

南水北调中线干渠冰期输水冰情分析及冰害防治措施

刘艺鹏¹ 张新政²

1. 南水北调工程服务有限公司 河南 郑州 450000

2. 南水北调中线工程保安服务有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 为保障南水北调中线干渠冰期输水安全, 本文针对中线干渠冰期输水冰情及冰害防治开展研究。阐述了干渠工程特征、冰期水文气象条件及冰情演变规律, 分析了冰情监测体系构建与数据处理方法, 基于监测数据总结冰情时空分异与阶段性特征; 明确主要冰害类型及成因, 建立多维度风险评估体系; 最后提出物理防治与运行调控相结合的综合防治措施。研究成果为中线干渠冰期输水安全保障提供科学依据, 对提升跨流域调水工程冰期运行管理水平具有重要实践意义。

关键词: 南水北调中线; 冰期输水; 冰情分析; 冰害防治

引言: 南水北调中线工程是我国水资源优化配置的核心工程, 冰期输水安全直接关系到沿线城市供水保障与工程稳定运行。北方寒冷地区冬季低温易引发冰塞冰坝、冰盖挤压等冰害, 威胁渠道结构安全与输水功能。当前冰期输水管理仍面临冰情预判精准度不足、防治措施针对性有待提升等问题。基于此, 本文系统开展中线干渠冰情分析与冰害防治研究, 通过梳理冰情演变规律、优化监测与防治体系, 为破解冰期输水安全难题提供技术支撑, 助力工程长效稳定运行。

1 南水北调中线干渠冰期输水冰情概述

1.1 中线干渠工程基本特征

南水北调中线干渠是我国重大跨流域调水工程的核心组成部分, 工程线路呈南北走向, 途经多个气候过渡带, 总长度长、覆盖范围广。干渠以明渠输水为主要方式, 渠道断面多采用梯形或矩形设计, 配套有节制闸、退水闸、渡槽、隧洞等各类水工建筑物, 形成完整的输水系统。工程设计充分考虑地形地貌差异, 渠底高程沿输水方向逐步降低, 依靠重力实现水流输送。干渠沿线地质条件复杂, 涉及粉质壤土、砂壤土等多种土层, 部分河段穿越冻土区, 对冰期输水的工程稳定性提出了较高要求。

1.2 冰期输水水文气象条件与运行目标

中线干渠冰期主要受北方寒冷气候影响, 冰期持续时间随纬度升高逐步延长, 期间气温多处于 0°C 以下, 极端低温天气频发, 风速、日照等气象因素直接影响冰情发展。水文方面, 冰期输水流量受水源地来水情况和受水区需水要求调控, 水流流速相对平缓, 水位波动幅度较小。冰期输水核心运行目标是保障输水安全稳定, 在防范冰害风险的前提下, 满足沿线城市生活用水、工业

用水及生态补水需求, 同时确保水工建筑物完好, 避免因冰情引发工程险情, 维持输水系统的正常功能。

1.3 中线干渠冰情形成机理与演变规律

中线干渠冰情的形成与气温、水流条件、渠道边界条件等多种因素密切相关, 当气温持续低于 0°C 时, 渠水表层热量不断散失, 水温降至冰点后逐步形成冰盖, 进而发展为完整冰期过程。冰情演变呈现明显的阶段性特征, 初始阶段以表层薄冰形成为主, 随低温持续, 冰盖厚度逐步增加; 中期冰盖相对稳定, 内部冰体结构不断变化; 后期随气温回升, 冰盖开始消融、破碎, 进入流冰阶段。不同河段因水文气象条件、工程特征差异, 冰情演变速度、冰盖厚度及流冰强度存在显著差异, 整体演变过程受气候波动和运行调控措施的双重影响, 呈现出规律性与复杂性并存的特点^[1]。

2 南水北调中线干渠冰情监测与特征分析

2.1 中线干渠冰情监测体系与数据处理

南水北调中线干渠冰情监测体系以保障冰期输水安全为核心, 构建全链条、多维度监测网络。(1) 监测体系构成上, 涵盖气象、水文、冰情三大核心模块, 气象监测聚焦气温、风速、日照等关键要素, 水文监测重点跟踪流量、水位、水温变化, 冰情监测则针对冰厚、冰盖完整性、流冰密度等核心指标, 实现对冰情形成、发展、消融全过程的动态覆盖。(2) 监测部署结合干渠地形地貌与冰情风险分布, 在重点闸站、弯道、浅滩等关键河段加密监测点位, 采用自动化传感器与人工巡查相结合的方式, 提升监测的时效性与准确性。(3) 数据处理环节, 先通过异常值剔除、缺失值补全完成数据校验, 再采用标准化处理方法统一数据格式, 最后借助统计分析工具提炼核心信息, 为冰情特征分析奠定数据基础。

