

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.01.037

黄河内蒙段凌情变化规律及智能耦合预报模型

苑希民, 冯国娜, 田福昌, 薛文字

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 由于特殊的地理位置、水文气象条件及河道特性的影响, 黄河内蒙段几乎每年都会发生凌汛。对黄河内蒙段主要控制站的气象水文等实测数据进行分析后, 发现近年来随着凌期气温升高, 流量增大, 流凌、首封日期推后, 开河日期提前, 且最大冰厚明显变薄。为此, 以黄河内蒙段巴彦高勒站为例, 通过相关分析选取合适的预报因子, 采用基于遗传算法的神经网络方法建立了凌情智能耦合预报模型(GA-BP模型), 对流凌、封河、开河日期进行预报。对比不同模型的预报结果, 发现多元线性模型、BP模型和GA-BP模型合格率分别为80%、86.7%和93.3%, GA-BP模型的预报精度较高。因此, GA-BP模型可以为黄河内蒙段的凌汛灾害防治提供重要支持。

关键词: 冰凌预报; 智能耦合模型; 凌情变化规律; 黄河内蒙段

中图分类号: P338 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2015)01-0163-05

Variation laws of ice regime and intelligent coupling forecast model in the Inner Mongolia reach of the Yellow River

YUAN Xi min, FENG Guo na, TIAN Fu chang, XU E Wen yu

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Due to the special geographical position, hydro-meteorological conditions, and river course characteristics, ice flood at most occurs every year in the Inner Mongolia reach of the Yellow River. The meteorological and hydrological data at the main controlling stations in the Inner Mongolia reach were analyzed, which suggested that the temperature and flow discharge increase in recent years, the ice run date and freeze up date push back while the break up date brings forward, and the maximum ice thickness thins obviously. In this paper, the appropriate prediction factors were selected by the correlation analysis. Ice regime intelligent coupling forecast model was built using the neural network method based on the genetic algorithm. The model was applied to forecast the ice run date, freeze up date, and break up date at the Bayangaole station in the Inner Mongolia reach. The forecast results obtained from different models were compared, and it showed that the multiple linear model, BP model, and GA-BP model have high passing percentages, which are 80%, 86.7%, and 93.3%, respectively. GA-BP model has the highest forecast accuracy and can provide the critical support for the prevention of ice disasters in the Inner Mongolia reach of the Yellow River.

Key words: ice forecasting; intelligent coupling model; variation laws of ice regime; Inner Mongolia reach of the Yellow River

黄河内蒙段位于黄河流域最北端, 自上游兰州至包头纬度差437', 上下河段温差较大。河道特性和水文气象条件决定了流凌、封河日期溯源而上, 开河日期自上而下。特别是春季开河期, 上游来水、融冰水加槽蓄水挟带着大量破裂后的冰块向下游流动, 沿途水鼓冰, 冰阻水, 卡冰结坝, 水位涌高, 常常导致漫堤或溃堤, 造成严重的凌汛灾害。而对凌情准确及时地预报是凌汛灾害防御的关键, 因此建立可靠实用的凌情预报模型对内蒙防凌减灾工作具有重要意义。

关于凌情预报, 国内外已有不少研究。Adams采用经验公式建立了圣劳伦斯河上游段封河预报模型^[1]; 美国Clarkson大学的沈洪道(Shen Hungtao)教授, 依据热交换原理和冰水力学理论, 建立了冰水耦合的综合动态数学模型^[2,4], 并在St. Lawrence河流上进行长期封河日期预报。我国的徐剑铎^[5]利用指标法, 对黄河内蒙段的流凌、封河、开河日期和开河最高水位、最大流量分别进行预报; 张遂业^[6]、张傲姬^[7]、乔继平^[8]采用数理统计多元线性回归分析方法建立了

收稿日期: 2014-06-23 修回日期: 2014-11-07 网络出版时间: 2014-12-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20141203.1344.017.html>

