

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0041

QUAN Dong, LI Chao, LU Xinchuan, et al. A study of low discharge process and impacting factors of Toudaoguai Reach in Inner Mongolia of the Yellow River during ice flood period[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2):620-628. [全栋, 李超, 路新川, 等. 黄河干流头道拐河段凌汛期小流量过程变化及其影响因素研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2):620-628.]

# 黄河干流头道拐河段凌汛期小流量过程变化及其影响因素研究

全 栋<sup>1</sup>, 李 超<sup>1</sup>, 路新川<sup>2</sup>, 史小红<sup>1</sup>, 杨朝霞<sup>1</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 010018; 2. 黄河万家寨水利枢纽有限公司, 山西 太原 030002)

**摘 要:** 黄河干流内蒙古段河道冬季流凌封河期, 河道水量除一部分转化为冰量外, 很大一部分转化为槽蓄水量而贮存在河道中, 导致下游头道拐河段出现小流量过程, 上游河道流量转化为槽蓄水量和贮存的冰量越大, 小流量持续时间越长, 开河期发生凌汛洪水风险越高。通过对1998-2016年头道拐站凌汛期流量变化过程分析, 重新界定了小流量上限阈值为 $330 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 并且以此值为标准进行小流量过程研究, 分别采用R/S极差分析法、Fourier变换分析法对近年来小流量过程变化特征进行分析; 结合非线性概率Logit模型和Probit模型对小流量过程的影响因素进行讨论。结果表明: 小流量持续天数变化呈现缩短趋势; 同时, 小流量过程与上游相对来水之间变化关系显著且过程同步, 而滞后于河道槽蓄水量变化过程; 通过Logit模型和Probit模型分析各影响因素变化时相应小流量持续时间变化的响应概率大小, 明确河道冰流量是小流量过程第一影响因素, 气温条件是小流量过程的决定因素, 首封位置和相对来水量是小流量过程重要影响因素。

**关键词:** 黄河头道拐河段; 凌汛期; 小流量变化过程; 影响因素

**中图分类号:** P332.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)02-0620-09

## 0 引言

黄河干流内蒙古段地处黄河流域最北端, 特殊的地理位置、河势条件和气候特征使得该河段凌汛问题成为黄河研究的关键问题之一。河道封冻过程是首先出现一处或多处卡冰, 上游来冰从卡冰位置处向上游发展而形成稳定冰层。初始封河位置称为首封位置, 首封河段内冰层增大了过水断面湿周及糙率, 且部分上游来冰及冰花在冰层下堆积, 减小了河道过流断面面积, 导致封冻断面过流能力减弱, 相同流量条件下水位明显升高, 来流受冰层影响而将部分水量贮存在河道内形成槽蓄水, 此外, 黄河干流内蒙古段冬季干旱无降水径流补给, 水量补给主要来源于地下水, 河道水量相

对稳定, 因而导致封河位置以下河段流量减小。河道在小流量条件下封河导致封河水位较低, 开河期阻碍冰凌输移, 极易形成开河期冰坝, 且开河期大量槽蓄水量下泄, 增加了黄河内蒙古段“武开河”的风险。

黄河干流内蒙古段是黄河流域内冰凌灾害较为严重的地区, 1993年巴彦高勒三盛公水利枢纽下游4 km处形成冰塞, 水位迅速上涨至1 054.4 m, 导致堤防决口, 造成经济损失 $4 \times 10^6$ 元; 2001年清水河县水泥厂河段凌汛灾害导致水泥厂停产18天, 造成经济损失 $2.53 \times 10^5$ 元; 2015年托克托县曹家湾河段开河期冰凌壅水, 沿黄公路淹没, 水位计被冲断。有鉴于此, 国内外很多学者开展黄河内蒙古段水流及凌情特征研究, 康玲玲等<sup>[1]</sup>根据1954-

收稿日期: 2018-06-14; 修订日期: 2019-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目“水力-冰情-河势耦合作用下弯道卡冰机理及数学模型研究”(51669024)资助

作者简介: 全栋(1992-), 男, 内蒙古赤峰人, 讲师, 2017年在内蒙古农业大学获硕士学位, 从事河冰水力学和泥沙运动力学研究。  
E-mail: 13644769625@163.com

通信作者: 李超, 副教授, 从事河冰水力学及泥沙运动力学研究。E-mail: nmndlc@imau.edu.cn.

1998年冬季各月气温,研究气温变化特点及宁蒙河段凌情关系并建立了气温和凌情的关系式。赵水霞等<sup>[2]</sup>通过对冬季野外冰情监测,结合遥感影像解译分析研究黄河头道拐河段什四份子弯道处河冰生消演变及冰塞的形成过程,指出弯道凹岸处冲积岸冰及凸岸静态岸冰的生长,极大地束窄了河面宽度,降低了冰封期水流的输冰能力。董雪娜等<sup>[3]</sup>研究指出,在1950–2005年的55个凌汛年度中,黄河下游河道水量减少,冬季气温持续升高,引起下游河段凌情新变化,呈现封、开河日期提前,冰量及槽蓄水量减少且不封冻年频率增加。金双彦等<sup>[4]</sup>采用1986–2009年间黄河头道拐站凌汛期日均流量资料进行水文频率分析,确定了头道拐小流量上限阈值为 $350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;刘吉峰等<sup>[5]</sup>研究发现小流量过程是在气候变化、河道状况和水库调度等多种因素影响下自上游向下游传播叠加累计的结果。

