



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.01.022

李芬, 李昱, 李敏, 等. 基于模糊评价模型的南水北调中线冰害风险空间分布[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 132-137. LI Fen, LI YU, LI Min, et al. Spatial distribution of ice hazards in middle route of South to North Water Transfer Project based on fuzzy evaluation model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 132-137. (in Chinese)

## 基于模糊评价模型的南水北调中线 冰害风险空间分布

李芬, 李昱, 李敏, 张弛

(大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 南水北调中线工程线路长、跨越纬度大, 冬季输水时存在发生冰塞、冰坝的风险, 其中冰塞、冰坝堆积风险、开河模式规律等随渠道地理条件如: 弯曲、横断面宽度等的变化而变化。因此亟需对风险的空间分布进行研究, 以便于实现对渠道的分级管理, 节省运营成本, 增加工程应对风险的能力。应用模糊评价理论, 通过分析、量化渠道地理条件, 建立风险评价指标体系与评估模型, 获得了冰害风险的空间分布。首先分析获得纵向坡度、弯曲、横断面束窄及渠道障碍物四个易诱发渠道冰害的地理条件; 之后基于冰塞产生机理改进了地理条件的量化方法, 并构建了冰害风险评价指标体系; 然后以京石段为例, 采用等距分割的方法获得多个单元渠道, 并采用模糊评价模型评估每个单元渠道的风险; 最后基于单元渠道的风险分布评估京石段不同渠段的风险。结果表明: 单元渠道的冰害风险可分为5级; 西黑山节制闸-瀑河倒虹吸节制闸渠段及坟庄河节制闸-南拒马节制闸渠段的相对风险最大, 研究结果对冰害防治具有一定的指导意义。

**关键词:** 冰害风险; 南水北调中线; 模糊评价; 空间分布; 冰期输水

**中图分类号:** TV 68    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2017)01-0132-06

### Spatial distribution of ice hazards in middle route of South to North Water Transfer Project based on fuzzy evaluation model

LI Fen, LI YU, LI Min, ZHANG Chi

(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The middle route of the South to North Water Transfer project is long and runs across a wide range of altitudes, and it will suffer from the risks of ice clogging and damming during the freezing period. The risk of ice jam accumulation as well as the break up pattern vary with the tortuosity, cross section width and other geographical conditions of the channel. Therefore, it is necessary to study the spatial distribution of the ice hazards in order to realize hierarchical management of channels, save operating costs and increase the ability to deal with risks. This paper established a risk evaluation index system and evaluation model to obtain the spatial distribution of the ice hazards by quantifying the channel's geographical conditions based on the fuzzy evaluation theory. First, four geographical indicators that predispose to ice hazards were obtained including longitudinal slope, tortuosity of channel, cross section width and obstacles. And then, the quantitative method for geographical conditions was improved based on the mechanism of ice jam formation, and the risk evaluation index system was established. Lastly, the Beijing Shiji azhuang section was taken as a case study, in which the risks of different canal reaches were evaluated with the proposed model by partitioning the section into multiple unit channels. Results showed that the ice hazards of a unit channel can fall into five lev-

收稿日期: 2016-01-28    修回日期: 2016-05-11    网络出版时间: 2017-01-04  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170104.0929.010.html>  
基金项目: 国家科技重大专项(2014ZX03005001)

**Fund:** National Science and Technology Major Project(2014ZX03005001)

**作者简介:** 李芬(1990), 女, 山东泰安人, 主要从事工程冰期输水研究。E-mail: lifendllg@mail.dlut.edu.cn

**通讯作者:** 李昱(1988), 男, 山东泰安人, 博士, 主要从事连通条件下水库群优化调度的研究。E-mail: dagongliyu@mail.dlut.edu.cn

els, and the hazards are the largest in the Xihei Mountain Regulator Baohe River Regulator Reach and Fenzhuang River Regulator- Nanjuma Regulator Reach. The research findings can offer some valuable guidance to ice damage prevention and control.

