

南水北调中线京石段冰期输水规律研究

徐冬梅, 辛悦, 王文川, 邱林

(华北水利水电大学 水利学院, 郑州 450011)

摘要: 南水北调中线京石段供水工程起于河北省石家庄, 止于北京的团城湖, 渠道全长 307 km, 由于沿线冬季天气寒冷, 通常都会出现结冰现象。为了做好冰期调水运行工作, 确保冰期通水工作的顺利进行, 输水本文利用京石段四次冰期调度运行数据, 在分析各输水渠段的冰情时空分布特征的基础上, 提出了冰期输水调度的经验与规律, 为南水北调中线工程的冰期调度运行、冰期灾害防治和冰期灾情预报提供技术支撑。

关键词: 南水北调中线; 京石段; 冰期; 输水规律; 时空分布特征

中图分类号: TV 68; TV 875 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)01-0168-05

Study on water diversion regulation in Beijing Shijiazhuang section of Middle Route of South to North Water Diversion Project during ice period

XU Dong mei, XIN yue, WANG Wen chuan, QIU Lin

(School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: The Beijing Shijiazhuang section of the Middle Route of South to North Water Diversion Project is about 307 km long, which starts from Shijiazhuang of Hebei Province and ends at Tuancheng Lake of Beijing. Due to the cold weather in winter, water along the route is usually frozen. Water diversion operation is quite different between the ice period and normal period, thus it is necessary to investigate the water diversion regulation during the ice period in order to ensure the diversion safety. Based on the four time water diversion regulation data during the ice period in the Beijing Shijiazhuang section, the spatial and temporal distribution characteristics of water diversion during the ice period were analyzed. The experience and regularities of water diversion were summarized, which can provide the technical support for the water diversion, ice disaster prevention, and ice disaster forecast in the Middle Route of South to North Water Diversion Project during the ice period.

Key words: Middle Route of South to North Water Diversion Project; Beijing Shijiazhuang section; ice period; water diversion regulation; spatial and temporal distribution characteristics

冰期输水规律分析是冰期运行调度的重要基础之一, 由于对冰塞冰坝的形成机理及其影响因素不确定性的认知不足, 冰期输水规律的研究一直是冰期输水运行调度的重点和难点。对冰期输水规律的研究源于对天然河道的冰塞冰坝现象的分析, 目前在一些重要河流也取得了一些有价值的成果, 比如 Jueyi Su^[1] 等通过对黄河冰塞现象的观测, 通过冰层厚度与佛汝德数的相关性对冰情进行量化研究; Shen 等^[2] 通过轻质推移质输沙率公式对冰盖下的输冰量进行研究; A. M. Wasantha Lal 等^[3] 提出了 RICE 模型, 该模型采用一维非恒定流方程对水流进行模拟。而以一维数学模型为主的河冰数学模型也被应用于我国一些河流^[4-6], 用以研究冰塞冰坝现象。目前, 对于输水渠道冰情的研究主要以

原型观测、试验以及模型模拟的方法为主^[7], 如颜丙池^[8]、严增才等^[9] 对冰期调度过程实施了原型观测, 分析了岸冰、流冰、水内冰及冰坝等冰情的生成及演变条件; 赵嘉诚等^[10] 对已有冰期调水数据进行了分析, 对冰期输水技术实施进行了相关探讨; 范北林等^[11] 提出了采用佛汝德数、流冰密度、负积温综合判别冰情的方法; 穆祥鹏等针对南水北调工程的具体渠段, 对结冰期及冰盖下输水阶段的输水能力进行了研究^[12-13], 并结合水力学、冰水力学和传热学等理论, 针对南水北调中线干渠构建了一维冰期输水模型^[14]; 郭新蕾等^[15] 建立了渠道非恒定流模型对冰情进行了数值模拟; 王涛等^[16]、刘国强等^[17] 将智能算法及仿真模拟技术应用于输水规律研究。以上研究对南水北调中线工程的冰期输水提供了有益

收稿日期: 2014-06-06 修回日期: 2014-11-17 网络出版时间: 2014-12-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20141203.1134.004.html>

