

文章编号:1671-6833(2024)06-0001-08

# 考虑淹没区域危险度的溃坝洪灾避难场所选址评价

李宗坤<sup>1</sup>, 张开楷<sup>1</sup>, 葛巍<sup>1,2</sup>, 朱俊宇<sup>1</sup>, 焦余铁<sup>1</sup>, 张亚东<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 针对溃坝洪灾避难场所选址中对潜在淹没区域危险程度重视不足的问题, 提出了一种新的溃坝洪灾避难场所选址评价模型。首先, 在构建危险度评价指标体系的基础上, 运用改进突变评价法对潜在淹没区域进行危险度评价和危险等级划分; 其次, 将避难场所与高级别危险区的距离作为选址评价指标, 并考虑避难场所的灾害风险、位置规模、应急保障等条件, 通过层次分析法确定权重, 运用 TOPSIS 法对避难场所进行选址评价; 最后, 以我国陆浑水库下游 13 个潜在淹没区域和 10 个备选避难场所为例进行验证。结果表明: 危险等级较高的潜在淹没区域中, 白元镇为 I 级危险区, 彭婆镇、鸣皋镇、城关街道、龙门镇为 II 级危险区, 评价较优的备选避难场所能够满足重视高危险度潜在淹没区域的要求。

**关键词:** 溃坝洪水; 避难场所; 危险度; 选址; TOPSIS 法

**中图分类号:** TV122+.4; X43

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2024.06.016

水库大坝在给人类带来显著经济和社会效益的同时, 对下游人民群众的生命财产安全造成了极大的威胁。2020 年 5 月, 由于暴雨等原因, 美国 Eden-ville 坝溃决, 一万多人紧急疏散。2021 年郑州市“7·20”暴雨, 造成郭家咀水库、常庄水库以及下游贾鲁河堤岸发生险情, 数十万人紧急转移。合理规划 and 建设避难场所对降低溃坝洪水造成的危害和损失有重要作用。因此, 研究潜在溃坝洪灾避难场所选址评价方法至关重要。

现代选址研究起源于 20 世纪初, Weber 等<sup>[1]</sup>开展了选址研究, 提出了单一仓库到各个需求点的距离最小化问题。随着需求的多样化、复杂化, 选址研究也更加深入。Dalal 等<sup>[2]</sup>将建设成本作为目标, 构建了避难场所选址的单目标模型。单目标模型主要包括  $p$ -median 方法、 $p$ -center 方法等, 该类模型使用方便, 但适用目标较单一<sup>[3]</sup>。因此, 研究人员进一步构建了多目标模型。Zhao 等<sup>[4]</sup>以最小疏散时间和避难场所面积为目标构建了多目标选址模型。

Xu 等<sup>[5]</sup>以最小避难场所面积和疏散距离为目标构建了选址模型。张宣峰等<sup>[6]</sup>以容纳人数最多且避难场所数量最少为目标构建了选址模型。王维莉等<sup>[7]</sup>以最小避难场所数量和转移距离为目标, 建立了优化模型。以上研究通常从建设成本、容纳人数等避难场所自身因素出发来考虑模型的构建, 但未充分考虑避难需求地区危险程度的影响, 可能会出现规划的避难场所与高危险程度地区的距离相对较远的情况。

因此, Esmaelian 等<sup>[8]</sup>考虑建筑物质量和人口密度构建了避难场所选址模型; Marcelin 等<sup>[9]</sup>考虑年龄分布对飓风救援设施的选址进行了优化分析。以上研究通过考虑避难需求地区特征的影响, 使避难场所选址能够重视人口密度大、老龄化严重等因素, 但仅考虑了一两个影响因素进行危险程度的识别。然而, 避难需求地区的危险程度受多个因素影响, 需要对其进行综合评价, 以判断出危险程度高的地区, 合理选址。

**收稿日期:** 2024-05-28; **修订日期:** 2024-06-21

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52079127, 52179144); 中国博士后科学基金项目(2023M731259); 河南省自然科学基金优秀青年基金项目(232300421067); 河南省高校科技创新人才支持计划(22HASTIT011)

**作者简介:** 李宗坤(1961—), 男, 河南邓州人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水利水电工程风险评价与管理研究, E-mail: lizongkun@zzu.edu.cn。

**通信作者:** 葛巍(1990—), 男, 江苏沭阳人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水利水电工程风险评价与管理研究, E-mail: gewei@zzu.edu.cn。

**引用本文:** 李宗坤, 张开楷, 葛巍, 等. 考虑淹没区域危险度的溃坝洪灾避难场所选址评价[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(6): 1-8. (LI Z K, ZHANG K K, GE W, et al. Evaluation on site selection of shelters for dam failure floods considering the risk degree of inundation area[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(6): 1-8.)