**Key words:** ice hazard; middle route of South to North Water Transfer Project; the fuzzy evaluation model; spatial distribution; water transfer in freezing period

南水北调中线工程由汉江中上游的丹江口水库引水,重点解决北京、天津、石家庄、郑州等沿线 20 多座大中城市的缺水问题,并兼顾沿线生态环境和农业用水,干渠总长达 1277 km,南北跨越 8 个纬度,水流自暖温带流向半寒冷地区<sup>[1]</sup>。冬季运行时,黄河以北的渠道,将有不同程度的冰凌出现,总干渠将处于无冰输水、流冰输水、冰盖输水等多种状况组合的复杂运行状态,因此存在发生冰塞、冰坝的风险<sup>[2]</sup>。冰塞、冰坝的出现将降低渠道的输水能力、雍高上游水位、严重时将威胁堤防、使供水中断等。因此,开展中线冰害防治研究,对保障工程冬季安全运行具有重要意义。

为降低渠道冰害风险,减少损失,学者们主要从以下两个方面开展了研究:一是通过构建冰期数值模拟平台研究其冰情特性,提出工程冰期输水冰情防治和冰害预防措施<sup>[3,4]</sup>。二是构建渠道冰期运行控制模型,研究不同冰情下渠系水力响应特性,探讨可缓解冰害的冰期自动运行控制方式<sup>[5,6]</sup>。但数值模型存在河道概化难以反映实际情况、模型参数合理性较难验证等问题<sup>[7,9]</sup>,控制模型也存在依赖经验系数的问题<sup>[10]</sup>,且气象预报同样存在不确定性等。

实际上,由于工程情况复杂,实际运行时难以完全避免冰害的发生。渠道形态、水力、热力等因素共同决定冰害何时何地发生,且各因素之间相互影响、依存与转化,机理复杂<sup>[11]</sup>。现有的冰塞预报模型多为仅适用于特定地点的经验模型<sup>[12,13]</sup>,而中线运行时间短,并未发生过冰害事件,可用数据少,不具有构建冰害预报模型的条件。与此同时冰塞等的堆积地点、开河模式等主要受河流地理形态影响,有一定规律可循<sup>[15]</sup>。中线工程线路长,情况复杂,冰害预报及应急能力不足,因此可通过构建地理模型量化不同渠段对冰害的敏感性,将防治重点聚焦于冰害风险较大的渠段,提高工程应对灾害的能力。已有研究表明<sup>[14]</sup>通过构建地理模型研究河流在开河、冰塞等的敏感性是可行的。Dr Munck<sup>[15]</sup>构建了一个地理模型,通过量化不同地理因素对冰坝堆积的影响,预测冰坝的堆积地点; Karl Erich<sup>[16]</sup>进一步改进了该模型,并将其应用于河流开河模式的研究; Lindenschmidt<sup>[17]</sup>将该模型应用到 Dauphin River,

通过主成分分析法研究不同因素对河流冰桥形成地点的影响等等。

本文以南水北调中线京石段明渠为研究对象,对中线冰害风险的空间分布进行研究。首先针对中线渠道的具体特点构建合理的指标体系,并获得各指标数值。为了描述分析指标具有的模糊性及连续性,选取模糊评价方法<sup>[18,19]</sup>对其进行分析评价。

## 1 冰害风险模糊评价模型

渠道的地理要素多具有模糊性,如弯道弯曲程度的大小等,并没有明确的界定。在前期研究中,指标量化一般采用人为划分等级的方法,在很大程度上难以反映指标的差异性,指标差异性得不到体现将最终影响结果真实性。而模糊评价模型不用进行等级划分,能将定量测取的因素及难以量化的模糊因素综合起来进行评价,并考虑了指标变化的连续性,指标隶属度体现了指标差异对冰害堆积的影响,评价结果真实的反映了不同渠道的冰害敏感性差异,实现了对研究对象的多级量化;此外,模糊评价模型既可用于单元渠道的风险评价,寻找全线最危险的断面;也可用于单个渠段的风险评价,寻找渠段内相对风险最大的断面,实现了对中线冰害风险的多层次量化评价。因此本文采用模糊评价方法对京石段明渠部分冰害风险的空间分布进行定量分析评价,其原理参见文献[19]。

