

# 万家寨水库上游的冰情特征分析及预报

张璐<sup>1</sup>, 张生<sup>1</sup>, 李超<sup>1</sup>, 熊运阜<sup>2</sup>

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特市 010018;

2. 黄河万家寨水利枢纽有限公司, 山西 太原 036412)

**摘要:** [目的] 研究黄河万家寨水库上游至托克托县喇嘛湾河段冰情特征及预报方法, 为防凌实践提供重要依据。[方法] 通过对 1998—2015 年度冰情分析, 研究了该河段的封、开河过程及二者之间的联系, 以野外观测为基础, 分别对封、开河时间历时与气温、流量、冰厚、封河天数进行了相关性分析, 选取了与封、开河时间相关性系数较高的影响因子, 利用 BP 神经网络模型对万家寨上游河段的封河历时、开河历时、开河日期进行了预报。[结果] 通过与实际观测日期对比, 该预报方法合格率达到 93%。[结论] 神经网络模型对于黄河万家寨水库上游段封河历时、开河历时、开河日期预报的适用性较强, 更适合解决受复杂因素影响的问题。

**关键词:** 冰凌; BP 神经网络; 封河; 开河; 万家寨水库

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2017)01-0196-05

**中图分类号:** P338<sup>+</sup>.4

**文献参数:** 张璐, 张生, 李超, 等. 万家寨水库上游的冰情特征分析及预报[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1):196-200. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.035; Zhang Lu, Zhang Sheng, Li Chao, et al. Analysis and prediction of ice characteristics in upstream of Wajiazhai dam on Yellow River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1):196-200. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.035

## Analysis and Prediction of Ice Characteristics in Upstream of Wajiazhai Dam on Yellow River

ZHANG Lu<sup>1</sup>, ZHANG Sheng<sup>1</sup>, LI Chao<sup>1</sup>, XIONG Yunfu<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, Inner Mongolia

Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Yellow

River Wajiazhai Water Multi-purpose Dam Project Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 036412, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of this paper is to explore the characteristics and forecasting methods of ice regime of upper reach of Wajiazhai dam and Lamawan reach in Togtoh County after Wajiazhai reservoir, and provide a basis for ice prevention and scheduling. [Methods] The processes of freezing-up and thawing of the river reach were analyzed based on the field observations from 1998 to 2015, including the dates and durations of both freezing-up and thawing and their relationships to the affecting factors like air temperature, flow rate, ice thickness, and number of days of frozen. The significant correlation coefficients were selected and BP neural network model was applied to predict the durations of the freezing-up, durations of thawing, and dates of thawing of the upstream reach respectively. [Results] The accuracy of the predicting results were up to 93% compared with the observed date. [Conclusion] Neural network model is suitable for forecasting freezing-up duration, breaking-up duration and breaking-date in upper reach of Wajiazhai dam, and is more suitable for solving the problem of ice regime influenced by complex factors.

**Keywords:** ice; BP neural network approach; freeze-up; thawing; Wajiazhai reservoir

收稿日期: 2016-03-15

修回日期: 2016-06-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“冻融过程中湖泊污染物多介质迁移转化规律及机制研究”(51339002), “寒区湖泊冰封期营养物质冰水多介质环境过程及对富营养化影响效应研究”(51369017)

第一作者: 张璐(1990—), 女(汉族), 内蒙古自治区巴彦淖尔市人, 硕士研究生, 研究方向为黄河河冰研究。E-mail: 1026093195@qq.com。

通讯作者: 张生(1960—), 男(汉族), 内蒙古自治区包头市, 教授, 主要从事水环境科学与工程研究。E-mail: shengzhang@imau.edu.cn。

黄河万家寨水利枢纽于 1998 年建成蓄水,在下闸蓄水以前,坝址上游喇嘛湾(距坝 76.6 km)以下河段整个冬季常年都以淌凌为主,这主要是由于该段河槽比降大,上游卡冰形成冰盖后,使得该河段上游来冰量减少,因而该河段由于水气热交换而形成的冰凌可以在此顺利下泄。自 1998 年水利枢纽运用后,抬升了上游河道水位,减缓了水流流速,使得冰凌在水库回水末端冰盖形成后,上游来冰在库尾上游弯道处堆积,导致库区由之前淌凌为主河段变为稳定封冻河段。其中,在距坝址 58 km 处的牛龙湾,冰凌容易形成堆积,导致上游 63 km 处的水泥厂水位壅高,因此,在开河期该处几乎每年都会产生凌汛灾害,尤其 2007—2008 年度堆冰严重,最高水位达 982.24 m,水面高出路面 0.8~1.0 m,曹家湾耕地全部被淹没,造成较大损失。因此,开展封开河冰情预报研究可对防凌实践提供重要技术支持。

