

文章编号:1671-6833(2023)01-0089-07

基于改进突变评价法的黄河凌汛灾害风险评价

李宗坤^{1,2}, 胡义磊¹, 邓 宇^{3,4}, 葛 巍^{1,5}

(1. 郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 软件学院, 河南 郑州 450002; 3. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 4. 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心, 河南 郑州 450003; 5. 代尔夫特理工大学技术、政策和管理学院, 荷兰 代尔夫特 2628 BX)

摘 要: 针对突变评价法综合评价价值偏高、评价值之间比较接近的问题, 提出了一种采用三参数指数型曲线进行回归分析的改进方法, 并对改进方法的合理性进行了验证, 计算得到的改进评价值与常规评价值相比, 不仅大小排序一致, 而且极差明显增大, 数据在 $[0, 1]$ 的分布更加分散。从凌灾的自然属性和社会属性两个方面出发, 建立了 4 个层次的黄河凌汛灾害风险评价指标体系, 并将改进方法应用于黄河内蒙古头道拐至万家寨河段两岸 4 个旗县的凌汛灾害风险评价中。结果表明: 偏关县属于极低风险地区; 准格尔旗属于高风险地区; 清水河县和托克托县均属于中等风险地区; 常规突变评价法得到的综合评价价值很接近, 除偏关县外, 其余均集中在 $[0.912, 0.941]$, 不利于直观有效地区分风险的大小程度, 而改进的突变评价法使调整后的综合评价价值分布范围有效扩大, 极差达到了 0.446, 具有更高的分辨水平, 风险的大小等级更具可比性。评价结果与对各地区实际凌情的分析基本一致。

关键词: 凌汛灾害; 风险评价; 突变理论; 改进; 三参数指数

中图分类号: TV875; X43

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2022.04.011

凌汛是指河段中大量流凌堆积, 阻塞过水断面, 使水位壅高的一种现象^[1]。在凌汛期, 由于封河时冰塞冰坝的形成, 河道过流断面减小、槽蓄水量增加、水位上涨, 如开河过于突然(“武开河”), 则会在极短时间内形成凌汛险情, 造成冰水漫堤或堤防决口, 严重威胁到两岸人民的生命安全, 给当地经济发展带来严重的损害^[2]。

针对凌汛问题, 进行风险评估是开展防凌工作的有效手段之一, 根据评估的结果, 有针对性地采取防治措施, 防凌减灾的效果更好。Beltaos^[3]采用分布式函数方法(DFM), 利用凌汛峰值流量为数据源成功地量化和评估了冰塞洪水风险; Carrivick 等^[4]分析了冰岛等 20 个国家汇编的 1 348 次冰川洪水数据资料, 采用相对灾害指数对其产生的社会影响进行了评估; Wu 等^[5]采用投影寻踪、模糊聚类 and 加速遗传算法建立了黄河宁蒙段冰凌灾害风险综合评价模型, 并对宁蒙河段 1991—2010 年的冰灾风险进行了评估; Luo^[6]提出了一种

三参数区间灰色评价方法并建立了灰色 GM(1, 1) 模型, 可高效地评价黄河宁蒙河段冰冻灾害风险; 之后罗党等^[7]又提出了集对分析与前景理论相结合的评估方法, 对宁蒙河段不同地区的冰凌灾害进行了风险评估。上述研究方法中, 评价指标的选取及指标体系构建量化依据不足, 评价指标的权重易受到人为主观因素影响, 且评估模型计算过程较为复杂, 适用性不强。

在以突变理论为基础的突变评价法中, 系统的势函数能够反映系统具有某种趋向能力的状态, 而系统的状态由内部(状态)变量和外部(控制)变量之间的相互作用决定, 与评价指标分配的权重无关, 在一定程度上避免了主观因素对评价结果产生的影响^[8]。此外, 该评价方法虽然涉及系统科学、模糊数学和拓扑学等复杂数学理论, 但归一化公式的计算使得模型在实际应用中简单易行, 在自然科学和社会科学领域得到了广泛的应用。目前, 采用突变评价法对黄河凌汛灾害风险进行分析的研究较少。

收稿日期: 2022-06-07; 修订日期: 2022-08-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51879116, 51979024)

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, 主要从事水利工程风险评估与管理研究, E-mail: lizongkun@zzu.edu.cn。

引用本文: 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.)

