

陈晓辉, 李日辉, 温珍河, 等. 渤海海域地质环境稳定性定量评价[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(3): 14-21.

CHEN Xiaohui, LI Rihui, WEN Zhenhe, et al. Quantitative evaluation of the geological environment stability in the Bohai Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(3): 14-21.

渤海海域地质环境稳定性定量评价

陈晓辉^{1,2}, 李日辉^{1,2}, 温珍河^{1,2}, 付军^{1,2}, 徐晓达^{1,2}

(1 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237; 2 崂山实验室, 青岛海洋科技中心海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237)

摘要:渤海地理位置优越, 海洋经济发展迫切需要地质环境资料的支撑, 现有研究通常分海区开展, 缺乏实测资料支持的系统性研究。基于 2008—2016 年海洋区域地质调查环境地质因素的相关资料, 通过网格化处理, 量化渤海海域主要环境地质因素的特征参数, 建立了以海底地形或底质环境变化类、地层不均衡类、活动构造类为主要评价指标的地质环境稳定性评价指标体系, 采用专家-层次分析定权法和模糊数学评价方法对研究区地质环境稳定性进行定量评价研究。结果显示, 渤海海域依据地质环境稳定性可划分为差等、较差、中等、较好、优等 5 级, 大部分海域地质环境稳定性总体较好, 地质环境稳定性较差的海域占比 10.00%, 尤其是黄河三角洲周边海域, 不稳定环境地质因素活动断层、地震震中、浅层气及与潮流相关的环境地质因素较为集中, 危险性较大。研究结果对渤海海域自然资源的开发利用、生态环境保护等具有重要的应用价值, 相关定量评价方法可为中国海洋环境地质研究提供借鉴。

关键词:渤海; 环境地质因素; 地质环境稳定性; 定量评价

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.050

0 引言

渤海海域开展地质环境稳定性定量评价研究具有重要意义。首先, 渤海是一个典型的半封闭海湾型内陆架浅海, 地理位置优越, 涉及的环渤海经济圈是国家发展战略规划的重要区域, 2013 年确定的渤海海峡跨海通道工程地处渤海东部海域, 是中国具有特殊意义的战略性海区; 其二, 渤海第四系的沉积厚度介于 300~600 m^[1], 海陆交互沉积是这一地质时期的重要沉积特征; 其三, 渤海活动构造

发育, 海域内 NE 向郯庐断裂与 NW 向张家口-蓬莱断裂, 最新活动时间可追溯至全新世^[2-3]; 其四, 渤海海域具有丰富的海洋油气资源、海盐资源、生物资源等, 海域内海底管线与光缆众多, 必然会对区域地质环境产生极大的依赖性, 迫切需要技术资料的支撑。随着海洋开发的深入, 对海洋地质环境作用的强度和范围日益增强, 地质环境条件较 20 世纪发生了很大的变化, 海域地质环境所带来的危害逐步显现出来, 已成为制约中国海洋开发和海洋经济发展的重要因素。因此, 系统开展渤海海域地质环境稳定性定量评价研究, 可为渤海海域海洋经济发展规划的制定、资源的开发利用、涉海工程建设、海洋生态文明建设等提供保障, 同时有利于促进中国海域环境地质的定量研究, 具有一定的示范意义。

近 50 年来, 中国对陆域环境地质的调查研究取得了很大进步, 理论比较成熟, 尤其是数字化信息技术的发展促进了陆域环境地质研究的长足进步, 形成了完善的环境地质理论体系, 完成了全国大部分城市及重点区域环境地质的评价分区研究,

收稿日期: 2023-03-06

资助项目: 山东省自然科学基金“黄河三角洲周边海域灾害地质因素定量研究”(ZR2022MD098); 中国地质调查局项目“1:25 万东海重点海域海洋区域地质调查”(GZH201500203), “全国陆域及海区地质图件更新与共享”东部海区区域地质志项目(DD20190377), “东部重点海域海洋区域地质调查”(DD20221710)

第一作者: 陈晓辉(1981—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事陆架晚第四纪层序地层与环境地质方面的研究工作。E-mail: hongzi1982@163.com