对于溃坝洪灾而言,洪水的潜在淹没区域即为避难需求地区。因此,针对上述问题,在建立潜在淹没区域危险度评价指标体系的基础上,应用改进突变评价法构建了危险度评价模型并制定危险等级划分标准,将避难场所与高级别危险区的距离作为选址评价指标,从而与选址结合构建了潜在溃坝洪灾避难场所选址评价模型。

1 危险度评价及等级划分

危险程度高的潜在淹没区域对避难场所需求更迫切,在规划避难场所时应倾向于该类区域。为识别此类区域,将潜在淹没区域的危险程度定义为危险度并进行评价。根据危险度评价结果将各个潜在淹没区域划分为不同级别的危险区,为避难场所选址评价提供依据。

1.1 危险度评价指标体系

潜在淹没区域危险度与生命损失有一定的契合性,危险程度高的区域生命损失显然更大。参照已有生命损失研究成果<sup>[10-14]</sup>,结合研究目的及实际情况,对相应评价指标进行优选,指标选取的原则如下。

- (1)科学性。评价指标体系需要在科学的理论的指导下建立,逻辑必须清晰严谨。
- (2)系统性。为便于分析,选取的指标应能形成一个有机的整体,且具有一定的层次性。
- (3)指标要符合研究目的及实际情况。要剔除不符合实际情况的评价指标,找出最重要且具有代表性的评价指标。

(4)定性与定量相结合。洪灾认知水平等定性指标难以直接量化,且对危险度也具有重要影响。因此,应坚持定性与定量相结合的原则。

根据以上指标选取原则和灾害理论,从致灾因子、承灾体、孕灾环境 3 个方面确定危险度的评价指标,选用洪水严重程度、风险人口数量、青壮年比例、洪灾认知水平、与坝址的距离、建筑物质量、具备的救援能力 7 个评价指标,从而构建危险度评价指标体系,如图 1 所示。

1.2 评价指标标准化及等级划分

结合中国洪涝灾害等级划分标准以及已有溃坝生命损失研究,通常将生命损失及评价指标划分为 5 个等级。为方便有效地区分不同危险等级的潜在淹没区域,本文将评价指标平均分为 D-5 级[0, 0.2)、D-4 级[0.2, 0.4)、D-3 级[0.4, 0.6)、D-2 级[0.6, 0.8)和 D-1 级[0.8, 1.0] 5 个等级。

洪水严重程度是危险度的重要影响因素,其取

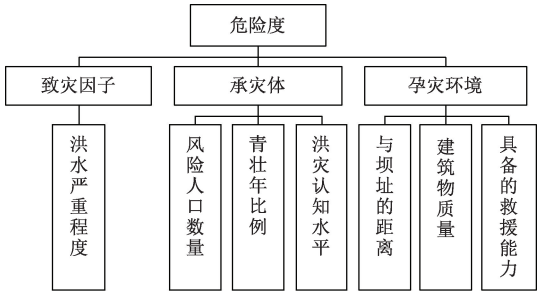


图 1 潜在淹没区域危险度评价指标体系  
Figure 1 Evaluation index system for risk degree of potential inundation areas

值为洪水深度和流速的乘积。根据已有研究<sup>[11]</sup>,可将洪水严重程度及洪灾认知水平、具备的救援能力 2 个定性指标划分为 5 个等级。

危险度评价是受洪水影响区域的内部比较,评价目的是区分不同危险等级的潜在淹没区域。因此对风险人口数量、青壮年比例、与坝址的距离、建筑物质量 4 个定量指标的初始值进行标准化处理,并平均分为 5 个等级,以达到区分的目的。其中,风险人口数量按式(1)进行标准化处理,青壮年比例、与坝址的距离、建筑物质量按式(2)进行标准化处理。

$$R_i = \frac{r_i - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}}; \tag{1}$$

$$R_i = \frac{r_{\max} - r_i}{r_{\max} - r_{\min}}。 \tag{2}$$

式中: $R_i$  为指数  $i$  标准化处理后的值; $r_i$  为指数  $i$  的初始值; $r_{\max}$  和  $r_{\min}$  分别为所有指标  $i$  中的最大值和最小值。

综合以上分析,初步制定各个评价指标的对应等级,如表 1 所示。

对于评价指标初始值的获取,建筑物质量参照 Ge 等<sup>[15]</sup>提出的建筑物躲避率计算方法综合分析确定,如式(3)所示:

$$R = \frac{NUM_{un-dest}}{NUM_{tot}} \times 100\%。 \tag{3}$$

式中: $R$  为建筑物躲避率; $NUM_{un-dest}$  为成功抵御洪水冲击的建筑数量; $NUM_{tot}$  为面对洪水冲击的建筑总数。

建筑物对洪水冲击的抵御能力参照王志军等<sup>[16]</sup>建立的中国房屋破坏参考标准确定,如表 2 所示。使用水动力模拟软件 HEC-RAS 进行溃坝洪水模拟,结合 ArcGIS 软件获取洪水严重程度数据。其余 5 个评价指标根据已有统计资料确定。