吴岚^[9]应用突变评价法对内蒙古 4 个村落的冰凌洪水灾害风险进行了研究,计算出的风险评价价值均集中于 0.9,风险最低区域的评价价值也较高,评价结果不符合人们根据评价价值大小直观判断评价区域风险高低的习惯,容易产生误解。鉴于此,提出改进的突变评价法,对黄河凌汛灾害风险进行综合评价,并以黄河内蒙古头道拐至万家寨河段两岸的 4 个旗县为实例进行验证。

1 突变评价法的原理和特性

1.1 突变评价法的原理

突变理论由法国著名数学家 Rene Thom 于 1972 年在《结构稳定性和形态发生学》中首次提出,用来探讨和研究非连续的变化和突变现象^[8]。利用势函数来描述初等突变的模型,将系统的临界点进行划分,通过深入地研究其具有的不连续性特征,对初等突变的模型进行归纳,进而以此为理论基础研究自然界与社会现象中发生的不连续变化过程。突变系统的基本模型有 7 种,常用突变模型和相应的归一化公式^[10]如表 1 所示。

表 1 几种常见的突变模型

Table 1 Several common catastrophe models		
类型	势函数	归一化公式
折叠突变	x^3+ax	$x_a=\sqrt{a}$
尖点突变	x^4+ax^2+bx	$x_a=\sqrt{a},x_b=\sqrt[3]{b}$
燕尾突变	$x^5+ax^3+bx^2+cx$	$x_a=\sqrt{a},x_b=\sqrt[3]{b},x_c=\sqrt[4]{c}$
蝴蝶突变	$x^6+ax^4+bx^3+cx^2+dx$	$x_a=\sqrt{a},x_b=\sqrt[3]{b},x_c=\sqrt[4]{c},x_d=\sqrt[5]{d}$

1.2 突变评价法的特性

突变评价法不依赖精确的指标权重,只需要定性确定各指标之间的相对重要性,减小了主观因素对评价结果产生的影响,评价结果更具客观性。但是由于归一化公式的聚集特性,常规突变评价法存在综合评价价值偏高、评价价值之间比较接近的缺陷,不利于人们直观地判断综合值的等级与大小^[8]。

为了克服上述的缺陷,施玉群等^[11]提出通过分值得变换法将集中的综合评价价值变换为对应的具有习惯意义上“优”、“劣”概念的底层指标隶属度值,从而使变换后的综合值具有更大的可比性;唐明等^[12]采用线性关系调整计算了常规突变评价法的初始综合值,使评价价值分布到 $[0,1]$ 上的 10 个子区间,进而直观地分辨评价价值的大小和等级;李绍飞等^[8]选取幂函数的回归模型对突变综合评价价值和底层指标隶属度值进行拟合,并对拟合函数的模型结构和参数进行了分析讨论,使改进后的评价价值具有更高的

分辨水平,优劣更为清晰;李宗坤等^[10]提出采用 S 型曲线作为回归模型进行拟合的改进方法,改进的评价结果数值分布更加合理,具有更直观的“优”、“劣”含义。

根据上述研究可以看出,改进方法的关键是选取一种与突变评价法特性($x \in [0,0.1]$ 时, y 值急速增长; $x \in [0.1,1]$ 时, y 值缓慢增长趋近于 1)相一致的模型进行回归分析,根据该模型的对应关系,将系统的总突变隶属度值变换为对应的具有“优”、“劣”含义的底层指标隶属度值,以达到将突变评价价值极差增大的目的,进而使评价结果的优劣更加直观。针对同一个评价对象,选用合适的模型对突变评价法进行改进,能使评价结果具有更高的分辨水平。但现有改进方法提出的模型较少,且模型大多只含有 2 个参数,不能通过自身的调节使模型进一步优化,自适应能力不强^[13]。鉴于此,提出以下的改进方法,拓宽模型可供选择的范围,使改进的突变评价法在克服常规突变评价价值过高且比较集中的缺陷时能达到更好的效果。