对这些地区经济可持续发展具有重要的指导意义。与陆域环境地质相比, 涉及海域环境地质的研究比较零散, 中国东部海域有关海域环境地质的系统研究始于 20 世纪末, 主要出于生存环境与近岸工程建设的需要, 多集中在经济发达的近岸海域, 定量系统性区域性的工作较少, 虽然也有部分学者通过对地质资料的模糊量化, 选取适宜的评价模型、评价指标及权重值, 对中国东部海域包括渤海海底稳定性进行定量评价分区研究^[4-9], 但采用的数据资料多收集少实测, 系统性不足, 主要原因是缺乏实测数据作为支持。本文依托青岛海洋地质研究所完成的 1:100 万与 1:25 万海洋区域地质调查项目, 在前期环境地质相关研究的基础上, 将整个渤海海域作为一个整体, 选取主要环境地质因素作为研究对象, 系统全面地揭示这些环境地质因素的时空分布特征, 并重点开展地质环境稳定性定量评价分区研究。

1 材料与方法

1.1 研究材料

随着中国中大比例尺海洋区域地质调查的逐步开展, 2008—2016 年青岛海洋地质研究所相继完成了渤海海域 1:100 万大连幅、天津幅海洋区域地质调查与 1:25 万锦西-营口幅海洋区域地质调查等调查研究工作, 并进行了各图幅内环境地质因素图的编制及稳定性定性评价分区研究。本文研究材料主要来源于 1:100 万大连幅环境地质因素图、1:100 万天津幅环境地质因素图、1:25 万锦西-营口幅环境地质因素图, 以及图幅地质环境稳定性评价分区等相关成果资料。

1.2 研究方法

评价指标权重值的确定采用专家-层次分析法, 结合了专家打分法定性分析, 兼顾层次分析进行定量分析, 既有定性指标又有定量指标, 是一种较为合理、可行的定权方法^[10-11]。

本文地质环境稳定性评价采用模糊数学评价方法。海洋环境地质是一个多因素耦合的动态系

统, 包含了多方面、多层次的多种环境地质因素。由于海洋环境地质因素的复杂性、发生的随机性与不确定性, 加之人们主观认识上的差异, 很难对地质环境的稳定性得出一致性的评价区划, 同时稳定性区划界线及其因素的分级界线也存在不确定性, 不能用是(1)或否(0)简单的二值逻辑来划分, 而是需要一种用区间 $[0, 1]$ 的多值逻辑来评价。模糊数学能够实现复杂不确定的评价因素定量化, 是解决此类问题合理有效的方法^[12], 近年来广泛应用于海底稳定性评价区划研究^[4-6, 13-15]。

2 渤海海域环境地质因素分类

海域环境地质因素的分类一直是中外学者进行探讨的主要问题, 目前尚无统一定论。有关海洋环境地质因素的分类, 主要是海洋灾害地质类型的划分, 主要根据灾害地质因素的危害程度^[16]、形态特征^[17]、灾害动力存在圈层位置^[18]、成因、空间分布及其危害程度^[19]、活动性^[20]、内外动力体系及空间分布^[21-22]、危害作用方式及空间位置^[4]、空间分布与直接或间接影响程度及成因相结合^[5]等标准, 有不同的灾害地质因素类型划分方案。然而, 已有的划分方案主要着重于其成因机制, 不利于后续地质环境稳定性评价分区研究。本文整合前人有关灾害地质的分类原则, 结合渤海海域的实际情况, 以实用简洁为原则, 从利于海洋地质环境稳定性评价的角度出发, 将渤海海域环境地质因素分为海底地形或底质环境变化类、地层不均衡类、活动构造类 3 大类, 为了便于论述, 在上述分类的基础上, 进一步划分海底环境地质因素与埋藏环境地质因素(表 1)。

3 渤海海域主要环境地质因素分布

通过综合分析渤海海域地质与地球物理调查数据资料, 确定了研究区环境地质因素, 主要包括地球内动力作用引起的晚更新世以来的活动构造类, 外动力作用引起的海底地形或底质环境变化类与地层不均衡类, 前者主要涉及地震震中与活动断

表 1 渤海海域环境地质因素分类表

Table 1 Classification of environmental geology factors in the Bohai Sea

类型划分	海底地形或底质环境变化类	地层不均衡类	活动构造类
海底环境地质因素	潮流沉积体(潮流沙脊、潮流沙席、沙波)、潮流冲刷槽、海底滑坡	水下三角洲	地震震中、活动断层
埋藏环境地质因素	—	埋藏古河道、埋藏古三角洲、浅层气	地震震中、活动断层

层,后者主要涉及水下三角洲、潮流沉积体、海底滑坡、潮流冲刷槽、浅层气、埋藏古河道、埋藏古三角洲等。这些环境地质因素在分布和成因上既有区别又有联系,其分布与组合关系具有区域分异的特征,这一特征是地质环境稳定性评价区划的基础。