模糊评价进行中线冰害风险空间分布研究的计算步骤如下。

(1) 进行单元渠道冰害风险空间分布研究。

a. 构建单元渠道冰害风险空间分布模糊评价模型的模型指标体系。

首先通过查阅文献[14-17]、分析渠道形态、横断面特征等确定了可能诱发渠道发生冰凌堆积的四个因素:渠道纵坡发生变化、渠道中有弯道、渠道中发生束窄及渠道中存在障碍物。前期研究中,由于受自然河道数据难获得及精度低的限制,对指标量化时一般采取直接采用原始数据或人为简单分级的策略。如直接取横断面宽度数值来代表渠道中发生束窄这个因素,但由冰塞原理可知,导致冰凌发生堆积的原因并不是横断面宽度的数值大小,而是上下

游间横断面在宽度上的变化程度,即横断面发生了扩张或束窄。本文在前期研究的基础上,依托于中线地理数据的完整性、精度高等特点,改进了指标计算方法,如指标  $I_3$  定义为上下游横断面宽度的比值,通过比值数值的大小体现了横断面的变化程度,从而实现定量表现各渠道单元的“风险程度”,更符合工程实际。

b. 确定方案集合及每个方案的特性。

将京石段明渠部分的 19 个渠段按从南到北的顺序等距离进行分割,共获得 991 个单元渠道,每个单元渠道约 200 m。然后将每个单元渠道作为一个方案,其特性用 4 个指标衡量,求得其相应指标得分;其中,  $I_1$ 、 $I_3$  用渠道上游与下游断面的比值作为指标得分。计算方案对每个指标的相对隶属度  $\mu_A(ui)$ 。

c. 指标权重  $w$  的确定。

d. 方案隶属度的确定。

采用式(1)计算方案的优属度  $u^*$ ,根据隶属度函数的余集定义,应有  $u' = 1 - u^*$ ,其中  $u'$  为劣属度

$$u^* = \frac{1}{1 + \left[ \frac{\sum_{i=1}^m w_i (1 - \mu_A(ui))}{\sum_{i=1}^m (w_i \mu_A(ui))} \right]^2} \quad (1)$$

式中:  $u^*$  为方案从属于优等方案的隶属度,简称优属度;  $m$  为方案的评价指标个数;  $\mu_A(ui)$  方案对每个指标的相对隶属度;  $w_i$  方案指标权重。

(2) 进行渠段冰害风险空间分布研究。

由(1)可知,一个渠段由多个单元渠道串联在一起。冬季运行时,中线以渠段为单位进行水力调控。因此在对单元渠道冰害风险分析的基础上,考虑风险较大的单元渠道在各个渠段的数量及各渠段自身的特点,构建渠段风险评价的评价指标体系,利用模糊模型对中线渠段冰害风险空间分布进行研究,确定各渠段发生冰害风险的相对大小。

## 1.1 单元渠道冰害风险空间分布模糊评价指标体系

(1) 由冰水力学理论可知,容易形成冰塞、冰坝的河道条件之一是上段比降陡,下段比降缓,这样易使流冰花或冰凌在冰盖前缘下潜,并在冰盖下堆积。将渠道纵坡变化率  $I_1$  确定为指标之一。

$$I_1 = \frac{i_{up}}{i_{down}} \quad (2)$$

式中:  $I_1$  为渠道纵坡变化率;  $i_{up}$  为单元渠道上游断面坡降;  $i_{down}$  为单元渠道下游断面坡降; 由  $I_1$  定义可知,  $I_1$  数值越大,表示该渠道发生冰凌堆积的风险越大。下同,不再赘述。