作者简介: 苑希民(1968-), 男, 北京人, 教授, 博士(后), 主要从事防洪减灾方面研究。E-mail: fgnxwy@163.com

通讯作者: 冯国娜(1991-), 女(满族), 河北唐山人, 主要从事防洪减灾方面研究。E-mail: 15536887943@163.com

黄河上游封开河预报模型; 陈赞廷^[9]、可素娟等^[10] 将理论与经验相结合, 建立了黄河上下游冰情预报数学模型; 陈守煜等^[11] 将神经网络应用于黄河宁蒙河段封开河预报中; 于庆峰^[12]、周翔南^[13] 分别运用 Shepard 方法和 SVM 算法, 建立三湖河口站冰情信息预报模型。

但是, 由于冰凌洪水形成条件及运动机理的复杂性, 数十年来关于黄河内蒙段凌情预报结果并不理想, 并且随着凌情监测资料的增多, 以往预报方法及模型的封闭性特点, 不

能根据近期的监测资料进行模型动态修正, 缺乏自适应功能。此外, 近年来由于全球气候变暖和河道冲淤变化, 导致已有冰凌预报模型的精度进一步降低, 难以准确模拟封开河日期。

本文选择巴彦高勒、三湖河口、头道拐三个主要控制站(图 1) 分析黄河内蒙段凌情变化规律, 并以巴彦高勒站为例, 建立基于遗传算法的神经网络智能耦合预报模型(GA- BP 模型), 对该站的流凌、封河、开河日期进行预报。



图 1 黄河内蒙段流域图

Fig. 1 Watershed of Inner Mongolia reach of the Yellow River

1 凌情变化特点及规律

1.1 气温变化

气温是影响凌情变化的主控因素。在全球变暖的大背景下, 黄河内蒙段 20 世纪 60 年代以来凌汛期(11 月至翌年

3 月) 平均气温呈明显变暖趋势, 增温率为 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ^[14]。从图 2 可见, 1986 年-1998 年各旬平均气温整体高于 1957 年-1985 年, 而 12 月-翌年 2 月为主要封冻期, 最大温差接近 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冬季气温的高低, 尤其是负气温的累积量对封河历时、冰盖厚度都有重要的影响。

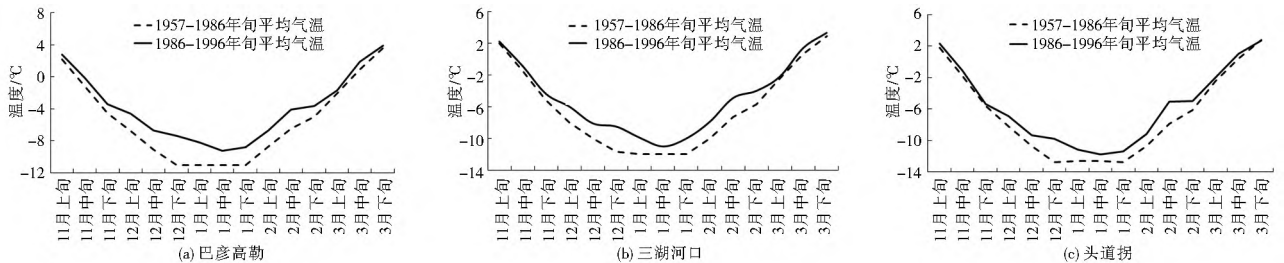


图 2 多年旬平均气温

Fig. 2 The ten-day annual average temperature

1.2 流量变化

黄河上游修建了龙羊峡、刘家峡等水利工程, 凌期水库的调节改变了河道水量的分配规律。水库发挥防凌作用时调用方式主要体现在以下两个方面: 一是封冻前期, 通过水库提高下泄流量来加大水体搬运冰块的能力, 推迟封冻; 二是在开河期, 适当提高冰下流速, 削减开河期凌峰流量, 争取形成“文开河”。

1968 年, 刘家峡水库运用后, 凌期平均流量变幅较大, 三个控制站多年旬平均流量见图 3。巴彦高勒 1951 年-1968 年多年旬平均流量为 $452\text{ m}^3/\text{s}$, 1968 年-1983 年为 $545\text{ m}^3/\text{s}$, 增大 21%; 三湖河口 1951 年-1968 年为 $442\text{ m}^3/\text{s}$, 1968 年-1983 年为 $570\text{ m}^3/\text{s}$, 增大 29%; 头道拐 1951 年-1968 年为 $442\text{ m}^3/\text{s}$, 1968 年-1983 年为 $538\text{ m}^3/\text{s}$, 增大 22%。2000 年后平均流量相较于 1968 年-1983 年变化不大, 故上