3.1 活动构造类环境地质因素

该类型是渤海海域危险性最高的环境地质因素类型,主要包括活动断裂与地震震中,对海底的稳定性将产生较大影响。

研究区活动断裂主要表现为 NNE 向、NEE 向、EW 向及 NW 向等多组活动断裂(图 1): NNE 向、

NEE 向断裂为郯庐断裂的继承性断裂,该组断裂不连续分布,自北向南切割深度逐渐变浅,在渤海中部被 NW 向断裂错断,以北的海域断裂主轴位于辽东湾海域,最新活动时间北部可追溯至晚更新世,南部莱州湾海域可追溯至全新世早中期。NNE 向与 NEE 向断裂在晚更新世—全新世各个时段的垂向活动速率超过 0.06 mm/a,近 20 kaBP 的垂向活动速率超过 0.08 mm/a^[3,23]。EW 向、NW 向断裂为张家口-蓬莱-威海断裂的继承断裂,主要由不连续的走向一致的若干条次级断裂组成,局部具有负花状构造,在渤海湾西南部与莱州湾海域较为密集,该组断裂的最新活动时间可追溯至晚更新世,近 20 kaBP 以来的垂向活动速率超过 0.06 mm/a^[2]。

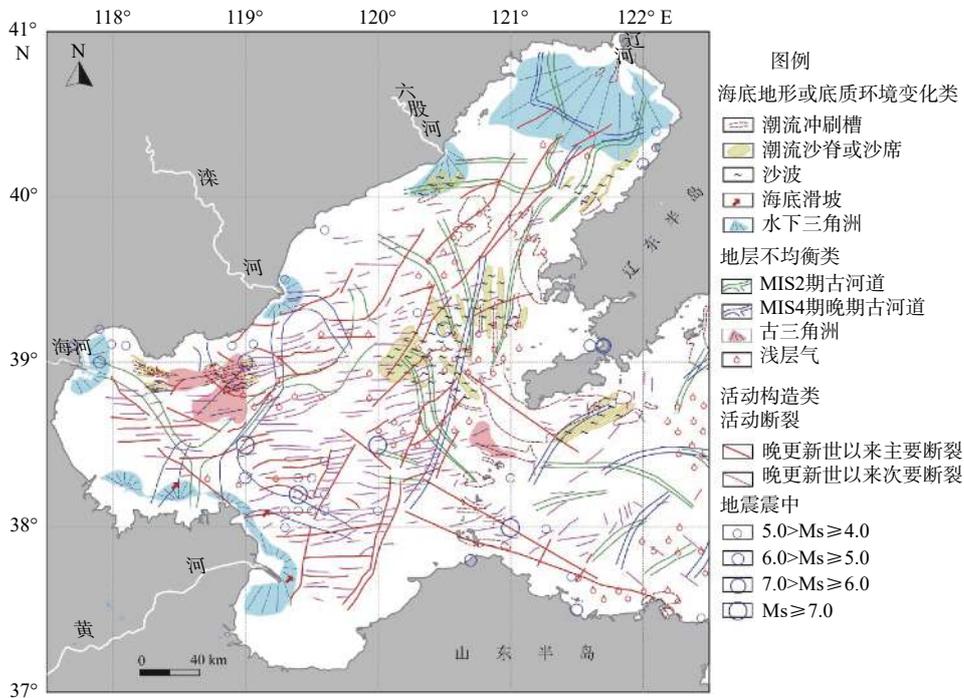


图 1 渤海海域主要环境地质因素分布图

Fig.1 Distribution of the main environmental geology factors in the Bohai Sea

中国地震台网资料显示,公元纪年以来,渤海地区 5.0 级以上地震 13 次。其中,7.0 级以上地震 5 次,最大地震 7.5 级;6.0~7.0 级地震 3 次,5.0~6.0 级地震 6 次。渤海中部活动性最强,总体上渤海海域内的地震多发生于中上地壳,属于浅源构造地震^[24],破坏性较大。渤海海域地震震中与活动断裂分布及其活动性存在良好的相关性,如 1969 年 7 月 18 日在渤海发生了 7.4 级地震,震中位置为 38.2°N, 119.4°E,地处于郯庐断裂与张家口-蓬莱-威海断裂的交汇部位,其他现代地震活动,基本沿断裂带周边分布,主要受断裂的浅层继承性活动断裂

