

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.03.002

基于可变模糊综合分析的冰凌预测模型

徐 晶¹ 冀鸿兰¹ 张宝森² 陈守煜³ 张傲妲¹

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018 ;
2. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003 ; 3. 大连理工大学土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

摘要 :在分析凌汛成因影响因素的基础上,以可变模糊集理论为核心,采用二元比较法确定指标权重,结合统计相关分析确定预报因子相关程度,提出一种基于可变模糊综合分析的冰凌预测模型。将该模型应用于黄河内蒙古段开河日期的预测,结果表明该模型计算简便,对开河日期的预测具有较高的精度。

关键词 :冰凌预报 ;开河日期 ;可变模糊集 ;二元比较 ;指标权重

中图分类号 :TV875 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2011)03-0006-03

Ice forecast model based on variable fuzzy synthetic analysis / XU Jing¹, JI Hong-lan¹, ZHANG Bao-sen², CHEN Shou-yu³, ZHANG Ao-da¹ 1. School of Hydraulic & Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhehot 010018, China ; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China ; 3. School of Civil & Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract :Based on the analysis of various factors for ice floods, an ice forecast model with the variable fuzzy synthetic analysis as the core was proposed by using the binary comparison method to determine the index weight and the correlation degrees among various forecast factors according to the statistical correlation analysis. It was applied to the forecast of break-up date of rives in Inner Mongolia. The results show that the proposed model is simple in calculation and has higher forecast precision for break-up date.

Key words :ice forecast ; break-up date ; variable fuzzy set ; binary comparison ; index weight

凌汛是冰凌对水流产生阻力引起的江河水位明显上涨的水文现象,易发生于冬季的封河期和春季的开河期。由于黄河内蒙古段纬度较高,大陆性气候特征显著,冬季严寒漫长,河流冰冻期能达四五个 月。春初解冻开河,冰水齐下,极易造成冰凌壅塞,水位上涨,从而形成凌汛洪水。相关资料显示,黄河内蒙古段每年都有不同程度的凌汛灾害发生。相对准确的开河日期预测,对其防凌减灾有重要的指导作用。目前,对封河、开河日期预报研究较多的是美国 Clarkson 大学的沈洪道教授,主要依据热交换原理和冰水力学理论建立冰水耦合动态数学模型,预报精度较高^[1-2]。沈洪道等^[3]还建立起适用于非稳定流的冰情数学仿真模型 RICEN。国内关于开河日期预报的研究不多,由于受到诸多因素的影响及方法自身存在不足,各种开河预报方法通常具有不同程度的经验性^[4],至今仍没有一个广泛认可的预测

模型。由于开河过程是一个渐变过程,具有中介过渡及模糊性,传统的定性分析方法易造成识别上的困难,为此,冀鸿兰等^[5-6]提出模糊优选神经网络预测冰凌的方法,取得了较好的效果。为了更好地反映开河过程的渐变性及模糊性特点,笔者以陈守煜^[7-9]的可变模糊集理论为基础,提出一种基于可变模糊综合分析的冰凌预测模型,对黄河内蒙古段三湖河口水文站的开河日期进行预测。

1 冰凌预测的可变模糊综合分析模型

1.1 基于可变模糊集理论的预测模型

设有 n 年实测凌汛统计资料 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。第 j 年凌汛信息可用 m 个指标特征值来表示,指标特征值包括影响开河日期的各要素,即 $x_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})^T$,则 n 年实测资料的全体指标特征可用 $m \times n$ 阶矩阵表示:

$$X = (x_{ij}) \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为第 j 年实测资料中第 i 个预报因子的指标特征值 ($i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$)

预测因子 y_j 为第 j 年的开河历时 ($j = 1, 2, \dots, n$) , 则预报对象(开河历时)矩阵为

$$Y = (y_j) \quad (2)$$

参照实测资料并考虑各因子的物理意义, 确定各预报因子可变集合的吸引域矩阵 I_{ab} 与范围域矩阵 I_{cd} :

$$\begin{aligned} I_{ab} &= ([a_i, b_i]) = (I_{iab}) \\ I_{cd} &= ([c_i, d_i]) = (I_{icd}) \end{aligned} \quad (3)$$

