

黄河头道拐站开河日期预测的 LSSVM 方法

于国卿^{1,2}, 李书霞^{1,2}, 田治宗^{1,2}

(1. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 郑州 450001; 2. 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心, 郑州 450001)

摘要: 根据实测冰情数据分析发现, 可将冰盖厚度演变过程作为预测头道拐站的开河日期的主要依据, 同时还应考虑封冻期气温、流量等对冰盖厚度的持续性和累积性影响。据此提出了一种应用数据挖掘技术和 LSSVM 进行头道拐站开河日期预测的新方法。应用 LSSVM 模型对头道拐站 2010 年、2011 年和 2012 年开河日期的预测结果表明, 可在封冻期内任一冰盖厚度测量日期利用上述方法对该站的开河日期进行预测, 有效延长了预见期, 且在 3 月 6 日前的预测值均满足许可误差合格率的要求。根据 LSSVM 模型预测误差呈波动性变化的特点, 提出了预测开河日期的均值法, 可使开河日期预测精度得到显著提高。

关键词: 开河日期; 最小二乘支持向量机; 数据挖掘; 头道拐站; 黄河

中图分类号: TV 124 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)05-0150-05

The LSSVM Method to Forecast the Break up Date of the TouDaoguai Station along the Yellow River

YU Guoqing^{1,2}, LI Shuxia^{1,2}, TIAN Zhizong^{1,2}

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450001, China;

2. Research Center on Levee Safety Disaster Prevention, MWR, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: According to the analysis of measured ice data, the paper pointed out that the evolution of the ice sheet thickness can be used as the main basis for forecasting the break up date at the TouDaoguai station along the Yellow River, and the persistent and cumulative effects of temperature and flow during the freezing period are also important factors which affect the timing of break up date. A new method to forecast the break up date using the data mining technology (DM) and least square support machine (LSSVM) was presented in this paper. The LSSVM model was used to predict the break up dates at the TouDaoguai station in 2010, 2011, and 2012, and the results showed that the method can predict the break up date on any date of ice sheet thickness observation during the frozen period, which can expand the forecast period effectively. Furthermore, the predicted values of break up date before March 6th met the requirements of the allowable prediction error rate. An average value method of forecasting the break up date was proposed according to the characteristics of volatility change in the prediction error produced by the LSSVM model, which can improve the prediction accuracy significantly.

Key words: break up date; LSSVM; data mining; TouDaoguai station; Yellow River

黄河内蒙古河段地处黄河最北端, 河段南、北纬度间隔 4° 以上(北纬 $37^{\circ}35'$ - 北纬 $41^{\circ}50'$)^[1]。一般情况下上游河段温度高, 下游河段温度低, 因此流凌、封河通常溯源而上, 解冻开河则自上而下。开河时, 上游来水、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, 形成越来越大的凌洪向下游推进, 容易形成冰凌灾害。应对冰凌灾害的手段除修建如水库、防凌蓄滞洪区和控导工程等工程性措施外, 非工程措施如对冰情的监测和预测也能发挥重要作用。作为黄河上、中游分界点的头道拐水文站位于黄河内蒙古河

段由西向东流向和由北向南流向的转折处, 是黄河流域水文站中纬度最高的水文站之一, 同时也是黄河防洪、防凌和水量调度的重要控制站^[2]。对该站开河日期进行及时、准确的预测能够为防凌指挥和水库调度决策提供重要的参考依据。

可素娟等^[3-6]采用经验和理论结合的方法建立了黄河上游冰情预测数学模型, 但随着河流断面和气候条件的变化, 已经不能很好地发挥作用。近年来, 众多学者进行了大量的相关研究, 比如杨开林等^[7-8]开展的河道冰情数值模拟研究; 陈守煜等^[9-10]利用水文站气温、水位和流量, 将传统的 BP 神

收稿日期: 2013-01-22 修回日期: 2013-08-07 网络出版时间: 2013-08-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130823.1502.014.html>

基金项目: 水利部公益性行业科研专项项目(201201080); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(HKY-JBYW-2010-06)