本文基于1998–2016年头道拐水文站冰期资料,对凌汛期河道流量过程进行分级研究,重新界定小流量上限阈值;并采用R/S极差分析法、Fourier变换分析法研究小流量过程变化特征;同时采用非线性概率Logit模型和Probit模型,将小流量持续时间作为离散变量,结合近年来观测资料研究其影响因素。本研究有助于进一步明确黄河内蒙古段凌情特征及头道拐站小流量过程变化状态,对增强

黄河内蒙古段防凌能力,减少河道冰凌灾害,指导防凌度汛工作具有一定科学意义。

## 1 区域概况及研究方法

### 1.1 研究区概况

黄河干流内蒙古段地处黄河流域最北端(图1),从宁夏的石嘴山进入内蒙古境内,于准格尔旗马栅乡榆树湾出境,全长840 km,占黄河干流总长度的15.74%,落差240 m,占黄河总落差的5%,河道形状呈“几”字型大弯状。河段内有石嘴山、巴彦高勒、三湖河口、昭君坟(包头)和头道拐5个水文站,其中石嘴山水文站为黄河干流在内蒙古的入境站,头道拐水文站为出境站。头道拐水文站位于黄河干流内蒙古段下游呼和浩特市托克托县境内,黄河干流由此进入中游段。头道拐断面以上河道为平原型河道,河面宽、水深浅、流速缓;头道拐断面以下进入峡谷型河道,河面窄、水深大、流速急。内蒙古河段气候类型属中温带大陆性干旱半干旱季风气候,年平均气温 $4 \sim 8^\circ\text{C}$ ,降水量 $150 \sim 450 \text{ mm}$ ,降水量年际变化大且年内分配不均,年蒸发量 $1\,200 \sim 2\,000 \text{ mm}$ 。凌汛期头道拐下游河段冰厚大、最大冰厚可达1 m以上,整个河道堆冰量大,加之河道弯道多、曲率大,极易发生卡冰结坝现象,造成凌汛灾害<sup>[6]</sup>。

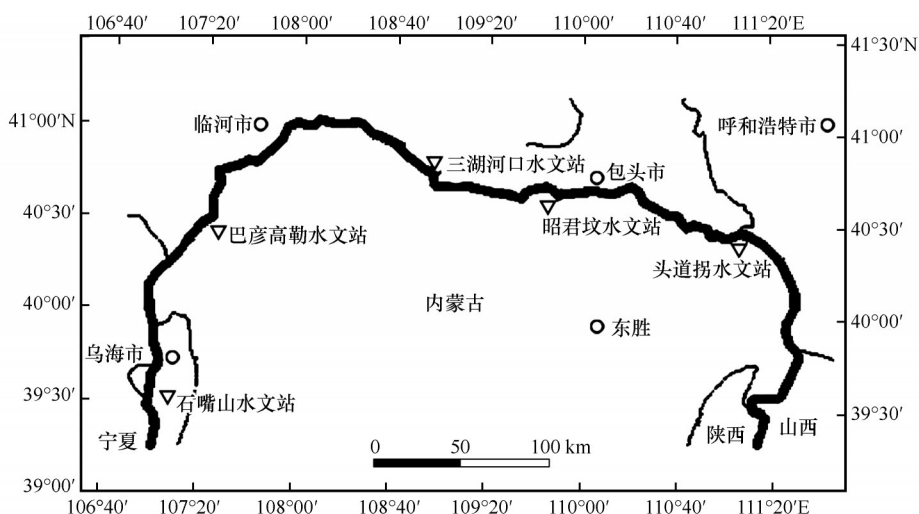


图1 黄河干流内蒙古河段区域位置

Fig. 1 Map showing the Inner Mongolia reach of the Yellow River

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 小流量过程特征分析

头道拐河道小流量过程特征主要表现在小流量持续时间的长短变化。采用R/S极差分析法,通

过Hurst指数 $H(0 < H < 1)$ 对小流量持续时间、凌汛期内河道平均流量与平均气温的时间序列变化趋势进行判断分析,当 $H=0.5$ 时,说明时间序列是完全独立的随机过程;当 $H < 0.5$ 时,表明未来变化状

况与过去变化相反,即反持续性;当 $H>0.5$ 时,表明未来变化状况与过去变化一致,即有持续性<sup>[7]</sup>。对于一个时间序列 $k(t)$ , $t=1,2,\dots$ ,进行极差分析,计算各参数方法如式(1)~(4)所示:

均值:

$$k_n = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n k(t) \quad (1)$$

累积离差:

$$X(t, n) = \sum_{t=1}^n [k(t) - k(n)] \quad (2)$$

极差:

$$R_n = \max X(t, n) - \min X(t, n) \quad (3)$$

标准差:

$$S(n) = \left[ \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (k(t) - k_n)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中: $n$ 为时间序列样本容量; $t$ 为时序。

采用Fourier变换研究凌汛期内河道槽蓄水量、相对来水量和小流量持续时间的周期性特征。Fourier变换是数字信号处理领域的一种很重要的算法,根据时序信号的频谱图求出时间序列的变化周期,研究时间序列变化过程中的周期规律<sup>[8]</sup>。假定将时间序列 $x_t$ 展开为Fourier级数,可表示为式(5):

$$x_t = \sum_{i=1}^k (a_i \cos 2\pi f_i t + b_i \sin 2\pi f_i t) \quad (5)$$

式中: $f_i$ 为频率; $t$ 为时间序号; $k$ 为周期分量的个数即主周期(基波)及其谐波的个数; $\varepsilon_t$ 为残差(白噪声序列)。当频率 $f_i$ 给定时,上式可被视为多元线性回归模型。借助多元回归分析理论可以证明,当 $i \neq N/2$ 时,待定系数 $a_i$ 、 $b_i$ 的最小二乘估计为式(6)和式(7):

$$\hat{a}_i = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N x_t \cos 2\pi f_i t \quad (6)$$

$$\hat{b}_i = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N x_t \sin 2\pi f_i t \quad (7)$$