游水库的调节是内蒙段凌汛期流量增大的主要原因。

1.3 封开河日期变化

据 1957 年-2005 年资料统计, 黄河内蒙段流凌日期最早发生在 1972 年 11 月 2 日, 最晚发生在 1994 年 12 月 2 日, 多年平均为 11 月 16 日; 首封日期最早发生在 1969 年 11 月 7 日, 最晚发生在 1989 年 12 月 30 日, 多年平均为 12 月 2 日; 开河日期最早发生在 1979 年 2 月 10 日, 最晚发生在 1970 年 3 月 18 日, 多年平均为 3 月 3 日。

近年来, 受暖冬气候和流量增大的综合影响, 内蒙河段流凌、首封日期逐渐推后, 而开河日期逐渐提前, 见图 4。大约每 10 年流凌日期推后约 1 d, 首封日期推后约 2 d, 开河日期提前约 3 d。巴彦高勒、三湖河口、头道拐水文站封冻天数多年均值由 20 世纪 90 年代前的 97 d、110 d、104 d 减小为 90 年代后的 77 d、99 d、93 d。

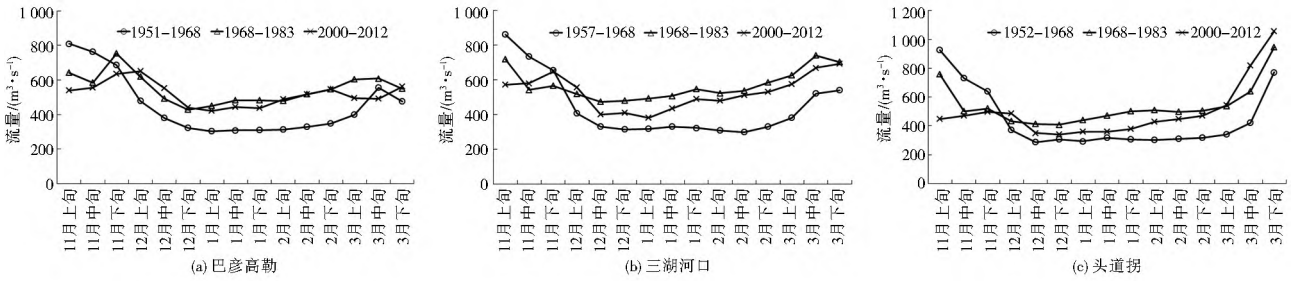


图3 多年旬平均流量

Fig. 3 The ten day annual average flow discharge

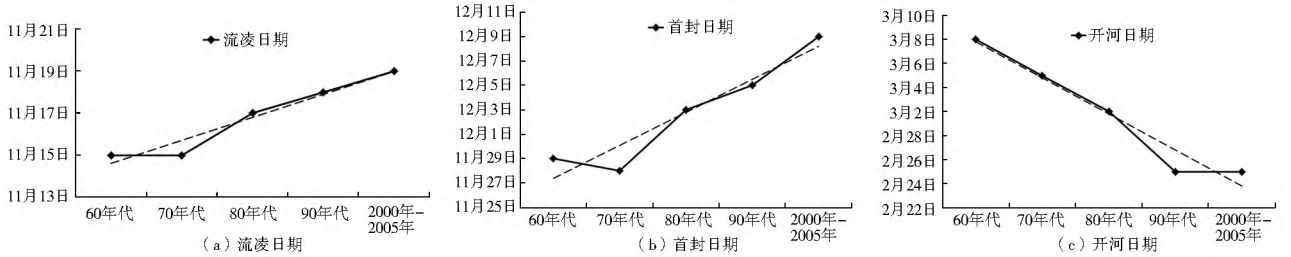


图4 流凌、首封、开河日期多年均值

Fig. 4 The annual average ice run date, freeze up date, and break up date

1.4 最大冰厚变化

冰厚是低温持续时间及强度的体现,冰厚对凌汛的强弱具有重要的参考价值。利用1957年-2002年的最大冰厚实测数据,以1957年-1958年作为年序数1,绘制出历年最大冰厚曲线(图5),从中可以明显看出,最大冰厚存在明显的变薄趋势。对比图2和图5可以发现,气温变化和最大冰厚变化基本呈对应现象,即“气温低冰层厚,气温高冰层薄”;可将这45年划分为两个阶段:1957年-1986年为厚冰期,持续29年,其中巴彦高勒平均最大冰厚0.81 m,三湖河口0.76 m,头道拐0.70 m;1986年-2002年为薄冰期,持续16 a,巴彦高勒平均最大冰厚0.57 m,三湖河口0.55 m,头道拐0.60 m。

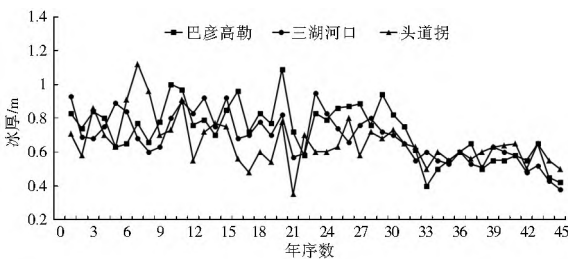


图5 历年最大冰厚

Fig. 5 The highest ice thickness of each year

2 智能耦合模型的建立