作者简介: 于国卿(1975-), 男, 河南封丘人, 高级工程师, 主要从事防洪减灾、水利信息技术研究。E-mail: yuguoqing01@126.com

神经网络算法应用到黄河宁蒙河段开河和封河预测中;李亚伟、陈守煜等^[11]建立了基于SVR(支持向量机回归)的黄河凌汛预测模型,在小样本情况下,具有训练速度快、泛化能力强的特点,对黄河内蒙段凌汛期封河历时预测比较准确;冯国华^[1]采用AGA-BP(加速遗传算法反向传播学习算法)建立了黄河冰情信息的相似预测模型。2006年,黄河水利委员会水文局开发完成了黄河宁蒙河段冰情预测系统,其中头道拐站开河日期预测模型包括了多元线性回归模型、GM(0, N)模型和神经网络模型,应用上述预测系统对2001年-2004年4个不同站点的开河日期进行预测发现,石嘴山、三湖河口和巴彦高勒站的预测效果较好,但头道拐水文站预测效果较差^[6]。

由于缺乏可用的河道地形资料,目前暂不具备建立基于水动力学的宁蒙河道冰情数学模型的条件,上述各冰情预测模型均为考虑热力学理论及冰水力学理论的概念性数学模型^[6]。已有的模型在对头道拐站开河日期预测时未考虑冰盖厚度的变化过程,通常仅选择冰盖厚度的最大值作为代表,同时将每年3月2日之前的其他冰情数据进行综合、概化,形成1个冰情年度仅包括1条数据的冰情样本。实际上,综合与概化降低了数据的代表性,掩盖了数据的细节变化特征,加上参数率定时样本容量小,由此建立的预测模型不够稳定。此外,头道拐站开河日期预测值最早在3月3日发布,而该站历年开河日期介于3月4日-3月31日之间,进行开河日期预测时预见期较短。针对头道拐站开河日期预测中存在的问题,本文在分析冰情物理成因的基础上,以1986年-2012年头道拐站的实测冰情数据为依据,将数据挖掘技术(Data Mining, DM)和支持向量机(Support Vector Machine, SVM)算法引入头道拐站开河日期预测研究中,探讨延长预见期和提高预测精度的方法。

1 开河日期影响因素分析

1.1 影响河流冰情的主要因素

已有研究表明,影响黄河宁蒙河段冰情的主要因素包括热力因素、动力(水力)因素、河道形态和人类活动等^[1,6],其中河道形态和人类活动可通过热力因素和动力因素间接体现。对于特定的河段,由于平面位置固定,如将河流走向与河道边界条件视为相对稳定,则河段的冰情变化主要与热力因素和动力因素有关。

目前黄河上游各水文站监测的冰情指标中,热力因素主要包括气温和水温,动力因素主要包括流量、流速和水位。根据《河流冰情观测规范》(SL-59-93),冰盖厚度采用固定点冰厚测量方法,从封冻后且在冰上行走无危险时开始观测,至解冻时停止。测量时间为封冻期每月的1日、6日、11日、16日、21日和26日。

1.2 头道拐站开河日期影响因素

所谓开河是指河道冰盖厚度和强度减小,冰层融化、破裂和流动,最终全河段水面贯通、冰块全部消融的现象。因此开河日期即河段全部开通、冰块基本消融的日期^[3]。冰盖的生消演变过程影响开河日期的早晚,根据实测冰情数据预测开河日期应首先考察冰盖厚度的影响。

在冰盖的生消过程中,热交换和动力作用条件决定着冰在河道中的移动和积聚,而冰与大气的热交换促使冰凌的冻结和冰强度的增加或减小。2002年以来头道拐站冰盖厚度发展过程(图1)显示,河流封冻后,随着气温的升降和冰下流量的变化,冰盖厚度亦随之不断变化。广义上开河可视为冰盖形成后其厚度的“薄-厚-薄”演变、直至丧失整体性和稳定性的过程,经历的时间从封河日期始,至开河日期止。因此对开河与开河日期的研究宜将稳定冰盖形成时间作为开河日期计算的起始参照点。