(2) 弯道通过迫使移动的冰改变方向,并撞击外侧河岸对冰塞的形成产生积极影响。将渠道弯曲程度  $I_2$  确定为指标之一。

$$I_2 = \frac{c_{ture}}{c_{line}} \quad (3)$$

式中:  $I_2$  为渠道弯曲程度;  $c_{line}$  为单元渠道两断面直线距离;  $c_{ture}$  为单元渠道两断面实际距离。

(3) 冰塞发生的初始条件是:碎冰块或冰花等停止向下游移动,开始堆积,因此,阻碍冰移动的河道障碍物是冰塞的常发地点。将渠道断面束窄率  $I_3$ 、渠道障碍物情况  $I_4$  确定为指标

$$I_3 = \frac{b_{up}}{b_{down}} \quad (4)$$

式中:  $I_3$  为渠道断面束窄率;  $b_{up}$  为单元渠道上游横断面宽度;  $b_{down}$  为单元渠道下游横断面宽度。

$$I_4 = \begin{cases} 1 & \text{渠道中无桥梁} \\ 1.15 & \text{渠道中存在桥梁} \end{cases} \quad (5)$$

当渠道中存在桥梁时,由于桥墩的阻水作用,会发生雍水现象。通过搜索文献发现,现在还未开展针对南水北调中线桥墩对冰塞雍水水位影响的研究,因此本文借鉴文献[20]的研究成果,通过分析不同工况条件(不同流速、不同冰厚)下桥墩对冰塞雍水的影响后将  $I_4$  定为 1.15,表示冰塞的存在使桥墩的雍水提高了约 15%。

## 1.2 单元渠道冰害风险空间分布模糊评价指标权重的确定

在权重确定时考虑了如下因素:通过分析发现,弯道在诱发冰凌堆积中发挥了重要作用<sup>[21]</sup>,因此将其作为最重要的指标。渠道中的障碍物一般是指渠道中的跨渠桥梁,但由于桥梁布置时已经考虑了尽量减小其对冰塞堆积的影响,因此将其作为最不重要的指标。此外,京石段纵坡在 1/20 000 ~ 1/30 000 之间,纵坡数值本身就很小,纵坡发生变化的地方就更少了,因此将其排在指标的第三位。

最后应用二元比较模糊决策分析法<sup>[19]</sup>确定指标权重,见表 1。

表 1 京石段渠道冰害风险模糊评价指标权重

Tab. 1 Weight of indexes for fuzzy evaluation of ice hazards in Beijing Shijiazhuang section

横断面弯曲程度	渠道横断面束窄率	渠道纵坡变化率	渠道障碍物情况
0.43	0.28	0.18	0.11

## 2 南水北调中线冰害风险分析

### 2.1 研究区域简介

总干渠起点陶岔渠首位于北纬 32°40′、东经

111°42'; 终点北京市团城湖位于北纬 39°49'、东经 116°15'; 纬度相差 7°19'; 沿程经过 3 个气候区。中线沿程南阳、郑州、新乡、安阳、邢台等 8 个主要气象站的多年气温资料表明: 安阳以北地区 1 月平均气温低于 0℃, 邢台以北地区冬季平均气温均低于 0℃。因此, 安阳以北地区的渠道冬季输水时将出现不同程度的冰问题<sup>[1]</sup>, 尤其京石段是冰害控制的重点<sup>[3]</sup>。

京石段自石家庄古运河至北京团城湖。其中石家庄古运河枢纽至北拒马河支南段位于河北省, 输水线路长 227.4 km, 采用明渠输水; 北拒马河至团城湖段位于北京市, 输水线路长 80.1 km, 采用 PCCP 管道和暗涵输水。因此本文将京石段明渠由古运河至北拒马河中支作为研究渠段, 渠道纵坡一般在 1/20 000~1/30 000 之间, 沿线交叉建筑物共 444 座, 其中公路交叉建筑物 244 座, 节制闸及工作闸共 20 个。将两相邻闸门之间的渠道称为渠段, 共 19 个渠段。