基金项目: 河南省高校科技创新人才支持计划项目(13HASTIT034); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目(2012GGJS-099)

作者简介: 徐冬梅(1977-), 女, 吉林双辽人, 副教授, 博士, 主要从事水文水资源系统分析、优化建模等方面的研究。E-mail: xudongmei@ncwu.edu.cn

的借鉴。但南水北调中线工程具有沿线长、跨度大的特点,各渠段冰期起止时间及冰期跨度差异较大,为冰期统一调度带来了极大的风险,因此仍有必要对实际冰期通水特点及通水规律进行分析研究,总结以往通水经验,为后续冰期安全通水提供技术支撑。

1 京石段各渠段冰期发展阶段划分

目前为止,京石段已经过四次完整的调水过程,调水过程中有完整的冰情记录及冰期通水运行日报。根据冰期成冰特点,结合京石段四次调水冰情记录及冰期通水运行日报,冰期调水可划分为以下五个阶段。

(1) 冰期目标水位生成阶段(达成目标水位阶段)。

经统计,该阶段一般发生在12月上旬至12月中旬,气温逐渐降低,冰期即将来临。为实现冰期的通水流量,此阶段需要调高水位,以便后期成型冰盖具有一定的高度,使得冰盖下的空间仍能满足供水需求。

(2) 流冰阶段。

该阶段一般发生在12月中旬至12月下旬,气温和水温进一步降低,水中开始出现一定浓度的冰花、冰屑、冰片、冰块。在此期间调度部门继续保持向北京输水,但应密切注意

流速流态的变化,并采取措施以保证冰盖的尽快形成。

(3) 冰盖形成阶段。

该阶段一般发生在12月下旬至次年1月上旬。随着气温继续下降,总干渠由流冰逐渐形成稳定的冰盖。

(4) 冰盖下输水阶段。

该阶段一般发生在次年1月中旬至次年2月中旬,已形成具有一定厚度的冰盖,冰盖稳定性好。该阶段输水流量加大到冰盖输水目标流量后,以恒定流量供水,并设法保持渠道水位基本稳定。

(5) 融冰阶段。

该阶段一般发生在次年2月中旬至3月上旬,天气转暖,冰盖逐渐融化。在此期间继续保持向北京供水,应注意调整各闸段流速,防止冰塞、冰坝的出现。

2 各输水渠段冰情时空分布

经过对四次通水日报进行统计,结果见表1、图1,可以发现各次调水中各渠段的冰期发展在时间上稍有差异,同一时刻不同渠段的融冻状态呈现复合共存的状态。

从表1可以看出,四次冰期调水各闸段进入冻融阶段的时间稍有差异,这主要与当年的气温分布有关。

表1 冰期各阶段持续时长统计

Tab.1 Statistics of duration time of each phase during the ice period

调水次序	进入流冰期 月-日	融冰结束 月-日	持续时长/d			
			流冰期	冰盖形成阶段	冰盖下输水阶段	融冰期
第一次调水	12-11	02-23	11~17	7~9	29	22
第二次调水	12-16	02-28	5~14	14~17	19	24
第三次调水	12-17	03-01	20~38	2~10	8~25	19
第四次调水	12-18	03-10	-	3~8	51	22

从图1可以看出,第四次调水冰盖形成最快,冰盖下输水时间最长。第二次调水冰盖形成时间较长,第三次调水流冰期较长,需严密注视冰期冰情。四次调水融冰期均需20d左右。

3 冰期调水主要控制因子

冰期调水运行期间,为使流冰阶段、冰盖形成和冰盖下输水等流态正常运行,防止冰塞、冰坝及其他破坏性冰害发生,根据以往冰期输水经验,京石段调水的主要控制因子应

包括水位、流量、流态。

3.1 水位

为尽量减小冰期调度的不利影响,缩短冰盖形成时间,保障冰盖下输水的安全性,冰期水位变动幅度越小越好,同时考虑到冰期入京水量的需求,在冰盖形成前,水位应抬升至冰期目标水位。四次冰期调水运行总干渠沿线各控制闸冰期的目标水位见表2。根据供水计划12月上旬开始逐步将总干渠明渠段水位抬升至冰期目标水位。在冰期输水运行中,应使目标水位基本保持不变。