1.3 基于改进突变评价法的危险度评价步骤

突变理论由法国数学家 Rene Thom 于 1972 年提出,用来研究非连续现象。突变评价法是突变理

表 1 评价指标对应等级

Table 1 Corresponding levels of evaluation index

评价指 标等级	洪水严重程 度/(m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	风险人 口数量	青壮年比例	洪灾认 知水平	与坝址 的距离	建筑物 质量	具备的救 援能力
D-5 级	[ 0,0.5)	[ 0,0.2)	[ 0,0.2)	明确	[ 0,0.2)	[ 0,0.2)	强
D-4 级	[ 0.5,4.6)	[ 0.2,0.4)	[ 0.2,0.4)	中等	[ 0.2,0.4)	[ 0.2,0.4)	较强
D-3 级	[ 4.6,12.0)	[ 0.4,0.6)	[ 0.4,0.6)	一般	[ 0.4,0.6)	[ 0.4,0.6)	中等
D-2 级	[ 12.0,15.0)	[ 0.6,0.8)	[ 0.6,0.8)	模糊	[ 0.6,0.8)	[ 0.6,0.8)	较弱
D-1 级	[ 15.0,+∞)	[ 0.8,1.0]	[ 0.8,1.0]	未知	[ 0.8,1.0]	[ 0.8,1.0]	弱

表 2 中国房屋破坏参考标准

Table 2 Reference standards for buildings damage in China

房屋类型	破坏标准
泥土结构平房	$H \geq 0.9$ m 且 $S_F \geq 2$ m <sup>2</sup> /s
砖砌、混凝土结构平房	$V \geq 2$ m/s 且 $S_F \geq 7$ m <sup>2</sup> /s
2 层楼房	$V \geq 2.4$ m/s 且 $S_F \geq 15$ m <sup>2</sup> /s
3 层楼房	$V \geq 2.4$ m/s 且 $S_F \geq 22$ m <sup>2</sup> /s
4 层楼房	$V \geq 2.54$ m/s 且 $S_F \geq 29$ m <sup>2</sup> /s

注: $H$ 为洪水水深; $V$ 为洪水流速; $S_F$ 为洪水严重程度。对于更高的楼房,其抵抗洪水能力很强,可认为不能被破坏。

论常见的应用,具有快速准确、有效减少主观因素影响的优点。常用突变模型如表 3 所示。由于归一公式的聚集性,常规突变评价法所得评价值较为接近,不符合对优劣的直观判断。因此,研究人员提出了改进突变评价法,以提高评价值分辨率水平,便于直观判断评价值的等级<sup>[17]</sup>。具体评价流程如下。

步骤 1 根据洪水模拟数据和已有统计资料确

表 3 几种常见的突变模型

Table 3 Several common catastrophe models

类型	控制变量	势函数	归一公式
折叠突变	1	$x^3/3+ax$	$x_a = a^{1/2}$
尖点突变	2	$x^4/4+ax^2/2+bx$	$x_a = a^{1/2}, x_b = b^{1/3}$
燕尾突变	3	$x^5/5+ax^3/3+bx^2/2+cx$	$x_a = a^{1/2}, x_b = b^{1/3}, x_c = c^{1/4}$
蝴蝶突变	4	$x^6/6+ax^4/4+bx^3/3+cx^2/2+dx$	$x_a = a^{1/2}, x_b = b^{1/3}, x_c = c^{1/4}, x_d = d^{1/5}$

注:在突变评价法的应用中,归一公式的 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 分别为各评价指标的数据。

表 4 危险度对应危险等级

Table 4 Corresponding levels of risk degree

危险度	危险等级
[ 0,0.2)	V 级危险区
[ 0.2,0.4)	Ⅳ级危险区
[ 0.4,0.6)	Ⅲ级危险区
[ 0.6,0.8)	Ⅱ级危险区
[ 0.8,1.0]	I 级危险区

2 考虑潜在淹没区域危险度的溃坝洪灾避难场所选址评价

2.1 潜在溃坝洪灾避难场所选址评价指标体系

针对溃坝洪水灾害,结合危险等级划分、已有研究

定所有指标的值。

步骤 2 根据指标的特点对指标进行标准化处理。

步骤 3 将危险度评价指标根据相对重要性由强到弱依次排列,构建突变模型。采用常规突变评价法计算当所有底层指标的隶属度值均为  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ , 且  $x_i \in [0, 1]$ ) 时的突变综合评价值  $y_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ , 且  $y_i \in [0, 1]$ )。