2.2 基于监测数据的中线干渠冰情特征分析

依托监测数据,中线干渠冰情特征呈现显著的时空分异与阶段性规律。(1)时间维度上,冰情演变可划分为初冰、封冻、融冰三个阶段,初冰阶段冰厚增长缓慢,封冻阶段冰盖厚度趋于稳定且达到峰值,融冰阶段伴随流冰现象,各阶段持续时长受区域气象条件调控;(2)空间维度上,高纬度河段冰期更长、冰盖更厚,弯道及狭窄河段易出现流冰堆积,而闸站附近因水流扰动,冰情演变节奏与平直河段存在差异;(3)关键特征指标分析显示,冰厚与低温持续时长呈正相关,流冰强度与流量变化密切相关,这些特征为精准预判冰情发展趋势、制定针对性冰害防治措施提供了核心依据。通过对监测数据的系统分析,可清晰掌握不同工况下冰情的演变规律,为冰期输水运行调控提供科学支撑^[2]。

3 南水北调中线干渠主要冰害类型与风险评估

3.1 中线干渠主要冰害类型及成因

南水北调中线干渠冰期输水过程中,主要冰害类型受气候条件、水流状态及工程结构特征共同影响,核心类型包括冰塞冰坝、冰盖挤压破坏及流冰撞击危害。冰塞冰坝多形成于弯道、闸前、浅滩等水流平缓或断面突变河段,低温环境下流冰持续堆积封堵渠道,导致水位壅高,威胁渠道堤岸安全;冰盖挤压破坏源于气温骤变引发的冰盖热胀冷缩,或水流扰动产生的冰盖应力集中,易造成冰盖开裂、隆起,进而损坏渠道衬砌结构;流冰撞击危害主要发生在融冰期,破碎冰体随水流运动,对闸门将、渡槽进出口等水工建筑物产生冲击,长期作用下会加剧结构磨损或损坏。

3.2 中线干渠冰害风险评估核心内容

冰害风险评估以保障输水安全为核心,通过多维度指标体系构建与科学评估方法应用,实现风险等级划分与精准防控。评估过程首先明确风险评估指标,涵盖气象指标(极端低温、低温持续时长)、水文指标(流量、水位变幅)、工程指标(渠道断面形式、建筑物类型)及冰情指标(冰厚、流冰密度);其次采用定性与定量结合的评估方法,整合监测数据与历史冰害案例,建立风险评估模型;最终依据评估结果划分高、中、低风险河段,明确各风险等级的防控重点,为后续针对性制定冰害防治措施提供科学依据,有效提升冰期输水工程安全保障能力。同时要纳入风险动态监测模块,结合实时冰情数据更新评估结果,强化风险预警时效性;同步开展不同防控措施的成本效益分析,优化冰害治理方案的资源配置效率^[3]。

4 南水北调中线干渠冰害防治措施

4.1 物理防治冰害技术措施

4.1.1 保温防冻措施设计与应用

保温防冻措施核心目标为减少渠水热量散失、延缓或阻止冰体形成发展,要结合中线干渠不同河段气候条件与工程特征针对性设计。(1)渠道表层保温:采用柔性保温覆盖材料铺设水面,材料需满足耐低温、抗水流冲击、环保且易铺设回收要求,铺设范围优先覆盖浅滩河段、闸前缓流区域及高纬度寒冷河段;(2)衬砌结构防冻:增设导热系数低、抗压强度高的复合型保温层,可铺设于衬砌层外侧或内侧,做好保温层与周边结构的衔接处理,避免出现保温薄弱区域;(3)特殊建筑物防护:渡槽、涵洞等采用外包保温层结合密封防渗的双重防护措施,减少结构热量传导,防止冰体附着堆积;(4)应用管理:结合冰期气象预报提前规划铺设时间,确保初冰期前完成全覆盖,建立定期巡查机制,及时修复破损材料,保障保温效果持续稳定。