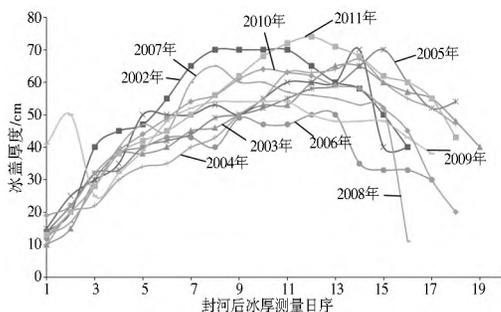


图1 头道拐站2002年以来历年冰厚发展过程

Fig. 1 The ice thickness process at the TouDaoguai station since 2002

河流稳定封冻后的气温、流量、水位、封冻历时等因素在封冻期的变化,直接或间接地影响到冰盖厚度的发展和未来开河日期的早晚。头道拐站1986年-2012年各冰情指标变化过程(见图2)显示,在封冻期,气温、流量和水位的变化呈波动性变化,其中气温表现为先下降再升高的过程,流量表现为波动式增大的过程,而水位表现为持续增加的过程。气温、流量等因素对封冻期内的冰盖厚度具有持续和累积性的影响,因此,除应将各冰盖厚度测量日期的气温、流量、水位和冰厚作为影响开河日期的因素之外,同时还应考虑各指标在封冻期内的平均值和累计值。

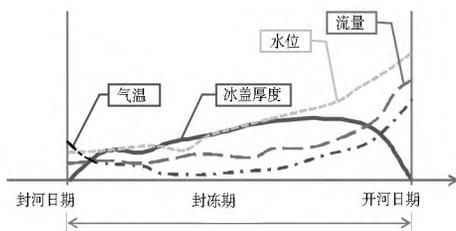


图2 1986年-2012年头道拐站冰情指标变化过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of variation of ice indicators between 1986 and 2012

1.3 挖掘数据集的构建

为了在开河日期预测模型中考虑冰盖厚度和气温、流量、水位等影响因素,本文采用数据挖掘技术(Data Mining, DM)构造各因素累积属性。

选取封冻期内头道拐站各次测量日期的冰盖厚度和气温、流量、水位、距封河日期的天数,以及上游三湖河口站的流量作为开河日期的影响因素,通过数据提取和属性构造得到影响开河日期的头道拐站气温、流量和水位的平均值和累计值属性(指标),以及上游三湖河口站流量的平均值和累计值属性。各属性的计算起点为封河日期,终点为封冻期内各冰盖厚度测量日期(各累计值和平均值的构造方法见图3)。

通过构造, 1 个冰情年度内平均可得到 17 条记录, 每条记录包括 21 个属性, 其中待预测的开河日期属性构造为“冰盖厚度测量日期距开河日期的天数”。

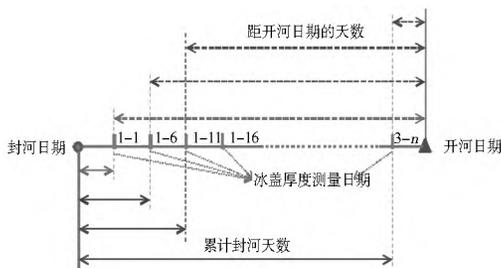


图 3 头道拐站开河日期平均指标和累计指标构造时段示意图

Fig. 3 Schematic diagram of construction periods of break up dates for the average indicators and accumulative indicators at the Toudaoguai station

2 预测模型

2.1 基本方程

最小二乘支持向量机 (Least Squares Support Vector Machine, LSSVM) 是对 SVM 的拓展^[12]。LSSVM 通过将传统 SVM 中的不等式约束改为等式约束, 且将误差平方和引入结构风险计算中, 降低了计算的复杂度, 且求解问题的速度和收敛精度得到提高。

