

层次分析法在崩岸风险评估体系中的应用

王 捷

(上海市土地储备中心, 上海市 200336)

摘 要: 河道崩岸严重影响防洪安全和河势稳定, 为避免崩岸险情的发生, 应科学开展河道崩岸的监测及预警分析工作。以浦东国际机场外侧 14.2 km 崩岸预警岸段为例, 基于工程实际, 综合考虑自然因素与人为因素的影响, 采用层次分析法构建岸线风险评估体系。通过构建判断矩阵、敏感性分析确定评估体系中各指标的权重分配。将评估岸段合理划分, 通过岸线风险评估模型定量评估各岸段风险值, 判断预警岸段中相对风险更高的岸段, 为科学实施保滩工程提供重要技术支撑。同时对比保滩工程实施前后, 各岸段相对风险变化情况, 对存在崩岸风险的岸段开展监测预警分析及保滩工程提出建议。

关键词: 崩岸; 层次分析法; 岸线风险评估

中图分类号: TU998.4

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)11-0201-05

Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) in Bank Collapse Risk Assessment Systems

WANG Jie

(Shanghai Land Reserve Center, Shanghai 200336, China)

Abstract: Bank collapse significantly threatens the flood control safety and river regime stability. To prevent such risks, it is crucial to scientifically conduct the monitoring and early-warning analysis of bank collapse. Taking the 14.2-km bank collapse early-warning section along the outside of Pudong International Airport as an example, and based on the engineering practices, the impacts of natural and human factors are comprehensively considered to establish a shoreline risk assessment system using the Analytic Hierarchy Process (AHP). By constructing the judgment matrices and conducting the sensitivity analyses, the weight distribution of each indicator in the assessment system is determined. The evaluated riverbank section is divided reasonably. The risk values of each riverbank section are quantitatively evaluated through the shoreline risk assessment model to determine the riverbank sections with relatively higher risks among the warned riverbanks, providing the important technical support for the scientific implementation of the beach protection project. At the same time, by comparing the changes in relative risks of each bank section before and after the implementation of the beach protection project, the monitoring, early warning and analysis should be carried out for the bank sections with the risk of bank collapse, and the suggestions for the beach protection project should be put forward.

Keywords: bank collapse; Analytic Hierarchy Process (AHP); shoreline risk assessment

0 引 言

自三峡水库蓄水运行以来, 拦沙效应使得“清水下泄”, 长江中下游干流河道发生长历时、长距离的冲刷, 崩岸险情发生的频率和强度明显增加^[1]。崩岸的危害涉及河势稳定、防洪、航运、民生、生态等多个维度。自 2017 年起, 长江委连续下发通知, 要求长江中下游各省市做好崩岸险情监测预警工作, 确

保堤防、重要基础设施安全和河势稳定。本文以 II 级崩岸预警段—上海浦东国际机场外侧 14.2 km 岸段为例, 通过建立风险评估体系, 科学分析判断岸线相对风险状况, 针对部分高风险岸段实施保滩措施后, 对比工程前后岸段的相对风险变化情况, 提出针对性措施, 确保堤防及后方土地安全。