## 2.2 结果分析

首先将京石段明渠部分的 19 个渠段按从南到北的顺序等距离进行分割, 共获得 991 个单元渠道。将每个单元渠道作为一个方案, 利用 1.1 确定的指标体系, 采用模糊评价模型, 进行单元渠道冰害风险空间分布研究。然后在单元渠道冰害风险分析的基础上, 考虑风险较大的单元渠道在各个渠段的数量及各渠段的特点, 构建渠段评价的评价指标体系, 利用模糊模型对中线渠段冰害风险空间分布进行研究, 研究结果如下(图 1)。

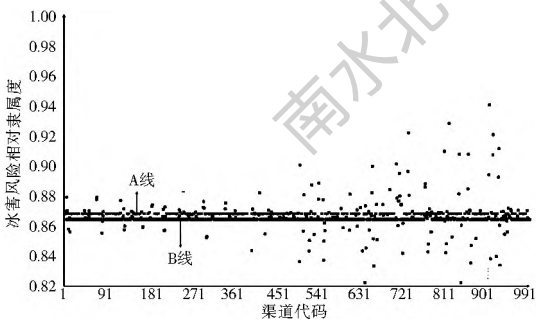


图 1 京石段单元渠道冰害风险模糊评价结果

Fig. 1 Fuzzy evaluation results of ice hazards of unit channels in Beijing Shijiazhuang section

通过分析图 1 所示的单元渠道冰害风险模糊评价结果得到: 京石段单元渠道冰害风险分布可大致分为 5 级。因中线约有 54% 的单位渠道为无桥梁的顺直渠道, 它们发生冰害的风险均相同, 故“组成”了图 1 中的 B 线这个线性区域, 将其作为衡量其他渠道风险的基准; 与此类似, 仅有桥梁通过 ( $I_4 = 1.15$ , 其他指标与基准渠道相同) 的单位渠道约占总

渠道数量的 20%, 它们发生冰害的风险也相同, 组成了图 1 中的 A 线。由于桥墩对冰凌具有阻碍作用并减小了横断面面积, 与基准渠道相比更易诱发冰凌堆积; 位于 A 线与 B 线中间区域的渠道大部分存在弯道, 但其位于 A 线下方, 表示弯道对诱发冰凌堆积的作用没有桥梁大, 这与中线为人工渠道, 尽量避免急转弯、连续转弯有关; B 线下方区域的单位渠道与基准渠道相比风险更小, 如该区域中编号 553 的渠道, 渠道中发生了横断面扩张, 增大了输冰能力, 降低了冰凌堆积的风险; 发生冰害风险相对最大的单位渠道是位于 A 线上方区域内的渠道, 将该区域冰害风险内隶属度最大的 10 个单元渠道列出了表 2, 这也是整个京石段明渠部分风险最大的 10 个单元渠道。

表 2 京石段冰害风险相对最大的 10 个单元渠道

Tab. 2 The 10 unit channels with the largest ice hazards in Beijing Shijiazhuang section

渠段编号	渠段名称	桩号	隶属度	桩号	隶属度
12	西黑山 瀑河	157+ 307	0.900	165+ 072	0.922
14	中易水 北易水	182+ 281	0.909	184+ 917	0.928
15	北易水 七里庄沟	190+ 392	0.907		
16	七里庄沟 马头沟	194+ 593	0.907		
18	坟庄河 南拒马河	204+ 549	0.940	205+ 949	0.907
18	坟庄河 南拒马河	206+ 149	0.920	208+ 549	0.911

冬季运行时, 中线以渠段为单位进行水力调控。因此, 通过分析位于 A 线上方区域内的单元渠道(统称为敏感渠道)在各个渠段的分布及各渠段的特点, 确定各渠段发生冰害风险的相对大小, 其中敏感渠道共有 105 个, 占总渠道数的 10.5%。取敏感渠道在各渠段的数量 R1、前 50 个最敏感渠道在各渠段的数量 R2、敏感渠道占渠段渠道数的百分比 R3、渠段长度 R4 四个指标对京石段明渠段的 19 个渠段进行冰害风险分析。指标在各渠段的分布见图 2、图 3。

