规模较大,多分支。在大型海底峡谷附近海底侵蚀作用强烈、地形崎岖、坡度较大(平均坡度为 $2^{\circ}41'56.1''$)^[10,17]。冲绳海槽中段槽底较为平坦,中轴部位发育中央地堑^[18]。冲绳海槽中段东坡由琉球岛弧西侧的岛屿、礁石、隆起等地形组成,地形非常复杂^[19]。

冲绳海槽处于欧亚板块和菲律宾海板块相互作用的交汇地带,构造、地震活动强烈。研究区海槽槽底和海槽东坡处构造活动活跃带,地震发生频繁,地震加速度值较大,研究区海槽东坡为地震烈度区划 8 级区、海槽槽底区为地震烈度区划 7 级区、东海外陆架区为地震烈度区划 6 级区以及研究区西北边界处小范围的地震烈度区划 5 级区。

研究区海底表层沉积物类型包括:黏土、粉砂质黏土、砂-粉砂-黏土、黏土质粉砂、细砂、粉砂质砂、砂质粉砂、砂、珊瑚礁、岩石、砾石十一种类型。其中黏土质粉砂分布面积最大,分布在海槽槽底以及海槽东坡除台地周围以外的区域;细砂分布在研究区范围内的东海外陆架区;粉砂质砂分布在研究区北部东海外陆架及邻近的陆坡区。研究区内东海陆架除北部外陆坡上的沉积物为砂质粉砂;在 $27^{\circ}\sim 28^{\circ}N$ 的槽底区沿海槽走向分布有一长条状的粉砂质黏土;研究区东南半深海台地区分布的表层沉积物为砂以及岩石;其他表层沉积分布面积均较小。

2 研究区海底灾害地质类型

通过对研究区调查数据的综合性分析,确定了研究区海底主要灾害地质类型(图 2),有潮流沙脊、海底峡谷、古三角洲、海底滑坡、埋藏古河道、冲刷槽、浅层气、浊积扇、海槽边界断裂、裂谷十种灾害地质类型。数据来源于我国近海海洋综合调查与评价专项。

潮流沙脊、海底峡谷、海底滑坡是研究区内危险性最高的 3 种灾害地质类型且分布面积较大。潮流沙脊主要分布在研究区西北部,位于东海外陆架之上,具有较高的活动性,因其活动时会造成海底大规模的泥沙移动,对海底造成巨大的破坏,将会摧毁活动范围内的各种海洋设施及海底设施,造成巨大损失^[20]。海底峡谷主要分布在研究区内陆坡及台地边坡附近,分布在陆坡之上的海底峡谷主要根据陆坡的走向分布,集中在研究区中部及西南部;在研究区东南半深海台地周围也分布有海底峡谷。海底峡谷分枝较多,是陆源沉积物向海槽搬运的天然运输通道^[21],由于其地形地貌的复杂性及谷内物质的运输将对峡谷附近的海底稳定性产生重要影响;海底滑坡主要分布在研究区西南部,海底峡谷密集发育的陆坡区,巨厚的沉积物发生滑动时将会产生巨大的破坏力。

浊积扇、裂谷、海槽边界断裂是研究区内危险性较高的 3 种灾害地质类型。浊积扇位于研究区西南部的陆坡坡脚与该处海底峡谷伴生。因其沉积环境决定了上覆沉积物较松散,承载力差,建设在其上的工程设施