BP网络是按误差反传递算法训练的多层前馈网络。设有输入层 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$, 输出层 $x_1^M(t), x_2^M(t), \dots, x_n^M(t)$ 和若干隐含层的神经网络模型,其中 M 为不包含输入层在内的网络层数, N_m 为第层神经元数; $w_j^{(m)}$ 为权重; $\theta_i^{(m)}$ 为阈值。输入层表示为

$$x_1^0(t) = x_i(t) \quad 1 \leq i \leq M \quad (1)$$

第 m 层中第 i 个神经元节点所接收到的上一层输入总和为

$$y_i^{(m)}(t) = \sum_{j=1}^{N_{m-1}} w_j^{(m)}(t) x_j^{(m-1)}(t) + \theta_i^{(m)}(t) \quad 1 \leq i \leq N_m, 1 \leq m \leq M \quad (2)$$

在学习过程中, $\theta_i^{(m)}(t)$ 作为权值处理

$$\begin{cases} x_0^{(m)}(t) = 1 \\ w_{i0}^{(m+1)}(t) = \theta_i^{(m+1)}(t) \quad 1 \leq i \leq N_{m+1}, 0 \leq m \leq M-1 \end{cases} \quad (3)$$

$$y_i^{(m)}(t) = \sum_{j=0}^{N_{m-1}} w_j^{(m)}(t) x_j^{(m-1)}(t) \quad (4)$$

第 m 层中第 i 个神经元节点的输出为

$$x_i^{(m)}(t) = \frac{1}{1 + \exp(-\sigma y_i^{(m)}(t))} \quad 1 \leq i \leq N_m, 1 \leq m \leq M \quad (5)$$

式中: σ 为斜率参数。

遗传算法是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法。遗传算法把问题的解表示成染色体。给出一群初始染色体,即种群初始化。用训练样本对种群中的每个个体进行训练,计算其学习误差,从而确立适应度值。对各个染色体进行选择计算,选择概率为

$$p_k = f(i) / \sum f(i) \quad (6)$$

式中: $f(i)$ 为染色体 i 的适应度函数; $\sum f(i)$ 为种群的总适应度。将上一代选择出的染色体交叉计算,在种群中随机均匀选取两个染色体 X_i^t, X_j^t 作为交叉双亲,则产生新的子代为