河道冰情分析和研究多采用实地监测和模型模拟的方法,在国外,利用热交换原理和冰力学原理建立的模型已经在冰情预报中被广泛应用<sup>[1-4]</sup>,这一方法已用于加拿大圣劳伦斯河蒙特利尔河段,预测精度较高。在国内,黄河冰凌问题一直以来备受研究领域和管理部门的关注,黄河下游冰情预报模型自 20 世纪 80 年代末建立后<sup>[5]</sup>。模糊优选神经网络方法成功地引入到黄河内蒙段冰情预报<sup>[6-9]</sup>中,取得了较好的效果,许可误差为 6 d 的情况下,预报精度达 86.7%。而对于本文的研究区域的相关研究主要为冰塞、冰坝等冰情灾害的研究<sup>[10-11]</sup>。本文拟在此基础上,选取 1998—1999 年至 2014—2015 年共 17 个冬季(当年 11 月至次年 3 月)的实测数据,分别对黄河万家寨上游的温度、流量、水位及河道地形变化进行分析,以此来分析万家寨上游冰情变化特点,并选取关联度大的预报因子,运用 BP 神经网络模型,对万家寨上游封河历时、开河历时、开河日期进行预报分析,为防凌实践提供重要依据。

## 1 区域及研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区域为从万家寨水库坝址到头道拐河段,总长 112.4 km。该河段属于峡谷型河道,库区河道呈“U”型,河宽约 300~500 m,从头道拐至拐上河段属于天然河道,河面开阔且纵坡较缓,拐上是河道纵坡由缓变陡的转折点,拐上以下河道的比降达 1.17‰。整个研究区域处于黄河内蒙段下游,由于冬季受到蒙古冷高压的控制,气候寒冷且干燥,雨雪较少<sup>[12-14]</sup>,冰期长 4—5 个月,凌汛期 12 月与 1 月气温最低,多年平均气温分别为 -8, -10.6 °C,最低气温分别为

-24.8, -23.3 °C。万家寨库区一般年在 11 月开始流凌,12 月进入稳封期,3 月解冻开河,多年稳封期平均流量为 387 m<sup>3</sup>/s,开河期平均流量为 885 m<sup>3</sup>/s。距坝 58 km 处的牛龙湾为“S”型弯道,此处的河床比降与河面宽度变化较大,特殊的地形条件及桥墩、护堤等人工建筑物的阻挡,使得冰凌在此处不易下泄,极易卡冰结坝,造成严重的冰凌灾害。

### 1.2 人工神经网络

人工神经网络<sup>[15-16]</sup>是由大量神经元组成的极其复杂的非线性网络系统。其过程如下<sup>[17]</sup>:设输入神经元为  $h$ ,隐含层神经元为  $i$ ,输出神经元为  $j$ ,  $n_h, n_i, n_j$  为 3 层神经网络的节点数目,  $\theta_i, \theta_j$  为隐含层节点  $i$ ,输出层节点  $j$  的阈值,  $w_{hi}, w_{ij}$  为输入层节点  $h$  与隐含层节点  $i$  间、隐含层节点  $i$  和输出层节点  $j$  间的连线的权值,各节点的输入为  $x$ ,输出为  $y$ 。

(1) 初始化。设已归一化的输入、输出样本为

$$\{x_{k,h}, d_{k,j} \mid k = 1, 2, \dots, n_k; h = 1, 2, \dots, n_h; j = 1, 2, \dots, n_j\}$$

$nk$  为样本容量。给各连接权  $\{w_{hi}\}, \{w_{ij}\}$  和阈值  $\{\theta_i\}, \{\theta_j\}$  赋予  $(-0.1, 0.1)$  区间上的随机值。

(2) 置  $k = 1$ ,把样本对  $(x_{k,h}, d_{k,j})$  提供给网络 ( $h = 1, 2, \dots, n_h; j = 1, 2, \dots, n_j$ )。