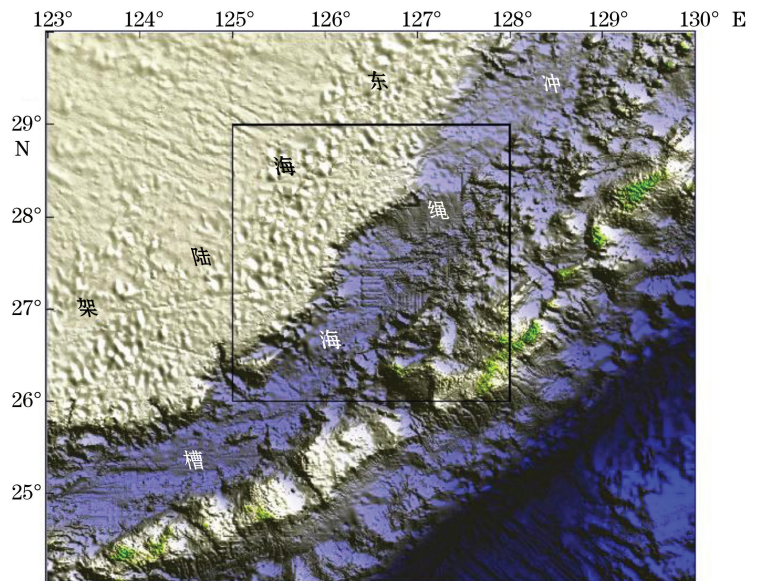


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location map of the study area

将极易发生倾覆,沉陷等;裂谷、海槽边界断裂为构造作用产生一系列断裂,海槽边界断裂主要位于研究区中部及东南部,与槽底走向相一致,走向 NE;裂谷轴主要分布在研究区东南侧,走向 NE-SW。断裂对其附近海底的稳定性将产生较大影响,易发生崩塌、塌陷等灾害。

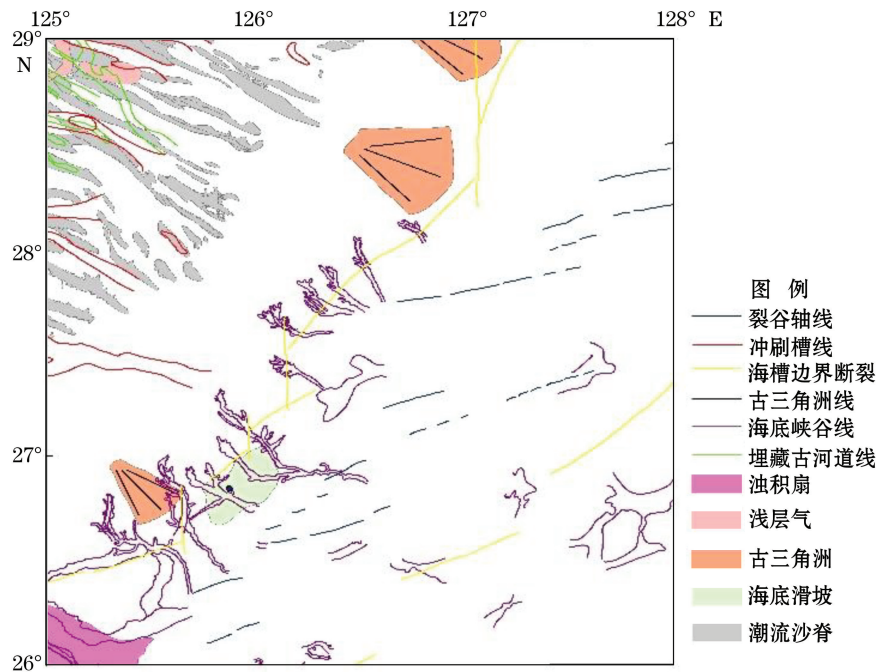


图 2 研究区灾害地质分布图

Fig.2 Distribution map of geologic hazards

冲刷槽、浅层气是研究区内危险性中等的灾害地质类型。浅层气分布在研究区西北部,东海外陆架之上,外陆架早期接受的陆源沉积物为其提供了孕灾环境。在海洋工程施工过程中被钻透,将会导致海底迅速塌陷,会使海洋工程设施迅速倾斜、倒塌有时甚至会发生火灾^[20];冲刷槽主要分布在研究区西北部东海外陆架区与潮流沙脊大致相间分布。失去活动性的冲刷槽被松散沉积物充填,承载力低不利于海洋工程设施的安全与稳定性,依然在活动的冲刷槽对槽底的冲刷较为强烈,沟壁较陡,稳定性差。