$$X_i^t = X_i^t r_j + X_j^t (1 - r_j) \quad (7)$$

$$X_j^t = X_i^t (1 - r_j) + X_j^t r_j \quad (8)$$

式中: r_j 为(0, 1)区间产生的随机数。

变异有两个目的:一是使遗传算法具有局部的随机搜索能力;二是防止出现不成熟收敛。变异量 $d(X_i)$ 是染色体 X_i 、取值区域左右边界 a_i 与 b_i 、当前进化代 g_i 、最大进化代 g_m 和形状系数 b 等参量的函数:

$$d(X_i) = \begin{cases} (b_i - X_i)[r(1-t)]^b & \text{当 } sign = 0 \text{ 时} \\ (X_i - a_i)[r(1-t)]^b & \text{当 } sign = 1 \text{ 时} \end{cases} \quad (9)$$

$$X'_i = \begin{cases} X_i + d(X_i) & \text{当 } sign = 0 \text{ 时} \\ X_i - d(X_i) & \text{当 } sign = 1 \text{ 时} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $t = g_c / g_m$; r 为 (0, 1) 区间产生的随机数。通过交叉、变异遗传操作, 目标函数值较优的被保留, 较差的被淘汰。遗传操作可以越过位垒, 能跳出局部较优点, 到达全局最优点, 即问题的最优解^[15]。

BP 网络具有非线性映射、自适应、自学习等优点, 但由于其初始权重和阈值是随机产生, 导致网络学习训练具有盲目性、随机性, 使得网络容易陷入局部最小。遗传算法是一种全局优化算法, 同时处理搜索空间中多个个体, 有较好的全局搜索性。结合两者优点, 建立智能耦合模型 (GA-BP 模型), 利用遗传算法优化 BP 网络的初始权重和阈值, 再使用 BP 网络进行学习训练。

3 模型应用

3.1 选取预报因子

影响凌情的因子主要包括: 动力因子 (流速、水位、流量、风力等)、热力因子 (主要有寒潮冷空气活动、太阳辐射、水温、气温等)、河势因子 (主要有河道的平面位置、走向、糙率、比降等)。由于黄河内蒙段河势的年度变化不大, 暂不作考虑, 主要考虑动力和热力因子。根据巴彦高勒站多年冰情及水文资料, 通过相关性分析, 选择预报因子如下。

流凌日期预报因子: x_1 为 11 月 1 日至气温转负日天数, x_2 为气温转负当日气温, x_3 为 11 月 10 日至 20 日气温和, x_4 为 11 月 10 日至 20 日流量均值, y 为 11 月 1 日至流凌日的天数。

封河日期预报因子: x_1 为气温转负日到流凌日气温和, x_2 为 11 月 1 日至流凌日的天数, x_3 为流凌日水位 (巴彦高勒水位在 1 050 m 左右, x_4 为计算方便, 去掉千位及百位), x_4 为流凌后第 5 天流量, x_5 为流凌后 10 天气温和, y 为 11 月 1 日至封河日的天数。

开河日期预报因子: x_1 为 1 月 9 日至 26 日气温和, x_2 为 1 月 9 日至 26 日流量均值, x_3 为 2 月 20 日流量, x_4 为 2 月 16 日至 25 日石嘴山流量均值, x_5 为最大冰厚。 y 为 2 月 1 日至开河日的天数。

3.2 模型训练

选择巴彦高勒站 1986 年- 2000 年序列资料作为样本训练, 利用 2000 年- 2005 年序列资料进行模型检验: 确定网络结构, 构建网络; 设定遗传算法参数, 经过选择、交叉、变异运算得到误差最小的初始权重和阈值; 设定神经网络参数, 利用优化后的初始权重和阈值, 进行 BP 网络训练。模型参数设置见表 1。

3.3 模型检验

利用巴彦高勒站 2000 年- 2005 年的资料对 GA-BP 模型进行预报检验, 并与多元线性模型和 BP 模型进行对比, 结果见表 2。《水文情报预报规范》(GB/T 22482- 2008) 给出的冰情和春汛预报结果的许可误差见表 3。每年度模型预报的预见期为实际封冻日期与流凌后 5 d 日期的差值。经计算巴彦高勒站 2000 年- 2005 年 5 年的预见期为 18 d、3 d、11 d、9 d、28 d, 许可误差为 7 d、2 d、4 d、3 d、7 d。