(3) 计算隐含层各节点的输入  $x_i$ ,输出  $y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n_i$ )。

$$x_i = \sum_{h=1}^{n_h} w_{hi} \cdot x_{k,h} + \theta_i$$

$$y_i = 1/(1 + e^{-x_i})$$

(4) 计算输出层各节点的输入  $x_j$ ,输出  $y_j$  ( $i = 1, 2, \dots, n_j$ )

$$x_j = \sum_{i=1}^{n_i} w_{ij} \cdot y_i + \theta_j y_j = 1/(1 + e^{-x_j})$$

(5) 计算输出层各节点所收到的总输入变化时单样本点误差  $E_k$  的变化率。

$$\frac{\partial E_k}{\partial x_j} = y_j(1 - y_j)(y_j - d_{k,j}) \quad (j = 1, 2, \dots, n_j)$$

(6) 计算隐含层各节点所收到的总输入变化时单样本点误差的变化率。

$$\frac{\partial E_k}{\partial x_i} = y_i(1 - y_i) \sum_{j=1}^{n_j} \left( \frac{\partial E_k}{\partial x_j} \cdot w_{ij} \right) \quad (i = 1, 2, \dots, n_i)$$

(7) 修正各链接的权值和阈值。

$$w_{ij}^{t+1} = w_{ij}^t - \eta \frac{\partial E_k}{\partial x_j} y_i + \alpha(w_{ij}^t - w_{ij}^{t-1})$$

$$\theta_j^{t+1} = \theta_j^t - \eta \frac{\partial E_k}{\partial x_j} + \alpha(\theta_j^t - \theta_j^{t-1})$$

$$w_{hi}^{t+1} = w_{hi}^t - \eta \frac{\partial E_k}{\partial x_i} x_{k,h} + \alpha(w_{hi}^t - w_{hi}^{t-1})$$

$$\theta_i^{t+1} = \theta_i^t - \eta \frac{\partial E_k}{\partial x_i} + \alpha(\theta_i^t - \theta_i^{t-1})$$

式中： $t$ ——修正次数，学习速率  $\eta \in (0, 1)$ ，动量因子  $\alpha \in (0, 1)$ 。 $\eta$  较大，则算法收敛快，但是不稳定，可能出现震荡， $\eta$  较小则算法收敛缓慢； $\alpha$  的作用恰好与  $\eta$  相反。

(8) 置  $k = k + 1$ ，取学习模式对  $(x_k, h, d_k, j)$  提供给网络，转步骤 3，直至全部  $nk$  个模式对训练完毕，转步骤 9。

(9) 重复步骤 2 至步骤 8，直到网络全局误差函数。

$$E = \sum_{k=1}^{nk} E_k = \sum_{k=1}^{nk} \sum_{j=1}^{nj} (y_j - d_{k,j})^2 / 2$$

小于预先设定的一个较小值或学习次数大于预先设定的值，结束学习。

当信号输入到神经网络的时候，首先传到隐含层节点，经过网络作用函数转化后，再把隐含层节点的输出信号传播到输出层节点，经过处理后输出结果。其中，节点的作用函数通常采用 Sigmoid 型函数，其数学模型是： $f(x) = 1/(1 + e^{-x})$ 。

### 1.3 模型参数设置

在 BP 神经网络系统中，设定含有输入层（接收外界输入的信息，并传递给中间层各神经元）、隐含层（处理内部信息，负责信息变换）和输出层（向外界进行信息输出）的 3 层网络结构。根据预报因子数不同输入层的输入节点数也不同，预报封河历时选择了 3 个影响因子，因此输入节点数为 3，预报开河历选择了 4 个影响因子，因此输入节点数为 4，预报开河日期选择了 6 个影响因子，因此节点数为 6；经过反复数值训练表明，隐含层设 5 个隐节点比较合适；输出层仅有一个单节点输出即为预报对象。参考文献[7]设置 BP 神经网络的运行参数为：学习效率为 0.9，动量系数为 0.05，训练次数一般为 2 000~100 000，经过模型的反复训练，得出训练次数为 10 000 时预报精度达到最高。根据上述的模型算法，用 1998—2010 年资料对网络进行反复训练，用 2010—2015 年的数据进行验证，直到满足精度要求为止。