埋藏古河道分布在研究区西北部,位于东海外陆架之上;古三角洲分布在陆坡区,在研究区北部有两处,西南部一处。这 2 种灾害地质因子因其沉积速率快、沉积物松散、承载力差,当在这些地方建设海洋工程设施时会因地基的不稳定,使工程设施倾斜甚至倾倒。这 2 种灾害地质类型活动性差、数量少,探明具体位置进行回避即可避免发生损失。

3 海底稳定性评价

海底稳定性可以被视为海洋开发建设活动的制约因素;海底稳定性差,制约程度高,开发风险高^[22];海底稳定性好,制约程度低,开发风险低。海底稳定性受多种类型因素的影响,同时影响因素本身具有复杂性和不确定性,因此,海底稳定性评价结果并不具有绝对的含义。由于影响海底稳定性的因素及海底环境的复杂性,加之人们主观上的差异,不易对海底稳定性得出一致性评价,此外稳定性分级的界限也很模糊,因此,综合前人的经验和相关的评价结果,采用模糊数学的方法来进行海底稳定性的评价工作是可行的^[22-24]。

本文采用模糊数学原理,建立由多种影响因素组成的评价因素集 A,构建与影响因素集相匹配的模糊评语集 X。通过模糊信息化确定各单一因素对评审等级的归属程度;构建评价因素集 A 到评语集 X 的模

糊评价矩阵 R 。通过模糊权值矩阵计算各因素在评价目标中的权重值 W ,最后运用模糊运算矩阵计算出定量解值 B ,选取优势等级作为评价单元的稳定性值。

3.1 评价指标

评价指标包括孕灾背景指标与灾害地质因子指标。孕灾背景指标包括地貌类型指标、地震区划指标和海底沉积物类型指标;灾害地质因子指标为灾害地质类型指标。在确定评价指标时,依据各指标特性、海底灾害地质环境特点以及其危险性程度,通过对指标的综合考虑和统计分析以及参考海洋灾害地质类型分类体系^[25]进行了分级,将4类指标各划分为5个等级。这4类5级评价指标构成研究区海底稳定性评价指标体系(表1)。评级指标均采用矢量化的地图数据,数据来源于比例尺为1:500 000的海底地质灾害图、海底地貌图、海底沉积物类型图和地震烈度区划图。

根据4类评价指标,构成海底稳定性评价因素集 A :

$$A = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}。 \quad (1)$$

式中: a_1 为地震烈度区划类指标, a_2 为灾害地质类指标, a_3 为地貌区划类指标, a_4 为沉积物类指标。

表1 海底稳定性评价指标体系及分级

Table 1 Assessment index system and its classification for Submarine stability

指标体系	地震区划类	灾害地质类	地貌区划类	沉积物类
1级	地震动峰值加速度值=0.05g, 相当于5级地震区	古三角洲	陆架平原、浅滩	岩石、砾石、岩石、 珊瑚礁
2级	地震动峰值加速度值=0.1g, 相当于6级地震区划区	埋藏古河道	海盆、浊积平原	细砂
3级	地震动峰值加速度值=0.15g, 相当于地震区划7级区	冲刷槽、浅层气	海台	粉砂质砂、砂质粉砂、 砂-粉砂-黏土
4级	地震动峰值加速度值=0.2g, 相当于地震区划8级区	浊积扇、裂谷、 海槽边界断裂	海山海丘、海岭	黏土质粉砂
5级	地震动峰值加速度值 $\geq 0.3g$, 相当于地震区划9级区	海底峡谷、潮流沙脊、 海底滑坡	潮流沙脊、陆坡	粉砂质黏土、黏土

3.2 海底稳定性程度分级

通过对评价目标特点的分析,结合常用的分级方法,进行海底稳定性分级。常用的分级方法为逻辑信息分类法和特征分类法,可将级别划分为3级或5级^[26]。本文采用五值逻辑分类体系^[22],将海底稳定性程度划分为5级,分别为不稳定、较不稳定、稳定性中等、较稳定和基本稳定五个等级区。