设样本为 n 维向量, m 个样本为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)$ 。用非线性映射 $\varphi(x)$ 将样本从原空间映射到高维特征空间, 其拟合函数为:

$$f(x) = \omega \cdot \varphi(x) + b \quad (1)$$

其优化问题为:

$$\min S(\omega, \xi) = \frac{1}{2} \omega \cdot \omega + C \sum_{i=1}^m \xi_i^2 \quad (2)$$

$$s.t. \quad y_i = \omega \cdot \varphi(x_i) + b + \xi_i \quad i = 1, \dots, m$$

式中: ω 为权向量; b 为偏置量; C 为惩罚因子; ξ_i 为松弛因子; i 表示第 i 个样本。

引入 Lagrange 法求解, 得:

$$L(\omega, b, \xi, \alpha) = \frac{1}{2} \omega \cdot \omega + C \sum_{i=1}^m \xi_i^2 - \sum_{i=1}^m \alpha_i (\omega \cdot \varphi(x_i) + b + \xi_i - y_i) \quad (3)$$

其中 $\alpha_i (i = 1, \dots, m)$ 为 Lagrange 乘子。

根据优化条件求偏导可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \omega} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^m \alpha_i \varphi(x_i) \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^m \alpha_i = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \xi_i} = 0 \Rightarrow \alpha_i = C \xi_i \\ \frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0 \Rightarrow \omega \cdot \varphi(x_i) + b + \xi_i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

采用核函数 $K(x_i, x_j)$ 代替内积计算 $(\varphi(x_i), \varphi(x_j))$, 得到:

$$\begin{bmatrix} 0 & L_m^T \\ L_m & \Phi + E/C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $L_m = [11, \dots, 1]^T$; $y = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T$; $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m]^T$; Φ 为 m 阶方阵, 其第 i 行第 j 列元素为 $K(x_i, x_j)$, E 为

m 阶单位矩阵。

采用最小二乘法求解 a, b , 得到非线性预测模型:

$$f(x) = \sum_{i=1}^m \alpha_i K(x_i, x_j) + b \quad (6)$$

2.2 模型验证

选用 RBF 作为核函数, 利用网格搜索和交叉检验的方法优化选取参数 C 和 σ^2 。共分为 3 个方案对头道拐站和三湖河口站 2002 年- 2012 年的实测冰情数据进行模型训练和检验, 见表 1。

表 1 头道拐站开河日期 LSSVM 预测模型的数据集划分方案
Table 1 The partition scheme of dataset using LSSVM to forecast the break up date at the TouDaoguai station

方案编号	方案 1	方案 2	方案 3
训练集起始年度	2002- 2003	2002- 2003	2002- 2003
训练集终止年度	2008- 2009	2009- 2010	2010- 2011
检验集起始年度	2009- 2010	2010- 2011	2011- 2012
检验集终止年度	2011- 2012	2011- 2012	2011- 2012

各方案对检验集起始年度开河日期的预测结果见表 2。

由表 2 可知, 根据本文提出的挖掘数据集和 LSSVM 算法, 可在封冻期内任一冰盖厚度测量日期后得到一个当年度开河日期预测值, 有效延长了开河日期预测的预见期。上述 3 个方案训练得到的 LSSVM 预测模型对 2009 年- 2010 年、2010 年- 2011 年和 2011 年- 2012 年 3 个冰情年度的开河日期预测结果表明, 除各年度 3 月 6 日之后的预测值外, 其他各次开河日期预测值均满足《水文情报预测规范》(SL 250- 2000) 中关于许可误差的要求, 合格率达到 100%。

3 讨论

3.1 LSSVM 预测模型的局限性

应用 LSSVM 模型预测可有效延长头道拐站开河日期预见期, 但由于 LSSVM 建模训练时不考虑数据发生时间的前后顺序, 故该模型预测时仅与构造数据的值有关, 而与数据的次序呈松散型的关联性。上述特点可反映在预测误差变化情况中, 见图 4- 图 6。