表2 各控制闸冰期目标水位

Tab.2 The target level of each control gate during the ice period

节制闸名称	桩号	冰期目标水位/m			
		第一次调水	第二次调水	第三次调水	第四次调水
磁河节制闸	31+695	73.66	73.66	73.66	73.66
沙河北节制闸	47+142	71.46	71.46	71.46	71.46
唐河节制闸	75+929	69.61	69.61	69.61	69.61
放水河节制闸	101+626	68.05	69.24	69.24	69.24
蒲阳河节制闸	114+824	67.00	67.00	67.14	67.14
岗头节制闸	141+922	65.72	65.20	65.30	65.30
北易水节制闸	187+392	62.84	62.55	62.55	62.55
坟庄河节制闸	202+097	61.20	61.30	61.36	61.36
北拒马河节制闸	227+470	60.30	60.30	60.30	60.30

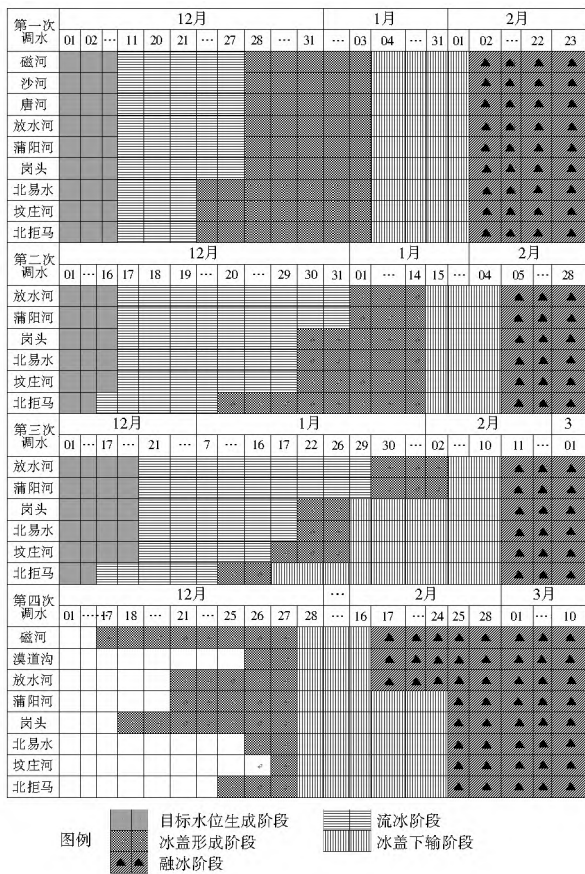


图 1 冰期发展阶段过渡图

Fig. 1 Transition diagram of development phase during the ice period

3.2 流量

低流速、小流量有利于冰盖的形成,因此冰盖形成期间,应尽量减小流速,同时控制进、出流量不变;冰盖形成后逐渐加大输水流量至目标流量,之后尽量以恒定流量供水;进入融冰阶段后,入总干渠流量应保持冰盖输水流量不变,各渠道融冰增加的水量应通过调节控制闸闸门开度往下游渠段输送。由于冰期入总干渠流量为 11~15 m³/s,北京实际受水流量为 8~14 m³/s。目标流量需要在进入冰期前调整到位,并保持不变。

3.3 流态

各渠段的冰期运行流态主要通过佛汝德数和流速来控制。参考以往成功的调水经验^[8, 12, 18-20],本次调水采用了更为严格的控制,渠道水流流速一般控制在 0.30 m/s 以下;渠道内水流的佛汝德数控制在 0.06 以下,其中建筑物进口收缩断面的佛汝德数控制在 0.08 以下;渠道水深控制在 2.0 m 以上;倒虹吸进口与临时埋管进口淹没深度在 0.2 m 以上。