构成模糊评语集 X :

$$X = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}。 \quad (2)$$

式中: v_1 代表基本稳定, v_2 代表较稳定, v_3 代表稳定性中等, v_4 代表较不稳定, v_5 代表不稳定。

3.3 确定评价因子归属度

归属度反映的是评价因子对评语集的隶属程度。正态型隶属函数是将评价资料模糊信息化的较为恰当的函数,因海底环境具有复杂性,很难获得具有连续变化特点的函数来进行模糊信息化,为此引入贴近度分析方法,选取具有正态分布特点又比较适当的数值“0.0,0.2,0.5,0.8,1.0,0.8,0.5,0.2,0.0”来代替隶属度函数,用来表示评价因子对海底稳定性的影响程度。因此就可以把评价因子对稳定性的影响程度变为归属度

值(表 2)。归属度值的确定是通过例证法正太型函数分布规律以及专家经验法后进行实践检验逐步修改和完善后所得,为了便于模糊评价的计算,各评价因子相应的归属程度应基本相等^[22-24]。

表 2 海底稳定性评价指标隶属度值

Table 2 Subjection value of assessment indices for Submarine stability

稳定性等级	评价指标			
	地震区划类	灾害地质类	地貌区划类	沉积物类
基本稳定	1 级	1 级	1 级	1 级
v_1	0.15	0.15	0.15	0.15
较稳定	2 级	2 级	2 级	2 级
v_2	0.30	0.30	0.30	0.30
稳定性中等	3 级	3 级	3 级	3 级
v_3	0.55	0.55	0.55	0.55
较不稳定	4 级	4 级	4 级	4 级
v_4	0.80	0.80	0.80	0.80
不稳定	5 级	5 级	5 级	5 级
v_5	0.85	0.85	0.85	0.85

3.4 构建模糊评价矩阵 R

依据表 2 模糊信息化所得评价指标隶属度值,对各评价指标进行判别量化,对于第 $n(n \leq 4)$ 个评价指标中的评价因子,其评价集为

$$r_n = \{r_{n1}, r_{n2}, r_{n3}, r_{n4}, r_{n5}\} \quad (3)$$

式中: n 分别代表各评价指标中的各级评价因子。

各评价因子的评价集构成了评价因素集 A 到评语集 X 的模糊评价矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & \dots & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & \dots & r_{45} \end{bmatrix} \quad (4)$$

矩阵中: r_1 为地震烈度区划类指标, r_2 为灾害地质类指标, r_3 为地貌类型指标, r_4 为沉积物类型指标。矩阵 R 的第 1 列到第 5 列分别为各类评价指标下各评价因子所对应的隶属度值。

3.5 确定评价指标权重值

为了解决各评价指标在海底稳定性评价中相对重要性的问题,引入权重指标来区分。确定权重的方法有多种,本文通过专家评判与层次分析决策^[27]相结合的方法来获得权重值。通过专家判定各指标的相对重要性,再通过层次分析过程,构造权值判别表。通过权值判别表构建权值判别矩阵,计算获得各评价指标的权重值分配集 W 。各类评价指标的权重值:地震区划为 0.468 6;灾害地质类为 0.364 1;地貌区划类为 0.118 7;沉积物类为 0.048 6。

3.6 模糊矩阵运算得出评价结果

通过建立的模糊关系矩阵 R ,以及权值分配集 W ,以 $6' \times 6'$ 大小的网格为评价单元,进行海底稳定性评价。通过模糊运算矩阵得到综合评价结果 B :

$$B = W * R = (b_1, b_2, b_3, b_4) \quad (5)$$

式中： $*$ 为模糊变换算子。

评价结果 B 为基于评价因素集 A 的综合评价结果，模糊运算矩阵所得结果是一组等级隶属度值。按照模糊数学最大的隶属度原则，取隶属度最大者所对应的等级作为评价单元海底稳定性等级。

