连云港海底航道安全海洋环境综合评价

张存勇

（江苏海洋大学 测绘与海洋信息学院 连云港 222005）

摘要：海底航道安全与海洋环境相关，随着海洋调查观测技术的进步，航道观测信息增多，有些信息往往难以定量，如何利用这些资料评估海底航道安全日益重要。本研究在综合分析连云港海底航道安全海洋环境主要影响因素的基础上，基于航道地形环境、航道地质环境、海洋动力环境、极端事件对航道安全的影响程度，建立了连云港海底航道安全海洋环境模糊综合评价模型，运用模糊综合评价法对航道安全海洋环境进行了定量评估，依据评价结果，连云港海底航道安全海洋环境定量评价为 2.63，等级介于比较安全与一般危险之间，对航道海洋环境立体监测与安全评价体系建设具有实践意义。

关键词：海底航道；安全；海洋环境；综合评价；连云港

中图分类号：P7 **文献标志码**：A **文章编号**：1005－9857(2019)09－0060－04

Evaluation on Marine Environment in Lianyungang Submarine Channel

ZHANG Cunyong

(School of Geomatics and Marine Information, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

Abstract: The safety of ship channel is related to marine environment. With the progress of marine survey and observation technology, there are more and more observation data. How to evaluate the channel safety from those increasing observation data becomes more and more important. However, some data is often difficult to evaluate quantitatively on submarine channel. A fuzzy comprehensive evaluation model was constructed based on the topographic environment, geological environment, marine dynamic environment and extreme events, which were mainly marine environment factors affecting the safety of Lianyungang ship channel. According to the evaluation results, the quantitative evaluation value was 2.63, and the safety of assessment level was between the relatively safe and the general risk. It was of practical significance to the construction of three-dimensional monitoring and safety evaluation system for the marine environment of waterway.

Key words: Submarine channel, Safety, Marine environment, Comprehensive evaluation, Lianyungang

0 引言

航道水域环境是船舶安全通航的基础，由于人们无法直接对海底航道进行观测，往往需要进行多学科的海洋调查来获取航道信息，除底质取样、钻探取样、海底照相等传统调查方法，遥感、多波速、浅地层剖

收稿日期：2019-03-10；**修订日期**：2019-08-19

基金项目：江苏省重点研发计划项目(BE2018676).

作者简介：张存勇，副教授，博士，研究方向为海洋技术

面、侧扫声呐、声学多普勒剖面仪和其他声学探测系统可以大范围、快速、实时反映水体中的悬沙、海底地形地貌、海底沉积特征、水动力等信息。随着数字航道、智慧航道的发展，这些信息可以实现形象地反映航道宏观和微观情况，为航道数字化、网络化和智能化提供了一种先进的手段。但这些航道信息有些能够定量评价，有些只能定性描述，如何将这些海洋环境因素进行综合分析尚无统一的评价方法。模糊综合评价法基于模糊数学的隶属度理论把定性评价转化为定量评价，解决了很多难以量化的非确定性问题[1]，具有结果清晰，系统性强的特点，适合各种非确定性问题的解决，已广泛应用于航道通航环境[2-3]、航行危险度[4]、操船环境安全[5]等评价中，但还较少用于海底航道安全海洋环境综合评价。

连云港港是我国典型的淤泥质海港，航道淤积和边坡稳定受海洋环境影响较大，随着 30 万吨航道的拓展开发，航道能否“挖得出”，不因淤泥流淌造成太大工程量；“稳得住”，挖出的航道边坡能否稳定；“用得起”，航道疏浚维护费用是否太高等关键问题亟须对航道安全环境进行评价。本研究基于连云港海底航道调查研究，通过综合分析影响航道空间安全的主要海洋环境因素，尝试利用模糊综合评价法对航道空间安全海洋环境进行定量评估，以期为航道海洋环境立体监测与评价体系建设、保障航道安全运营起到一定作用。