步骤 4 通过回归分析拟合  $x$  与  $y$  的函数关系。

步骤 5 通过常规突变评价法计算各个潜在淹没区域的评价值。

步骤 6 根据回归函数将常规突变评价值  $y$  转换为隶属度值  $x$ , 即为危险度。

步骤 7 根据得到的危险度  $x$  判断潜在淹没区域所属危险等级,如表 4 所示。

成果以及国家规范<sup>[18-19]</sup>,从灾害风险、位置规模、应急保障、与不同级别危险区的距离 4 个方面出发,进行潜在溃坝洪灾避难场所选址评价指标体系的构建。

(1)灾害风险。避难场所应选在不易发生地震、滑坡、泥石流等地质灾害的地段。暴雨等极端天气易引起超标准洪水,而超标准洪水是溃坝发生的主要原因之一<sup>[20]</sup>。极端降雨天气使滑坡、泥石流等地质灾害出现的可能性增加,因此针对潜在溃坝洪灾的避难场所更应避免选址在易出现地质灾害风险的地段。此外,避难场所应远离易燃易爆工厂仓库、储气站等危险源。因此,选取地质灾害、与危险源的距离作为 2 个评价指标。

(2)位置规模。避难场所是供大量风险人口避



难的场所,需考虑可容纳人口的数量。此外,避难场所还应满足不被洪水淹没的要求。因此,可容纳人数、高程是 2 个重要评价指标。避难场所连通的避难道路、地形情况(如坡度等,高程除外)应满足要求,以便车辆等交通工具能够顺利抵达。

(3) 应急保障。灾害发生后,大量避难人口向避难场所转移。为维持秩序和预防紧急情况,避难场所应当靠近当地的医疗机构、公安机关、消防机构,且距离越近越好。

(4) 与不同级别危险区的距离。潜在淹没区域与避难场所的距离是风险人口能够顺利进入避难场所的关键影响因素<sup>[21]</sup>。危险度高的潜在淹没区域对避难场所需求更迫切,避难场所应接近此类区域。因此,根据危险度评价结果,将避难场所与 I 级危险区、II 级危险区的平均距离以及与危险区的最大距离作为 3 个评价指标,约束备选避难场所与不同级别危险区的距离,使避难场所选址能够优先考虑高级别危险区的需求。

综上,选取了地质灾害、与危险源的距离等 12 个评价指标,构建了潜在溃坝洪灾避难场所选址评价指标体系,如图 2 所示。其中,与医疗机构、公安机关、消防机构的距离 3 个指标均取最近距离。

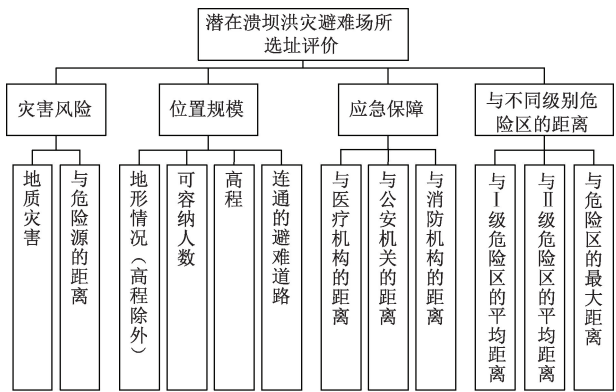


图 2 潜在溃坝洪灾避难场所选址评价指标体系  
Figure 2 Evaluation index system for site selection of potential dam failure flood shelters

2.2 考虑潜在淹没区域危险度的溃坝洪灾避难场所选址评价模型

(1) 备选避难场所初选。在进行备选避难场所的选择时,首先根据地质灾害、与危险源的距离、地形情况(高程除外)3 个指标对避难场所进行初选。若 3 个指标符合条件,则通过初选,对备选避难场所进行评价时不再考虑这 3 个指标。

(2) 层次分析法(AHP)计算权重。层次分析法能够有效处理复杂决策问题,特别是在本研究中,该方法能够反映决策者对不同级别危险区的重视程

度。大致计算步骤如下:首先,根据 1~9 标度法则由专家进行打分,并构造判断矩阵;其次,根据判断矩阵的最大特征值求出相应的特征向量,进而得出权重值;最后,进行一致性检验,如式(4)和式(5)所示。若  $CR < 0.10$ ,则通过一致性检验,否则应重新确定判断矩阵。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}; \tag{4}$$

$$CR = \frac{CI}{RI}。 \tag{5}$$

式中: $\lambda_{\max}$  为判断矩阵最大特征值; $n$  为判断矩阵的阶数; $RI$  为随机性指标,可查表取值。

(3) 基于 AHP-TOPSIS 的避难场所选址评价。潜在溃坝洪灾避难场所选址影响因素较多,选用能够有效处理多目标决策问题的 TOPSIS 综合评价法对备选避难场所进行评价,评价步骤如下。

步骤 1 构建决策矩阵并进行标准化处理。

步骤 2 将层次分析法计算得到的权重与标准化矩阵相乘得到加权矩阵。

步骤 3 确定正期望解和负期望解。

步骤 4 计算各个评价对象到正期望解和负期望解的距离,如式(6)所示:

$$\begin{cases} D_i^1 = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_j^1 - z_{ij})^2}; \\ D_i^0 = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_j^0 - z_{ij})^2}。 \end{cases} \tag{6}$$