4 冰期调度规律分析

4.1 流冰阶段

进入冰期后,渠道内逐步产生冰屑、冰花、冰片、冰块等流冰,流冰漂浮于水上,少量的流冰对建筑物及渠道的输水能力影响较小,当水内流冰达到一定密度时,极易在闸墩、涵洞、渡槽、倒虹吸等建筑物的入口处以及狭窄渠段及转弯处堆积下潜,使得过水断面减小,水位抬高,甚至形成冰塞,危及渠道输水安全。因此流冰期不仅要为冰盖形成创造条件,

通过人工干扰措施尽量缩短流冰期的时间,控制水流含冰量,还要防止冰塞和危及渠道及其建筑物安全的一切危害。

此阶段流态控制主要要求低流速、按目标水位运行,同时流量满足需水要求。经统计,各次调水过程中位于下游端的北拒马河的流速最大,其中第三次调水中达到 0.353 m/s,其余闸段均小于 0.3 m/s,佛汝德数均小于 0.06,大部分闸段的佛汝德数小于 0.03,很好地满足了控制条件的要求。

由于京石段输水渠道较长,渠段较多,流冰阶段的出现时间存在差异,有从南向北随气温变化的特点:位于上游的放水河闸段进入流冰阶段时间较晚,位于下游闸段的北拒马进入流冰阶段时间较早,且各闸段各年进入流冰期的时间各有不同。为准确说明流冰阶段各闸段的控制因子变化特点,选取四次均参与调水的上下游代表闸段——放水河闸段和北拒马闸段的水位流量进行分析。

由典型闸门的水位及流速变动图(图 2、图 3)可以看出,水位波动范围在目标水位上下 0.50 m 范围内;第一次调水和第二次调水的渠段水位变化幅度比较大,主要是因为流冰期初期水位尚未调整至目标水位;第三次调水调水时水位略高于目标水位,但每日水位变化幅度比较小,整体趋势比较平稳。由流速变动情况可以发现,位于上游的放水河流速较低,波动幅度较小,位于下游的北拒马河闸段流速相对较高,第三次调水流速均高于 0.3 m/s(控制流速),但所在范围仍属于安全范围。

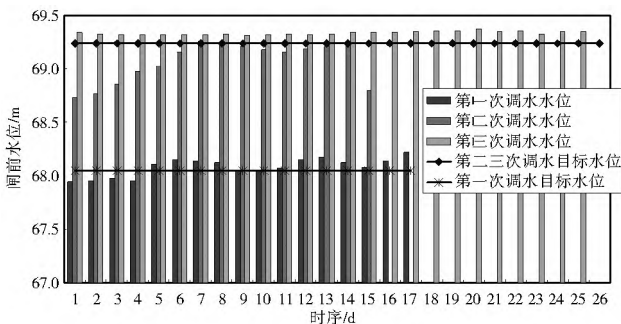


图 2 放水河闸段流冰期闸前水位变动

Fig. 2 Variation process of water level in the upstream of Fangshuhe control gate

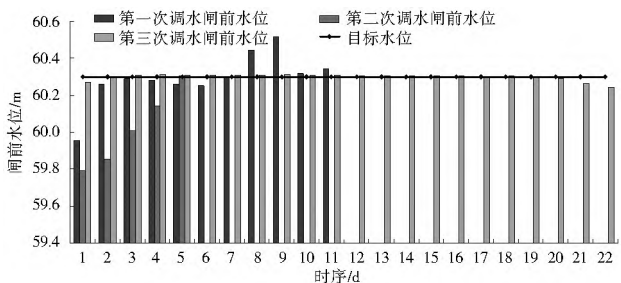


图 3 北拒马河闸段流冰期闸前水位变动

Fig. 3 Variation process of water level in the upstream of Beijuma control gate

综上所述,流冰期闸前的水流速度整体处于低速状态,且变化幅度较小,尤其是流冰期初期更为明显,流冰期后期,冰盖已基本形成,流速有提升的趋势。随着通水次数的增多,通水经验的逐渐丰富,第三次流冰期调水过程中的水位变幅总体明显变小,除蒲阳河、放水河外,其余闸段水位变幅