式中: $N$ 为观测个数,则时间序列的周期图可以定义为式(8):

$$I(f_i) = \frac{N}{2} (a_i^2 + b_i^2) \quad (8)$$

式中: $I(f_i)$ 为频率 $f_i$ 处的强度( $i=0,1,2,\dots,N-1$ )。

则 $\frac{I(f_i)}{2}$ 即为谱密度。以 $f_i$ 为横轴,以 $I(f_i)$ 为纵轴,绘制时间序列的周期图,可以在最大值处找到时间序列的周期。

### 1.2.2 小流量影响因素分析

小流量变化过程影响因素采用非线性概率

Logit和Probit模型进行研究,将小流量持续时间长短作为离散变量,其余各影响因素作为自变量建立模型,通过模型边际效应分析,计算各影响因素变化时相应因变量的响应概率,进而分析各影响因素对小流量过程影响程度<sup>[9-10]</sup>。Logit模型和Probit模型是二元离散选择模型,因变量只有两个虚拟数值0和1,代表因变量的两种状态,模型估计采用最大似然法估计,其模型分布如式(9)和式(10):

Logit模型:

$$\ln \left( \frac{P_i}{1-P_i} \right) = X_i^* \beta \quad (9)$$

Probit模型:

$$P_i = \int_{-\infty}^{X_i^* \beta} \frac{e^{-\frac{x^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}} dx \quad (10)$$

式中: $P_i$ 为因变量取值为1时的概率; $X_i^*$ 为自变量; $\beta$ 为自变量的回归系数。

## 2 小流量过程概述

### 2.1 河道小流量阈值界定

黄河水利委员会水文局信息中心依据凌汛预报经验,统计黄河内蒙古段凌汛期多年封河流量约为 $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,而封冻河道冰下最大过流能力一般能恢复到封河前流量的70%~75%,因此通常以封河流量的70%作为小流量的上限阈值,即小流量阈值为 $350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于凌汛期河道水力条件、河势条件和气候特征的复杂性和变动性,对河道内流量变化过程产生重要影响,本文对1998-2016年头道拐水文站在凌汛期内流量过程进行研究,划分河道流量大小等级,以河道凌汛期流量大小概率为指标,进而确定小流量阈值。头道拐水文站凌汛期多年平均流量为 $481.82 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,变差系数为0.565,以凌汛期内河道平均流量为标准,将河道流量划分为四个等级<sup>[11]</sup>:

大流量级: $I > I_0 + \sigma$ ; 偏大级: $I_0 < I \leq I_0 + \sigma$ ;

偏小级: $I_0 - \sigma < I \leq I_0$ ; 小流量级: $I \leq I_0 - \sigma$ 。

其中, $I_0$ 为流量均值, $I$ 为流量, $\sigma$ 为流量系列的标准差。

按照分级原则计算1998-2016年各年凌汛期内流量序列中小流量级概率如表1所示。由表1可知,按照流量划分等级计算出处于小流量级的多年平均概率为21.11%,小流量级持续天数多年平均值为19 d。参考河道封冻后流量恢复到封河前流量的70%,现依据凌汛期河道流量划分等级,以小流

量级概率为 30% 作为界定标准，统计 1998 – 2016 年间小流量级概率 30% 时对应河道多年平均流量上限值为  $329.42 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，因此，确定黄河内蒙古段凌汛期小流量上限阈值为  $330 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，凌汛期内流量低于  $330 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  时即表明河道处于小流量过程。

表 1 流量过程频率统计  
Table. 1 Discharge process frequency statistics

年度	流量均值/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	小流量级上限/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	小流量级概率/%	35% 概率流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	30% 概率流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
1998 – 1999	525.43	207.83	14.44	330.16	307.12
1999 – 2000	522.16	130.50	20.00	332.37	268.03
2000 – 2001	454.45	141.57	12.22	341.73	324.90
2001 – 2002	459.12	185.05	30.00	388.39	321.01
2002 – 2003	357.40	117.76	10.00	222.74	192.16
2003 – 2004	486.83	146.24	22.22	379.71	332.87
2004 – 2005	477.04	177.81	23.33	368.22	297.60
2005 – 2006	543.80	256.03	22.22	425.69	368.01
2006 – 2007	475.98	215.39	14.44	329.00	296.72
2007 – 2008	531.49	189.98	13.33	311.26	285.01
2008 – 2009	481.32	201.36	16.67	310.03	267.13
2009 – 2010	471.52	214.13	20.00	364.61	317.49
2010 – 2011	478.14	225.17	21.11	383.14	357.91
2011 – 2012	528.42	298.77	24.44	429.51	399.09
2012 – 2013	615.60	373.34	15.56	514.21	488.16
2013 – 2014	471.52	307.75	24.44	352.22	328.77
2014 – 2015	492.51	248.49	26.67	476.38	398.39
2015 – 2016	525.43	370.00	41.11	329.91	334.73
2016 – 2017	522.16	375.27	25.56	331.58	373.90
各年均值	481.82	230.65	21.11	364.26	329.42

