

黄河宁蒙河段封河和开河预报方法初探

康志明¹ 张芳华¹ 李金田² 王文东¹ 金少华³ 杨克明¹

(1. 国家气象中心,北京 100081; 2. 内蒙古巴彦淖尔市气象局; 3. 云南省玉溪市气象局)

提 要: 利用气象和水文等实测资料,在系统地分析黄河上游宁蒙河段凌汛特征及物理成因的基础上^[1],选取与封、开河预报因子密切相关的因素进行统计分析发现:影响封河最主要因素是气温的变化,旬平均温度 $< -5^{\circ}\text{C}$,河流封冻;开河无确定的临界气温指标,而与隆冬1—2月累积负积温有明显负相关性。利用车贝雪夫多项式展开得到预报因子,采用数理统计逐步回归分析方法进行分析计算,分别建立了宁蒙河段封、开河日趋势统计预报模型。预报结果验证具有较好的预报效果。

关键词: 凌汛灾害 封河日 开河日 车贝雪夫多项式

Research on Freezing up and Melting Forecast of Ningxia-Inner Mongolia Section of the Yellow River

Kang Zhiming¹ Zhang Fanghua¹ Li Jintian²

Wang Wendong¹ Jin Shaohua³ Yang Keming¹

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081; 2. Bayannur Meteorological Office, Inner Mongolia)

Abstract: Based on meteorological and hydrological observed data, the character and physical cause of the ice run along Ningxia-Inner Mongolia Section of the Yellow River have been systematically analyzed. Statistical analysis of some factors that are interrelated to freezing up and melting of the river shows that the change of temperature is the main factor that affects the freezing up of the river, the river freezes up when the decadal mean temperature is lower than -5°C ; meanwhile there is no critical air temperature index related to the thaw date of river ice, the date has a clear negative correlation with the temperature of Jan and

Feb. Forecast equation was established through stepwise regression based on the factors created by Chebyshev polynomials, and it has proved to have good capability by the experimental forecast.

Key Words: ice run disaster freezing up date the thaw date of river Chebyshev polynomials

引 言

黄河上游凌汛灾害主要发生在宁夏的石嘴山至内蒙古头道拐河段（以下简称宁蒙河段）。凌灾的成因是黄河上游河道的流向由南向北，从宁夏入境至内蒙古巴彦淖尔盟磴口县为西南—东北走向，磴口县到托克托县自西向东，托克托县至清水河县以下基本由西北向南，河段呈∩型大弯曲。甘肃至宁夏河段温度高，内蒙古河段温度低。入冬时，内蒙古境内河段先行冻结；初春解冻时，则由上游逐渐向下发展，内蒙古河段温度低而延后解冻。由于特定的地理位置、河道形态和水文、气象条件，致使黄河宁蒙河段在流凌封河期和融冰开河期极易形成流冰堆积，使河水猛烈抬升，窄堤决口，酿成凌灾^[1-3]。因此每年黄河宁蒙河段流凌封冻期和融冰解冻期防治凌灾极为重要。

由于防凌工作的实际需要，防汛、水电和气象等部门都希望能事先预测出封河和开河时间。但这些工作涉及到上述众多部门和复杂的水文、气象和地理地貌等条件；仍处于探索阶段^[4]。有关凌汛期开、封河日期预报以及凌峰和凌险预报研究成果至今很少。张遂业在分析冰凌物理成因的基础上，采用数理统计多元线性回归分析方法，建立过黄河上游封冻、解冻预报模型^[5]，但更多的考虑水动力因素影响。李海英等利用天气气候分析，统计相关计算方法，制作黄河凌汛开河日的长期预报^[6]。

目前凌汛预报已成为气象服务的重要内

容，急需要一些中短期预报方法。虽然影响封河、开河的因素比较多，但最主要影响因素是气温的变化。若能找出封河和开河与温度之间的关系，并能较为准确地预测出气温的变化，即可做出封河和开河的趋势预报。本文利用水文部门多年统计确定的黄河宁蒙河段逐年水文站封河和开河日期资料，主要依据气象条件建立了统计预报方程，做出封河和开河日趋势预报，为冰凌灾害预报提供方法和参考依据。