根据实际情况确定预测模型吸引域矩阵 I_{ab} 中 $D_A(x_{ij}) = 1$ 的点值 M_i 。

如图 1 所示, x_{ij} 为 I_{cd} 区间内的任意点, 则当 x_{ij} 落入 M_i 点左侧时, 相对差异函数模型为

$$\begin{cases} D_A(x_{ij}) = \left(\frac{x_{ij} - a_i}{M_i - a_i}\right)^\beta & x_{ij} \in [a_i, M_i] \\ D_A(x_{ij}) = -\left(\frac{x_{ij} - a_i}{c_i - a_i}\right)^\beta & x_{ij} \in [c_i, a_i] \end{cases} \quad (4)$$

x_{ij} 落入 M_i 点右侧时, 其相对差异函数模型为

$$\begin{cases} D_A(x_{ij}) = \left(\frac{x_{ij} - b_i}{M_i - b_i}\right)^\beta & x_{ij} \in [M_i, b_i] \\ D_A(x_{ij}) = -\left(\frac{x_{ij} - b_i}{d_i - b_i}\right)^\beta & x_{ij} \in [b_i, d_i] \end{cases} \quad (5)$$

x_{ij} 落入 I_{cd} 区间外时

$$D_A(x_{ij}) = -1 \quad x_{ij} \notin [c_i, d_i] \quad (6)$$

式中: β 为非负指数, 常取 $\beta = 1$, 即相对差异函数模型为线性函数; $D_A(x_{ij})$ 为点 x_{ij} 的相对差异函数。

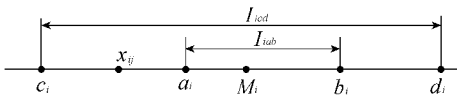


图 1 点 x_{ij} 、 M_i 与区间 I_{ab} 、 I_{cd} 的位置关系示意图

$D_A(x_{ij})$ 确定以后, 根据式 (7) 求解点 x_{ij} 的相对隶属度 $\mu_A(x_{ij})$:

$$\mu_A(x_{ij}) = \frac{1 + D_A(x_{ij})}{2} \quad (7)$$

设 m 个指标的权向量 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$, 其满足 $\sum_{i=1}^m \omega_i = 1$ 。

参考连续统上任一点 x_{ij} 对指标 i 的相对隶属度 $\mu_A(x_{ij})$ 关于左、右极点的广义权距离 d_g, d_b 分别为

$$d_g = \left\{ \sum_{i=1}^m [\omega_i (1 - \mu_A(x_{ij}))]^p \right\}^{1/p} \quad (8)$$

$$d_b = \left\{ \sum_{i=1}^m [\omega_i \mu_A(x_{ij})]^p \right\}^{1/p} \quad (9)$$

建立目标函数

$$\min F(u_j) = u_j^2 d_g^a + (1 - u_j)^2 d_b^a \quad (10)$$

对其进行求导运算, 导数为零的点即为最优解:

$$\frac{dF(u_j)}{du_j} = 0 \quad (11)$$

求解得出

$$u_j = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_g}{d_b}\right)^a} \quad (12)$$

于是得到综合相对隶属度矩阵

$$U = (u_j) \quad (13)$$

式中: p 为距离参数, $p = 1$ 为海明距离, $p = 2$ 为欧式距离; u_j 为样本 j 的综合相对隶属度; a 为模型优化准则参数, $a = 1$ 为最小一乘方准则, $a = 2$ 为最小二乘方准则。

建立预测对象 Y 与综合相对隶属度 U 的对应关系, 为了简化处理, 此处选用最为简单的线性相关关系^[10]:

$$Y = A + Bu \quad (14)$$

其中

$$A = \bar{y} - B\bar{u}$$

$$B = \frac{\sum_{j=1}^n (u_j - \bar{u})(y_j - \bar{y})}{\sum_{j=1}^n (u_j - \bar{u})^2}$$