2.2 小流量变化过程特征分析

2.2.1 小流量天数变化趋势

对 1998 – 2015 年凌汛期内头道拐水文站的平均气温、平均流量和小流量持续天数的时间序列变化过程进行分析，结果如图 2(a) 所示，河道平均流量与小流量持续天数变化趋势呈现相反状态，且小流量持续天数在 2009 年以后均小于 25 d，较 1999

年 44 d 明显缩短。对小流量天数、平均流量和平均气温的时间序列过程进行极差分析，如图 2(b) 所示，小流量天数、平均流量和平均气温的 Hurst 指数值分别为 0.42、0.63 和 0.23，其中，平均流量 Hurst 指数值大于 0.5，表明河道平均流量在未来变化趋势与过去一致；而小流量天数和平均气温 Hurst 指数值均小于 0.5，表明小流量天数和平均气

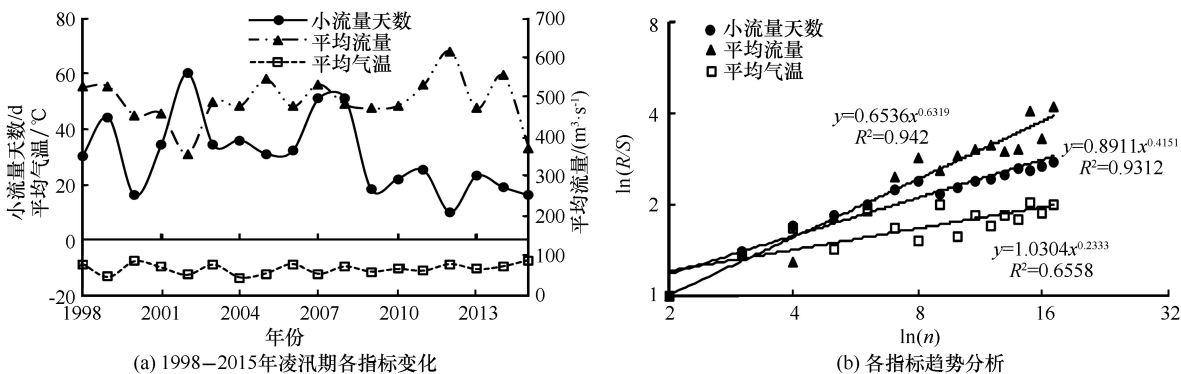


图 2 小流量过程变化趋势  
Fig. 2 Annual variations of the low discharge days, mean temperature, mean discharge during 1998 – 2015 (a) and their tendencies (b)



温在未来变化趋势与过去相反,结合多年小流量过程观测数据可知,头道拐站凌汛期平均气温呈升高趋势,相应小流量持续天数呈现缩短趋势。

### 2.2.2 小流量过程与相对来水过程和槽蓄水量过程关系

根据上游临近站三湖河口水文站的流量过程,计算凌汛期内头道拐站流量相对上游三湖河口站的来水量,并对1998—2015年河道凌汛期内槽蓄水量、相对来水量和小流量天数的变化过程进行研究,结果如图3(a)所示。从图中可以看出小流量天数与凌汛期河道相对来水量之间呈显著的相反变化关系,河道相对来水量越大,小流量持续天数越短,如2002年、2007年和2012年小流量天数分别为60 d、51 d和10 d,而凌汛期内头道拐站相对来水量分别为0.92、0.98和1.67,随着相对来水量的增大,上游河道冰封期转化为槽蓄水量减少,头道

拐站小流量过程持续天数因此缩短。河道槽蓄水量受小流量天数影响波动较小,其变化特征并不明显,如1999年、2002年、2007年和2012年小流量天数为44 d、60 d、51 d和10 d,而河道槽蓄水量分别为 $19.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $11.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $15.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $15.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。对河道槽蓄水量、相对来水量和小流量天数的时间序列过程进行周期分析,结果如图3(b)所示,槽蓄水量、相对来水量和小流量天数分别在频率0.25、0.083和0.083处功率谱密度出现最大值,对应变化周期为4年、12.05年和12.05年,说明小流量天数变化过程与河道相对来水量变化过程一致,而与槽蓄水量的变化过程非同步,变化周期相差较大。因此,凌汛期内通过适当增加上游海勃湾水利枢纽下泄流量,人为干预黄河干流内蒙古段封河位置及封河过程,进而可有效减少头道拐河段小流量过程持续时间。

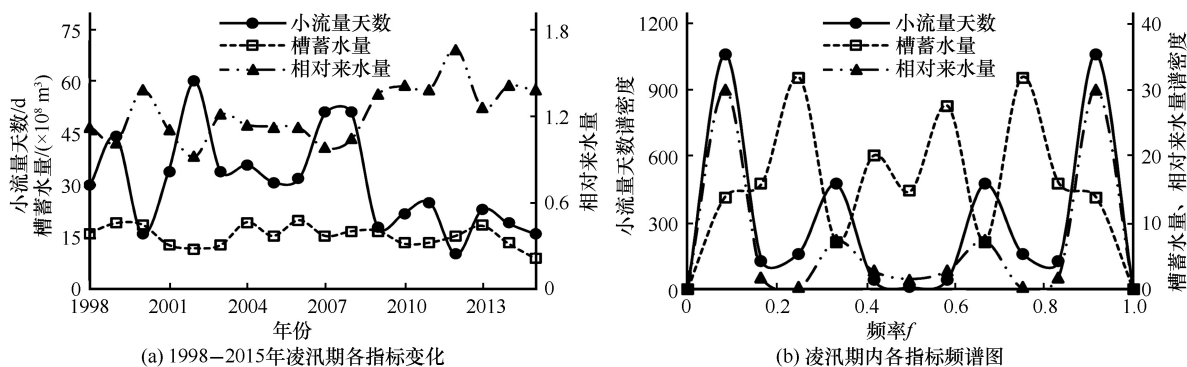


图3 小流量变化过程与周期

Fig. 3 Annual variations of the low discharge days, water storage, relative inflow during 1998 – 2015 (a) and their spectral densities (b)