均未超过 7 cm。

4.2 冰盖形成阶段

京石段临时通水工程具有水位高、断面大、流速低等特点,调度中采用动水形成冰盖方式。一般在寒潮到来期间,控制渠道内水流速度,使其满足结冰的范围要求,流冰就会在拦冰索前堆积且不下潜,拦冰索前的渠道断面首先生成冰盖,并逐渐向上游推进,形成稳定的具有一定厚度的冰盖。

4.2.1 京石段冰盖形成阶段调水控制条件

结合工程具体情况,京石段动水形成冰盖期间水流控制以控制水深、流速流态为主,整体控制条件为:

- (1) 输水渠道最小水深大于 2.0 m;
- (2) 渠道输水流速不大于 0.3 m/s;
- (3) 渠道水流佛汝德数不大于 0.06;
- (4) 尽量保持渠道冰盖的稳定性。

在冰盖形成过程中,运行调度仍按闸前常水位控制,当闸下水位发生变化时,通过调整闸门开度保持输水流量和节制闸上游水位不变。形成冰盖期间,应尽量控制进、出流量不变。若必须加大输水流量时,待冰盖厚度达到 15 cm 以上后,可缓慢加大输水流量,增加流量每天不能超过 2 m³/s。

4.2.2 水位流态控制情况

在以往冰期调水实例中,刘家峡、盐锅峡河段临界佛汝德数定为 0.09,引黄济青工程规定冰期调水水流的佛汝德数小于 0.08^[12,18-19],京密引水工程提出控制佛汝德数小于 0.09^[20]。本次研究的京石段在冰盖形成过程中控制佛汝德数小于 0.06,从冰期调度的角度来讲,会更为安全,冰盖形成时间更短。经统计,京石段冰盖形成阶段的各次调水过程中位于下游段的北拒马河的流速最大,其中第三次调水中达到 0.350 m/s,其余闸段均小于 0.3 m/s,佛汝德数均小于 0.06,很好地满足了流态控制要求。

由于实际运行期间,冰盖厚度、冰盖糙率均在不断变化。因此,即使控制闸门开度不变、输水流量不变,闸前和闸后的水位仍会有一定的波动。引黄济青工程冬季冰盖下输水调度时,水位按目标水位控制,且明确要求水位上浮不超过 10 cm,下浮不超过 5 cm。京石段冰期冰盖形成阶段的调水水位控制与其相同,调度过程中应密切关注每日 10 时与 17 时的水位变化,通过闸门适当调节,保持上游水位和过闸流量基本稳定。经统计分析,四次调水各闸门的闸前水位偏离目标水位大部分在 0.2 m 范围内,蒲阳河闸前水位普遍较高。在以后的调度过程中,建议密切关注蒲阳河水位变动情况。

纵观四次调水数据,第四次冰盖下输水的水位震荡最为平缓,除放水河闸段外,其余各闸门水位变幅均有逐渐变小趋势。

第四次冰期调水中北拒马闸段冰盖形成时间最短,第三次冰期调水时间次之,冰盖形成时间短,一方面受当年低气温影响,一方面与低流速、低佛汝德数有关,即与调度控制有关。第二次调水冰盖形成时间最长,且其水位变动幅度最大,水位变动过于频繁,则不利于冰盖形成。总体来看,在冰盖形成时期,闸前水位变动非常小,在目标水位附近震荡,上浮幅度未超过 10 cm,下浮幅度大多数时间小于 5 cm,仅第二次调水中个别时序下浮较大。

4.2.3 冰盖下调水阶段

冰盖形成后,渠道过水面积减小,湿周增大,水力半径减小,加之冰盖底面糙率的影响,水流所受阻力较封冻前成倍增加,致使渠道过流能力减小,如果控制不当,极有可能导致水位骤升、水流漫溢,甚至引发冰塞、冰坝,损毁水工建筑物等灾害。因此冰盖的稳定性是冰盖下安全输水的前提,该阶段输水不容许有剧烈的流量与水位波动。在冰盖形成且输水流量加大到冰盖输水目标流量后,应以恒定流量供水,并设法控制水流流态。