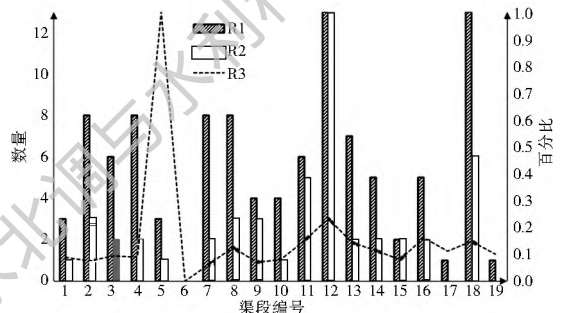


图 2 敏感单元渠道在各渠段内的分布

Fig. 2 Distribution of sensitive unit channels in each canal reach

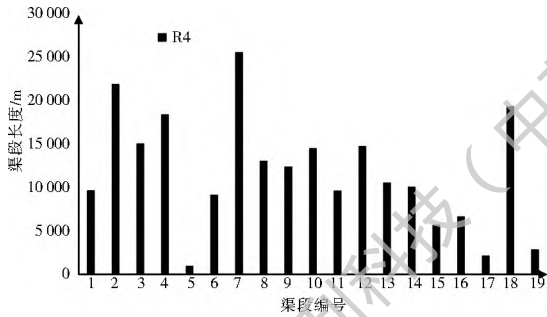


图 3 渠段长度

Fig. 3 The length of canal reaches

最后选用模糊评价模型对各渠段发生冰害的风险进行定量评价, 结果见图 4。

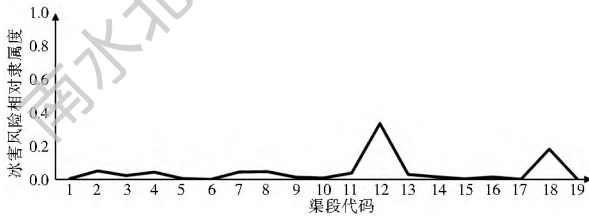


图 4 京石段渠段冰害风险分布

Fig. 4 Ice hazards distribution in Beijing-Shijiazhuang section

由图 4 可以看出, 冰害风险最大的两段渠段是 12 号西黑山节制闸-瀑河倒虹吸节制闸渠段, 此外该渠段担负着向天津分水的任务, 冬季流量变动较大, 更增加了风险; 另一个危险渠段为 18 号坟庄河节制闸-南拒马节制闸渠段。