## 3 小流量过程变化影响因素分析与讨论

### 3.1 小流量过程变化影响因素分析

影响凌汛期头道拐河段小流量过程持续时间的主要因素有水力条件、热力因素与河势条件,其中水力条件主要表现在封冻过程中河道流量及槽蓄水量的变化,热力因素主要表现在凌汛期内气温变化、首封时间及封冻后河道冰厚情况,河势条件主要表现在河道首封位置,而河道凌汛期内冰流量大小则是热力因素与水力条件共同作用的结果。现将小流量持续时间长短定义为离散变量,计算多年小流量持续天数均值为30.6 d,并将此值作为标准,大于此值表示小流量过程持续时间长,取值为“1”,小于此值表示小流量过程持续时间短,取值为“0”,其余对小流量过程的影响因素作为解释变

量定义如表2所示。

现结合1998—2015年头道拐站凌汛期内观测数据,选取小流量过程主要影响因素指标,通过Logit模型和Probit模型分析小流量持续时间长短的主要影响因素,模型结果如式(11)和式(12)所示。对Logit模型和Probit模型进行检验,其中Logit模型与Probit模型的拟合优度分别为0.463和0.463,拟合结果较好,LR statistic值分别为11.470和11.471,表明模型总体显著。由于两模型没有本质区别,一般情况下可以换用,但两者采用分布函数不同,为了分析结果更加准确,出于相互佐证的目的分别进行Logit模型和Probit模型回归分析,从建模结果可以看出两种模型总体效果相差不大,仅各变量间系数大小有所不同,建模效果比较理想。

表2 变量说明

Table 2 Description of the variables

变量	含义	取值说明
$Y$	小流量持续时间	离散变量：大于多年均值表示持续时间长，取值为1，反之为0
$X_1$	槽蓄水量	连续变量：取内蒙古河段多年连续观测槽蓄水量值
$X_2$	平均气温	连续变量：取头道拐站凌汛期内观测气温值
$X_3$	最大冰厚	连续变量：取头道拐站封冻期观测断面最大冰厚值
$X_4$	冰流量	连续变量：取头道拐站封冻期观测断面冰流量值
$X_5$	平均流量	连续变量：取头道拐站凌汛期内河道流量值
$X_6$	距站里程	连续变量：首封位置位于头道拐站上游为+，反之下游为-
$X_7$	首封时间	离散变量：根据多年首封时间排序分成两部分，首封时间早取值0，反之为1

Logit模型：

$$\ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right)=X_i^*\beta$$
$$X_i^*\beta=-15.868-0.036X_1-0.212X_2+0.09X_3+1.134X_4-0.008X_5+0.03X_6-0.374X_7 \quad (11)$$

Probit模型：

$$P_i=\int_{-\infty}^{X_i^*\beta\left(-\frac{x^2}{2}\right)}\frac{e^{-\frac{x^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}}dx$$
$$X_i^*\beta=-9.162-0.016X_1-0.108X_2+0.048X_3+0.638X_4-0.004X_5+0.017X_6-0.226X_7 \quad (12)$$

式中： $P_i$ 表示小流量持续时间表现为长的状态时概率。

对Logit模型和Probit模型进行边际效应分析，根据建模方程对影响因素分别求偏导数，计算相应自变量变化时因变量变化的响应概率，结果如图4所示。由图4可知，Logit模型和Probit模型同一影响因素求解的响应概率大小不同，Logit模型影响因素概率大小排序为 $X_4>X_7>X_2>X_3>X_1>X_6>X_5$ ，Probit模型影响因素概率大小排序为 $X_4>X_7>X_2>X_3>X_6>X_1>X_5$ ，两模型概率大小排序略有不同，但综合整体情形分析可知，水力条件与热力因素共同作用的冰流量大小对小流量持续时间长短影响最大，其次是表征热力因素的首封时间、平均气温和最大冰厚因素，最后是表征河势条件和水力条件的距站里程、槽蓄水量和平均流量因素。

3.2 小流量过程变化影响因素讨论

3.2.1 河道冰流量

河道凌汛期冰流量大小是水力条件和热力因素共同作用的结果，河道封冻过程中，气温越低，河道内产冰量相对越大，河道内冰流量的增加导致河道水流能量损失增大、过流能力越弱，河道水流阻力越大，使得上游来水更多的转化为槽蓄水量，河道在封冻过程中小流量持续天数也相应变长，随着封冻不断发展，敞露水面面积的减小和冰厚增大导致

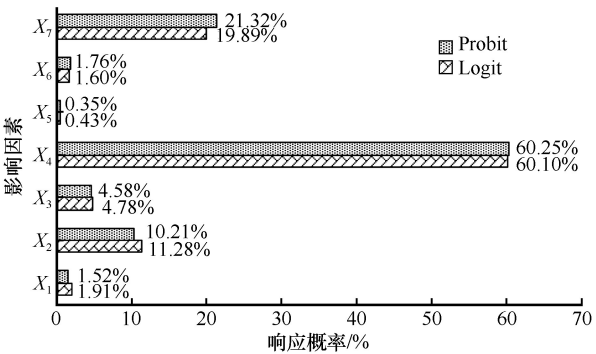


图4 影响因素响应概率

Fig. 4 Response probability of the influence factor

产冰量逐渐减小，加之水流对冰层底部冰花的冲刷，冰下流量逐渐增加，小流量过程才结束<sup>[12-13]</sup>。分析小流量天数与冰流量相关关系如图5所示，可知小流量持续天数与冰流量大小存在较高的相关性，冰流量越大，相应小流量过程持续天数越长，因此，河道冰流量是小流量过程变化的第一影响因素。