式中: $\bar{u}$ 为所有样本的综合相对隶属度的均值; $\bar{y}$ 为 n 年开河历时的均值。

1.2 二元比较模糊决策分析法确定指标权重

冰凌现象是流域的气象、自然地理、河道特性等诸多因子综合作用的结果, 各个因子对冰凌现象的影响程度不同, 模型赋予的权重也应不同。二元比较模糊决策分析法是以中国语言与思维习惯为基础、严格遵循一致性检验条件、针对无结构决策问题而提出的一种简便有效的求解方法。本文权重的确定采用陈守煜^[7,9]提出的有序二元比较方法。模糊概念语气算子与模糊标度值、相对隶属度间的关系归入表 1。

1.3 模型应用步骤

冰凌预测模型的应用步骤如下: ①分析确定待预报对象及其影响因子; ②统计分析已有资料, 根据数据信息及各因子的物理意义确定吸引域矩阵及范围域矩阵, 其中吸引域矩阵可参考实测系列的最大及最小值确定, 范围域矩阵可根据各因子的物理意义适当外延; ③应用二元比较模糊决策分析法确定各指标权重; ④根据所建模型计算综合相对隶属度矩阵 U , 建立 U 与预报对象 Y 的统计相关关系;

⑤利用回归方程进行开河日期预测。

表 1 模糊概念语气算子与模糊标度、相对隶属度的关系

语气算子	模糊标度	相对隶属度	模糊标度	相对隶属度
同样	0.50	1.000	0.525	0.905
稍稍	0.55	0.818	0.575	0.739
略微	0.60	0.667	0.625	0.600
较为	0.65	0.538	0.675	0.481
明显	0.70	0.429	0.725	0.379
显著	0.75	0.333	0.775	0.290
十分	0.80	0.250	0.825	0.212
非常	0.85	0.176	0.875	0.143
极其	0.90	0.111	0.925	0.081
极端	0.95	0.053	0.975	0.026
无可比拟	1.00	0		

2 模型应用实例

开河与气温、风力、太阳辐射、流量等因素有关，因此影响冰情现象的因素有：①河势因素（河道比降、糙率、河面宽度、河道弯曲度等）；②动力因素（河道槽蓄水量、上游来水量、消冰水量、流速、水位、风力等）；③热力因素（气温、水温、太阳辐射等）。河势因素是影响冰塞、冰坝的重要因素，对于开河也有影响，但相对于热力因素和动力因素，河势因素对开河预报的影响较小，可以忽略不计。

黄河内蒙古段三湖口水文站研究资料系列^[11]从 1968—2001 年，预报因子分别为：1968—2001 年各年气温稳定转正日期至开河日期的逐日累计气温 x_1 ，1968—2001 年各年开河期的平均水位 x_2 ，1968—2001 年各年开河期的平均流量 x_3 ，上年封冻期的最大冰厚 x_4 ，开河历时 Y 为 1968—2001 年开河日期至计算终点 5 月 1 日的天数。选取 1968—1996 年 28 a 资料用于建立预测模型，1997—2001 年 5 a 资料用于检验预测模型精度。取实测系列中的最大及最小值作为各预报因子的吸引域矩阵 I_{ab} 极值，适当外延构造范围域矩阵 I_{cd} ：

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} 2.5 & 140.5 \\ 1018.17 & 1020.25 \\ 590 & 1300 \\ 0.5 & 0.95 \end{bmatrix} \quad I_{cd} = \begin{bmatrix} 2.25 & 154.55 \\ 916.35 & 1122.28 \\ 531 & 1430 \\ 0.45 & 1.05 \end{bmatrix}$$

权重的确定方法采用陈守煜^[7,9]提出的有序二元比较方法。综合考虑各项因素确定封冻期最大冰厚，以该指标作为标准与其他各指标进行二元比较分析，得到二元比较判断矩阵并进行一致性检验。最大冰厚与累计正气温之间的语气算子为“稍稍”，水位与最大冰厚、流量与水位之间的语气算子均为“略微”，确定权重为 $\omega = (0.367, 0.200, 0.133, 0.300)$ 。