### 1.4 预报因子的筛选

影响凌汛的 2 大因素是自然因素和人为因素<sup>[18]</sup>。其中自然因素包括热力因素、动力因素、河势因素。热力因素主要包括水温、气温、降水等；动力因素主要有流量、流速、水位、风速等；河势因素主要包括河道比降、河面宽度、糙率、弯曲度等。人为因素主要包括人工建筑物和人类活动的影响。通过野外实地观测，发现入冬时气温持续低于  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下开始流凌，冰凌首先在库尾回水末端或弯道处卡冰堆积，温度持续降低，封河距离增加，所以流凌封河时的主

控因素为温度，而日均气温对封河的影响不大，所以选取了 11 月至封河时的累积负气温，17 a 来累积负气温平均为  $-177.45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，同时选取了负气温的持续天数及 11 月 25 至 12 月 6 日的流量，凌期流量平均在  $554.80\text{ m}^3/\text{s}$  左右。进入开河期，随着气温的回升，冰盖变薄且脆性增大，冰下过流能力增强，导致冰盖破裂而开河，因此自然因素为开河的主要影响因素，本文选取了 1 月 9 至 26 日流量均值及最大冰厚作为影响因子，因为封河期流量的大小和冰厚对开河有重要影响，近年来平均冰厚为  $0.98\text{ m}$ ，累积正气温与正气温累积天数也是重要影响因子。本文未考虑河势因素，原因是研究时段内河道每年的摆动比较小，地形变化不大，所以河势因素相对变化比较小，故未予考虑。冰情数据源于万家寨水库上游岔河口冰情站沿线各测站的统计资料，基本能够反映万家寨水库上游的冰情现象，且精度可靠。综上所述，基于野外观测与理论分析，选取了不同日期的温度、流量、冰厚、封河天数及封开河时的流量与温度，分别确定各影响因子与相应预报对象的相关性系数，如表 1 为各影响因子与各预报对象的相关性分析表。

表 1 各预报因子与封河历时、开河历时、开河日期的相关系数

预报因子	封河 历时	开河 历时	开河 日期
累计负气温	0.78	—	—
负气温持续天数	0.83	—	—
封河前流量	0.35	—	—
累计正气温	—	0.23	—
正气温累计天数	—	0.42	—
封河天数	—	0.39	0.43
封冻期最大冰厚	—	0.34	0.32
1 月份逐日累计气温	—	—	0.41
2 月 1 日至气温转正日期天数	—	—	0.70
封冻期累计负气温	—	—	0.38
1 月份日均流量	—	—	0.094

## 2 万家寨水利枢纽冰情变化分析

万家寨水库建立后，根据野外观测发现该河段冰情主要变化特点为：喇嘛湾以下稳定封冻河段增长；冰塞、冰坝生成几率增大；水位拥高，造成冰凌灾害<sup>[19]</sup>。由黄河内蒙古段下游典型断面水位变化如图 1（所用的数据为 2013—2014 年度冰期实测数据），从图 1 可以看出，水位从头道拐、蒲滩拐、喇嘛湾、水泥厂、岔河口沿程降低，从头道拐至岔河口河段水位降低  $15\text{ m}$  左右，幅度较大，由此也可以得出该河段比降较大。可以明显看出封河时岔河口断面首先封河，

然后朔源而上各断面依次封河,开河时则相反。其中,头道拐断面整个冰期水位变化不大,封开河时水位也没有明显涨落,说明该断面地势平缓,封开河较平稳。蒲滩拐断面水位在封开河时有较小的波动,但整体比较平稳,没有太大的变化。喇嘛湾断面水位在封开河时较蒲滩拐变化明显,因为该断面处于弯道上游,弯道卡冰后,极易壅高此处水位。水泥厂断面的水位涨落最明显,也是最易发生凌汛灾害的断面,该断面下游为“S”型弯道,11月23日时气温由正转负,到26日时降至11月最低气温-7.5℃,气温的突降导致下游卡冰堆积而壅高该断面水位,之后进入稳封期,3月17日气温升高至7.9℃且持续上升时,水位第2次上涨,说明下游河段因为上游河段解冻开河的冰凌堆积而产生冰坝,壅高了上游水位。岔河口断面水位涨落较明显但是比较缓慢,该断面地势较低,流凌易在此堆积,但不会造成大的凌汛灾害。