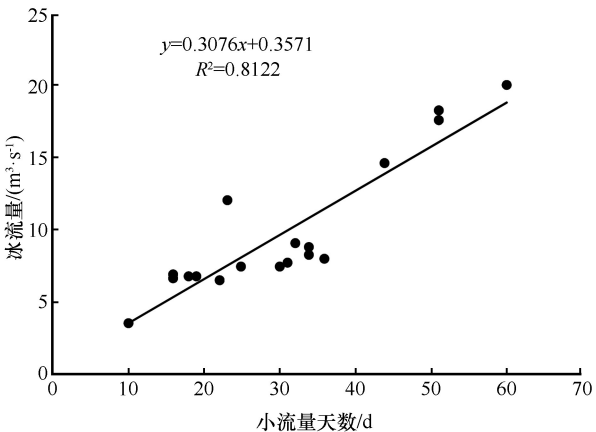


图5 冰流量与小流量天数相关关系

Fig. 5 Relationship between ice flow and low discharge days

3.2.2 热力因素

热力因素是凌汛形成和凌情变化的决定性因素，而气温通常作为表征热状况及其变化的基本要

素<sup>[14-16]</sup>。气温变化对河道流量产生的影响主要通过河道冰厚来表现,封河过程中气温的高低影响着封冻期冰厚的大小。气温的变化对河道封河时间、封河后河道冰厚增长起着重要影响,进而对河道内流量变化产生作用<sup>[17]</sup>。现选取2011-2016年巴彦高勒站、三湖河口站和头道拐站气温数据,分别计算头道拐站小流量持续期内各站平均气温,其变化结果如图6所示。由图6可知:2013年小流量持续时间较长为23 d,小流量时期内巴彦高勒站平均气温-8.23℃,三湖河口站-9℃,头道拐站-10.53℃,平均气温自上游向下游逐渐降低,且在头道拐气温最低;2016年小流量持续时间最短为13 d,小流量时期内巴彦高勒站平均气温-8.92℃,三湖河口站-6.23℃,头道拐站-6.48℃,下游头道拐站河段平均气温高于上游。头道拐站平均气温呈递增趋势,气温升高,使得头道拐封河时间偏晚,河道受冰层影响时间缩短,小流量持续时间也相应变短,因此,气温是小流量过程变化的决定因素。

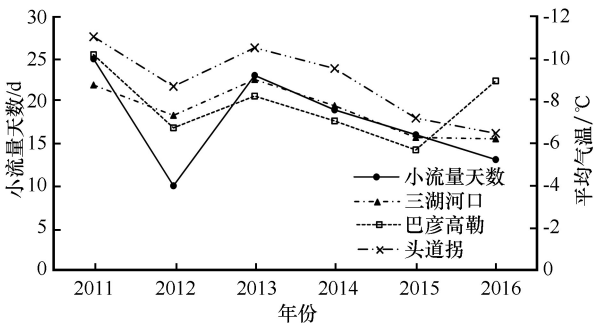


图6 小流量持续天数与平均气温变化  
Fig. 6 Annual variations of the low discharge duration and average temperatures at the three stations

3.2.3 河势及水力条件

首封位置与河道内流量大小、河道形态有关,也与气温地区分布均匀性有关。首封位置是影响头道拐断面小流量过程持续时间长短的主要因素。根据2012-2017年度凌汛期野外观测数据整理,统计河道封冻情况,结果如表3所示。由表3可知,小流量持续时间与河道首封位置有明显关系。首封位置对头道拐断面小流量过程的影响,主要反映在首封位置距站里程上。首封位置在头道拐上游且靠近头道拐水文站断面,则小流量持续时间较长;相反首封位置在头道拐水文站下游或在上游但离头道拐水文站断面较远,则小流量持续时间较短。河道首封位置在头道拐断面下游,则冰层向上游发展过程中,河道过流能力逐渐减弱,在头道拐断面未生成冰层之前,其流量主要受上游来水量影响;河道首封位置在头道拐断面附近的上游(如2013年度)位置,则初始冰层形成后,冰层糙率增大,河道过流能力迅速减弱,头道拐站很快进入流量减小期,直到形成稳定冰层以后,流量过程才趋于稳定并回升,因此小流量过程持续时间也较长;河道首封位置在上游离头道拐较远,例如包头境内或三湖河口(如2012年度和2016年度),则小流量持续时间相对较短。

对比2014年度与2015年度,2015年度比2014年度首封位置更靠近头道拐断面,但小流量过程持续时间却较短,主要因为2015年度小流量过程受气温因素影响显著,2015年度凌汛期内头道拐站气温较高,封河时间偏晚,河道受冰层作用时间较短,小流量过程也相应缩短。

表3 2012-2017年度封冻情况  
Table 3 Freeze-up situation during 2012-2017

年度	首封日期/mm-dd	首封位置	距头道拐站里程/km	小流量天数/d
2012-2013年	12-03	包头市包神铁路	146.5	10
2013-2014年	12-12	头道拐水文站上4 km	4.0	23
2014-2015年	12-03	包头九原区大城西河段	164.7	19
2015-2016年	12-15	什四份子河段	4.0	16
2016-2017年	11-23	三湖河口水文站下4 km	265.8	13