式中: $Z_j^1$  和  $Z_j^0$  分别为第  $j$  个指标的正期望解和负期望解; $i = 1, 2, \dots, m$ 。

步骤 5 计算各个评价对象的相对接近度即综合评价值,如式(7)所示:

$$C_i = \frac{D_i^0}{D_i^1 + D_i^0}。 \tag{7}$$

式中: $D_i^1$  和  $D_i^0$  分别为第  $i$  个评价对象到正期望解和负期望解的距离; $i = 1, 2, \dots, m$ 。

步骤 6 将计算得到的综合评价值按由大到小的顺序依次排列,值越大的方案越好,由此得到备选避难场所的优劣次序。

综上,建立了评价潜在淹没区域危险度的模型,并与选址结合构建避难场所选址评价模型,方法流程如图 3 所示。

3 实例分析

3.1 工程概况

陆浑水库位于河南省洛阳市嵩县陆浑峡谷,是一座以防洪为主,兼灌溉、供水、发电等综合利用的

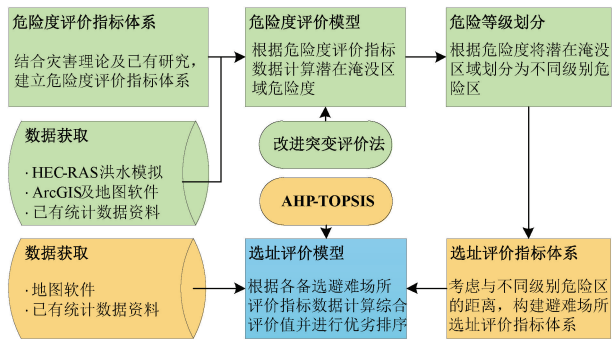


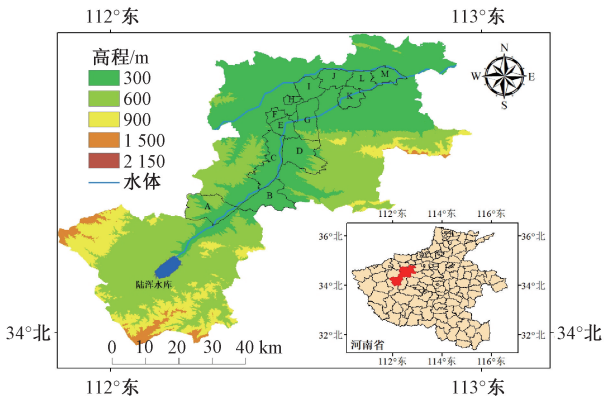
图 3 潜在溃坝洪灾避难场所选址评价方法流程图

Figure 3 Flowchart of the methodology for evaluating the site of potential dam failure flood shelters

大型水库。水库主要建筑物包括大坝、溢洪道、灌溉发电洞等,大坝坝高 55 m,为黏土斜墙砂壳坝。水库流域面积 3 492 km<sup>2</sup>,总库容 1.32×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>。水库距洛阳市 67 km,下游地区人口数量众多,发展水平较高,一旦溃坝后果难以接受。因此,研究以陆浑水库下游伊川县、洛龙区等地区为例,进行潜在溃坝洪灾避难场所选址评价。选取水库下游 13 个潜在淹没区域为研究对象,距离坝址由近到远分别是鸣皋镇(A)、白元镇(B)、城关街道(C)、彭婆镇(D)、龙门石窟街道(E)、龙门镇(F)、诸葛镇(G)、太康东路街道(H)、李楼街道(I)、佃庄镇(J)、庞村镇(K)、翟镇(L)和岳滩镇(M),工程概况如图 4 所示。

3.2 危险度评价与危险等级划分

根据统计资料及现有研究<sup>[15]</sup>,得到陆浑水库下游 13 个潜在淹没区域评价指标的原始数据,如表 5 所示。其中,青壮年比例由于缺乏具体数据,采用乡镇级别 15~59 岁年龄分布数据代替;建筑物质量根据式(3)计算得出。在表 5 中,按照改进突变评价法计算 13 个潜在淹没区域的危险度,并进行危险等



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的  
的标准地图(审图号为 GS(2020)4619)。

图 4 研究区域概况图

Figure 4 Overview of the study area

级划分,得到下游 13 个潜在淹没区域的危险度评价及危险等级划分结果。不同级别危险区的分布如图 5 所示。

采用葛巍等<sup>[10]</sup>提出的 AHP-BN 法进行风险值的计算,将所得结果与危险度评价结果对比,如表 6 所示。E 和 G 计算得到的风险值较高,原因是 2 个地区在洪水严重程度方面较危险,而在 AHP-BN 法中洪水严重程度的权重系数较大。突变评价法无须对评价指标赋权,因此 E 和 G 得出的风险值较危险度评价结果高。其余评价结果均一致,验证了危险度评价方法的有效性。