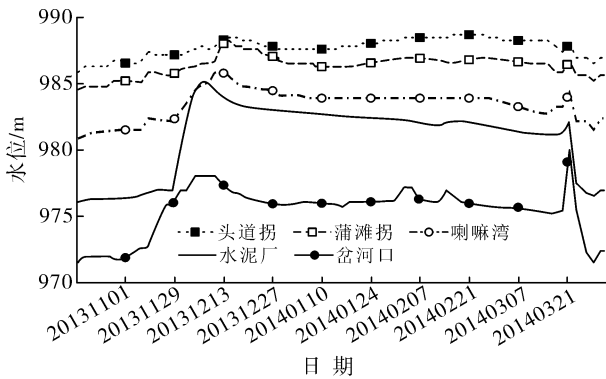


图 1 万家寨水库上游水位变化曲线

绘制冬季冰情纵断面图如图 2 所示。从图 2 可以看出,整个河段明显分为 4 部分。坝址—32 km 河段因为受水库直接影响,水流流速非常小,虽然该段河床比降非常大,但是水面比降小,所以气温由正转负后,该河段便开始结冰封河,属于平封河段。距坝 32~52.1 km 河段主要受到温度的影响,而导致封河形态的位置不同,11 月气温偏低,立封河段会增加,气温偏高,平封河段会增加,属于平立封交替河段。距坝 52.1~67.6 km 河段有明显的高程落差,而且

河床比降和水面比降都很大,水库未建库蓄水以前,该河段因为地处于峡谷型河段,河道比降、水流流速较大而从不封冻,建库后,由于受到回水末端的影响,使得该河段流速减小,水位抬升,再加上大坝对流凌的拦截作用,导致冰凌极易在弯道处堆积,封河时此河段主要受动力因素影响而形成动力型冰盖,即该河段为立封河段。距坝 67.6 km 以上河段,河槽比降小,封河时主要受热力因素影响而形成热力型冰盖,即该河段为平封河段;整个河段封河时朔源而上,11 月气温由正转负后,由于坝前的流速几乎为零,坝前至 32 km 河段开始结冰,且冰面平滑,气温持续降低,便开始流凌,冰凌在平封边缘处开始堆积,受地形影响,到距坝 67.6 km 后,才由立封转为平封河段。开河时上游首先开河,开河形成的流冰堆积到 52.1~67.6 km 河段内,极易生成冰坝,形成武开河局势,拥高水位造成冰凌灾害。

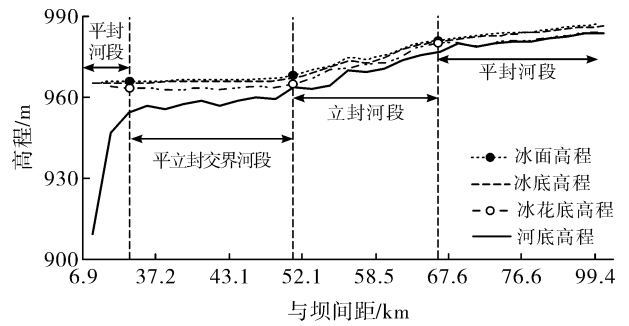


图 2 万家寨水库上游冬季冰情纵断面

### 3 模型的预测

根据《水文情报预报规范》<sup>[20]</sup>中有关春汛和冰情预报的规定,并参照多年的防凌减灾实践工作,预见期定为 16 d,根据线性内插法,得到许可误差为 6 d。根据表 2 预报检验结果可知,封河历时和开河历时的预报结果均在许可误差范围内,且和实测值非常接近,而开河日期的预报除 2011—2012 年度的预报误差峰值为 9 d 大于许可误差外,其余的预报值都在许可误差内。

表 2 万家寨上游封河历时、开河历时、开河日期预报模型结果

时 间	封河历时/d			开河历时/d			开河日期		
	实测值	预测值	误差	实测值	预测值	误差	实测值	预测值	误差
2010—2011 年	47	44	3	54	54	0	0326	0325	1
2011—2012 年	46	48	2	55	53	2	0327	0318	9
2012—2013 年	37	43	6	45	39	6	0317	0323	6
2013—2014 年	44	44	0	51	54	3	0323	0321	2
2014—2015 年	44	45	1	52	50	2	0324	0324	0

分析其原因(如图 3 所示),发现该年度虽然封河晚、冰层薄,但是封冻时间较长,该年度进入 3 月以后气温偏低,气温迟迟达不到开河的条件,3 月 15 日之前主要以融冰为主,并且河段内发生许多新增的清沟与原有的清沟逐渐加宽加长且连通,因此导致开河过程减缓,较其它年份来说开河较晚,所以该年度的预测结果偏差较大。综上所述,共 15 个预报结果中,预报合格率为 93.3%,预报精度较高,满足水文预报的精度要求。