头道拐站流量变化是上游河道流量向下游河道传递的结果,因此上游来水量对下游河道流量大小起着至关重要的作用<sup>[18-21]</sup>。本文选取巴彦高勒站和三湖河口站,采用相对来水量衡量头道拐站流量变化,现根据2011-2017年凌汛资料,分别计算头道拐站小流量持续时间内巴彦高勒站和三湖河口

站与头道拐站流量比值,再计算历年该比值的均值,计算结果如图7所示。由图7可知,近几年小流量持续天数呈递减趋势,巴彦高勒站相对来水量比值由2012年2.96减小为2016年1.45,三湖河口站由2012年1.67减小为2016年1.27。表明头道拐站在封河期间上游来水量是呈逐渐增加的趋势,河



道来流量的增大,尤其在2014年海勃湾水库蓄水运行以后,河道内冰封期槽蓄水量减小到 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以下,同时头道拐站来流量占上游水量的比例逐渐增加,减少了上游河道水量转化为槽蓄水量,加之河道淤积与封河初期上游海勃湾水库蓄水对黄河内蒙古段小流量过程进行控制,使得小流量过程持续时间变短。

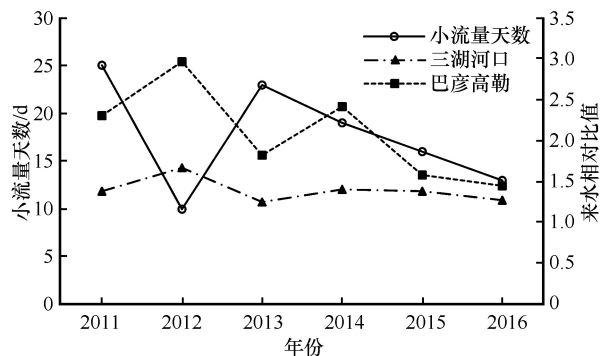


图7 小流量持续天数与相对来水量变化

Fig. 7 Annual variations of the low discharge days and relative inflow

#### 4 结论

(1)通过对1998–2016年头道拐河道流量过程分级研究,确定30%概率的小流量级所对应的河道流量值,即河道流量值 $330 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 为小流量过程上限阈值,凌汛期河道流量低于此值表明河道处于小流量过程。通过对小流量过程变化研究,近年来小流量过程变化特征表现为小流量持续天数呈现缩短趋势,同时小流量过程与上游相对来水过程变化同步,而且滞后于河道槽蓄水量变化过程。

(2)通过建立非线性概率Logit和Probit模型讨论小流量过程变化的影响因素,结果表明:河道冰流量是小流量过程变化的第一影响因素,气温是小流量过程变化的决定因素,首封位置和相对来水量是小流量过程变化的重要影响因素。

(3)凌汛期控制上游海勃湾水利枢纽下泄流量,从而人为控制黄河干流内蒙古段封河位置及封河时间,减小头道拐河段小流量过程持续时间,对保障黄河干流内蒙古段凌汛期安全有重要指导意义。

#### 参考文献(References):

[1] Kang Lingling, Wang Yunzhang, Chen Fazhong, et al. Analysis on effect of air temperature on ice jam floods at Ningmeng reaches of the Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(3): 318–322. [康玲玲, 王云璋, 陈

发中,等.黄河上游宁蒙河段气温变化对凌情影响的分析[J].冰川冻土,2001,23(3):318–322.]