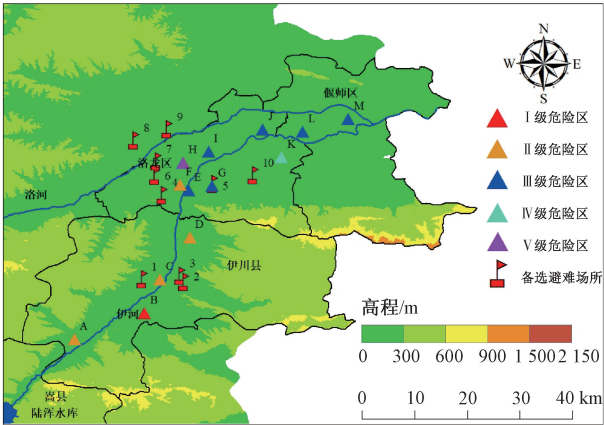
3.3 潜在溃坝洪灾避难场所选址评价

根据溃坝洪水模拟结果,在潜在淹没范围以外选取出 10 个备选避难场所。所选取的场所均满足 3 个初选指标的要求,因此只需考虑容纳人数等 9 个评价指标。备选避难场所的评价指标数据如表 7 所示,位置分布如图 5 所示。

表 5 潜在淹没区域危险度评价及危险等级划分结果

Table 5 Risk degree and classification of potential inundation areas

潜在淹 没区域	洪水严重程 度/(m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	风险人 口数量	青壮年 比例/%	洪灾认 知水平	与坝址的 距离/km	建筑物 质量/%	具备的救 援能力	危险度	危险等级
A	24.11	8 614	55.1	明确	23	61.670	弱	0.746	Ⅱ级
B	19.76	12 527	52.0	明确	36	55.001	弱	0.817	Ⅰ级
C	29.45	21 982	65.5	一般	39	72.730	较弱	0.612	Ⅱ级
D	20.62	10 569	55.9	一般	50	67.331	弱	0.786	Ⅱ级
E	32.84	9 825	59.2	中等	55	68.810	强	0.511	Ⅲ级
F	15.05	4 032	61.4	未知	56	63.674	弱	0.607	Ⅱ级
G	10.99	10 302	60.0	未知	64	81.853	弱	0.460	Ⅲ级
H	5.40	7 426	64.1	明确	66	77.309	强	0.195	V级
I	8.27	29 551	58.4	中等	68	64.909	较强	0.505	Ⅲ级
J	7.24	20 528	57.3	未知	78	73.208	弱	0.499	Ⅲ级
K	3.39	8 405	58.8	未知	80	91.422	弱	0.260	Ⅳ级
L	7.58	31 043	57.9	未知	84	71.063	弱	0.519	Ⅲ级
M	8.67	20 215	58.4	未知	92	69.660	弱	0.443	Ⅲ级



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的  
标准地图(审图号为GS(2020)4619)。

图 5 不同级别危险区及备选避难场所分布图

Figure 5 Distribution of areas and  
alternative shelters

表 6 危险度与风险值结果对比

Table 6 Comparison of results

危险度	风险值 (AHP-BN 法)	潜在淹没区域排序	
		按危险度	按风险值
0.817	0.861	B	B
0.786	0.844	D	D
0.746	0.844	A	A
0.612	0.841	C	C
0.607	0.838	F	F
0.519	0.791	L	E
0.511	0.601	E	G
0.495	0.575	I	L
0.491	0.572	J	I
0.476	0.563	G	J
0.443	0.561	M	M
0.255	0.446	K	K
0.195	0.415	H	H

表 7 备选避难场所评价指标数据

Table 7 Data of evaluation index for alternative shelters

备选避 难场所	容纳 人数	高程/ m	连通的 避难道 路/条	与医疗机 构的距 离/km	与公安机 关的距 离/km	与消防机 构的距 离/km	与 I 级危险 区的平均 距离/km	与 II 级危险 区的平均 距离/km	与危险区的 最大距离/ km
1	30 000	227	1	1.3	0.7	4.3	11	15.00	60
2	12 000	207	1	0.5	0.2	2.2	12	17.00	57
3	23 000	211	2	1.1	0.1	1.5	11	15.50	56
4	11 000	291	1	4.5	3.4	4.6	28	18.00	38
5	9 000	154	1	1.4	0.6	0.7	36	23.50	44
6	50 000	155	3	0.7	0.9	1.4	33	22.75	42
7	20 000	146	2	2.5	0.5	0.6	36	23.75	43
8	30 000	161	4	0.3	0.9	1.0	42	30.25	49
9	14 000	150	2	0.5	0.4	1.4	43	31.25	52
10	50 000	164	1	8.0	0.9	3.6	45	32.50	55