表 1 模型参数

Tab. 1 Model parameters

参数设置	流凌日期 预报模型	封河日期 预报模型	开河日期 预报模型
输入层神经元个数	4	5	5
网络结构			
输出层神经元个数	1	1	1
隐含层神经元个数	10	11	18
遗传算法 参数			
种群规模	60	60	60
迭代次数	300	300	300
交叉概率	0.2	0.2	0.2
变异概率	0.05	0.05	0.05
神经网络 参数			
学习速率	0.01	0.01	0.01
最大训练次数	8000	10000	8000
目标函数误差	0.001	0.001	0.001

表 2 巴彦高勒站预报结果

Tab. 2 Forecast results at the Bayangaole station

项目	年度	实测 值/d	GA-BP 模型		多元线性 模型		BP 模型	
			预报 值/d	是否 合格	预报 值/d	是否 合格	预报 值/d	是否 合格
流凌 预报	2000- 2001	39	32	是	29	否	33	是
	2001- 2002	34	34	是	32	是	36	是
	2002- 2003	37	35	是	33	是	37	是
	2003- 2004	35	34	是	29	否	34	是
	2004- 2005	25	28	是	30	是	32	是
封河 预报	2000- 2001	62	57	是	66	是	57	是
	2001- 2002	42	44	是	49	否	50	否
	2002- 2003	53	51	是	52	是	54	是
	2003- 2004	49	48	是	48	是	48	是
	2004- 2005	58	53	是	52	是	54	是
开河 预报	2000- 2001	37	37	是	38	是	30	是
	2001- 2002	23	26	否	25	是	25	是
	2002- 2003	34	32	是	34	是	27	否
	2003- 2004	35	35	是	37	是	38	是
	2004- 2005	45	44	是	43	是	45	是

表 3 预报要素许可误差

Tab. 3 Allowable errors for each forecast element

预见期/d	≤2	3~ 5	6~ 10	11~ 13	14~ 15	> 15
许可误差/d	1	2	3	4	5	7

由表 4 可知, 多元线性模型的合格率均值为 80%, BP 模型的合格率均值 86.7%, GA-BP 模型的合格率均值 93.3%。神经网络模型的预报精度高于多元线性模型, 预报等级均为甲等, 但 BP 模型的误差均值较大。而引入遗传算法后, 改善

表 4 巴彦高勒站模型检验结果

Tab. 4 Model test results at the Bayangaole station

模型	GA-BP 模型			多元线性 模型			BP 模型		
	流凌	封河	开河	流凌	封河	开河	流凌	封河	开河
合格率 (%)	100	100	80	60	80	100	100	80	80
预报等级	甲等	甲等	甲等	丙等	甲等	甲等	甲等	甲等	甲等

了神经网络的全局寻优能力,误差均值由3.6 d减小为2.3 d,因此GA-BP模型最优。

4 结论

(1) 受暖冬气候和流量增大的影响,黄河内蒙段流凌、首封日期逐渐推后,而开河日期逐渐提前。由于流域温度的整体升高,最大冰厚存在明显的变薄趋势。

(2) 结合BP网络和遗传算法优点,建立了智能耦合预报模型。通过不同模型的对比发现,多元线性模型的合格率均值为80%,BP模型的合格率均值86.7%,GA-BP模型的合格率均值93.3%。GA-BP模型克服了网络学习训练的随机性,减少了陷入局部最优解的可能,有效提高了预报精度。