- [2] Zhao Shuixia, Li Changyou, Li Chao, et al. Processes of river ice and ice-jam formation in Shensifenzi Bend of the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(3): 351–358. [赵水霞, 李畅游, 李超, 等.黄河什四份子弯道河冰生消及冰塞形成过程分析[J].水利学报,2017,48(3):351–358.]
- [3] Dong Xuena, Lin Yinping, Li Xuemei, et al. Characteristics of ice regime in the lower Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(6): 882–887. [董雪娜, 林银平, 李雪梅, 等.黄河下游凌情特征及变化[J].水科学进展,2008,19(6):882–887.]
- [4] Jin Shuangyan, Zhai Jiarui, Jiang Xinhui, et al. Low discharge process variety and impacting factors of Toudaoguai Station in ice flood period[J]. Yellow River, 2012, 34(12): 27–29. [金双彦, 翟家瑞, 蒋昕挥, 等.凌汛期头道拐小流量过程变化及影响因素分析[J].人民黄河,2012,34(12):27–29.]
- [5] Liu Jifeng, Wang Qingchun, Zhao Na, et al. Characteristic of winter discharge and its responses to climate change and human activities at Toudaoguai section of the Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(2): 424–429. [刘吉峰, 王春青, 赵娜, 等.黄河内蒙古段头道拐断面冰期水流特征及其对气候变化与人类活动的响应[J].冰川冻土,2014,36(2):424–429.]
- [6] Li Changyou, Li Chao. River ice evolution of Yellow River in Inner Mongolia and its numerical simulation[M]. Beijing: Science Press, 2018. [李畅游, 李超.黄河内蒙古段河冰生消演变特性及数值模拟技术[M].北京:科学出版社,2018.]
- [7] Xiao Yi, Yang Shengfa, Shao Xuejun. Trends of temporal variation of the flow-sediment discharges into the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Sediment Research, 2017, 42(6): 22–27. [肖毅, 杨胜发, 邵学军.三峡水库水沙条件时序变化趋势研究[J].泥沙研究,2017,42(6):22–27.]
- [8] Fan Qibin. Wavelet analysis[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2008. [樊启斌.小波分析[M].武汉:武汉大学出版社,2008.]
- [9] Liu Y, Yue W Z, Fan P L, et al. Spatial determinants of urban land conversion in large Chinese cities: a case of Hangzhou[J]. Environment and Planning: Part B, 2011, 38(4): 706–725.
- [10] Liu Kang, Li Yuee, Wu Qun, et al. Driving force analysis of land use change in the developed area based on Probit regression model: a case study of Nanjing City, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(7): 2131–2138. [刘康, 李月娥, 吴群, 等.基于Probit回归模型的经济发达地区土地利用变化驱动力分析——以南京市为例[J].应用生态学报,2015,26(7):2131–2138.]
- [11] Cai Mingke. Comparative Study on hydrologic-meteorological-drought characteristics of Guanzhong areas[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(6): 33–37. [蔡明科.关中地区水文、气象干旱特征对比研究[J].灌溉排水学报,2003,22(6):33–37.]
- [12] Yan Na, Yan Junping, Du Jiwen, et al. An analysis on the relationship of ice flood trend of lower reaches of Yellow River and climate change[J]. Journal of Arid and Resources and Environment, 2008, 22(8): 45–48. [闫娜, 延军平, 杜继稳, 等.黄河下游凌汛变化趋势与气候变化关系分析[J].干旱区资源与环境,2008,22(8):45–48.]
- [13] 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. [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.]
- [14] Wang Fuqiang, Wang Lei. Analysis of ice regime characteristics in the Ningxia-Inner Mongolia reach of Yellow River in the recent ten years[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(4): 21 – 24. [王富强, 王雷. 近10年黄河宁夏河段凌情特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 21 – 24.]
- [15] Huang F B, Shen H T, Ian M K. Modeling border ice formation and cover progression in river[C]//21st IAHR International Symposium on Ice, China, Dalian, 2012.
- [16] Shen H T. Mathematical modeling of river ice processes[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 62(1): 3 – 13.
- [17] Wang Yunzhang, Kang Lingling, Chen Fazhong, et al. Effect of air temperature change in the last 30 years on ice jam flood in the lower reaches of the Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(3): 323 – 327. [王云璋, 康玲玲, 陈发中, 等. 近30 a气温变化对黄河下游凌情影响分析[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 323 – 327.]
- [18] Wang Ping, Hou Suzhen, Chu Weibin, et al. The incremental variation of channel storage and its influencing factors of Inner-Mongolia reach of the Yellow River in ice flood season[J]. Yellow River, 2011, 33(9): 19 – 21. [王平, 侯素珍, 楚卫斌, 等. 黄河内蒙古段凌期槽蓄增量变化与影响因素[J]. 人民黄河, 2011, 33(9): 19 – 21.]
- [19] Liu Junqiu, Shi Wenjuan. Research on change and periodicity of annual runoff volume along the Ningxia-Inner Mongolia section of the Yellow River[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(3): 413 – 418. [刘俊秋, 史文娟. 黄河宁 – 蒙河段流量变化及周期研究[J]. 干旱区研究, 2012, 29(3): 413 – 418.]
- [20] Lan Yongchao, Zhu Yuntong, Liu Gensheng, et al. Study of the seasonal characteristics and regional differences of climate change in source regions of the Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 741 – 749. [蓝永超, 朱云通, 刘根生, 等. 黄河源区气候变化的季节特征与区域差异研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(3): 741 – 749.]
- [21] An Lijuan. Aridity variation and its impact on water resources in Inner Mongolia from 1971 through 2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 732 – 740. [安莉娟. 1971 – 2010年内蒙古干湿变化特征及对水资源影响[J]. 冰川冻土, 2016, 38(3): 732 – 740.]

## A study of low discharge process and impacting factors of Toudaoguai Reach in Inner Mongolia of the Yellow River during ice flood period

QUAN Dong<sup>1</sup>, LI Chao<sup>1</sup>, LU Xinchuan<sup>2</sup>, SHI Xiaohong<sup>1</sup>, YANG Zhaoxia<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. Yellow River Wanjiazhai Water Multi-purpose Dam Project Co., LTD, Taiyuan 030002, China)

**Abstract:** During icing period, with the exception to freezing, large amount of water from the section of the Yellow River in Inner Mongolia is converted into channel storage. This will lead to a long low discharge process at Toudaoguai Hydrology Station. Longer low discharge process will lead to ice flood during the break-up period. The critical low discharge value,  $330 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , was defined after analyzing the changing process and characteristics of Toudaoguai Hydrology Station discharge from 1998 to 2016. Based on this value, analysis of low discharge process was conducted using R/S range analysis method, Fourier transformation method and multiple linear regression analysis. The Logit and Probit nonlinear probabilistic models were used to discuss factors of low discharge process at the same time. The result showed that the number of low discharge days was decreasing, and there was a significant impact relation between low discharge process and change in upstream relative discharge. The low discharge process synchronized with change in upstream relative discharge, but lagged behind the change in channel storage. By using Logit and Probit models to analyze the response probability of duration of low discharge changing with each influence factors, ice discharge was a primary influence factor of low discharge process. The temperature and condition of the freeze-up site, as well as the relative coming discharge, were the main factors also.

**Key words:** Toudaoguai Reach of the Yellow River; ice flood period; low discharge change process; influence factors

(责任编辑: 陈仁升; 编辑: 周成林)