1 岸线风险评估指标体系

影响岸滩稳定性的因素众多, 各种因素相互作用下导致崩岸发生的机理也十分复杂^[2]。近年来, 许多学者就崩岸发生的机理^[3-5]、影响因素^[6]及过

收稿日期: 2025-05-15

作者简介: 王捷(1990—), 女, 硕士, 工程师, 从事滩涂整治工作。

程^[7]开展了大量研究。随着数学理论的发展,学者们开始注重对岸滩稳定性进行量化评价,比较常用的评价方法有层次分析法、模糊综合评价法、神经网络模型法等^[8]。其中模糊综合评价法^[9]通过隶属度函数将定性评价转化为定量分析,即利用模糊数学对评估对象进行整体等级划分或排序。该方法适用于处理模糊信息,且结果信息丰富,缺点为权重设定依赖人工且计算复杂。神经网络模型法^[10]是一种模拟生物神经元结构与处理机制的计算模型,通过多层非线性变换实现复杂模式识别与决策支持。该方法自学习能力强,且容错性高,缺点为决策过程可解释性差,且训练需要大量数据和计算资源。层析分析法(AHP)是一种系统化的决策分析方法,通过将复杂问题分解为层次结构,构建判断矩阵计算各元素的权重,最终通过综合权重得出最优解。该方法系统性强,结合了定量与定性分析,数据需求量少且决策效率高,缺点为指标数量受限。王延贵等^[11]提出了岸滩稳定性的层次结构模型,构造了岸滩稳定综合评价函数。孙启航等^[12]提出了河岸崩塌评价层次结构模型,不少指标在天然河道崩岸段的检验中都取得了良好效果。考虑到岸线风险评估的实测数据样本数量及问题复杂程度,本次拟选用层次分析法。本文基于工程实际,构建层次分析体系(见图1),在对岸线风险进行综合评价时,选取岸线风险评估为目标,列为第一层。考虑到崩岸本质是冲刷导致的失稳,除自然因素以外,人类活动因素也是影响崩岸的重要因子,因此构建岸线风险评估层次模型时,选取滩地动态变化(自然因素)与护岸工程质量(人为因素)两个指标。滩地动态变化包括岸线变化速率、岸滩平均下蚀速率、河岸水下坡比、河岸水上坡比、后退余量等5个指标。护岸工程质量包括工程外观质量、防潮能力、结构安全、渗流能力等4个指标。

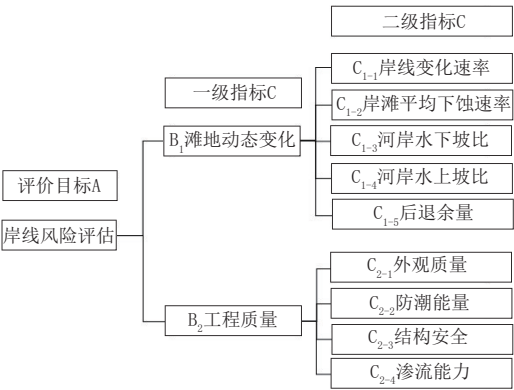


图1 岸线风险评估层次结构体系

B₁层的二级指标C₁₋₁–C₁₋₅为定量评价指标,通过开展水下地形测量,按照相关规范进行计算。其中C₁₋₁、C₁₋₂计算公式参照《海岸侵蚀监测与灾害损失评估技术规范》(GB/T 42435–2023)^[13],C₁₋₃、C₁₋₄计算公式参照《河道崩岸监测规范》(T/CHES 57–2021)^[14]。C₁₋₅为现状岸线到工程临界稳定状态下岸线之间的距离。由于各二级指标数值、量纲均不相同,故对各指标参数进行线性归一化处理。

B₂层的二级指标C₂₋₁–C₂₋₄为定性评价指标,依据《堤防工程安全评价导则》(SL/Z 679—2015)^[15],通过现场对结构外观进行检查及防潮能力复核(堤顶高程复核)、结构安全复核(整体抗滑稳定复核)、渗流安全复核(取内外坡双向最大潮差复核)的计算结果,给出“满足规范要求”、“不满足规范要求”等定性评价结果,并对C₂₋₁–C₂₋₄进行量化,评价结果为良好或满足规范要求时,量化值为1,评价结果为破损或不满足规范要求时,量化值为2。

2 岸线风险评估指标权重

2.1 二级指标B–C权重计算

依据层次分析法原理,将同一层次中的评估指标两两比较,根据他们之间的相对重要性,列出判断矩阵(见表1、表2),选择Santy提出的1–9标度法作为判断标度。构建判断矩阵后,用最大特征值λ_{max}的值(或CR≤0.1)来衡量矩阵的一致性,通过不断微调相对重要度数值,最终求得符合一致性检验的结果后,采用几何平均法将判断矩阵做归一化处理,得到权重向量。采用Matlab软件计算得到二级指标B–C权重结果如下:

表1 二级指标B₁–C权重计算及一致性判断

B ₁	C ₁₋₁	C ₁₋₂	C ₁₋₃	C ₁₋₄	C ₁₋₅
C ₁₋₁	1	1/2	1/2	1/2	3
C ₁₋₂	2	1	1/2	1	3
C ₁₋₃	2	2	1	1/2	3
C ₁₋₄	2	1	2	1	3
C ₁₋₅	1/3	1/3	1/3	1/3	1
最大特征值	λ _{max} =2.50				
权向量	w=[0.21, 0.14, 0.13, 0.11, 0.41]				
一致性检验	CR=0.048 3<0.1, 通过				