2 突变评价法的改进

2.1 改进突变评价法的步骤

根据突变评价法的特性可知,当底层指标的隶属度值均取为 x_i 时,求出系统相应的总突变隶属度值 y_i ,则 x_i 与 y_i 呈正相关,且 (x_i,y_i) 的分布规律和三参数指数函数 $y = k - ae^{bx}$ 的图像变化趋势一致。因此,选取三参数指数型曲线来拟合 x 与 y 的关系,研究采用该模型对突变评价法进行改进的效果。

改进突变评价法的主要步骤如下。

(1)构建评价指标体系,将评价对象分解为由多个指标分主次组成的分层阶梯式系统。

(2)求出三参数指数回归模型的函数,判断曲线方程的拟合度并进行显著性检验,相关的计算流程如下。

令所有底层指标的隶属度值为 $x_i(i=1,2,\cdots,n, \text{ 且 } x_i \in [0,1])$,根据建立的评价指标体系,由突变评价法计算出相应的系统总突变隶属度值 $y_i(i=1,2,\cdots,n, \text{ 且 } y_i \in [0,1])$ 。采用三参数指数型曲线来拟合 x 与 y 的关系,如式(1)所示:

$$y = k - ae^{bx}, 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1. \quad (1)$$

曲线回归方程中,含有 3 个需要计算的统计量: k,a 和 b 。其中, k 为当 x 趋向于 $+\infty$ 时, y 所能达到的最大值。由突变评价法的特性可知,本文中 k 的

取值趋近于 1 且大于 1。将曲线回归函数通过变量代换 $y' = \ln(k - y)$, $a' = \ln a$ 化为线性回归函数的形式,如式(2)所示:

$$y' = a' + bx_0. \tag{2}$$

为了简便、快捷、准确地得到 k 的估计值,考虑到曲线的总体变化趋势,可以取 3 个等距的点 (x_0, y_0) 、 $(x_{n/2}, y_{n/2})$ 和 (x_n, y_n) 代入式(2),求解得到的方程组消去 a' 和 b ,即可求出 k 的较优解,得到估计值 \hat{k} 。

求得 k 的估计值之后,即可利用极大似然估计法求 a' 和 b 的估计值:令 $l_{xx} = \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2/n$, $l_{y'y'} = \sum_{i=1}^n y_i'^2 - (\sum_{i=1}^n y_i')^2/n$, $l_{xy'} = \sum_{i=1}^n x_i y_i' - (\sum_{i=1}^n x_i) \cdot (\sum_{i=1}^n y_i')/n$, 那么可以得到 $\hat{b} = l_{xy'}/l_{xx}$, $\hat{a}' = \bar{y}' - \hat{b}\bar{x}$, $\hat{a} = e^{\hat{a}'}$ 。则求得回归方程,如式(3)所示:

$$y' = \hat{a}' + \hat{b}x_0. \tag{3}$$

对曲线回归模型进行显著性检验。通过计算判定系数 R^2 ,检验曲线的拟合程度。 R^2 的值越接近于 1,说明拟合程度越好, R^2 的计算如式(4)所示:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2}. \tag{4}$$

将计算出的 k 、 a 和 b 的估计值代入式(1),即可得到函数 \hat{y} 。实际求得每个 \hat{y} 和 $\sum (y - \hat{y})^2$,进而计算出 $R = \sqrt{R^2}$ 。在显著性水平 $\alpha = 0.01$ 下进行检验,查相关系数检验表得到 $R_{(0.01, n-2)}$,若 $R \geq R_{(0.01, n-2)}$,则回归模型是显著的。将 $y' = \ln(k - y)$, $a' = \ln a$ 代入式(3),可得回归函数如式(5)所示:

$$y = \hat{k} - \hat{a}e^{\hat{b}x}, 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1. \tag{5}$$