1 封河日趋势预报

河段内冰盖的发展及冰凌现象的产生是水体通过冰盖传导与大气交换热量，水体失热所造成的。黄河宁蒙河段开始流凌一般在每年 11 月中下旬，封河在 11 月下旬到 1 月中旬。就内蒙古磴口河段来看，1961—2000 年 40 年中平均封河日为 12 月 16 日，而在 12 月封河的有 36 年，占 90%；表明绝大多数年份 12 月该县河段即已封冻。其中最早的在 11 月 30 日，最晚为 1 月 13 日，反映不同年份封河时间不一样，有时早晚跨度也较大，有年际变化显著之特征。尽管影响河流封冻迟早的因素较为复杂，但关键还是气温的变化。封河主要决定于冬季高纬地区冷空气向南侵入的频率和强度。经对 1961—2000 年气象、水文资料分析结果表明，40 年中封河时旬平均温度为 -8.4°C ，其中旬平均温度 $t < -5^{\circ}\text{C}$ 有 35 年，占 87.5%。由此可将封冻日趋势预报转化为旬平均温度预报，当预报的旬平均温度低于 -5°C 时，该

旬 10 天之内河段方能出现封冻。

1.1 旬平均温度预报因子的选择

影响温度变化的因子非常多,但对于中期时效的旬平均温度预报来说,目前业务中使用的中期数值模式的形势预报产品有 500hPa 高度场、地面气压场和 850hPa 温度场。如直接用这些场的格点资料作为因子来建立预报方程,则因子数目太多并且天气学意义也不明确,会造成预报方程的不稳定性。然而车贝雪夫多项式是一种建立在场的资料基础上的数学方法,它可以浓缩形势场的特征,较好地反映出天气形势场和要素场特征。因此采用车贝雪夫多项式对形势场资料进行展开,便能减少因子数目和突出天气学意义,有利于建立较好的预报方程。具体方法为:

设某一气象场 $F(x, y)$, 若有 $m \times n$ 个等距网格点的观测值,则可用车贝雪夫多项式将其展开,表示为:

$$F(x, y) = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} A_{i,j} \zeta_i(x) \zeta_j(y)$$

其系数是:

$$A_{i,j} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n F(x, y) \zeta_i(x) \zeta_j(y)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \zeta_i^2(x) \zeta_j^2(y)}$$

可以表示气象场的特征。在实际应用中常取前八项,各项均有明确的天气学意义。

在上式中,当 $i=j=0$ 时,则有:

$$A_{00} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n F(x, y)$$

A_{00} 实际上是气象场 $F(x, y)$ 的平均值,表示某气象场的平均状况。对于高度场,即表示场内的平均高度,正值越大,表明高压越强;反之负值则表示低压的强度。而对于温度场来说, A_{00} 是场区的平均温度,正负值代表冷暖空气的强度。

A_{01} 表示场区内南北向梯度。对于高度场,其反映东西纬向输送的大小。对于温度场可看作东西向锋区强度指数。

A_{10} 表示场区内东西向梯度。对于高度场是反映南北风经向输送的大小,被称为经向度指数。

A_{02} 则表示气象场区中经向切变的强弱。 $A_{02} > 0$ 表示高度场南北高,中间低,场区气旋性切变占优势; $A_{02} < 0$ 表示南北低中间高,反气旋占优势。

A_{20} 表示纬向切变的强弱。 $A_{20} > 0$ 表示高度场东西高,中间低,为低槽形气压场; $A_{20} < 0$ 表示东西低,中间高,为高脊形气压场。故 A_{20} 又被称为槽脊强度指数;在温度场中称其为温度槽脊强度指数。

A_{11} 为鞍形场指数, A_{12} 和 A_{21} 分别为经向和纬向双鞍型场指数,均表示鞍形场分布的特征。

在冬季由于影响天气系统主要源于上游和北方地区,故将 $35 \sim 65^\circ \text{N}$ 、 $40 \sim 130^\circ \text{E}$ 范围内的 500hPa、850hPa 和海平面 3 层要素的候平均格点资料进行车贝雪夫多项式展开,取展开式前 8 个系数作为预报因子,3 层共有 24 个因子。对于站点预报,单点数据与温度之间也有直接的天气学关系。因此将站点处的格点数据直接作为预报因子,加上车贝雪夫系数,共选取 27 个因子,比直接使用所取范围内 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 经纬度网格的格点数据 (1665 个) 因子数则大为减少。