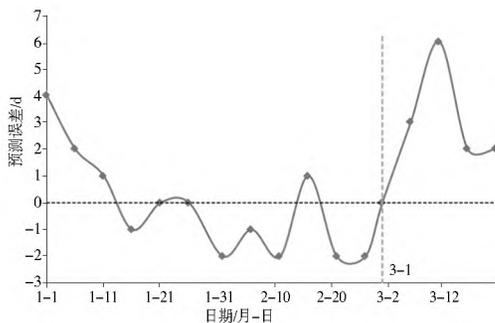


图 4 方案 1 预测 2009 年- 2010 年度开河日期误差变化曲线

Fig. 4 The break up date error curves from 2009 to 2010 according to scheme 1

根据图 4- 图 6, 上述 3 个方案建立的 LSSVM 预测模型在各冰盖厚度测量日期预测开河日期时, 预测误差呈波动性变化, 其中 3 月份之前误差变化相对平稳, 进入 3 月份后误差绝对值显著增大。造成这一现象的原因包括 LSSVM 自身

表 2 头道拐站开河日期预测结果

Table 2 The forecasting results of break-up date at the TouDaoguai station

方案 1			方案 2			方案 3		
冰盖厚度测量日期	预测开河日期	误差/d	冰盖厚度测量日期	预测开河日期	误差/d	冰盖厚度测量日期	预测开河日期	误差/d
2010-01-01	2010-03-28	4	2010-12-16	2011-03-23	4	2011-12-21	2011-03-18	-2
2010-01-06	2010-03-26	2	2010-12-21	2011-03-21	2	2011-12-26	2011-03-20	0
2010-01-11	2010-03-25	1	2010-12-26	2011-03-22	3	2012-01-01	2011-03-22	2
2010-01-16	2010-03-23	-1	2011-01-01	2011-03-20	1	2012-01-06	2011-03-23	3
2010-01-21	2010-03-24	0	2011-01-06	2011-03-21	2	2012-01-11	2011-03-22	2
2010-01-26	2010-03-24	0	2011-01-11	2011-03-18	-1	2012-01-16	2011-03-20	0
2010-02-01	2010-03-22	-2	2011-01-16	2011-03-18	-1	2012-01-21	2011-03-19	-1
2010-02-06	2010-03-23	-1	2011-01-21	2011-03-16	-3	2012-01-26	2011-03-17	-3
2010-02-11	2010-03-22	-2	2011-01-26	2011-03-17	-2	2012-02-01	2011-03-16	-4
2010-02-16	2010-03-25	1	2011-02-01	2011-03-16	-3	2012-02-06	2011-03-17	-3
2010-02-21	2010-03-22	-2	2011-02-06	2011-03-18	-1	2012-02-11	2011-03-19	-1
2010-02-26	2010-03-22	-2	2011-02-11	2011-03-17	-2	2012-02-16	2011-03-18	-2
2010-03-01	2010-03-24	0	2011-02-16	2011-03-19	0	2012-02-21	2011-03-19	-1
2010-03-06	2010-03-27	3	2011-02-21	2011-03-18	-1	2012-02-26	2011-03-19	-1
2010-03-11	2010-03-30	6	2011-03-01	2011-03-17	-2	2012-03-01	2011-03-22	2
2010-03-16	2010-03-26	2	2011-03-06	2011-03-17	-2	2012-03-06	2011-03-19	-1
2010-03-21	2010-03-26	2	2011-03-11	2011-03-13	-6	2012-03-11	2011-03-23	3
			2011-03-16	2011-03-10	-9	2012-03-16	2011-03-21	1
			2011-03-21	2011-03-11	-8			

注: 1. 2009 年- 2010 年开河日期为 3 月 24 日; 2. 2010 年- 2011 年开河日期为 3 月 19 日; 3. 2011 年- 2012 年开河日期为 3 月 20 日; 4. 误差为负时表示预测值早于实际开河日期, 误差为正时表示预测值迟于实际开河日期。