采用各预报因子的多年统计平均值确定 M 点值， $M = (29.28 \quad 1019.23 \quad 921.17 \quad 0.70)^T$ 。

将 I_{ab} 、 I_{cd} 、 M 中的相关数据代入所建预测模型，可得各预报因子的相对隶属度矩阵。根据式(12)计算可变参数 a, p 在 4 种变换组合下的综合相对隶属度，见表 2。考虑到各参数组合有不同的适用性，此处选取各组合的平均情况加以预测。各参数综合相对隶属度均值矩阵与预测对象的回归方程为

$$Y = 52.96 - 17.92U$$

表 2 综合相对隶属度

时 间	$p = 1$		$p = 2$		均值
	$a = 1$	$a = 2$	$a = 1$	$a = 2$	
1996—1997	0.79	0.93	0.79	0.93	0.86
1997—1998	0.65	0.77	0.68	0.82	0.73
1998—1999	0.54	0.57	0.50	0.50	0.53
1999—2000	0.76	0.91	0.74	0.89	0.83
2000—2001	0.43	0.36	0.47	0.43	0.42

为综合比较，本次计算分别选取 4 种参数组合预测成果与综合（均值）预测结果加以对比，如表 3 所示。根据表 3 可知，本文预测值与实测值的绝对平均误差为 1.6 d，文献[5]、文献[12]预测值与实测值的绝对平均误差分别为 3.4 d、3.6 d。所以，本文的预测成果更趋稳定，其预报偏差更小。

表 3 可变模糊预测模型预测结果

时 间	不同参数组合的预测结果				综合 预测 结果	实 测 值	文献	文献
	$p = 1$		$p = 2$				[5]	[12]
	$a = 1$	$a = 2$	$a = 1$	$a = 2$			预测 结果	预测 结果
1996—1997	39	36	39	36	38	42	35	34
1997—1998	41	39	41	38	40	40	39	40
1998—1999	43	43	44	44	44	44	42	42
1999—2000	39	37	40	37	38	40	46	46
2000—2001	45	46	45	45	45	43	44	41

3 结 语

以可变模糊集理论为核心，结合二元比较法及统计相关分析，提出了一种基于可变模糊综合分析的冰凌预测模型。其中，二元比较分析法能够快速、合理地确定预报因子的权重，使权重确定更简便易行，增强了模型的可操作性及实用性，相关分析充分应用统计信息确定预报因子相关程度。将该模型应用于黄河内蒙古段凌汛预测，实例应用结果表明，其对开河日期预测的精度较高。

参考文献：

[1] SHEN Hong-dao. Dynamic transport of river ice[J]. Journal of Hydraulic Research, 1990, 28(6): 659-671.
[2] WASANTHALAL A M, SHEN Hong-dao. A mathematical model for river ice processes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1993, 117(3): 851-867.

(下转第 26 页)

表 2 不同尺寸试件的压缩初始损伤

h/m	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
D_0	-0.0012	0.0319	0.0590	0.0813	0.0995	0.1148	0.1268	0.1368
h/m	0.40	0.50	0.60	0.80	1.00	1.40	1.80	2.00
D_0	0.1451	0.1574	0.1657	0.1750	0.1792	0.1820	0.1825	0.1826

表 3 不同尺寸试件的压缩峰值损伤

h/m	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
D_t	-0.0003	0.0969	0.1674	0.2184	0.2554	0.2822	0.3016	0.1368
h/m	0.40	0.50	0.60	0.80	1.00	1.40	1.80	2.00
D_t	0.3258	0.3385	0.3452	0.3505	0.3520	0.3526	0.3526	0.3526