控制。

3.2 海底地形或底质环境变化类环境地质因素

该类型环境地质因素是研究区危险性较高的环境地质因素类型,其活动性会对海底工程等设施造成巨大破坏,主要包括海底滑坡、潮流沉积体、潮流冲刷槽等。

潮流沉积体主要表现为潮流沙脊群、潮流沙席、沙波。潮流沙脊群在研究区广泛发育,主要包括辽东湾西侧六股河口潮流沙脊群、辽东湾东侧近岸海域潮流沙脊群、渤海湾北部潮流沙脊群、辽东浅滩

潮流沙脊群和辽东半岛东南近岸潮流沙脊群(图 1)。其中, 辽东湾西侧六股河与东侧近岸存在数条 NNE 向发育的现代潮流沙脊, 水深位于 10 m 以浅, 沙脊长 3~41 km、高 1~3 m、脊宽 < 1 km, 属潮流和沿岸流共同作用发育而成的; 渤海湾北部海域有东西 2 处潮流沙脊群, 东侧潮流沙脊群主要由一系列 NE—SW 向、NW—SE 向展布的潮流沙脊组成, 大部分水深 20 m 以深, 沙脊长 5~23 km、高 3~8 m、脊宽 1~6 km; 辽东浅滩潮流沙脊, 主要由东西排列的 6 条沙脊组成, 水深 10~36 m, 形似伸开的手指状, 地形起伏较大, 脊槽高差可达 20 m^[25]; 辽东半岛东南近岸潮流沙脊主要由 4 条彼此平行的 NE—SW 向展布的潮流沙脊组成, 水深 40~50 m, 沙脊长 35~75 km、高 3~17 m、脊宽 3~7 km^[26]。渤海海域潮流沙脊主要表现为渤中浅滩沙脊, 分布在渤海东部, 老铁山水道西北侧、辽东浅滩西南侧, 地形微隆起, 水深 15~30 m, 无明显脊槽底形^[25]。沙脊在研究区上述潮流沙脊群与潮流沙脊沉积区均有分布, 表明了这些潮流沉积体的活动性。

研究区潮流冲刷槽主要有 2 种类型: ①束狭水道底部侵蚀沟槽, 主要分布在渤海海峡周边、庙岛群岛、长山列岛海域(图 1)。其中, 铁山水道是中国海岸带最深、规模最大的冲刷槽, 最大水深 84 m, 相对深度 20~60 m。②潮流沙脊群间的侵蚀沟槽, 主要分布在研究区潮流沙脊群分布区, 规模相对较小, 脊槽相对高度一般为几米至 20~30 m。

渤海海域海底滑坡主要分布在黄河水下三角洲周边海域^[27-28], 存在瓶颈状滑坡、平移板状滑坡与旋转滑坡 3 种类型, 具有高含水和流动性等特点, 滑坡沉积物出现刚性运动-塑性流动-流体流动的完整流变过程。

3.3 地层不平衡类环境地质因素

该类型环境地质因素是研究区危险性中等的环境地质因素, 这些因素相互伴生, 其危害是潜在的, 主要来自其自身特征导致的持力层不平衡。渤海海域地层不平衡类环境地质因素主要包括水下三角洲、埋藏古三角洲、埋藏古河道、浅层气等。

渤海海域三角洲主要由河流携带大量泥沙在海洋水动力较弱、水下地形较为平缓地带堆积形成的大小不同的三角洲, 有的仍然暴露在海底表现为水下三角洲, 有的则已呈埋藏状态为埋藏古三角洲。渤海海域水下三角洲广泛发育, 主要分布在黄河、海河、滦河、六股河、辽河河口; 埋藏古三角洲主要

分布在渤海湾北部与渤海海峡西北部。

研究区的埋藏古河道主要对应晚第四纪以来冰期-间冰期转换导致的低海面时期, 后随着海平面上升, 这些古河道被埋藏于海相地层之下。研究区识别出的埋藏古河道主要分为 2 期: 末次冰盛期与 MIS4 期晚期, 某些区域出现 2 期河道的叠加, 这些古河道系统与黄河、滦河、辽河、海河等周边河流相对应, 大部分垂直于岸线分布, MIS2 期埋藏古河道分布范围更广、规模更大。

研究区浅层气主要分为生物成因和构造成因 2 类: 生物成因浅层气与沉积物中的有机质密切相关, 主要集中分布在渤海东部、渤海湾、山东半岛北部海域, 这些地区的第四纪地层广泛发育古三角洲、古河道沉积, 含有泥炭夹层及其他富含有机质堆积层, 这些有机物质经腐败细菌分解转化为甲烷为主的气体; 构造成因浅层气主要源自深部地层, 主要分布在渤海油气资源开发区, 这些地区断裂构造广泛发育, 深部油气向上运移并在浅部地层中聚集而成。