(3)按照常规突变评价法,运用归一公式进行递归运算,求出初始综合评价值。

(4)利用三参数指数回归模型,将初始综合评价值代入计算出的回归函数中求其解,得到调整后的综合评价值作为改进值,进而根据事先划分的评价等级确定研究对象所属的级别。

2.2 三参数指数回归模型的合理性验证

为了验证选取三参数指数回归模型改进突变评价法的合理性及改进效果,以安徽省 2005 年旱灾的风险评价^[12](算例 1)和燕山水库施工方案的风险评价^[10](算例 2)作为算例进行验证,计算过程的相关数据分别来自文献[12]、文献[10]。

对于算例 1,利用上述改进方法得到的三参数指数回归模型的函数如式(6)所示:

$$y = 1.047\ 4 - 0.385\ 6e^{-2.026\ 9x},$$
$$0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1. \tag{6}$$

计算其判定系数 $R^2 = 0.997$ 接近 1,表明曲线回归方程拟合良好,且 $R = 0.999 > R_{(0.01, 8)} = 0.765$,因此选取的回归模型是显著的。

对于算例 2,利用上述改进方法得到的三参数指数回归模型的函数如式(7)所示:

$$y = 1.009\ 2 - 0.194\ 2e^{-2.854\ x},$$
$$0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1. \tag{7}$$

计算其判定系数 $R^2 = 0.965$ 接近 1,表明曲线回归方程拟合良好,且 $R = 0.982 > R_{(0.01, 13)} = 0.641$,因此选取的回归模型是显著的。

根据求得的回归函数,分别计算出改进的突变评价值,如表 2、表 3 所示。分析结果可知,利用三参数指数回归模型计算出的改进值,不但与常规值的大小排序一致,而且极差明显增大:算例 1 的极差由 0.102 增加到 0.367,扩大了 2.60 倍;算例 2 的极差由 0.033 增加到 0.319,扩大了 8.67 倍。数据在 [0,1] 上的分布更加合理,具有更高的分辨水平。因此,采用该模型对突变评价法进行改进是合理可行的。

表 2 算例 1 改进突变评价法计算结果对比

Table 2 Comparison of calculation results in example 1						
项目	合肥	六安	淮北	滁州	蚌埠	亳州
常规值	0.853	0.875	0.903	0.926	0.93	0.955
改进值	0.338	0.397	0.485	0.57	0.587	0.705

表 3 算例 2 改进突变评价法计算结果对比

Table 3 Comparison of calculation results in example 2			
项目	方案三	方案一	方案二
常规值	0.954	0.968	0.987
改进值	0.441	0.543	0.760

3 改进突变评价法的实证研究

3.1 研究区域概况

在中国冬春时节各大江河中,黄河凌汛已成为最突出、最主要的汛情之一^[14]。宁蒙河段因其特殊的地理位置、河道特性和水文气象条件,成为黄河冰凌洪水灾害最为严重的河段,该河段冬春时期易产生冰凌卡塞、壅高水位,引发凌汛灾害。以黄河内蒙古头道拐至万家寨河段两岸的托克托县、准格尔旗、清水河县、偏关县为研究对象。该河段河道比降大,水流速度大,在万家寨水利枢纽建成运行以前,冬季以流凌为主。水利枢纽建成运行之后,由于水库蓄水作用的影响,水面比降变小,水流流速降低,冬季河段全部封河,几乎每年在水库末端形成冰塞阻水

和冰坝险情,进而河段水位被严重抬高,引发冰凌洪水灾害,导致公路、耕地被淹,给两岸旗县人民的生命安全带来了严重的威胁,对当地经济的发展造成重大的不利影响。因此,做好该河段各旗县的防凌防汛工作及防灾减灾研究,对保障人民安居乐业和地区经济稳定发展具有至关重要的作用。根据上述提出的改进突变评价法,对这 4 个研究区域进行凌汛灾害的风险评价。