值损伤 0.3526。
将表 2 和表 3 中 $h = 0.05 \sim 0.20\text{ m}$ 的计算结果与表 1 中的结果进行比较,最大误差小于 2%,可见在现有的试验数据范围内,灰色预测模型具有很高的精度,据此预测的较大尺寸试件的损伤参数可应用于大尺寸结构的损伤分析。

3 结 语

混凝土损伤参数具有尺寸效应,在混凝土结构的损伤分析中应考虑混凝土损伤参数的尺寸效应。运用灰色理论对混凝土压缩损伤参数的尺寸效应进行研究,建立预测方程,以小试件初始损伤和峰值损伤试验数据为基础,预测较大尺寸试件的初始损伤和峰值损伤,推测了大体积混凝土的初始损伤和峰值损伤,得出如下结论:损伤参数虽然随混凝土尺寸的增大而增大,但最终趋近于一个固定值,初始损伤趋近于 0.1827,峰值损伤趋近于 0.3526,该值可用于大体积混凝土结构的损伤计算。

参考文献:

[1]徐道远,符晓陵,计家荣,等.拱坝破坏机理及损伤:断裂分析方法[C]//高拱坝学术讨论会论文集.北京:国家自然科学基金委员会工程与材料科学部,1996:208-217.
[2]徐道远,王向东,朱为玄,等.混凝土损伤及损伤仿真计算[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(4):14-20.
[3]周栋.混凝土材料性能尺寸效应[D].南京:河海大学,2003.
[4]曹亮.三点弯曲试件混凝土 K_{IC} 尺寸效应公式的修正[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(1):63-66.
[5]金玉,王向东,徐道远,等.基于无损弹性模型的混凝土损伤定量分析[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(6):659-663.
[6]王向东,徐道远,周栋,等.混凝土损伤参数的尺寸效应[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2005,28(3):308-310.
[7]余天庆,钱济成.损伤理论及其应用[M].北京:国防工

业出版社,1993:58-90.
[8]李兆霞.损伤力学及其应用[M].北京:科学出版社,2002:46-70.
[9]ANDREEV G. Brittle failure of rock materials test results and constitutive model[J]. Rotterdam: Balkema A A,1995:1-5.
[10]邓聚龙.灰色预测与决策[M].武汉:华中科技大学出版社,2002:120-180.
[11]王向东,朱为玄,徐道远.灰色理论在预测混凝土性能参数长期值中的应用[J].河海大学学报:自然科学版,1999,27(6):64-67.
[12]岑家全.混凝土压缩损伤参数尺寸效应的数值分析[D].南京:河海大学,2010.

(收稿日期:2010-10-12 编辑:骆超)

(上接第 8 页)

[3]SHEN Hong-dao, WANG D, WASANTHALAL A M. Numerical simulation of river ice processes[J]. Journal of Cold Regions Engineering, ASCE,1995,9(3):107-118.
[4]茅泽育,许昕,王爱民,等.开河期冰坝预测方法研究[J].水利水电科技进展,2007,27(3):76-80.
[5]冀鸿兰,陈守煜.冰凌预报模糊优选神经网络 BP 方法[J].水利学报,2004,35(6):114-118.
[6]冀鸿兰,朝伦巴根,陈守煜.模糊优选神经网络 BP 模型在黄河内蒙段封开河预报中的应用[J].水利水电科技进展,2008,28(3):70-72.
[7]陈守煜.工程模糊集理论与应用[M].北京:国防工业出版社,1998.
[8]陈守煜.水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M].大连:大连理工大学出版社,2005.
[9]陈守煜.复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用[M].长春:吉林大学出版社,2002.
[10]李希灿,刘桂生,张波,等.水文中长期预报成因模糊综合分析预测模式[J].黑龙江水专学报,1998,25(3):67-71.
[11]冀鸿兰.黄河内蒙段凌汛成因分析及封开河日期预报模型研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2002.
[12]冀鸿兰,朝伦巴根,陈守煜.基于模糊识别人工神经网络的冰凌预报模型[J].水力发电,2008,33(11):24-26.

(收稿日期:2010-09-07 编辑:骆超)