1.2 预报方程的建立

用逐步回归方法建立预报方程时,对每一旬的前一候平均作车贝雪夫多项式展开并取得预报因子,并以该旬的旬平均温度为预报量。以磴口站预报为例来说明,用 1985—2004 年 12 月各旬平均温度 (共 60 个样本),运用逐步回归方法建立了旬平均温度预报方程:

$$Y = -342.54 - 21.63x_7 - 3.475x_{10} + 0.33x_{26} + 1.07x_{27}$$

方程中 x_7 表示 500hPa 槽脊强度指数, x_{10} 是地面气压场的南北梯度, x_{26} 是地面气压格点值, x_{27} 为 850hPa 温度格点值。由此可见, 被选取的因子都具有非常明确的天气学意义, 并且与温度密切相关。方程 F 值为 63.2, 按显著水平 $\alpha=0.05$, 因子数 $f_1=4$, 自由度 $f_2=32$, 得到临界值 $F_\alpha=2.67$, $F>F_\alpha$, 回归效果显著, 复相关系数 $R=0.91$, 表明相关性较好。在实时业务预报中, 可用 T213、EC、JAPAN 等数值预报模式未来 5 天的形势预报格点资料, 经车贝雪夫多项式展开得到预报因子, 通过上述预报方程做出未来 10 天的平均温度预报, 以滚动预报方式进行。当预报出平均温度 $t < -5^\circ\text{C}$ 时, 可预报未来 10 天内该河段会出现封冻。

利用上述预报方程, 对 2005 年 12 月各旬黄河上游内蒙古磴口站的旬平均温度进行了业务试报, 其结果如表 1 所示。月内 3 旬平均绝对误差为 1.26°C , 预报效果较为理想。该年 12 月上中旬实际温度较低, 而预报结果也较低, 预报封河日趋势偏早, 实际封河比常年平均偏早 4 天, 与预报趋势较吻合。

表 1 2005 年 12 月内蒙古磴口站旬平均温度试报结果

时间	预报值 / $^\circ\text{C}$	实际值 / $^\circ\text{C}$	预报误差 / $^\circ\text{C}$
2005 年 12 月上旬	-13.13	-10.3	-2.83
2005 年 12 月中旬	-11.31	-11.0	-0.31
2005 年 12 月下旬	-7.44	-6.8	-0.64

2 开河日预报

2.1 预报方程的建立

春天来临, 当气温升至 0°C 以上, 冰盖

将发生消融, 是暖空气活动起主要作用。河道中春天较高水温的径流将通过水流和冰盖间的紊动热交换加速冰盖融化过程。开河则是冰盖融化过程的最终结果, 冰盖融化的时间则受冰盖厚度、融冰所需热量、融冰的温度等因素的影响, 不可能在某一固定的温度之下完成。因此凌汛期开河不存在一个确定的临界气温指标。开河日的早晚与当年冬季到春季的气温直接相关。黄河宁蒙河段开河期通常在 3 月至 4 月上旬。再以磴口河段为例, 1961—2000 年 40 年中平均开河日是 3 月 15 日, 磴口河段 40 年开河都出现在 3 月, 相对跨度比封河时段明显变小。

春季由于西风带环流经向度变小, 槽脊移动性明显。因此天气多变, 气温变化快且变幅大, 故气温预报难度较大。开河迟早与当年冬季气温关系密切, 如果冬季冷空气活动频繁, 强度大, 致使封冻时间长, 冰层厚度厚, 则融冰所需的热量就越多, 满足融冰所需热量后才能开河, 开河日相对较晚, 而与春季瞬间气温关系较小。经对 1961—2000 年逐年冬季积温与开河日分析发现, 每年开河日早晚与该年隆冬 1 月、2 月累积负积温有明显的负相关性 (图 1)。图中开河距平天数为磴口站逐年开河日期与 40 年平均开河日期 (3 月 15 日) 之差, 负积温为当年隆冬 1 月、2 月各旬平均温度之和。两者相关系数 $R=-0.7223$ 。利用一元线性回归方法建立预报方程为

$$y = -0.3553x - 17.908$$

2.2 试报结果

利用上述预报方程对 2001—2005 年共 5 年黄河内蒙古磴口河段进行了业务试报, 其结果在表 2 中。试报的开河日期与实际开河日期相比, 5 年的平均绝对误差为 3.6 天。从开河早晚趋势预报来看, 5 年中有 4 年预测正确, 预报准确率达 80%。表明该