3.2 评价指标体系的构建

目前,尚未形成统一标准的凌汛灾害风险评价指标体系。凌汛灾害风险受多重因素影响,各影响因素之间相互关联,存在着复杂的关系且对风险演变的影响机制和程度又有所不同。当各因素发生变化并相互作用时,凌汛灾害风险就有可能发生突变。借鉴有关的研究成果^[9],结合凌情统计数据的可得性,从凌汛灾害的自然属性和社会属性两个方面出发,建立 4 个层次的凌汛灾害风险评价指标体系,对各研究区域凌汛灾害的风险等级进行综合评估。其中,承灾体以及应灾能力反映的是凌汛灾害的社会属性;前者描述的是灾害发生时,其对社会造成的影响及损失;后者描述的是灾害发生时,社会的抗灾恢复能力。结合突变评价法对评价模型控制变量数目的要求,选取了 14 个底层指标,并将各指标按其相对重要性进行排序,构建凌汛灾害风险评价指标体系,如图 1 所示。

3.3 凌汛灾害风险的评价

3.3.1 底层指标的无量纲化处理

各研究区域的原始数据来源于当地人民政府网站、所属市的统计年鉴、万家寨水利枢纽和头道拐水文站的实测数据。因各原始数据的度量单位均不相同,为了消除各指标间的差异,进行归一计算之前,需要对指标数据进行无量纲化处理^[10]:

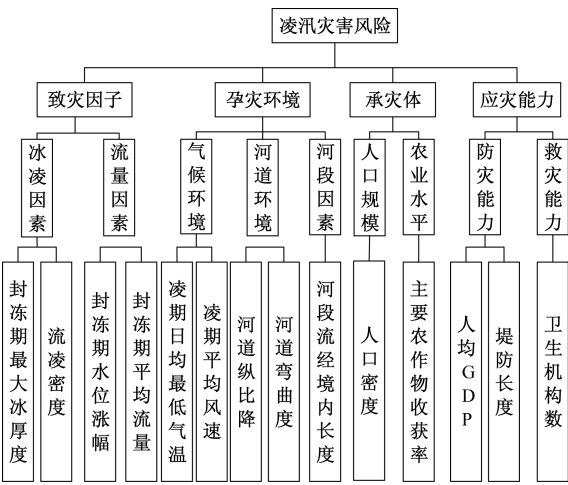


图 1 凌汛灾害风险评价指标体系

Figure 1 Risk evaluation index system of ice disaster

$$R_i = \frac{r_i - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}}; \tag{8}$$

$$R_i = \frac{r_{\max} - r_i}{r_{\max} - r_{\min}}。 \tag{9}$$

式中： r_i 为指标的实际值； R_i 为无量纲计算值； r_{\max} 和 r_{\min} 分别表示各项指标值的上、下界。当指标数值越大对风险的促进作用越强时,采用式(8)计算;当指标数值越大对风险的抑制作用越强时,采用式(9)计算。各旗县指标无量纲转换值如表 4 所示。

3.3.2 综合评价值的计算

根据表 1,选择相应的突变模型,将标准化后的指标值代入模型的归一化公式展开计算。从下层至上层,进行递归运算直到求出评价系统的初始综合评价值。计算过程按照“互补”与“非互补”的原则^[10],利用提出的改进方法,计算得到三参数指数回归模型的函数如式(10)所示:

$$y = 1.080\ 9 - 0.573\ 2e^{-1.897\ 6x}, \tag{10}$$
$$0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1。$$

表 4 指标无量纲转化值

Table 4 Dimensionless conversion value of the indicator

地区	封冻期最大冰厚度	流凌密度	封冻期水位涨幅	封冻期平均流量	凌期日均最低气温	凌期平均风速	河道纵比降
托克托县	0.049	0.361	0.038	0.537	0.591	0.413	0.991
准格尔旗	0.908	0.544	0.892	0.567	0.664	0.872	0.829
清水河县	0.812	0.909	0.810	0.746	0.372	0.780	0.937
偏关县	0.001	0.000	0.021	0.299	0.299	0.046	0.098
地区	河道弯曲度	河段流经境内长度	人口密度	主要农作物收获率	人均 GDP	堤防长度	卫生机构数
托克托县	0.092	0.037	0.890	0.828	0.878	0.537	0.141
准格尔旗	0.834	0.898	0.110	0.758	0.426	0.696	0.157
清水河县	0.264	0.155	0.023	0.237	0.859	0.973	0.938
偏关县	0.385	0.010	0.283	0.099	0.690	0.113	0.279