4 渤海海域地质环境稳定性定量评价

开展海域地质环境稳定性评价的最终目的是确定地质环境对人类开发和利用海洋的适宜性及稳定性程度, 其实质为海洋环境地质因素的灾变概率及其对人类社会产生的危害进行系统描述的过程。本文结合前人有关海底稳定性定量评价的经验与方法^[4-6,9], 主要从环境地质因素可能造成的海底地形或底质环境变化、地层不平衡、活动构造 3 个方面考虑, 建立适合研究区地质环境稳定性评价的指标体系, 并进行网格化处理, 通过模糊评价模型对研究区地质环境稳定性进行定量评价研究。

4.1 地质环境稳定性评价流程

4.1.1 评价指标体系的确定

评价指标体系的建立, 是一个系统分解、逐层控制的过程, 不是简单地单项评价指标的累加, 而是充分体现其系统性、客观性、可操作性及其主导性。本文主要依据研究区各种环境地质因素特性、分布特征及其危险性程度, 综合考虑和统计分析, 选取海底地形或底质环境变化、地层不平衡、活动构造 3 大类指标, 并将其划分为 5 个等级, 由此构成了研究区地质环境稳定性评价的指标体系(表 2)。

根据研究区3类评价指标,确立地质环境稳定性评价因素集 F :

$$F = \{f_1, f_2, f_3\} \quad (1)$$

式中: f_1 为海底地形或底质环境变化类指标;

f_2 为地层不均衡类指标;

f_3 为活动构造类指标。

表2 研究区地质环境稳定性评价指标体系及其分级

Table 2 Assessment index system and its classification of geological environment stability in the study area

指标体系	海底地形或底质环境变化类	地层不均衡类	活动构造类	
			地震震中	活动断层
1级	海底滑坡	浅层气	7.0级及以上	活动断层高密集处
2级	潮流沙脊	埋藏古河道	6.0~6.9级	活动断层密集处
3级	潮流冲刷槽	埋藏古三角洲	5.0-5.9级	活动断层较密集处
4级	沙波	水下三角洲	4.0~4.9级	活动断层较低密集处
5级	潮流沙席	空阙区	4.0级以下	活动断层低密集处或空阙区

4.1.2 稳定性分级

目前广泛采用的评价分级方法主要有逻辑信息分类法和特征分类法,划分级别通常为3级或5级^[6,13,29]。鉴于海域环境地质因素的复杂性与不确定性,同时考虑相关地质环境稳定性评价具有相对性特征,本研究借鉴前人海底稳定性分级方法^[10],采用5值逻辑分类体系,将研究区地质环境稳定性分为差等、较差、中等、较好、优等5个等级。

基于此,构建研究区地质环境稳定性等级集 R :

$$R = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5\} \quad (2)$$

式中: r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 、 r_5 分别为为差等、较差、中等、较好、优等。

4.1.3 评价指标隶属度的确定

隶属度是反映各类评价指标对地质环境稳定性影响的大小程度,一般借助专家经验与隶属函数来确定。考虑到研究区地质环境复杂性、评价指标的离散型等特点,为了便于综合评价,遵循各类评价因子对应的隶属度相等原则,本文借鉴前人海底稳定性区划研究关于隶属度确定的方法^[4,13],选取具有正态分布规律的数值,结合专家经验法实践完善获得研究区评价指标的隶属度(表3)。

表3 研究区各类评价指标隶属度信息表

Table 3 Subjection value of all kinds of assessment indices in the study area

稳定性 分级	指标分级	海底地形或底质 环境变化类	地层不均 衡类	活动构造类	
				地震震中	活动断层
r_1	1级	0.85	0.85	0.85	0.85
r_2	2级	0.80	0.80	0.80	0.80
r_3	3级	0.55	0.55	0.55	0.55
r_4	4级	0.30	0.30	0.30	0.30
r_5	5级	0.15	0.15	0.15	0.15

4.1.4 网格单元划分与赋值

本文评价单元划分方法采用网格化法,将评价区域划分成形状和大小相同的网格单元,该方法不局限于自然边界,而是根据区域的环境地质因素分布情况对相应网格进行赋值,获得网格化的环境地质因素信息,其网格单元承载的信息量和精度取决于网格单元的大小和赋值的精度^[4-5]。考虑到研究区范围及各评价指标的空间尺度,将研究区划分为3'×3'的网格单元。