4 研究区海底稳定性区划

以 $6' \times 6'$ 大小的网格为评价单元(进行单元的划分时采用复数积分法与包含检验法等栅格化算法对包含 2 种级别的单元,划定其等级,确定其隶属度),以综合调查所得的研究区地震区划图、灾害地质图、海底地貌图、海底沉积物类型图和数据源,通过依据模糊数学原理构建的模糊综合评价系统进行计算,采用优势合并方法,将优势的等级值作为该区的稳定性等级,得出研究区 900 个评价单元的海底稳定性等级值,绘制研究区海底稳定性区划图(图 3)。

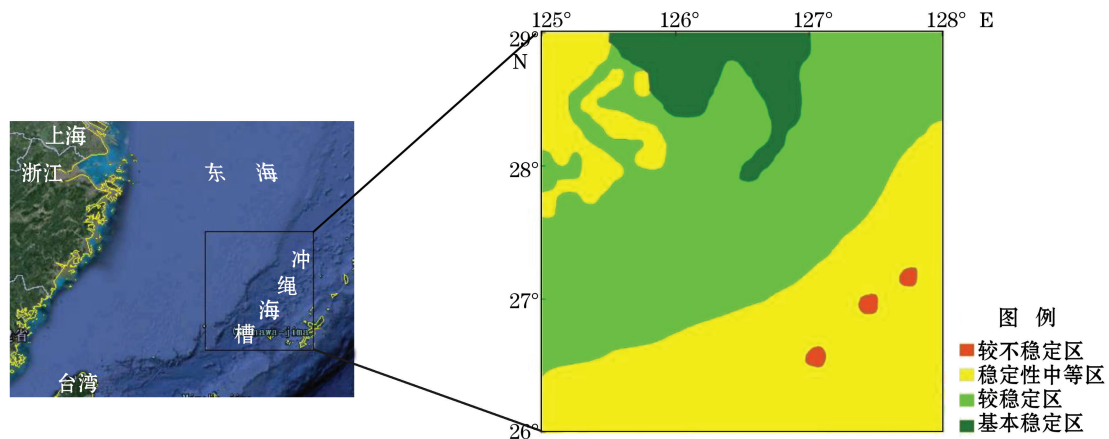


图 3 海底稳定性区划图

Fig.3 Division map of submarine stability

依据图 3 研究区海底稳定性区划图,将研究区海底稳定性划分 4 个级别:较不稳定区、稳定性中等区、较稳定区、基本稳定区。不稳定区在评价结果中未出现。

1) 较不稳定区

该区为图 3 中橙红色区域,共有 3 处。分布在研究区东南半深海台地区,地貌上为台地、陆坡、海盆的组合地貌,地形复杂。该区台地较为孤立,地形变化急剧,陆坡坡度大;台地周围海底沉积物较粗,陆坡与海盆内的海底沉积物主要为黏土质粉砂,沉积物的承载力差;又该区处于地震区划 8 级区划范围;灾害地质类型为附近存在的危险性较大的海底峡谷等,海槽边界断裂以弧形穿过 3 处较不稳定区,综合评价结果为较不稳定。

2) 稳定性中等区

该区为图 3 中黄色区域,共 4 处,面积较大,集中在两大区域,研究区东南外陆架潮流沙脊区及研究区东南部半深海台地区及西南部的槽底区。

外陆架潮流沙脊区位于外陆架残留砂平原之上,海底较为平坦,海底主要为残留砂构成的沙脊。由于残留砂流动性较大,因此具有较高的不稳定性,该区属地震区划 6 级区划范围内,由地震造成的不稳定性较小,综合评价结果为风险性中等区。

研究区东南部半深海台区地形复杂,由海山海丘、海台、海盆、海岭等地貌组合而成,海底沉积物类型以黏土质粉砂面积最大,在研究区东南角有砂及珊瑚礁的存在。灾害地质类型在该区域主要为几处较大的海

底峡谷及西南部槽底区存在的浊积扇及埋藏古河道,该区处于地震区划 8 级区,综合评价结果为风险性中等区。

3)较稳定区

该区为图 3 中浅绿色区域,主要集中在研究区的中部及东北部。海底地貌主要为陆坡与槽底的浊积平原。槽底较为平坦,只在东北部存在海岭及海盆。陆坡属侵蚀堆积型陆坡斜坡,海底侵蚀作用强烈,地形崎岖,坡度较大,稳定差。海底沉积物主要为槽底的黏土质粉砂、粉砂质黏土,陆坡上为砂质粉砂。海底灾害地质类型主要为陆坡上存在的较大海底峡谷及海底滑坡;该区划处于地震区划 7 级区,综合评价结果为风险性较低区。