计算其判定系数 $R^2 = 0.998$ 接近 1,表明曲线回归方程拟合良好,且 $R = 0.999 > R_{(0.01,8)} = 0.765$,因此选取的回归模型是显著的。

基于上述研究,计算 4 个研究区域凌汛灾害风险的常规突变评价值和改进突变评价值以及相应的极差,如表 5 所示。

表 5 各研究区域凌汛灾害风险突变评价值
Table 5 Comparison of calculation results

地区	常规值	改进值
托克托县	0.912	0.644
准格尔旗	0.941	0.743
清水河县	0.922	0.676
偏关县	0.755	0.297
极差	0.186	0.446

3.3.3 模型计算结果对比及分析

由表 5 对比可以看出,经三参数指数型曲线回归分析后所得的改进突变评价值比常规突变评价值在 $[0,1]$ 的分布更加分散、极差增大,优劣也更加清晰,分辨水平更高。

考虑到目前还没有关于凌汛灾害风险评价的统一准则,借鉴洪水灾害风险的等级划分结果^[15-16],并结合凌汛灾害的特点,对凌汛灾害风险的等级进行划分,进而根据计算的改进突变评价值,确定各研究区域的风险等级。凌汛灾害风险程度等级划分如表 6 所示。

表 6 各研究区域凌汛灾害风险等级
Table 6 Disaster risk level of ice disaster in each study area

风险度标准	风险等级	地区
$[0,0.3]$	极低风险	偏关县
$(0.3,0.5]$	低风险	
$(0.5,0.7]$	中等风险	清水河、托克托县
$(0.7,0.9]$	高风险	准格尔旗
$(0.9,1]$	极高风险	

根据以上计算分析可以得出以下结果。

(1)偏关县的凌汛灾害风险度最低。由于万家寨水库大坝位于偏关县境内,大坝底孔泄流水温较高,对冰花和流凌的产生以及河道封冻过程起到一定的抑制作用;开河时,上游河段冰坝溃决下移未运行至坝前河段即完全消除,再加上万家寨水库防凌调度的作用,因此偏关县境内基本没有凌汛灾害发生。

(2)准格尔旗的灾害风险度最高。该地区的牛龙湾范围为多弯道河段,河道的弯曲度以及河床纵比降变化大,且有浑河入河口岔道和铁路桥墩影响,冰凌下泄受阻,极易卡冰结坝,故此处常形成严重的

冰塞壅水。
(3)清水河县和托克托县的风险度介于中间。虽然河段流经两县境内的长度均较短,但两县的曹家湾、拐上、蒲滩拐、毛不拉村等地,由于其复杂的地形或位于黄河岸边的特殊位置,使得河道断面宽度、河道弯曲度变化较大,在黄河封、开河期间,也易发生冰凌洪水,遭受凌汛的威胁。计算出的各研究区域风险度大小排序,和上述对各地区实际凌情的分析基本一致,由此验证了将突变理论应用于凌汛灾害风险评价是合理可行的,且提出的改进突变评价法是准确有效的。

4 结论

基于突变理论,以黄河内蒙古头道拐至万家寨河段两岸的 4 个旗县区为研究对象,构建了凌汛灾害风险评价指标体系,并采用本文提出的改进突变评价法对各研究区凌汛灾害风险程度进行了综合评估。得出结论如下:常规突变评价法得到的综合评价值很接近,除偏关县外,其余均集中在 $[0.912, 0.941]$,不利于直观有效地区分风险的大小程度;改进的突变评价法,使调整后的综合评价值分布范围有效扩大,极差达到了 0.446,具有更高的分辨水平,风险的大小等级更具可比性;各研究区的风险度按由大到小排序为:准格尔旗、清水河县、托克托县、偏关县,评价结果与对各地区实际凌情的分析基本一致,验证了改进方法的可行性与准确性,为各旗县防凌减灾工作的科学规划、合理部署提供了参考。