4.1.5 评价指标权重值的确定

地质环境稳定性评价涉及到海底地形或底质环境变化、地层不均衡、活动构造3类指标的综合评价,各类指标对评价的贡献量大小存在差异性,即权重值的不同。本文在专家判断的基础上,纳入层序分析决策过程与方法,通过分析计算确定研究区地质环境稳定性各类评价指标的权重值分配集 X 。其中,海底地形或底质环境变化类指标权重值为0.15,地层不均衡类指标权重值为0.35,活动构造类指标权重值为0.50。

4.1.6 模糊数学综合评价

单评价指标模糊评价矩阵的构建:根据各评价指标隶属度,对其进行量化处理,确定各种地质环境评价因素集到地质环境稳定性等级集 R 的模糊关系矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & \cdots & r_5 \\ t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{15} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{25} \\ t_{31} & t_{32} & \cdots & t_{35} \end{bmatrix} \quad (3)$$

矩阵中, t_1 为海底地形或底质环境变化类指标, t_2 为地层不均衡类变化类指标, t_3 为活动构造类指标。 r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 为各评价指标对应的隶属度,第

2 行至第 4 行中的各列代表各类评价指标下评价因子对应的隶属度。

模糊矩阵计算: 在研究区网格化单元的基础上, 通过模糊关系矩阵 A 与权重值分配集 X 的综合运算, 获得各网格评价单元的评价结果 B :

$$B = \{A * X\} \quad (4)$$

式中: $*$ 为模糊变换算子。

每个网格评价单元根据模糊数学最大隶属度原则, 取隶属度最大的值为该网格隶属度值。

4.2 地质环境稳定性区划

根据以上步骤, 通过 Visual Basic 编制模糊计算程序, 对每个网格隶属度值进行模糊综合评判。评判结束后, 将网格坐标及隶属度值经过局部多项式法插值, 得到地质环境稳定性定量评价分区结果。

综合评价结果显示, 渤海海域根据地质环境稳定性可划分为 5 个等级区: 稳定性差等区、稳定性

较差区、稳定性中等区、稳定性较好区、稳定性优等区(图 2, 表 4)。研究区 2.87% 的海域地质环境稳定性为差等, 主要分布在黄河三角洲周边海域, 这一地区不稳定环境地质因素活动断层、地震震中、海底滑坡、浅层气等密集分布, 导致地质环境存在高危险性。7.13% 的海域地质环境稳定性较差, 主要分布在黄河三角洲周边稳定性差等区外围、渤海湾东北部、渤海海峡西部海域, 这些地区除活动构造类环境地质因素较为密集外, 浅层气及与潮流相关的环境地质因素危险性较大。此外, 20.11% 的海域地质环境存在一定的风险, 为稳定性中等海域, 主要分布在地质环境稳定性较差区外围、辽东湾东南部、辽东半岛东南部海域, 这些中等风险区活动断层、地震震中、潮流沙脊、沙波、潮流冲刷槽等环境地质因素较为集中。渤海海域 69.90% 的海域地质环境良好, 大部分地区活动断层、地震震中、浅层气、潮流冲刷槽、埋藏古河道等环境地质因素相对不发育, 分布相对较少甚至空缺, 显示了大部分海域地质环境稳定性良好。

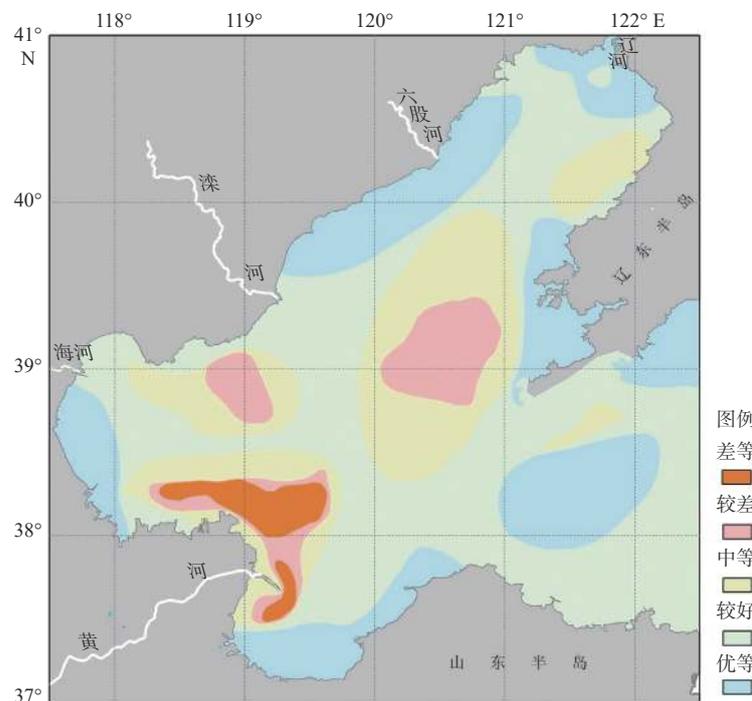


图 2 研究区地质环境稳定性区划图

Fig.2 Division of geological environment stability in the study area

研究显示, 渤海海域地质环境稳定性分区与环境地质因素的分布特征密切相关, 地质环境稳定性差等区与具有高风险的环境地质因素及其密集程度相对应, 这也显示了本文评价方法的科学性与可行性。在进行地质环境稳定性评价时, 采用网格化