图 5 为 12 号渠段各断面的冰害风险分布, 由图所示, 冰塞容易在渠段的中下游(桩号 157+ 307 到桩号 162+ 072) 及最下游的几个断面堆积。

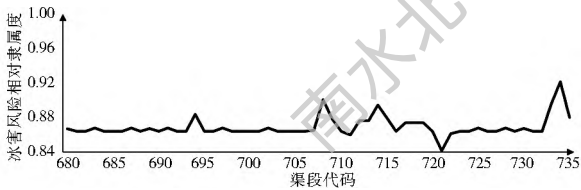


图 5 12 号渠段各断面冰害风险分布

Fig. 5 Distribution of ice hazards in each cross section of the 12th reach

图 6 为 18 号渠段各断面的冰害风险分布, 由图所示, 应对渠段上游区域加强监测(桩号 204+ 149 到桩号 209+ 678)。

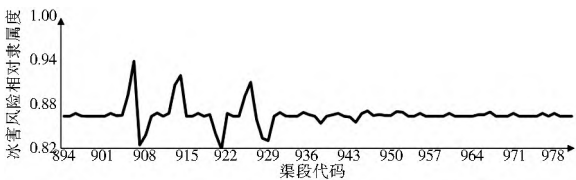


图 6 18 号渠段各断面的冰害风险分布

Fig. 6 Distribution of ice hazards in each cross section of the 18th channel

### 3 结论

本文以京石段为研究对象, 首先针对输水渠道的具体特点, 构建了合理的指标体系并采用模糊评价方法对中线京石段冰害风险空间分布进行了定量评价研究, 主要结论是如下。(1) 模糊评价模型改进了前期地理模型采用人为划分等级量化指标的方法, 考虑了指标的连续变化, 指标具有明确的物理意义, 指标隶属度体现了指标差异对冰害堆积的影响, 评价结果真实的反映了不同渠道的冰害敏感性差异, 实现了对单元渠道的多级量化; 此外, 模糊评价模型既可用于单元渠道也可用于渠段的风险评价, 体现了该方法的普适性。(2) 根据渠道发生冰塞、冰坝堆积风险的大小将京石段单元渠道分为了 5 级; (3) 给出了中线最危险的 10 个单元渠道的起始断面桩号; (4) 风险最大的两段渠段是 12 号西黑山节制闸-瀑河倒虹吸节制闸渠段及 18 号坟庄河节制闸-南拒马节制闸渠段, 其中应对 12 号渠段的中下游及 18 号渠段的上游渠道加强监测。可将研究结果与人工巡视相结合, 对重点渠段及断面在流凌期加强监测, 异常发生后, 首先排查。可降低成本, 提高效率, 提高中线工程应对灾害的能力。研究成果对南水北调中线工程冰期运行具有一定的指导借鉴意义。最后, 受资料限制导致不能全面掌握南水北调运行现状, 因此在确定模糊评价指标权重时无法消除人为因素的影响。当中线确实有冰坝等冰害事件发生后, 应重新研究冰害堆积地点各指标的特点并对各指标权重进行修正, 以使模型更符合工程实际。

#### 参考文献 (References):

[1] 刘之平, 吴一红, 陈文学. 等. 南水北调中线工程关键水力学问题研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (LIU Zhi ping, WU Yi hong, CHEN Wei xue. et al. Hydraulics research on the Middle Route of South to North Water Diversion Project [M]. Beijing: China Water & Power Press. 2010 (in Chinese))

[2] 董耀华, 杨国录. 大清河系观测河段及南水北调中线方案冰情计算分析[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(6): 13-17. (DONG Yao hua, YANG Guo lu. Calculation and analysis of ice processes in observed reaches of Daqinghe river and in main channels of Middle Line Scheme of Water Transfer Project from South to North China [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute. 1999, 16(6): 13-17. (in Chinese))

[3] 郭新蕾, 杨开林, 付辉. 等. 南水北调中线工程冬季输水冰情的数值模拟[J]. 水利学报, 2011, 42(11): 1268-1276. (GUO Xin lei, YANG Kai lin, FU Hui, et al. Numerical simulation of ice regime in the water conveyance system during winter in Middle Route of South to North Water Transfer Project [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(11): 1268-1276. (in Chinese))