参考文献:

[1] 杨开林. 河渠冰水力学、冰情观测与预报研究进展[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 81-91.
YANG K L. Advances of ice hydraulics, ice regime observation and forecasting in rivers[J]. Journal of hydraulic engineering, 2018, 49(1): 81-91.
[2] 郭立兵,周跃华,田福昌,等. 黄河宁蒙段凌汛致灾影响因素及灾害演变特点[J]. 人民黄河, 2020, 42(2): 22-26, 33.
GUO L B, ZHOU Y H, TIAN F C, et al. Influence factors and evolution characteristics of ice flood disaster in the ningxia-inner Mongolia section of the Yellow River [J]. Yellow River, 2020, 42(2): 22-26, 33.
[3] BELTAOS S. Distributed function analysis of ice jam flood frequency[J]. Cold regions science and technology, 2012, 71: 1-10.
[4] CARRIVICK J L, TWEED F S. A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods[J]. Global

- and planetary change, 2016, 144: 1-16.
- [5] WU C G, WEI Y M, JIN J L, et al. Comprehensive evaluation of ice disaster risk of the Ningxia-Inner Mongolia Reach in the upper Yellow River[J]. Natural hazards, 2015, 75(2): 179-197.
- [6] LUO D. Risk evaluation of ice-jam disasters using gray systems theory: the case of Ningxia-Inner Mongolia reaches of the Yellow River[J]. Natural hazards, 2014, 71(3): 1419-1431.
- [7] 罗党, 刘敏. 基于灰信息的黄河冰凌灾害风险评估模型[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 72-77, 92.
- LUO D, LIU M. Risk assessment model of ice disaster in the Yellow River based on grey information[J]. Journal of North China university of water resources and electric power (natural science edition), 2016, 37(6): 72-77, 92.
- [8] 李绍飞, 唐宗, 王仰仁, 等. 突变评价法的改进及其在节水型社会评价中的应用[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 48-55.
- LI S F, TANG Z, WANG Y R, et al. Improvement of catastrophe theory evaluation method and its application to water-saving society evaluation[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2012, 31(5): 48-55.
- [9] 吴岚. 基于突变理论的凌汛灾害风险评价与灾情评估[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- WU L. Risk assessment and disaster assessment of ice flood based on catastrophe theory[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [10] 李宗坤, 葛巍, 王娟, 等. 改进的突变评价法在土石坝施工期风险评价中的应用[J]. 水利学报, 2014, 45(10): 1256-1260.
- LI Z K, GE W, WANG J, et al. Improved catastrophe theory evaluation method and its application to earth-rock dam risk evaluation during construction[J]. Journal of hydraulic engineering, 2014, 45(10): 1256-1260.
- [11] 施玉群, 刘亚莲, 何金平. 关于突变评价法几个问题的进一步研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, 36(4): 132-136.
- SHI Y Q, LIU Y L, HE J P. Further study on some questions of catastrophe evaluation method[J]. Engineering journal of Wuhan university, 2003, 36(4): 132-136.
- [12] 唐明, 邵东国, 姚成林, 等. 改进的突变评价法在旱灾风险评价中的应用[J]. 水利学报, 2009, 40(7): 858-862, 869.
- TANG M, SHAO D G, YAO C L, et al. Improved catastrophe theory based evaluation method and its application to drought disaster risk evaluation[J]. Journal of hydraulic engineering, 2009, 40(7): 858-862, 869.
- [13] 李宗坤, 郑晶星, 王伟. 基于双曲线回归三参模型的分析方法研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2002, 23(1): 14-17.
- LI Z K, ZHENG J X, WANG W. Study on method of analysis based on hyperbola regression three-parameter model[J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2002, 23(1): 14-17.
- [14] 邵国明, 邓宇, 田治宗, 等. 黄河冰凌近期研究简述与展望[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 77-81, 108.
- GAO G M, DENG Y, TIAN Z Z, et al. Brief introduction and prospect of recent ice research in the Yellow River[J]. Yellow River, 2019, 41(10): 77-81, 108.
- [15] 李绍飞, 冯平, 孙书洪. 突变理论在蓄滞洪区洪灾风险评价中的应用[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(3): 132-138.
- LI S F, FENG P, SUN S H. Application of catastrophe theory to evaluation of flood risk in detention basin[J]. Journal of natural disasters, 2010, 19(3): 132-138.
- [16] 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.