4)基本稳定区

该区为图 3 中深绿色区域,分布于研究区北部稍偏西,该区域海底为外陆架残留砂平原,海底平坦,海底沉积物为粉砂质砂,风险性低;灾害地质类型单一,只有个别区域分布有潮流沙脊、冲刷槽;该区属地震区划 6 级区,综合评价结果为风险性低区。

5 结 论

通过对研究区综合调查资料的处理,获得了研究区海底灾害地质因子类型及其分布位置。利用构建的海底稳定性模糊综合评价模型对评价指标进行评价,得到评价结果并绘制了海底稳定性区划图。具体结论:

1)研究区海底灾害地质类型有潮流沙脊、海底峡谷、古三角洲、海底滑坡、埋藏古河道、冲刷槽、浅层气、浊积扇、海槽边界断裂和裂谷十种类型。区内潮流沙脊、冲刷槽、浅层气、埋藏古河道均位于东海外陆架区,东海外陆架地质环境为其提供了发育的基础;海底峡谷、海底滑坡、古三角洲、浊积扇主要分布在陆坡区,研究区东南半深海台地区也发育有海底峡谷,这两处区域均存在较大的地形坡度,成为这几种灾害地质因素发育的有利环境;海槽边界断裂与裂谷轴的成因主要是构造作用,其走向大致与海槽走向一致。

2)基于模糊数学原理,构建了海底稳定性模糊综合评价模型,构建了 4 类 5 级海底稳定性评价指标体系。研究区海底稳定性评价结果为 4 个等级:基本稳定区、较稳定区、稳定性中等区、较不稳定区。基本稳定区分布在研究区北部,主要为外陆架残留砂平原,灾害地质类型单一;较稳定区主要集中在研究区中部及东北部,地貌上为陆坡与槽底浊积平原,灾害地质类型为海底滑坡及海底峡谷等;稳定性中等区分布在两处较大区域:外陆架残留砂平原和东南部半深海台地区,其中东南部半深海台地区地貌类型复杂,处在地震区划 8 级区划,灾害地质类型主要为海底峡谷等;较不稳定区分布在东南半深海台地区,地形复杂且变化急剧,处在地震区划 8 级区划,灾害地质类型为海底峡谷等,海槽边界断裂穿过该 3 处区域。

参考文献(References):

- [1] LUAN X W, LU Y T, ZHAO K B, et al. Geological factors for the development and newly advances in exploration of gas hydrate in East China Sea slope and Okinawa Trough[J]. *Geoscience*, 2008, 22(3): 342-355. 栾锡武,鲁银涛,赵克斌,等. 东海陆坡及邻近槽底天然气水合物成藏条件分析及其前景[J]. *现代地质*, 2008, 22(3): 342-355.
- [2] XU H, CAI Y, SUN H Q, et al. The survey status and geological conditions of accumulation of gas hydrate resource in the East China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 32(4): 22-29. 许红,蔡瑛,孙和清,等. 东海陆坡天然气水合物成藏地质条件和 BSR 反射及成藏类型特征[J]. *热带海洋学报*, 2012, 32(4): 22-29.
- [3] LUAN X W, YUE B J, LU Y T. Seismic characteristics of gas hydrates in the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(5): 91-99. 栾锡武,岳保静,鲁银涛. 东海天然气水合物的地震特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(5): 91-99.
- [4] GONG J M, YANG W D, LU Z Q, et al. Regional geological characteristics of gas hydrates in the East China Sea and possible prospective areas[J]. *Marine Geology Development*, 2001, 17(7): 20-23. 龚建明,杨文达,卢振权,等. 东海天然气水合物的区域地质特征及可能的远景区[J]. *海洋地质动态*, 2001, 17(7): 20-23.
- [5] LUAN X W, CHU F Y, ZHAO Y Y, et al. The possible distribution of hydrate gas in the area of East Sea and its vicinity[J]. *Acta Sedi-*