2.2 一级指标A–B权重计算

因一级指标为二阶矩阵,本身具有一致性,无法通过一致性检验权重的合理性,故本文一级指标的权重计算在构建判断矩阵的基础上,增加权重敏感性分析。权重敏感性分析采用偏好顺序结构评估法

表 2 二级指标 B2-C 权重计算及一致性判断

B ₂	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
C ₅	1	3	3	3
C ₆	1/3	1	1	1/2
C ₇	1/3	1	1	1/2
C ₈	1/3	2	2	1
最大特征值	$\lambda_{\max}=2.88$			
权向量	$w=[0.10, 0.40, 0.32, 0.18]$			
一致性检验	CR=0.044 9<0.1, 通过			

(Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations), 将不同的决策方案或候选项根据多个决策准则进行排序和评估, 以确定最佳选择。首先构建标准化决策矩阵, 令 h_{ij} 为标准化后的结果, 实数的标准化公式如下:

正向型指标:

$$h_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})},$$

负向型指标:

$$h_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})},$$

在矩阵标准化后, 设置相应的偏好函数:

$$P_j(h_{ij}, h_{kj}) = F_j(d_j(h_{ij}, h_{kj}))$$

其中, $d_j(h_{ij}, h_{kj}) = h_{ij} - h_{kj}$ 。 $P_j(h_{ij}, h_{kj})$ 表示 h_{ij} 关于 h_{kj} 在各属性下评价差值在 $[0, 1]$ 内的函数。

将所有属性的偏好函数相加, 得到多属性偏好指数。如果有权重, 则需要额外乘以权重数值。

$$I(h_{ij}, h_{kj}) = \sum_{j=1}^n (\omega_j P(h_{ij}, h_{kj}))$$

最后计算净流值, $\phi(A_i)$ 越大, 方案越优。

$$\begin{cases} \phi^+(A_i) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m I(A_i, A_k) \\ \phi^-(A_i) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m I(A_k, A_i) \end{cases}$$
$$\phi(A_i) = \phi^+(A_i) - \phi^-(A_i)$$

综上, 一级指标权重计算如下: 通过构建判断矩阵, 拟定五种权重方案 (见表 3), 再通过偏好顺序结构评估法进行敏感性分析, 求解最优方案。

将计算得到的二级指标作为本次敏感性分析的决策层, 分别计算正向型指标、负向型指标及对应的偏好指数 (见表 4), 根据表 3 确定的五种方案, 计算各方案的净流值 $\phi(A_i)$, 计算结果见表 5。

根据敏感性分析可知, 随着滩地动态变化权重的增加, 敏感性分析净流值增大, 当权重组合为

表 3 一级指标 A-B 判断矩阵

方案一		
A	B ₁	B ₂
B ₁	2	1
B ₂	1	1/2
最大特征值	$\lambda_{\max}=1$	
权向量	$w=[0.33, 0.67]$	
一致性检验	二阶矩阵本身具有一致性	
方案二		
A	B ₁	B ₂
B ₁	1	1
B ₂	1	1
最大特征值	$\lambda_{\max}=1$	
权向量	$w=[0.5, 0.5]$	
一致性检验	二阶矩阵本身具有一致性	
方案三		
A	B ₁	B ₂
B ₁	2	1
B ₂	1	1/2
最大特征值	$\lambda_{\max}=1$	
权向量	$w=[0.67, 0.33]$	
一致性检验	二阶矩阵本身具有一致性	
方案四		
A	B ₁	B ₂
B ₁	3	1
B ₂	1	1/3
最大特征值	$\lambda_{\max}=1$	
权向量	$w=[0.75, 0.25]$	
一致性检验	二阶矩阵本身具有一致性	
方案五		
A	B ₁	B ₂
B ₁	4	1
B ₂	1	1/4
最大特征值	$\lambda_{\max}=1$	
权向量	$w=[0.8, 0.2]$	
一致性检验	二阶矩阵本身具有一致性	

表 4 敏感性分析偏好指数计算结果表

属性指标 (二级指标权重)	正向型 指标	负向型 指标	偏好指数 (+)	偏好指数 (-)
0.21	0.35	0.65	0.14	-0.44
0.14	0.13	0.87	-0.01	-0.73
0.13	0.10	0.90	-0.03	-0.77
0.11	0.03	0.97	-0.08	-0.86
0.41	1.00	0.00	0.59	0.41
0.10	0.00	1.00	-0.10	-0.90
0.40	0.97	0.03	0.57	0.37
0.32	0.71	0.29	0.39	0.03
0.18	0.26	0.74	0.08	-0.56