The Yellow River Ice Flood Disaster Risk Assessment Based on Improved Catastrophe Theory Evaluation Method

LI Zongkun^{1, 2}, HU Yilei¹, DENG Yu^{3, 4}, GE Wei^{1, 5}

(1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Software, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 3. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 4. Research Center on Levee Safety and Disaster Prevention, MWR, Zhengzhou 450003, China; 5. Faculty of Technology, Policy and Management, Delft University of Technology, Delft 2628 BX, the Netherlands)

Abstract: Considering the problem that the comprehensive evaluation value of the catastrophe theory evaluation method was too high and the evaluation values were relatively close, an improved method for regression analysis using a three-parameter exponential curve was proposed and verified by two examples. Not only the calculated improved evaluation value and the conventional evaluation value were the same in size order, but also the range was significantly increased, and the distribution of the data on $[0,1]$ was more scattered. Considering the natural and social attributes of the Yellow River ice flood disaster, established a four-level risk evaluation index system was established, and the improved method was applied to the ice flood disaster risk assessment of 4 counties on both sides of the Yellow River from Toudaoguai to Wanjiazhai in Inner Mongolia. The results showed that Pianguan County was in a very low-risk area; Zhungeer Banner was in a high-risk area; Qingshuihe County and Tuoketuo County were in the medium-risk area. The comprehensive evaluation values obtained by the conventional catastrophe theory evaluation method were very close, except for Pianguan, the rest are concentrated in the interval $[0.912, 0.941]$, which was not conducive to intuitively and effectively distinguishing the degree of risk. The improved method could effectively expand the distribution range of the adjusted comprehensive evaluation value, and the range reached 0.446, which had a higher level of resolution, and the level of risk was more comparable. The evaluation results were basically consistent with the analysis of actual ice conditions in various regions.

Keywords: ice flood disaster; risk evaluation; catastrophe theory; improvement; three-parameter exponent

(上接第 88 页)

A Method for Disc Cutter Wear Prediction Based on Neural Network

DING Xiaobin^{1,2}, XIE Yuxuan¹, XUE Haowen¹, LI Shijia³

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. South China Institute of Geotechnical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Guangzhou Mass Transit Engineering Consultant Co., Ltd., Guangzhou 510010, China)

Abstract: To provide a reference for manual cutter inspection in shield tunneling, in this study the wear of disc cutters was simplified as a multivariate nonlinear regression problem, and constructs a data analysis framework was constructed to predict the cutter wear quantitatively by combining the effect of three kinds of factors, which were machinery, geology and management. The shield tunnel section from Panyu Square Station to Nancun Wanbo Station of Guangzhou Metro Line 18 was taken as the engineering background, 4 parameters were selected and 2 386 labeled data derived from 34 face cutters and 81 manual inspections were obtained. The training of BPNN was expedited by using the LM algorithm and SMBO method, which fully exploitd the regression ability of the neural network. The prediction got coefficients of determination (R^2) over 0.86 for 83.3% of the test samples, and the accuracy was greatly improved compared with the reference formula used for data labeling. It showed that the model trained by this method had higher accuracy in the prediction of disc cutter wear.

Keywords: shield tunnel; disc cutter wear; improved BP neural network; optimization algorithm