预报方程具有较好的预报能力。由于选取的因子是 1—2 月的负积温，那么在 2 月底就可以做出春季的开河趋势预报，预报时效较长，能及时为防汛部门进行防凌部署及决策提供参考依据来满足防凌工作的需要。因近

些年采用投弹炸冰疏通河道、清除凌害，一些年份开河时间比自然开河提前 3—4 天。近 5 年的平均开河日期为 3 月 8 日，比 40 年的平均早 7 天。若排除这个因素，则上述预报方程的预报效果更为理想。

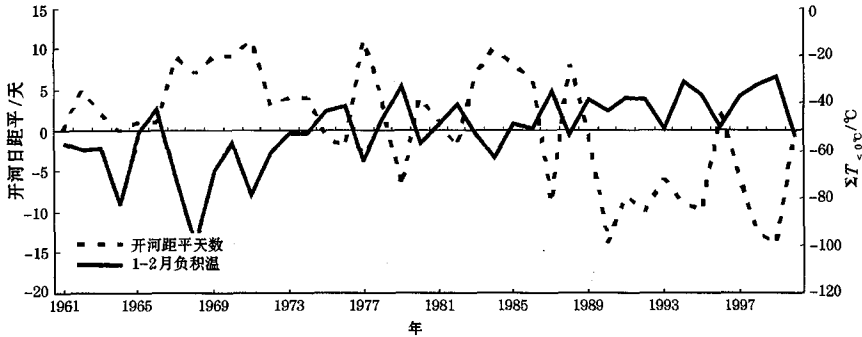


图 1 内蒙古磴口站 1961—2000 年逐年开河日距平天数和 1—2 月的负积温

表 2 2001—2005 年内蒙古磴口河段开河日试报结果

年份	开河时间	开河距平/天	1,2月 $\sum T_{<0} / ^\circ\text{C}$	预测开河距平/天	预报误差/天
2001	3月10日	-5	-54.1	1.3	6.3
2002	2月24日	-19	-14.8	-13.0	6
2003	3月7日	-8	-41.5	-3.2	4.8
2004	3月8日	-7	-32.6	-6.3	0.7
2005	3月18日	3	-62.5	3.19	0.2

3 结 语

(1) 黄河上游宁蒙河段的凌汛灾害是特定的地理位置、河道形态和水文气象条件所造成的，发生在每年冬季流凌封河期和春季融冰开河期间，最主要的影响因素是气温的变化。

(2) 宁蒙河段在旬平均气温 $t < -5^\circ\text{C}$ 时封冻；开河不存在确定的临界气温指标，与冬春季的气温直接相关。

(3) 用中期数值预报模式未来 5 天的形势预报格点资料，经车贝雪夫多项式展开得到预报因子，用逐步回归方程做出未来 10 天的平均温度预报。当 10 天的平均温度预

报 $t < -5^\circ\text{C}$ 时即封河。每年开河日与 1—2 月累积负积温有明显的负相关，利用一元线性回归建立开河日预报方程。

(4) 经对 2005 年 12 月旬平均气温试报，平均绝对误差为 1.26°C ，预报效果较为理想，预报的封河日趋势与实际封河日较吻合；试报 5 年开河日的平均绝对误差为 3.6 天，趋势预报准确率达 80%，具有较好的预报能力。

参考文献

- 王文东, 张芳华, 康志明等. 黄河宁蒙河段凌汛特征及成因分析 [J]. 气象, 2006, 32 (3): 32-38.
- 宫德吉, 白美兰, 王秋晨. 黄河凌汛及其研究 [J]. 气象, 2001, 27 (5): 28.
- 可素娟, 王玲, 杨向辉. 1997—1998 年度黄河内蒙古河段凌汛特点及成因分析 [J]. 人民黄河, 1998, 20 (12): 24-26.
- 茅泽育, 吴剑疆, 余云童. 河冰生消演变及其运动规律的研究进展 [J]. 水力发电学报, 2002, (1): 153-159.
- 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): 18-26.
- 李海英, 高建国. 内蒙古黄河凌汛期开河预报方法 [J]. 内蒙古气象, 1998, (4): 13-15.