- mentologica Sinica, 2001, 19(2): 315-321. 栾锡武, 初凤友, 赵一阳, 等. 我国东海及邻近海域气体水合物可能的分布范围[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 315-321.
- [6] MENG X W, LIU B H, SHI X F, et al. Possibility of gas hydrate occurring in the western lower slope of Mid-Okinawa Trough[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(4): 629-633. 孟宪伟, 刘保华, 石学法, 等. 冲绳海槽中段西陆坡下缘天然气水合物存在的可能性分析[J]. 沉积学报, 2000, 18(4): 629-633.
- [7] CHEN J W. Formation conditions and resources potential of gas hydrate in the Okinawa Trough of the East China Sea[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(6): 726-732. 陈建文. 东海冲绳海槽天然气水合物成矿地质条件与资源潜力[J]. 地球学报, 2014, 35(6): 726-732.
- [8] LEE C S, SHOR G G, BIBEE L D, et al. Okinawa Trough: origin as backarc basin[J]. Marine Geology, 1980, 35(1-3): 219-241.
- [9] GAO J M, LI G S, SUN J S, et al. Geomorphic characteristics of Okinawa Trough[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1987, 7(1): 726-732. 高金满, 李国胜, 孙家淞, 等. 冲绳海槽的地形地貌特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1987, 7(1): 726-732.
- [10] LI J B. Regional geology of the East China Sea[M]. Qingdao: China Ocean Press, 2008. 李家彪. 东海区域地质[M]. 青岛: 海洋出版社, 2008.
- [11] HSU S K, SIBUET J C, SHYU C T, et al. Magnetic inversion in the East China Sea and Okinawa Trough: tectonic implications[J]. Tectonophysics, 2001, 333(1-2): 111-222.
- [12] SIBUTE J, LETOUZEY F, BARBIER F, et al. Back arc extension in the Okinawa Trough[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1987, 92(B13): 14041-14063.
- [13] SHINJO R. Geochemistry of high Mg andesites and the tectonic evolution of the Okinawa Trough-Ryukyu arc system[J]. Chemical Geology, 1999, 157(1): 69-88.
- [14] HUH C A, SU C C, WANG C H, et al. Sedimentation in the southern Okinawa Trough-Rates, turbidites and a sediment budget[J]. Marine Geology, 2006, 231(1-4): 129-139.
- [15] XIANG R, SUN Y B, LI T G, et al. Paleoenvironmental change in the middle Okinawa Trough since the last deglaciation: evidence from the sedimentation rate and planktonic foraminiferal record[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2007, 243(3-4): 378-393.
- [16] CHEN D J, LI P Y, LIU L J, et al. The theoretical analysis of the impact of geological disasters on the social and economic development and the countermeasures[J]. Ocean Development and Management, 2009, 26(9): 64-71. 陈东景, 李培英, 刘乐军, 等. 海底地质灾害对社会经济发展影响的理论分析与普适性对策[J]. 海洋开发与管理, 2009, 26(9): 64-71.
- [17] LIU B H, LI X S, ZHAO Y X, et al. Debris transport on the western continental slope of the Okinawa Trough: slumping and gravity flowing[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2005, 36(1): 1-9. 刘保华, 李西双, 赵月霞, 等. 冲绳海槽西部陆坡碎屑沉积物的搬运方式: 滑塌和重力流[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(1): 1-9.
- [18] LUAN X W, GAO J Y, LIANG R C, et al. Topography and distribution of central graben in the Miyoko Section of Okinawa Trough[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(8): 1149-1155. 栾锡武, 高金耀, 梁瑞才, 等. 冲绳海槽宫古段中央地堑的形态与分布[J]. 地质学报, 2006, 80(8): 1149-1155.
- [19] LIU L J. Theory research and practice on East Sea geohazard regionalization in China[D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2004. 刘乐军. 东海灾害地质分区研究的理论与实践[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2004.
- [20] DU J, LI P Y, LIU L J, et al. Evaluation study of sea bed stability in the East China sea oil and gas resource area[J]. Advance in Marine Science, 2004, 22(4): 480-485. 杜军, 李培英, 刘乐军, 等. 东海油气资源区海底稳定性评价研究[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(4): 480-485.
- [21] LI W R, YANG Z S, WANG Q, et al. Terrigenous transportation through canyon and sedimentation of submarine fan in the Okinawa Trough[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2001, 32(4): 371-380. 李蔚然, 杨作生, 王琦, 等. 冲绳海槽陆源碎屑峡谷通道搬运与海底扇沉积[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(4): 371-380.
- [22] DU J, LI P Y, LI P, et al. The seabed stability zonation based on the marine geohazards evaluation in China[J]. Haiyang Xuebao, 2014, 36(5): 124-129. 杜军, 李培英, 李萍, 等. 基于海洋灾害地质评价基础上的我国近海海底稳定性区划[J]. 海洋学报, 2014, 36(5): 124-129.
- [23] YAN M C, WANG G Q, LI B S, et al. Land geoenvironmental regionalization of Guangdong coast by fuzzy mathematics[J]. Geography and Territorial Research, 2000, 16(4): 41-49. 闫满存, 王光谦, 李保生, 等. 基于模糊数学的广东沿海陆地地质环境区划[J]. 地理与地理信息科学, 2000, 16(4): 41-49.
- [24] DU J, LI P Y, WEI W, et al. Stability zoning of hazard geology in coastal zone of China[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(4): 1-6. 杜军, 李培英, 魏巍, 等. 中国海岸带灾害地质稳定性区划[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(4): 1-6.
- [25] LI P Y, DU J, LIU L J, et al. Geological characteristics and evaluation of coastal hazard in China[M]. Beijing: China Ocean Press, 2007. 李培英, 杜军, 刘乐军, 等. 中国海岸带灾害地质特征及评价[M]. 北京: 海洋出版社, 2007.