按照层次分析法的步骤计算权重值,并进行一致性检验。将所得权重与决策矩阵相乘从而构造加权矩阵,确定正负期望解,并根据式(6)计算各个评价对象到正期望解和负期望解的距离,通过式(7)计算得到 10 个评价对象的综合评价值  $C$  分别为 0.636, 0.621, 0.675, 0.262, 0.145, 0.350, 0.176, 0.352, 0.212, 0.268。将综合评价值从大到小依次排列,可以得出 10 个备选避难场所的优劣次序为 3,1,2,8,6,10,4,9,7,5。

不考虑与高级别危险区的距离,计算备选避难场所的综合评价,将 2 种结果进行对比分析,如表 8 所示。

由表 8 可知,当不考虑与高级别危险区的距离时,备选避难场所 8 为最优。虽然备选避难场所 8 的规模、应急保障等条件都较好,但由图 5 可知,备选避难场所 8 与 I 级、II 级危险区的距离较远。而

考虑与高级别危险区的距离的模型计算结果中,尽管备选避难场所 3,1,2 在规模、应急保障方面不是最优的,但综合考虑了与高级别危险区的距离,能够起到重视高危险度潜在淹没区域的效果。可见,所建立的考虑潜在淹没区域危险度的溃坝洪灾避难场所选址评价模型能够充分考虑高级别危险区的需求。因此,可结合实际情况,按照综合评价结果对避难场所进行优选。

该避难场所选址评价方法从灾害风险、位置规模、应急保障、与不同级别危险区的距离 4 个方面出发确定避难场所的选址评价指标,使用危险度评价结果来反映潜在淹没区域对避难场所的需求程度,运用 AHP-TOPSIS 评价法对备选避难场所进行优劣排序,能够使选出的避难场所满足远离灾害风险、具备适宜的规模、与应急保障设施距离近、重视高危险度潜在淹没区域等要求。该方法使用方便快捷,能

够对大量避难场所进行快速评价、判断相对重要性,可以很好地适用于紧急状态下的避难场所选址、确定避难场所的建设顺序等情况。

表 8 模型计算结果对比

Table 8 Comparison of calculation results				
排 序	考虑与高级别 危险区的距离		不考虑与高级别 危险区的距离	
	备选避难场所	综合评价值	备选避难场所	综合评价值
1	3	0.675	8	0.601
2	1	0.636	3	0.463
3	2	0.621	2	0.458
4	8	0.352	6	0.428
5	6	0.350	9	0.415
6	10	0.268	10	0.289
7	4	0.262	1	0.252
8	9	0.212	7	0.218
9	7	0.176	5	0.199
10	5	0.145	4	0.176

4 结论

合理规划和建设避难场所是应对灾害风险的重要措施。避难场所选址应重视高危险程度地区,本文构建了危险度评价模型,并与选址结合建立了潜在溃坝洪灾避难场所选址评价模型。以陆浑水库下游地区为例进行模型的应用,得出 5 个高级别危险区,危险度由高到低分别为白元镇、彭婆镇、鸣皋镇、城关街道、龙门镇,与层次分析-贝叶斯网络法得出的结果对比,证明了结果的有效性。最后,评价较优的备选避难场所能够在重视高危险度潜在淹没区域的同时满足灾害风险、位置规模、应急保障等要求,验证了方法的可行性。本文方法采用危险度评价结果来判断潜在淹没区域的需求程度,为潜在溃坝洪灾避难场所选址评价提供了新思路。

参考文献:

[1] WEBER E M, SEAMAN V Y, STEWART R N, et al. Census-independent population mapping in northern nigeria[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 204: 786-798.

[2] DALAL J, MOHAPATRA P K J, MITRA G C. Locating cyclone shelters: a case[J]. Disaster Prevention and Management, 2007, 16(2): 235-244.

[3] FADDA E, MANERBA D, CABODI G, et al. Comparative analysis of models and performance indicators for optimal service facility location[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2021, 145: 102174.

[4] ZHAO X J, XU W, MA Y J, et al. Relationships between evacuation population size, earthquake emergency shelter capacity, and evacuation time[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2017, 8(4): 457-470.

[5] XU W, MA Y J, ZHAO X J, et al. A comparison of scenario-based hybrid bilevel and multi-objective location-allocation models for earthquake emergency shelters: a case study in the central area of Beijing, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2018, 32(2): 236-256.

[6] 张宣峰,于善初,张晓飞. 多目标约束下的固定避难场所选址优化[J]. 城市发展研究, 2020, 27(8): 59-66.

ZHANG X F, YU S C, ZHANG X F. Optimized location model of resident emergency congregate shelter based on multi-objective constraints[J]. Urban Development Studies, 2020, 27(8): 59-66.

[7] 王维莉,王卓. 平灾结合的避难设施选址与灾民安置优化[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(10): 3689-3696.