经统计,四次调水各闸门的闸前水位偏离目标水位大部分在 0.2 m 范围内,前三次调水最大偏离值均发生在蒲阳河。各次调水过程中北拒马河的流速最大,最大流速为 0.351 m/s,其余闸段均小于 0.3 m/s,佛汝德数整体较小,均小于 0.06,能很好的满足控制条件要求。放水河闸段流速一直处于低速状态,四次调水流速均小于 0.2 m/s,北拒马闸段的第二次、第三次调水流速超过目标流速,控制流速在 0.35 m/s 范围内,其余两次调水流速均控制在 0.3 m/s 范围内,满足冰期调水控制条件。

4.2.4 融冰阶段

由于气候原因,京石段输水干渠的上游渠段首先进入融冰阶段,下游渠段进入融冰阶段较晚。此阶段冰隙加大,流冰增加,应注意冰塞、冰坝的形成。进入融冰阶段后,总干渠入流量仍保持冰盖期输水流量不变,由于渠道融冰而增加的水量通过调节闸门开度输移至下游渠段。各控制闸闸前水位逐渐由冰期目标水位减至非冰期水位。为保证融冰期的安全运行,各退水闸应密切关注冰期,做好退水准备。

5 小结

(1) 京石段经过四次冰期调水,未发生严重的冰塞冰坝以及其他冰冻灾害,这四次冰期输水调度方法是合理可行的,控制因子范围的确定也有推广价值。

(2) 四次冰期调水的流速、流态基本上满足控制条件,水位偏离目标水位的幅度未能很好的控制在控制目标(10 cm)范围内,但大多数时间能控制在 20 cm 范围内,偶有个别超过 20 cm 的情况,尤其是流冰期初期闸前水位距目标水位差距一般较大。

(3) 整体来说,四次冰期调水以第四次最为理想,其冰盖形成时间短,冰盖下输水历时长,水位变幅小;第二次调水冰盖形成时间长,水位变幅大,第三次调水流冰阶段较长,这两种情况均易产生冰害;四次调水融冰期均需 20 d 左右。

(4) 四次冰期调水过程中,蒲阳河闸前水位普遍偏离目标水位较高,在以后的调度过程中,建议密切关注蒲阳河水位变动情况。

参考文献(References):

- [1] Jueyi Sui, Bryan W Karney, Zhaochu Sun, et al. Field in vestigation of Frazil Jam evolution: A case study[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2002, 128(8): 781-787.
- [2] Hung Tao Shen, De Sheng Wang. Under cover transport and accumulation of Frazil Granules[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1995, 121(2): 184-195.