(0.75, 0.25) 时, 敏感性分析净流值达到最大值, 且滩地动态变化权重继续增大, 净流值也不会再发生变

表5 敏感性分析净流值计算结果表

序号	权重组合	$\varphi(+)$	$\varphi(-)$	φ
1	(0.33, 0.67)	0.06	-0.17	0.23
2	(0.5, 0.5)	0.09	-0.19	0.28
3	(0.67, 0.33)	0.08	-0.22	0.31
4	(0.75, 0.25)	0.08	-0.23	0.32
5	(0.8, 0.2)	0.08	-0.23	0.32

化,因此权重组合(0.75, 0.25)为最优方案。

综上,一级指标权重通过敏感性分析确定,二级指标通过判断矩阵确定,岸线风险评估指标体系权重分配表见表6。

表6 岸线风险评估指标体系权重分配表

一级指标B	权重	二级指标C	权重
B ₁ 滩地动态变化	0.75	C ₁₋₁ 岸线变化速率	0.21
		C ₁₋₂ 岸滩平均下蚀速率	0.14
		C ₁₋₃ 河岸水下坡比	0.13
		C ₁₋₄ 河岸水上坡比	0.11
		C ₁₋₅ 后退余量	0.41
B ₂ 工程质量评价	0.25	C ₂₋₁ 外观质量评价	0.10
		C ₂₋₂ 防潮能力评价	0.40
		C ₂₋₃ 结构安全评价	0.32
		C ₂₋₄ 渗流能力评价	0.18

3 风险评估模型及岸段风险分析

结合水下地形动态监测情况,将14.2 km 预警段划分为15段,每1 km 为一个评估岸段。利用加权综合评分法,构建岸线风险评估模型,利用各评估单元指标数据标准化后的数值分别计算海岸动态变化因子R和工程质量评价因子Q,综合以上风险因子计算获得岸线风险指数S。

$$S = R^{\alpha} \times Q^{\beta}$$

式中: α 和 β 分别为海岸动态变化和工程质量评价的权重系数。根据风险评估模型,岸线危险程度与海岸动态变化因子和工程质量评价成正比,S取值越大,该岸段的危险越大。为充分体现全预警段中各岸段的相对风险程度,得到高风险区域,需要对评估结果进行风险值划分。自然间断点分级法在各种灾害风险评估区划类项目中应用较广,且经验证区划结果正确性较高^[16],故本文选取自然断点法对计算得到的风险值进行划分,将15个数据划分为4类,经迭代计算,风险值划分情况见表7。

表7 风险值划分

相对风险情况	次中	中	次高	高
风险值	$S \leq 0.45$	$0.45 < S \leq 0.60$	$0.60 < S \leq 0.75$	$S > 0.75$

根据2023年10月(汛后)完成的水下地形测量成果及现场检查情况,计算出各评估岸段的相对风

险情况。

图2可知,2023年汛后,15个评估岸段中相对风险程度高的岸段有3段(第9-11段),该高风险岸段位于整个岸段中段内凹的下游,拐出的反弯形态走向受水流顶冲作用明显;相对风险程度次高的有6段(第1-2、4-5、14-15段),需保持监测,谨防该段岸线短期内风险有进一步增加的趋势;相对风险程度中等的有5段(第3、6、8、12-13段),相对风险程度中的仅有一段(第7段)。由于高风险岸段位于机场第五跑道外侧,其安全性不容有失,且最上游的1 km 滩地(第9段)已逼近规范安全临界状态,故针对该1 km 岸段开展保滩工程,新建3座150 m 丁勾坝(T型+L型+L型)。

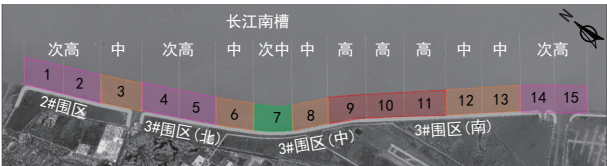


图2 岸线相对风险情况示意图(2023年汛后)