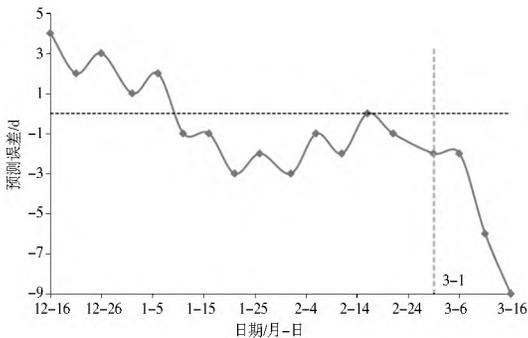


图 5 方案 2 预测 2010 年- 2011 年度开河日期误差变化曲线

Fig. 5 The break-up date error curves from 2010 to 2011 according to scheme 2

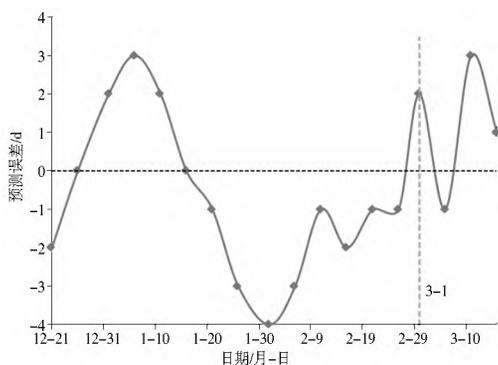


图 6 方案 3 预测 2011 年- 2012 年度开河日期误差变化曲线

Fig. 6 The break-up date error curves from 2011 to 2012 according to scheme 3

起主要作用。LSSVM 模型纳入的 20 个冰情指标中, 能够反映冰情变化过程的累计属性占 6 个(气温属性 3 个, 流量属性 2 个, 水位属性 1 个)。3 月份之前, 头道拐站处于稳定封冻期, 气温、水位、流量的变化相对平稳, 累计指标亦随之平稳; 进入 3 月份, 由于气温的升、降剧烈, 同时上游水库调度引起的流量、水位变化较稳封期有较大增大, 最终导致冰盖厚度变化显著, 累计指标变化幅度较大。因此, 采用 LSSVM 模型在 3 月份之后预测开河日期时误差较大。

3.2 开河日期预测值的确定方法

前已述及, 在 3 月 1 日之前(包括 3 月 1 日)的开河日期预测误差呈波动性变化, 且整体上越接近 3 月 1 日预测误差绝对值越小。为延长预见期, 可直接采用 3 月 1 日之前的预测值作为年度开河日期, 但预测值误差绝对值比较大。因此, 根据预测误差波动性变化的特点, 宜采用对预测值进行平均化的方法确定开河日期预测值(简称均值法), 即以封河日期后第一个冰盖厚度测量日期为起点, 以 3 月 1 日为终点, 将该时间段内的历次预测值取均值作为最终的开河日期预测值(见表 3)。当需要进一步提前预测时, 可将预测终点移至 2 月份, 仍取均值作为开河日期预测值。

表 3 均值法确定年度开河日期结果

Table 3 The break up date results using the average value method

预测年度	实际开河日期 / 月日	预测开河日期 / 月日	误差/d
2009- 2010	3-24	3-24	0
2010- 2011	3-19	3-19	0
2011- 2012	3-20	3-19	-1

根据表 3, 应用 LSSVM 模型在封冻期各冰盖厚度测量

算法和构造训练数据集方法的局限性, 其中数据集构造方法

日期预测开河日期后,以 3 月 1 日为终点采用均值法确定开河日期预测值时,预测精度明显提高,预测值全部满足许可误差合格率的要求。

4 结论

(1) 根据对实测冰情数据的分析,冰盖厚度是影响头道拐站开河日期的直接因素,封冻期气温、流量等通过对冰盖厚度的持续性和累积性作用间接影响到开河日期的早晚。据此应用数据挖掘技术构建了包括气温、流量等因素累计属性的挖掘数据集,然后在封河后任一冰盖厚度测量日期后得到 1 个开河日期预测值,有效延长了预见期。

(2) 根据挖掘数据集应用 LSSVM 算法对头道拐站 2010 年、2011 年和 2012 年开河日期预测结果表明,预测误差呈波动性变化,且整体上越接近 3 月 1 日预测误差绝对值越小,其中 3 月份之前误差变化相对平稳,进入 3 月份后误差绝对值显著增大。