1　航道概况

连云港港是长三角和渤海湾之间重要的区域性国际枢纽港，也是 21 世纪海上丝绸之路的重要组成部分，航道呈“人”字形，分一体两翼，包括主港区、南翼徐圩港区和北翼赣榆港区，人工开挖航道总长约 70 km，其中外航道内段连接主港区，长 17.3 km，徐圩航道连接徐圩港区，长 17 km，外航道外段为两港区共用航道，长 35.6 km。主港区进港航道走向 63°－243°，航道底标高－22.5 m，航道底宽 350 m。徐圩港区进港航道走向 16°－196°，航道底标高－22.5 m，航道底宽 360 m[6]。

航道所在海域开阔，水深较浅，低潮线以下的海底地形多为水下岸坡。海底上有密集的流蚀浅洼地，低于附近海底 1～4 m。表层沉积物主要为细砂、粉砂质砂、黏土质粉砂、粉砂质黏土。主港区以淤泥质为主，徐圩港区以粉砂质为主，细砂分布从北翼赣榆港区以带状延伸至主港区。粉砂质黏土主要分布在海域中部。粉砂质淤泥、淤泥质粉砂层一般厚约 5 m，最大厚度可达 15 m 左右[7]。

受海洋性、大陆性气候双重影响，航道海域冬季和春季常受强温带气旋的影响，夏季和秋季多受热带气旋的影响[8]。每年 5—11 月都有可能遭受台风影响。海浪波高平均为 0.5 m，一般秋、冬季略大于春、夏季，强浪为偏北向，累年平均波周期为 3.8 s。潮流基本为规则半日浅海潮流，变化显著，近岸表现为往复流运动，随水深增加，旋转流明显，以逆时针方向旋转为主，最大流速流向随季节不同差异明显。航道北部海域涨潮流向西南，落潮流向东北；航道南部海域，涨潮流向东南，落潮流向为西北。涨、落潮流速不等，涨潮流速大于落潮流速，落潮流历时大于涨潮流历时[9]。

2　模糊综合评价

2.1　评价因素选择

评价因素的确定是航道安全综合分析的基础，通常是由多个相互联系、相互作用的评价指标组成[10]。连云港港是一个在淤泥质海滩上人工疏浚而成的海港，水深、海岸线、航道坡度、航道宽度、海底坡度、海床性质、岸滩稳定性、海浪、波浪入射角、海流、潮汐、悬沙量、泥沙水力特性、台风、极端天气等一直是航道安全运营的重要环境因素。综合前人对航道安全的研究成果[11]，根据评价体系建立的科学性原则、全面性原则、系统性原则、简明性原则和可操作性原则[12]，结合连云港海底航道实际建立航道安全海洋环境评价因素集

$U=(u_1,u_2,u_3,u_4)$

其中：u_1,u_2,u_3,u_4 分别为航道地形环境、航道地质环境、海洋动力环境、极端事件。

$u_1=(u_{11},u_{12},u_{13},u_{14})$

其中：$u_{11},u_{12},u_{13},u_{14}$ 分别为水深、航道宽度、航道坡度、航道坡高。

$u_2=(u_{21},u_{22},u_{23})$

其中：u_{21},u_{22},u_{23} 分别为沉积层性质、岸滩稳定性、悬沙。

$u_3=(u_{31},u_{32},u_{33},u_{34})$

其中：$u_{31},u_{32},u_{33},u_{34}$ 分别为海浪、海流、潮汐、风。

$u_4=(u_{41},u_{42},u_{43})$

其中：u_{41},u_{42},u_{43}分别为地震、滑坡、台风。

2.2 评价指标

为了对各因素有比较直观的评价标准，将航道安全环境评价指标划分为“安全、比较安全、一般危险、比较危险、非常危险”5 个等级组成评价结果集合 V，并将评价集等级量化为 1～5，即安全、比较安全、一般危险、比较危险、非常危险分别对应 1，2，3，4，5，以便评价结果精确化，$V=(v_1,v_2,v_3,v_4,v_5)=(1,2,3,4,5)$。

2.3 评价权重

评价因素的权重是指每个因素重要程度的定量表示，也是评价过程中各个评价因素相对重要性的隶属度。目前确定权重的方法主要有比较矩阵法、均方差法、粗糙集法、层次分析法等。其中层次分析法是美国运筹学教授 Saaty[13] 提出的一种实用的多方案决策方法，可以将人们的主观判断与量化分析结合起来，对各个因素之间的差异进行量化处理，其定性与定量相结合的特点使得权重的确定具有一定的客观性，准确性相对较高，具有所需数据量小、花费时间短、计算量小的优点，因此本研究采用层次分析法确定权重大小，其步骤如下：