- nese)
- [4] 练继建,赵新.双缆网式拦冰索布设间距研究[J].南水北调与水利科技,2012,10(3):1-3.(LIAN Jijian,ZHAO Xin. Research on layout distance between net-style ice boom with two axes[J].South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2012,10(3):1-3.(in Chinese))
- [5] 穆祥鹏,陈文学,崔巍.等.长距离输水渠道冰期运行控制研究[J].南水北调与水利科技,2010,8(01):8-13.(MU Xiangpeng,CHEN Wenzue,CUI Wei,et al. Operation and control to long distance water diversion canal system during frozen period[J].South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2010,8(01):8-13.(in Chinese))
- [6] 刘孟凯,邢领航,黄明海.等.长距离渠系融冰期自动化控制模式研究[J].水利学报,2013,44(09):1080-1086.(LIU Mengkai,XING Linghang,HUANG Minghai,et al. An automatic operation model for the long distance canal system in ice melting period[J].Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(09):1080-1086.(in Chinese))
- [7] 王军.河冰水力学研究进展[J].水利水电技术,2004,35(5):111-113.(WANG Jun. Recent development in research river ice hydraulics[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2004,35(5):111-113.(in Chinese))
- [8] 王军,赵慧敏.河流冰塞数值模拟进展[J].水科学进展,2008,19(4):597-604.(WANG Jun,ZHAO Huimin. Recent development in simulation of river ice jam[J].Advances in Water Science,2008,19(4):597-604.(in Chinese))
- [9] 郭新蕾,杨开林,付辉.等.冰情模型中不确定参数的影响特性分析[J].水利学报,2013,44(8):909-914.(GUO Xinlei,YANG Kai lin,FU Hui,et al. Effect of uncertain parameters on ice processes simulation[J].Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(8):909-914.(in Chinese))
- [10] 刘国强,闫弈博,王长德.等.长距离渠系冰期运行过渡模式研究[J].武汉大学学报:工学版,2012,45(01):34-40.(LIU Guoqiang,YAN Yibo,WANG Changde,et al. Study of transition mode for juxtaposition ice cover formation of long distance canal system[J].Engineering Journal of Wuhan University,2012,45(01):34-40.(in Chinese))
- [11] 廖厚初,肖迪芳,栾建,等.冰坝与冰塞[J].东北水利水电,2010(6):65-66.(LIAO Houchu,XIAO Difang,LUAN Jian,et al. Ice dam and ice jam[J].Water Resources & Hydropower of Northeast China,2010(6):65-66.(in Chinese))
- [12] 茅泽育,许昕,王爱民.等.开河期冰坝预测方法研究进展[J].水利水电科技进展,2007(3):76-80,94.(MAO Zeyu,XU Xin,WANG Aimin,et al. Advances in prediction methods for breakup ice jams[J].Advances in Science and Technology of Water Resources,2007(3):76-80,94.(in Chinese))
- [13] 刘彦涛.河流冰塞形成机理与预报方法分析[J].山西建筑,2009(35):360-362.(LIU Yantao. The formation mechanism and forecasting method analysis of river water lock[J].Shanxi Architecture,2009(35):360-362.(in Chinese))
- [14] Lindenschmidt K E, Long, J. A GIS approach to define the hydrogeomorphological regime for instream flow requirements using geomorphic response units (GRU)[J].River Systems,2013,20(3-4):261-275.
- [15] De Munck S, Gauthier Y, et al. Preliminary development of a geospatial model to estimate a river channel's predisposition to ice jams[J].CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment (CRIPE), 16th Workshop on River Ice, 2011, 9: 18 - 22.
- [16] Sagin J. A geospatial model to determine patterns in river ice cover breakup and jamming behavior[J].IAHR International Symposium on Ice, 2014, 8: 11-15.
- [17] Lindenschmidt K E, Chun K P. Geospatial modelling to determine the behaviour of ice cover formation during freeze up of the Dauphin River in Manitoba[J].Hydrology Research, 2014, 64: 65-69.
- [18] 周惠成,李伟,张弛.等.流域防洪减灾工程措施方案优选研究[J].大连理工大学学报,2009,49(2):267-271.(ZHOU Huicheng,LI Wei,ZHANG Chi,et al. Research on optimization of flood control and disaster mitigation on engineering schemes[J].Journal of Dalian University of Technology, 2009,49(2):267-271.(in Chinese))
- [19] 陈守煜.工程模糊集理论与应用[M].北京:国防工业出版社,1998.(CHEN Shouyu. Engineering fuzzy set theory and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.(in Chinese))
- [20] 陆飞飞.封冻期桥墩对冰塞雍水水位的影响.[D].合肥:合肥工业大学,2013.(LU Feifei. Impact of piers on ice jam backwater[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.(in Chinese))
- [21] 李超,李畅游,李红芳.黄河(内蒙古段)弯道卡冰过及程及数值模拟研究.[J].水力发电学报,2015,34(10):103-110.(LI Chao,LI Changyou,LI Hongfang. Study and simulation on ice jam process in river bends for Inner Mongolia reach of the Yellow River[J].Journal of Hydroelectric Engineering, 2015,34(10):103-110.(in Chinese))