(3) 根据开河日期预测误差波动性变化的特点,提出了应用均值法确定年度开河日期预测值的方法确定开河日期预测值,即以封河日期后第一个冰盖厚度测量日期为起点,以 3 月 1 日为终点,将该时间段内的历次预测值取均值,作为最终的开河日期预测值。结果表明,开河日期预测精度明显提高,预测值全部满足许可误差合格率的要求。

参考文献(References):

- [1] 冯国华. 黄河内蒙古段冰凌特征分析及冰情信息模拟预报模型研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009. (FENG Guohua. Research on the Analysis of Ice Slush Feature and the Prediction Model of Ice conditions Information in Inner Mongolia Reach of the Yellow River[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009. (in Chinese))
- [2] 李玉姣, 胡军, 杨国伟. 黄河头道拐站低水预警流量预报方法研究[J]. 内蒙古水利, 2008, (4): 3-5. (LI Yujiao, HU Jun, YANG Guowei. The Forecasting Method of Warning Flow in the TouDaoguai Station along the Yellow River[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2008, (04): 3-5. (in Chinese))
- [3] 可素娟, 王敏, 饶素秋. 黄河冰凌研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002. (KE Sujuan, WANG Min, RAO Suqiu. Research on the Yellow River Ice[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy press, 2002. (in Chinese))
- [4] 陈赞廷, 可素娟. 黄河冰凌预报方法评述[C]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000. (CHEN Zanting, KE Sujuan. Review on the Ice Forecasting Methods of the Yellow River[C]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2002. (in Chinese))
- [5] 可素娟, 陈赞廷, 吕光圻, 等. 黄河上游实用冰情预报数学模型及优化水库防凌调度研究[R]. 黄河水利委员会水文局, 1998. (KE Sujuan, CHEN Zanting, LY Guangqi, et al. The Practical Ice Forecasting Mathematical Model and the Ice Flood Control Dispatching for Reservoir Optimization in the Upstream of the Yellow River[R]. Hydrological Bureau, YRCC, 1998. (in Chinese))
- [6] 黄河水利委员会水文局. 黄河宁蒙河段冰情预报系统技术报告[R]. 黄河水利委员会水文局, 2006. (Report of the Ice Forecasting System on the Ningxia Inner Mongolia Reach along the Yellow River[R]. Hydrological Bureau, YRCC, 2006. (in Chinese))
- [7] 王涛, 杨开林, 郭永鑫, 等. 神经网络理论在黄河宁蒙河段冰情预报中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(10): 1204-1208. (WANG Tao, YANG Kailin, GUO Yongxin. Application of Artificial Neural Networks to Forecasting of River Ice Condition[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(10): 1204-1208. (in Chinese))
- [8] 杨开林, 刘之平, 李桂芬. 河道冰塞的模拟[J]. 水利水电技术, 2002, 33(10): 40-47. (YANG Kailin, LIU Zhiping, LI Guifen. Simulation of the Ice Jam of River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002, 33(10): 40-47. (in Chinese))
- [9] 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. (CHEN Shouyu, JI Honglan. Fuzzy Optimization Neural Network BP Approach for Ice Forecasting[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (6): 114-118. (in Chinese))
- [10] 冀鸿兰. 黄河内蒙古段凌汛成因分析及封开河日期预报模型研究[D]. 内蒙古农业大学, 2002. (JI Honglan. Factor Analysis for Ice Flood and Model Research for Freeze up Time and Break up Time in the Inner Mongolia Reach of the Yellow River[D]. Inner Mongolia Agricultural University, 2002. (in Chinese))
- [11] 李亚伟, 陈守煜, 韩小军. 基于支持向量机 SVR 的黄河凌汛预报方法[J]. 大连理工大学学报, 2006, (2): 272-275. (LI Yawei, CHEN Shouyu, HAN Xiaojun. Yellow River Ice Flood Prediction Based on SVR[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, (2): 272-275. (in Chinese))
- [12] 邓乃扬, 田英杰. 数据挖掘中的新方法—支持向量机[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (DENG Naiyang, TIAN Yingjie. Support Vector Machine a New Method for Data mining[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))