(1)构建比较矩阵 D：$D=\begin{pmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1j} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{i1} & \cdots & d_{ij} \end{pmatrix}$

(2)计算各指标的权重 A：$A=(a_1,a_2,\cdots,a_m)$，$a_i=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(d_{ij}\sum_{k=1}^{n}d_{kj})$

(3)权重的一致性检验。$\mathrm{CR}=\frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}}$，其中 CI 为一致性指标，$\mathrm{CI}=\frac{(\lambda_{\max}-n)}{n-1}$，$\lambda_{\max}$ 为矩阵的最大特征根，n 为指标的数量，RI 为平均随机一致性指标(表 1)。当 CR=0 时为完全一致性；当 CR<0.1 时为满意一致性；当 CR≥0.1 时为不满意一致性。

基于航道地形环境、航道地质环境、海洋动力环境、极端事件对航道安全的影响程度，通过层次分析法就各指标在评价体系中的权重进行计算组成权重集，并进行归一化处理，结果如下：

$a_1=(a_{11},a_{12},a_{13},a_{14})=(0.20,0.27,0.32,0.21)$

$a_2=(a_{21},a_{22},a_{23})=(0.35,0.26,0.39)$

$a_3=(a_{31},a_{32},a_{33},a_{34})=(0.27,0.32,0.14,0.27)$

$a_4=(a_{41},a_{42},a_{43})=(0.10,0.22,0.68)$

$A=(a_1,a_2,a_3,a_4)=(0.04,0.06,0.22,0.24)$

对权重值进行一致性检验，$\mathrm{CR}=\frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}}=\frac{0.06}{1.21}=0.05$，满足一致性要求。

表 1 平均随机一致性指标[14]

维数	RI	维数	RI
1	0.00	6	1.24
2	0.00	7	1.32
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.12		

2.4 模糊评价矩阵

采用模糊统计法，邀请连云港港口航道设计院、连云港港务工程公司一线工程师、连云港引航站引航员、港口航道与海岸工程专业、海洋技术专业和海洋资源开发技术专业教师等专家和相关人员对评价因素进行比较，征询各评价因素对海底航道安全的相对重要程度，确定其隶属度大小并归一化，从而得到评价因素的隶属度矩阵 R。矩阵中的每一行是对每一单因素的评价结果，整个矩阵包含了按照评价结果集合 V 对评价因素集合 U 进行评价所获得的全部信息。

$$R_1=\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 0.14 & 0.36 & 0.32 & 0.13 & 0.05 \\ 0.23 & 0.40 & 0.32 & 0.05 & 0.00 \\ 0.20 & 0.60 & 0.20 & 0.00 & 0.00 \\ 0.12 & 0.47 & 0.29 & 0.12 & 0.00 \end{pmatrix}$$

$$R_2=\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 0.12 & 0.28 & 0.32 & 0.18 & 0.10 \\ 0.27 & 0.36 & 0.21 & 0.16 & 0.00 \\ 0.10 & 0.23 & 0.38 & 0.27 & 0.02 \end{pmatrix}$$

$$R_3=\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} \end{pmatrix}$$

$$=\begin{pmatrix}0.19 & 0.31 & 0.29 & 0.17 & 0.04\\ 0.18 & 0.36 & 0.27 & 0.19 & 0.00\\ 0.26 & 0.34 & 0.26 & 0.14 & 0.00\\ 0.10 & 0.27 & 0.30 & 0.21 & 0.12\end{pmatrix}$$

$$R_4=\begin{pmatrix}r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15}\\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25}\\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35}\end{pmatrix}$$

$$=\begin{pmatrix}0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00\\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00\\ 0.10 & 0.15 & 0.35 & 0.30 & 0.10\end{pmatrix}$$