WANG W L, WANG Z. Site selection of emergency shelters on the combination of normal times and disaster time and optimization of resettlement scheme for disaster victims[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(10): 3689-3696.

[8] ESMAELIAN M, TAVANA M, SANTOS-ARTEAGA F J, et al. A multicriteria spatial decision support system for solving emergency service station location problems[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2015, 29(7): 1187-1213.

[9] MARCELIN J M, HORNER M W, OZGUVEN E E, et al. How does accessibility to post-disaster relief compare between the aging and the general population? A spatial network optimization analysis of hurricane relief facility locations[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2016, 15: 61-72.

[10] 葛巍,焦余铁,洪辛茜,等. 基于 AHP-BN 法的溃坝生命损失风险评价[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(3): 8-12.

GE W, JIAO Y T, HONG X Q, et al. Risk assessment of life loss caused by dam breach based on AHP-BN method[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2021, 42(3): 8-12.

[11] 李巍,李宗坤,葛巍,等. 基于改进可变模糊集法的溃坝生命损失评价及其应用[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(4): 419-425.

LI W, LI Z K, GE W, et al. Improved variable fuzzy set method and its application in life loss assessment of dam



break[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, 53(4): 419-425.

[12] PENG M, ZHANG L M. Analysis of human risks due to dam break floods, Part 2, application to Tangjiashan landslide dam failure[J]. Natural Hazards, 2012, 64(2): 1899-1923.

[13] HUANG D J, YU Z B, LI Y P, et al. Calculation method and application of loss of life caused by dam break in China[J]. Natural Hazards, 2017, 85(1): 39-57.

[14] MAHMOUD A A, WANG J T, JIN F. An improved method for estimating life losses from dam failure in China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2020, 34(8): 1263-1279.

[15] GE W, JIAO Y T, WU M M, et al. Estimating loss of life caused by dam breaches based on the simulation of floods routing and evacuation potential of population at risk[J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128059.

[16] 王志军, 宋文婷. 溃坝生命损失评估模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(3): 205-210.

WANG Z J, SONG W T. Study of estimation model of loss of life caused by dam break[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(3): 205-210.

[17] 李宗坤, 胡义磊, 邓宇, 等. 基于改进突变评价法的黄河凌汛灾害风险评价[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(1): 89-95.

LI Z K, HU Y L, DENG Y, et al. The Yellow River ice flood disaster risk assessment based on improved catastrophe theory evaluation method[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(1): 89-95.

[18] 初建宇, 马丹祥, 苏幼坡. 基于组合赋权 TOPSIS 模型的城镇固定避难场所选址方法研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(增刊 2): 307-312.

CHU J Y, MA D X, SU Y P. Study on the location method of urban fixed refuge based on TOPSIS model with combined weight[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(S2): 307-312.

[19] AMINI H K, ASADZADEH T S, MIRHAKIMI S A. A new index-based model for site selection of emergency shelters after an earthquake for Iran[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 77: 103110.

[20] 李宏恩, 马桂珍, 王芳, 等. 2000—2018 年中国水库溃坝规律分析与对策[J]. 水利水运工程学报, 2021(5): 101-111.

LI H E, MA G Z, WANG F, et al. Analysis of dam failure trend of China from 2000 to 2018 and improvement suggestions[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(5): 101-111.

[21] BERA S, GNYAWALI K, DAHAL K, et al. Assessment of shelter location-allocation for multi-hazard emergency evacuation[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2023, 84: 103435.

Evaluation on Site Selection of Shelters for Dam Failure Floods Considering the Risk Degree of Inundation Area

LI Zongkun<sup>1</sup>, ZHANG Kaikai<sup>1</sup>, GE Wei<sup>1,2</sup>, ZHU Junyu<sup>1</sup>, JIAO Yutie<sup>1</sup>, ZHANG Yadong<sup>1</sup>

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** In response to the problem of insufficient attention to the risk degree of potential inundation areas in the siting of shelters for dam failure floods, a new model for evaluating the sites of shelters was proposed. On the basis of establishing the risk evaluation index system, the improved catastrophe theory evaluation method was used to evaluate the risk degree and classify the risk level of the potential inundation areas. The distance between shelters and high-risk level areas was taken as the site selection evaluation index, and the disaster risk, location scale, emergency support of shelters were considered. The weights were determined by AHP method, and the TOPSIS method was applied to evaluate the sites of shelters. Finally, 13 potential inundation areas and 10 alternative shelters downstream of Luhun Reservoir in China were used as examples for validation. The results showed that among the areas with high risk levels, Baiyuan Township was a Class I hazardous area, and Pengpo Township, Minggao Township, Chengguan Street, and Longmen Township were Class II hazardous areas. The better evaluated shelters could meet the requirements of paying attention to areas with high risk degree.

**Keywords:** dam-failure floods; shelters; risk degree; site selection; TOPSIS method