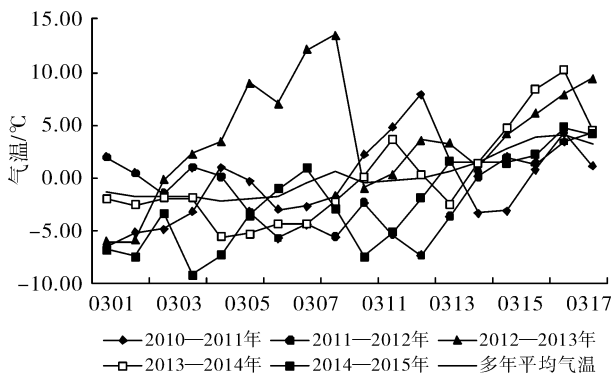


图 3 2010—2015 年及 3 月份多年平均温度对比

## 4 结论

(1) 从所选取的预报因子来看,气温、封冻天数、冰厚和流量是影响冰情变化的主控因素。

(2) 河段的封河形式主要取决于水面比降的大小。

(3) 头道拐以下库尾河段总是先于头道拐以上河段解冻开河,且形成库尾交通水泥厂附近河段冰坝的冰源来自头道拐以下,主要是距坝 67~100 km 河段的冰量。

(4) 由于黄河封、开河受多种因素的综合影响,且各影响因子虽单独与预报因子呈线性关系,但综合影响下关系较复杂,所以神经网络模型对于黄河万家寨水库上游段封河历时、开河历时、开河日期预报的适用性较强,更适合解决上述受复杂因素影响的问题。经过神经网络反复训练,最终得出预报合格率为 93.3%,预报精度较高,满足水文预报的精度要求。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Shen Hungtao, Yapa P D. A unified degree-day method for river ice cover thickness simulation[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1985,12(1):54-62.
- [2] Foltyn E P, Shen H T. St. Lawrence River freeze-up forecast[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1986,112(4):467-481.
- [3] Shen Hungtao, Shen H, Tsai S M. Dynamic transport of river ice[J]. Journal of Hydraulic Research, 1990,28(6): 659-671.
- [4] Shen Hungtao. Under cover transport and accumulation of frazil granules[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995,121(2):184-195.
- [5] 冀鸿兰,朝伦巴根,陈守煜. 基于遗传算法的模糊优选 BP 网络的冰凌预报模型[J]. 中国农村水利水电,2009(1):5-7.
- [6] 陈守煜,冀鸿兰. 冰凌预报模糊优选神经网络 BP 方法[J]. 水利学报,2004(6):114-118.
- [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.
- [8] 李凤玲,高瑞忠,冯国华,等. 两种改进的 BP 模型预报黄河内蒙段冰情信息及效果分析[J]. 中国农村水利水电,2011(7):69-72.
- [9] 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.
- [10] 郑春茂,裴群,闫新光,等. 万家寨水库运用对上下游河段防凌的影响[J]. 人民黄河,2002,24(3):34-35.
- [11] 可素娟,钱云平,郝守英,等. 万家寨水库凌情特点及初始封河期调度方案研究[J]. 冰川冻土,2002,24(2):209-213.
- [12] 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.
- [13] 丁永建,叶佰生,刘时银,祁连山中部地区 40 a 来气候变化及其对径流的影响[J]. 冰川冻土,2002,22(3):193-199.
- [14] 王根绪,沈永平,程国栋. 黄河河源区生态环境变化与成因分析[J]. 冰川冻土,2000,22(3):200-205.
- [15] 吴昌友. 神经网络的研究及应用[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2007:22-34.
- [16] 宋玉强. 人工神经网络在时间序列预测中的应用研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2005:14-27.
- [17] 金龙. 神经网络气象预报建模理论与应用[M]. 北京:气象出版社,2004:75-80.
- [18] 姚惠明,秦福兴,沈国昌,等. 黄河宁蒙河段凌情特性研究[J]. 水科学进展,2007,18(6):893-899.
- [19] 马喜祥,熊运阜,徐伟. 万家寨水库冰情浅议[J]. 泥沙研究,2003(4):66-72.
- [20] 水利部水利信息中心. 水文情报预报规范(GB/T22482-2008)[S]. 北京:中国水利水电出版社,2008.