- [26] XIE X D, ZHU Z Y, TAN M T, et al. Geological environment and geological disasters in Guangdong coastal area[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2003. 谢先得,朱照宇,覃慕陶,等. 广东沿海地质环境与地质灾害[M]. 广州: 广东科技出版社, 2003.
- [27] CAI H S, ZHOU A G, TANG C H. Expert-analytic hierarchy weighting process in geological environmental quality assessment[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 1998, 23(3): 299-302. 蔡鹤生,周爱国,唐朝晖. 地质环境质量评价中的专家-层次分析定权法[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1998, 23(3): 299-302.

Submarine Geohazards Types and Seabed Stability Evaluation of the Middle Part of the Okinawa Trough

MA Xiu-dong^{1,2,3}, LI Ping^{1,2,3}, XU Yuan-qin^{1,2,3}, GAO Shan^{1,2,3}

(1. *The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;*

2. *Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, SOA, Qingdao 266061, China;*

3. *Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China*)

Abstract: Based on all kinds of comprehensive survey data for the middle part of the Okinawa Trough, this study identified the geohazards types, drew up the geohazards map of the seabed, and established the indicator system composing of index of seismic intensity zoning, seabed geohazards and seabed landform and seabed sediment types, and then developed the comment system which is matched with that indicator system. Using the fuzzy information and the approach degree way, we obtained the subjection value of the evaluation factors to the degree of risk, and determined the weighted value of all evaluation indicators by using analytic hierarchy process. Using fuzzy mathematics to establish the fuzzy mathematic model and taking $6' \times 6'$ as grid size, we carried out fuzzy comprehensive operation and evaluation for 900 units in the middle part of Okinawa Trough, and drew up the seabed stability division map. This study provides some important clues for future resource development and disaster prevention and mitigation in the middle part of Okinawa Trough.

Key words: seabed geohazards; evaluation indicator; fuzzy evaluation; stability regionalization

Received: March 7, 2017