主体工程2024年9月实施完成后,汛后再次进行水下地形测量,各评估岸段的相对风险情况见图3。

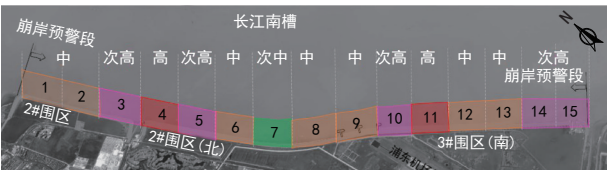


图3 岸线相对风险情况示意图(2024年汛后)

与2023年汛后评估结果相比,2024年汛后评估结果出现以下几点变化:

(1)实施保滩工程的1 km 高风险岸段(第9段)降为中风险岸段,根据汛后水下地形,-5 m 等深线不再冲刷后退且略有回淤,工程已发挥初步效益,随着时间的推移,坝田及上下游滩地将逐步淤积,岸段风险将进一步降低。同时,紧邻保滩工程下游1 km 岸段(第10段),由高风险降为次高风险,因此保滩工程对该岸段也起到一定积极作用。

(2)北段原1 km 中风险岸段(第3段)升为次高风险岸段,原1 km 次高风险岸段(第4段)升为高风险岸段,根据测量数据,这两段在近一年中断面刷深最为严重,最大刷深约1.2 m。由于上游水沙条件及区域大河势并没有发生变化,仍呈冲刷态势,部分岸段受台风影响,导致冲刷进一步加剧,风险提升。

4 结 语

(1)利用层次分析法建立了崩岸风险评估体系,

科学选取了评估指标并明确了各指标的权重,构建了风险评估模型并对风险值进行了计算和划分,对保滩工程的实施提供了重要技术支撑。同时对比了保滩工程实施前后的相对风险变化情况,证实了保滩工程实施的积极作用,但区域大河势及极端天气的影响使得整个岸段仍呈冲刷态势。

(2)鉴于水下地形的动态变化及保滩工程的实施对局部河势产生的影响,岸线相对风险程度在不断动态变化。针对存在崩岸风险的岸段,应当采用“统一规划,分期实施”的策略,通过定期开展水下地形监测,做好风险评估工作,根据岸段风险变化情况动态调整保滩方案,确保堤防及后方土地安全。

参考文献:

- [1] 夏军强,周美蓉,许全喜,等.三峡工程运用后长江中游河床调整及崩岸特点[J].人民长江,2020,51(1):16-27.
- [2] 邓彩云,李凌云,朱勇辉.河岸稳定性评估指标体系初探[J].长江科学院院报,2019,36(10):127-130.
- [3] 余文畴,长江中下游河道崩岸机理中的河床边界条件[J].长江科学院院报,2008,25(1):8-11.
- [4] 余文畴,岳红艳,长江中下游崩岸机理中的水流泥沙运动条件[J].人民长江,2008,39(3):64-66.
- [5] 夏军强,宗全利,许全喜,等.下荆江二元结构河岸本体特性及崩岸机理[J].水科学进展,2013,24(6):810-820.
- [6] 龚志龙,李凌云,王洪杨,等.长江中游干流河道崩岸特征与机理研究综述[J].长江科学院院报,2025,42(9):22-33.
- [7] 龚政,张凯丽,赵堃,多因素作用下河道崩岸过程试验与数值模拟研究[J].中国防汛抗旱,2022,32(9):16-20.
- [8] 李强,王乃茹,曹双,等.长江中下游岸滩稳定性评价指标体系构建及应用[J].人民长江,2022,53(8):1-8.
- [9] 彭良泉.长江中下游崩岸预测方法研究[J].水利水电快报,2022,43(2):1-8.
- [10] 王媛,陈尚星,汪华安.基于人工神经网络的崩岸预测模型研究[J].河海大学学报(自然科学版),2007,35(5):514-517.
- [11] 王延贵,齐梅兰,金亚昆.河道岸滩稳定性综合评价方法[J].水利水电科技进展,2016,36(5):55-59.
- [12] 孙启航,夏军强,周美蓉,等.层次分析法在荆江河段崩岸影响因素研究中的应用[J].泥沙研究,2021,46(2):21-28.
- [13] GB/T 42435—2023,海岸侵蚀监测与灾害损失评估技术规范[S].
- [14] T/CHES 57—2021,河道崩岸监测规范[S].
- [15] SL/Z 679—2015,堤防工程安全评价导则[S].
- [16] 赵志楠,孙晶,何凯,等.近40年邢台地区干旱灾害致灾因子危险性评估[J].农业灾害研究,2022,12(9):191-193.