2.5　模糊综合评价

评价因素的权重向量与模糊评价矩阵进行模糊运算，得出具体的评价矩阵 B，合成运算出最终评价等级向量。

$$B_1=a_1R_1=(b_1,b_2,b_3,b_4,b_5)$$
$$=(0.18,0.47,0.28,0.06,0.01)$$
$$B_2=a_2R_2=(b_1,b_2,b_3,b_4,b_5)$$
$$=(0.15,0.28,0.31,0.21,0.04)$$
$$B_3=a_3R_3=(b_1,b_2,b_3,b_4,b_5)$$
$$=(0.17,0.32,0.28,0.18,0.04)$$
$$B_4=a_4R_4=(b_1,b_2,b_3,b_4,b_5)$$
$$=(0.07,0.10,0.24,0.20,0.39)$$

由二级评价结果计算一级评价矩阵

$$B=\mathrm{AR}=(b_1,b_2,b_3,b_4,b_5)$$
$$=(0.16,0.34,0.28,0.15,0.07)$$

从综合评判结果可知，连云港海底航道海洋环境的总体评价处于比较安全档次，其隶属度为 0.34。

2.6　多层次模糊综合评价

根据加权平均法求取总的评价结果[3]，得出连云港海底航道海洋环境安全评价等级 V。

$$V=\frac{\sum_1^5 b_j\times v_j}{\sum_1^5 b_j}$$
$$=\frac{(0.16\times1+0.34\times2+0.28\times3+0.15\times4+0.07\times5)}{(0.16+0.34+0.28+0.15+0.07)}$$
$$=2.63$$

评价结果为 2.63，该结果综合考虑了模糊集中各元素的贡献，反映了整个模糊向量信息的精确值，类似于概率论中求数学期望的过程。根据评价指标集 V 可以判定连云港海底航道海洋环境安全等级介于比较安全与一般危险之间。相对传统定性评价结果通常只有两种，即稳定或不稳定，而模糊综合评价可以根据实际需求分为 3 类、4 类、5 类甚至更多，并将其定量化，实现了多因素综合评价。

3　结论

基于连云港海底航道建立了航道安全海洋环境模糊综合评价模型，采用模糊综合评判的方法定量评估了连云港航道海洋环境安全等级，得出航道安全海洋环境模糊综合评价处于比较安全档次，多层次模糊综合评价结果为 2.63，等级介于比较安全与一般危险之间，实现了对航道海洋环境多因素综合定量评估，评价结果对开展海底航道安全海洋环境立体监测以及深入研究建立科学合理评价体系具有重要意义。

参考文献

[1]　范沛冉.模糊综合评判法在通航风险评价中的应用[J].广州航海学院学报，2018，26(2)：36－39.

[2]　吴卫兵.蛇移门航道通航环境安全综合评价研究[D].大连：大连海事大学，2013.

[3]　温清洪.湄洲湾航道水域航行环境安全评价[J].广州航海学院学报，2017，25(2)：21－23.

[4]　赵仁余.水域交通危险度的模糊综合评判法[J].中国航海，1997(2)：40－45.

[5]　马会，吴兆麟.港口航道水域操船环境危险度的综合评价[J].大连海事大学学报，1998(3)：15－18.

[6]　顾勇，马兴华，金雪英，等.连云港港 30 万吨级航道建设主要技术问题[J].水运工程，2012(4)：123－128.

[7]　中国海湾志编纂委员会.中国海湾志(第四分册)[M].北京：海洋出版社，1993.

[8]　张存勇，刘吉堂.连云港市海洋灾害及其成因分析[J].海洋湖沼通报，2009(1)：35－40.

[9]　张存勇.连云港近岸海域潮流动力特征[J].水运工程，2012(3)：30－34.

[10]　杜栋，庞庆华，吴炎.现代综合评价方法[M].北京：清华大学出版社，2008.

[11]　马兴华，顾勇，金雪英.连云港港 30 万吨级航道工程可行性研究综述[J].中国港湾建设，2012(4)：25－29.

[12]　王加胜，南海航道安全空间综合评价研究[D].南京：南京大学，2014.

[13]　SAATY T L.The analytic hierarchy process[M].New York：McGraw-Hill Co，NY.1980.

[14]　运筹学教材编写组.运筹学[M].北京：清华大学出版社，2013.