(3) GA-BP模型在黄河内蒙段冰凌预报的应用中,不仅精度良好,能较好地预报流凌、封河和开河日期,而且由于模型具有开放性,可以随着凌情资料的增多而不断充实,对于冰凌灾害预报具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] Adams C E, Jr. Estimating water temperature and time of ice formation on the St. Lawrence River[J]. *Limnology and Oceanography*, 1976, 21(1): 128-137.
- [2] Shen H T. Dynamic transport of river ice[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1990, 28(6): 659-671.
- [3] Shen H T. Under cover transport and accumulation of frazil granules[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1995, 121(2): 184-195.
- [4] Shen H T. A unified degree day method for river ice cover thickness simulation[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1985, 12(3): 54-62.
- [5] 徐剑峰. 黄河内蒙河段的冰情预报[J]. *人民黄河*, 1989(1): 42-44. (XU Jianfeng. Ice forecast in Inner Mongolia reach of Yellow River[J]. *Yellow River*, 1989(1): 42-44. (in Chinese))
- [6] 张遂业. 黄河上游河段冰凌预报模型[J]. *甘肃水利水电技术*, 1997(4): 18-22. (ZHANG Su'ye. Ice forecast model at upper reaches of the Yellow River[J]. *Gansu Water Conservancy and Hydropower Engineering*, 1997(4): 18-22. (in Chinese))
- [7] 冀鸿兰, 张傲姐, 高瑞忠, 等. 黄河内蒙古段开河日期预报模型及应用[J]. *水利水电科技进展*, 2012, 32(2): 42-45. (JI Honglan, ZHANG A'ojie, GAO Ruizhong, et al. Application of the break up date prediction model in the Inner Mongolia Reach of the Yellow River[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012, 32(2): 42-45. (in Chinese))
- [8] 乔继平, 王富强, 代俊峰. 黄河宁蒙河段封开河日期预报方法研究[J]. *人民黄河*, 2013, 35(4): 67. (QIAO Jiping, WANG Fuqiang, DAI Junfeng. Research on forecast method of freeze up and break up date in Ningxia Inner Mongolia section of the Yellow River[J]. *Yellow River*, 2013, 35(4): 67. (in Chinese))
- [9] 陈赞廷, 可素娟. 建立黄河下游冰情数学模型优化三门峡水库防凌调度的研究[J]. *冰川冻土*, 1994, 16(3): 211-217. (CHEN Zanting, KE Sujuan. River ice modelling in lower reaches of the Yellow River and its utility in Sanmenxia reservoir regulation[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, 16(3): 211-217. (in Chinese))
- [10] 可素娟, 王敏, 饶素秋, 等. 黄河冰凌研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002. (KE Sujuan, WANG Min, RAO Siqiu, et al. *Yellow River ice research* [M]. Yellow River Conservancy Press, 2002. (in Chinese))
- [11] 韩宇平, 蔺冬, 王富强, 等. 基于粒子群算法的神经网络在冰凌预报中的应用[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(3): 35-37. (HAN Yuping, LIN Dong, WANG Fuqiang, et al. Application of Neural Networks to Ice Forecasting Based on Particle Swarm Optimization[J]. *Water Resources and Power*, 2012, 30(3): 35-37. (in Chinese))
- [12] 于庆峰, 高瑞忠, 李凤玲, 等. 基于AGA-Shepard模型的黄河三湖河站封开河日期预报[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(12): 214-218. (YU Qingfeng, GAO Ruizhong, LI Fengling, et al. Prediction on the freeze date and break up date of Sanhuhe Station on the Yellow River by AGA-Shepard model[J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2011, 39(12): 214-218. (in Chinese))
- [13] 周翔南, 王富强, 蔺冬. 基于遗传算法的SVM冰凌预报模型研究[J]. *华北水利水电学院学报*, 2012, 33(1): 19-22. (ZHOU Xiangnan, WANG Fuqiang, LIN Dong. Research of SVM ice forecast model based on genetic algorithm[J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2012, 33(1): 19-22. (in Chinese))
- [14] 顾润源, 周伟灿, 白美兰, 等. 气候变化对黄河内蒙古段凌汛期的影响[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(6): 1751-1756. (GU Runyuan, ZHOU Weican, BAI Meilan, et al. Influence of climate change on ice slush period at Inner Mongolia section of Yellow River[J]. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(6): 1751-1756. (in Chinese))
- [15] 李华昌, 谢淑兰, 易忠胜. 遗传算法的原理与应用[J]. *矿冶*, 2005, 14(1): 87-90. (LI Huachang, XIE Shulan, Yi Zhongsheng. Theory and Application of Genetic Algorithm[J]. *Mining and Metallurgy*, 2005, 14(1): 87-90. (in Chinese))