- [3] A M Wasantha Lal, Hung Tao Shen. Mathematical model for river ice processes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1991, 117(7): 851-867.
- [4] 张学成, 可素娟, 潘启民, 等. 黄河冰盖厚度演变数学模型[J]. 冰川冻土, 2002, 5(2): 203-205. (ZHANG Xue cheng, KE Sujuan, PAN Qimin et al. Mathematical modeling for the evolution of the thickness of the Yellow River Ice[J]. Journal of Glaciology and Geocryology. 2002, 5(2): 203-205. (in Chinese))
- [5] 茅泽育, 吴剑疆, 张磊, 等. 天然河道冰塞演变发展的数值模拟[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 700-705. (MAO Zeyu, WU Jianjiang, ZHANG Lei et al. The numerical simulation for the evolution of the ice jam in natural river[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(6): 700-705. (in Chinese))
- [6] 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. (in Chinese) (DONG Yaohua, YANG Guolu. The observation of Daqing River and analysis on ice calculation of the middle route of the South to North Water Diversion[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, 16(6): 13-17. (in Chinese))
- [7] 张成, 王开. 冰期输水研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(6): 59-63. (ZHANG Cheng, WANG Kai. The relational research and experience of water transfer during freezing period[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006, 4(6): 59-63. (in Chinese))
- [8] 颜丙池. 南水北调冰期输水原型观测与研究[J]. 河北水利水电技术, 2002, 2. (YAN Bingchi. Study and prototype observation of South to North Water Diversion in Ice Period[J]. Water Resources and Hydropower Engineering of Hebei, 2002, 2. (in Chinese))
- [9] 严增才, 吴新玲. 南水北调中线工程冰期输水原型观测与冰情分析[J]. 河北水利, 2008, 4. (YAN Zengcai, WU Xinling. Prototype observation and analysis on ice situation for the middle route of the South to North Water Diversion during ice period[J]. Hebei Water Resources, 2008, 4. (in Chinese))
- [10] 赵嘉诚, 韩黎明, 王术国. 浅议南水北调中线京石段工程冰期输水技术[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(5): 39-39. (ZHAO Jiacheng, HAN Liming, WANG Shuguo. Technologies of operation on Beijing-Shijiazhuang Section of middle route project of South to North Water Diversion in ice period[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(5): 39-39. (in Chinese))
- [11] 范北林, 张细兵, 蔺秋生. 南水北调中线工程冰期输水冰情及措施研究[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(1): 66-69. (FAN Beilin, ZHANG Xibing, LIN Qiusheng. Ice situation of the Middle Route of the South to North Water Diversion Project and ice danger prevention measures[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(1): 66-69. (in Chinese))
- [12] 穆祥鹏, 陈文学, 崔巍. 南水北调中线干渠输水能力研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 118-122. (MU Xiangpeng, CHEN Wengxue, CUI Wei. Study on water diversion capacity in the Middle Route of the South to North Water Transfer Project in ice period[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6): 118-122. (in Chinese))
- [13] 穆祥鹏, 陈文学, 崔巍, 等. 南水北调中线工程冰期输水特性研究[J]. 水利学报, 2011, 42(11): 1295-1301. (MU Xiangpeng, CHEN Wengxue, CUI Wei, et al. Study on the characteristics of flow in Middle Route of South to North Water Transfer Project during freezing period[J]. Journal of hydraulic engineering, 2011, 42(11): 1295-1301. (in Chinese))
- [14] 穆祥鹏, 陈文学, 崔巍. 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(1): 8-13. (MU Xiangpeng, CHEN Wengxue, CUI Wei. 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(1): 8-13. (in Chinese))
- [15] 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 Xinlei, YANG Kailin, 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))
- [16] 王涛, 杨开林. 神经网络算法在南水北调冰期输水中的应用[J]. 水利学报, 2009, 40(11): 1403-1408. (WANG Tao, YANG Kailin. Ice forecast by artificial neural networks in the Middle Route of the South to North Water Diversion Project[J]. Journal of hydraulic engineering, 2009, 40(11): 1403-1408. (in Chinese))
- [17] 刘国强, 闫闰博, 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(1): 34-40. (LIU Guoqiang, YAN Runbo, WANG Changde, et al. Study of transition mode for ice conformation mode of long distance canal system[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(1): 34-40. (in Chinese))
- [18] 杨开林, 王涛, 郭新蕾, 等. 南水北调中线冰期输水安全调度分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 1-4. (YANG Kailin, WANG Tao, GUO Xinlei, et al. Safety regulations of water conveyance in the Middle Route of South to North Water Diversion Project in Ice Period[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(2): 1-4. (in Chinese))
- [19] 王大伟, 徐茂岭, 于洁, 等. 冬季冰盖下输水渠道的断面设计[A]. 第二届全国水力学与水利信息学学术大会论文集[C]. 成都, 2005: 145-149. (WANG Dawei, XU Maoling, YU Jie et al. The canal section design for water diversion under ice cover in winter[A]. The Second National Hydraulics and Information of Hydraulic Engineering Academic Publications[C]. Cheng Du, 2005: 145-149. (in Chinese))
- [20] 李善增, 程天金, 李为民. 明渠冰盖输水观测研究[A]. 第一届全国冰工程学术会议论文集[C]. 山西: 中国水利学会水力学专业委员会, 1992: 57-64. (LI Shanzeng, CHENG Tianjin, LI Weimin. Study on observation of water diversion under ice cover in open canal[A]. The First National Ice Engineering Academic Publications[C]. Shan Xi: Professional Committee of Chinese Hydraulic Engineering Society, 1992: 57-64. (in Chinese))