数据单元进行评价, 充分保证了评价指标分布的均匀性与单元的一致性, 同时, 采用专家打分-层次分析权重法定量确定评价指标的贡献大小, 确保了权重值的客观性, 而采用模糊数学模型对研究区地质环境进行定量研究, 使相关结果具有区域可对比性。

表4 研究区地质环境稳定性分区信息表

Table 4 Division of geological environment stability in the study area

等级	分区	面积/km ²		占比/%	主要环境地质因素
r ₁	黄河三角洲周边海域	2889	2889	2.87	活动断层、地震震中、海底滑坡、浅层气、埋藏古河道、水下三角洲等环境地质因素密集
	黄河三角洲稳定性差等区外围	1761			
r ₂	渤海湾东北部海域	1496	7180	7.13	活动断层、地震震中、浅层气、潮流沙脊、潮流冲刷槽、沙波、潮流沙席、埋藏古河道、埋藏古三角洲较为密集
	渤海海峡西部海域	3923			
r ₃	黄河三角洲稳定性较差区外围	4353	20249	20.11	活动断层、地震震中、潮流沙脊、沙波、潮流冲刷槽、浅层气、埋藏古三角洲较为集中
	渤海湾东北部稳定性较差区外围	3250			
	渤海海峡西部稳定性较差区外围	9857			
	辽东湾东南部海域	2097			
	辽东半岛东南部海域	692			
r ₄	全区均有分布,介于稳定性中等、优等区之间	44263	44263	43.96	活动断层、地震震中、浅层气、潮流冲刷槽、埋藏古河道等环境地质因素有一定分布
	辽东湾北部近岸海域	2120			
r ₅	六股河口近岸海域	6191	26117	25.94	活动断层、地震震中、水下三角洲、埋藏古河道等环境地质因素分布较少或缺
	渤海湾西部近岸海域	2564			
	莱州湾南部、东部近岸海域	4027			
	辽东半岛东部、西部近岸海域	5242			
	渤海海峡东部海域	5973			

5 结论

本文从地质环境稳定性评价的角度出发,将渤海海域环境地质因素分为海底地形或底质环境变化类、地层不均衡类、活动构造类3大类。建立了海底地形或底质环境变化、地层不均衡、活动构造3类5个等级的评价指标体系,基于网格化单元,采用专家-层析分析定权法和模糊数学评价方法,圈定了渤海海域地质环境稳定性差等、较差、中等、较好、优等5个等级区。渤海69.90%的海域地质环境稳定性良好,20.11%的海域地质环境存在一定的风险,地质环境稳定性较差与差等等级的海域占比10.00%,尤其黄河三角洲周边海域,不稳定环境地质因素活动断层、地震震中、浅层气及与潮流相关的环境地质因素危险性较大。评价结果较为合理地显示了海底地质环境的稳定性,与环境地质因素分布相对应。研究结果对渤海海域自然资源的开发利用、生态环境保护等具有重要的指导意义,同时,相关定量评价方法可为中国海洋环境地质的定量研究提供参考。

参考文献:

[1] 秦蕴珊,赵一阳,赵松龄,等.渤海地质[M].北京:科学出版社,1985:161-211.
[2] 李西双,刘保华,华清峰,等.张家口-蓬莱断裂带渤海段晚第四

纪活动特征[J].海洋科学进展,2009,27(3):332-341.

- [3] 李西双,赵月霞,刘保华,等.郯庐断裂带渤海段晚更新世以来的浅层构造变形和活动性[J].科学通报,2010,55(1):1-12.
[4] 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.
[5] 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.
[6] 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.
[7] 徐元芹,李萍,刘乐军,等.河北南堡-曹妃甸海域工程地质条件及海底稳定性评价[J].海洋学报,2017,39(5):103-114.
[8] 宋晓帅,于开宁,吴振,等.莱州湾海岸带工程地质环境质量分区[J].海洋地质与第四纪地质,2019,39(2):79-89.
[9] 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.
[10] 李培英,李萍,刘乐军,等.我国海洋灾害地质评价的基本概念、方法及进展[J].海洋学报,2003,25(增刊):122-134.
[11] 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.
[12] 杨和雄,李崇文.模糊数学和它的应用[M].天津:天津科学技术出版社,1993:148-184.
[13] 马秀冬,李萍,徐元芹,等.冲绳海槽中段海底灾害地质类型及海底稳定性评价[J].海洋科学进展,2018,36(1):79-87.
[14] GUO X S, ZHENG D F, NIAN T K, et al. Large-scale seafloor stability evaluation of the northern continental slope of South China Sea[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2020, 38(7): 804-817.
[15] 刘娅楠,贾超,胡邦琦,等.基于微地貌特征的西太平洋菲律宾海海底稳定性评价[J].海洋地质与第四纪地质,2022,

- 42(1): 214-221.
- [16] CARPENTER G B, MCCARTHY J C. Hazards analysis on the Atlantic outer continental shelf [C]. Houston: 12th Annual Off-shore Technology Conference Proceedings, 1980: 399-410.
- [17] WILLIAN R B. Structure of the continental shelf and slope geohazardous and engineering constructs [D]. Texas: A & M University. 1986.
- [18] 刘以宣, 詹文欢, 陆成斌. 华南沿海地质灾害类型、发育规律及防治对策[J]. 热带海洋. 1992, 11(2): 46-53.
- [19] 李凡, 于建军. 陆架海灾害地质因素分类[J]. 海洋科学, 1994(4): 50-53.
- [20] 冯志强, 冯文科, 薛万俊, 等. 南海北部地质灾害及海底工程地质条件评价[M]. 南京: 河海大学出版社. 1996.
- [21] 刘锡清. 中国海洋环境地质学[M]. 北京: 海洋出版社, 2006.
- [22] 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.
- [23] 王洪聚, 刘保华, 李西双. 晚更新世以来渤海南部海域断裂活动性[J]. 地球科学进展, 2011, 26(5): 556-564.
- [24] 谢卓娟, 吕悦军, 彭艳菊, 等. 渤海海域地震震源深度的分布特征[J]. 震灾防御技术, 2008, 3: 311-320.
- [25] 刘振夏, 夏东兴, 汤毓祥. 渤海东部全新世潮流沉积体系[J]. 中国科学(B辑), 1994, 24(12): 1331-1338.
- [26] 陈晓辉, 张训华, 李日辉, 等. 辽东半岛南岸海域潮流沙脊及影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(1): 11-17.
- [27] 杨作升, 陈卫民, 陈章榕, 等. 黄河口水下滑坡体系[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(6): 573-581.
- [28] 周良勇, 刘健, 刘锡清, 等. 现代黄河三角洲滨浅海区的灾害地质[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(3): 19-27.
- [29] 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.

Quantitative evaluation of the geological environment stability in the Bohai Sea

CHEN Xiaohui^{1,2}, LI Rihui^{1,2}, WEN Zhenhe^{1,2}, FU Jun^{1,2}, XU Xiaoda^{1,2}

(1 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China;

2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Marine Science and Technology Center, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China)

Abstract: The Bohai Sea has a superior geographical position. The development of its marine economy asks urgently for the support of geological environment data. Most present studies usually are concentrated on some individual seas, and lack of the systematic thinking of different seas using actual testing data. Based on the available data of environmental geological factors in marine regional geological survey since 2008, The Bohai Sea was divided into grid cells and the characteristic parameters of its main environmental geology factors were quantified. An indicator system of the evaluation of the geological environment stability was established based on the topographic or ground environmental change, uneven bearing stratum, and active tectonics. The geological environment stability in the study area was quantitatively evaluated by using expert-analytic hierarchy process and fuzzy mathematics. Results suggest that the geological environment stability in Bohai Sea was divided into five grades: poor, relatively poor, medium, relatively good, and excellent. The stability in most of Bohai Sea is generally in good condition at the present. The regions in poor and relatively poor grades of stability accounts for 10%, particularly in the adjacent area of the Yellow River Delta, where the unstable environmental geology factors active faults, earthquake epicenter, shallow gas and the factors related to the tide are comparatively dense, with relatively large hazard. This study is valuable for future exploitation and utilization of natural resources, eco-environment conservation in Bohai Sea. Meanwhile, the quantitative evaluation method of this study provided a reference for the study of marine environmental geology.

Key words: Bohai Sea; environmental geology factors; geological environment stability; quantitative evaluation