4.1.2 破冰除冰技术与设备选型

破冰除冰技术需根据冰情类型(封冻冰、流冰)、冰厚及河段特征选择适配方案,核心是高效破除冰体、消除冰塞冰坝隐患。(1)封冻河段破冰:采用机械与人工破冰相结合的方式,设备选型需考量渠道断面尺寸、冰厚及作业安全性,履带式破冰机适用于浅滩及岸边区域,两栖破冰船适用于水深较大的主渠段,运行遵循由浅入深、分段推进原则,避免冰盖大面积坍塌;(2)冰塞冰坝破除:对流冰堆积形成的隐患,采用定向爆破破冰技术,精准定位冰塞冰坝薄弱区域,严格控制爆破药量与范围,防止损伤渠道衬砌及建筑物;(3)设备适配与维护:兼顾设备机动性与适应性,针对弯道、闸站等复杂河段配置小型化、灵活化破冰设备,确保作业无死角;建立定期维护检修机制,冰期来临前完成设备调试与保养,保障低温环境下稳定运行。

4.1.3 导流防冰工程优化布置

导流防冰工程通过优化渠道水流形态、引导冰体有序运动,减少关键河段冰体堆积,降低冰害风险。(1)弯道河段调控:在凹岸侧设置导流墩,其间距、高度及布置角度根据弯道曲率、水流速度精准计算,通过改变水流流向避免流冰漩涡堆积;(2)闸前区域防护:设置前置导流栅,采用耐腐蚀、高强度金属材料制作,栅格间距匹配流冰尺寸,兼顾挡冰与通流功能,外侧增设集冰区域便于后续集中清理;(3)断面突变区域优化:通过渐变段设计减缓水流速度变化,避免水流紊乱引发冰体堆积;(4)排冰设施增设:在合适位置设置排冰闸或溢水槽,排冰闸设于冰塞冰坝易发河段下游侧,通过闸门开

启引导冰体排出；溢冰槽适用于水位壅高风险较高的河段，冰体堆积致水位超预警时，排出表层冰体与部分水流以降低渠道运行压力；工程布置需契合输水系统运行要求，避免影响正常流量，确保与原有工程协调衔接。

4.2 运行调控防治冰害措施

4.2.1 冰期输水流量优化调控策略

冰期输水流量调控以“稳流防冰、适度扰动”为核心原则，通过科学调整流量平衡输水需求与冰害防控关系。(1) 初冰期调控：小幅提升流量利用水流扰动延缓表层薄冰形成，严格控制调整幅度，避免流量突变引发水流紊乱；(2) 封冻期调控：维持稳定中低流量运行，减少水流对冰盖的冲击，防止冰盖破裂产生流冰，同时保障沿线基本用水需求，严控流量调控精度以避免水位大幅波动；(3) 融冰期调控：采用渐进式提升流量策略，推动流冰有序下泄，避免局部堆积形成冰塞，流量提升速度结合融冰速度与气象数据确定，严禁流冰高峰期大幅增流；(4) 调控保障：建立多断面流量联动监测机制，实时掌握各河段流量、水位及冰情变化，动态调整调控方案；结合受水区用水需求预测提前制定流量计划，确保输水安全与供水保障双重目标实现。

4.2.2 水温调控技术与实施路径

水温调控技术通过提升或维持渠水温度抑制冰体形成发展，是主动防控手段。(1) 水源端调控：采用水库深层取水方式提升下泄水温，利用深层水体水温稳定、受外界气温影响小的特性，选取合适取水深度确保干渠进水水温维持在冰点以上，延缓初冰期到来；(2) 沿线辅助调控：在高纬度寒冷河段渠道两侧布置太阳能集热系统，通过热交换装置将热量传递至渠水，提升局部河段水温减少冰体堆积；(3) 调度时序优化：日间气温较高时段适当提升输水流量增加热量积累，夜间低温时段维持低流量运行减少热量散失；(4) 实施保障：建立水温实时监测网络，重点监测水源出口、干渠关键河段及冰情易发区域水温变化，根据数据调整调控强度与范围，确保效果符合预期，同时避免水温骤变影响渠水生态环境。

4.2.3 极端冰情下应急调度方案

应急调度方案以“快速响应、精准防控、保障安全”为核心，针对极端低温、强降雪、冰塞冰坝突发等情况制定针对性措施。(1) 应急准备：建立极端冰情预警机制，整合气象、水文、冰情监测数据构建预警指标体系，明确不同等级预警的启动条件与响应流程；(2) 极端低温应对：接到预警后提前启动保温防冻措施，扩大保温材料铺设范围，同时将输水流量降至安全阈值，减少水流扰动引发的冰害风险；(3) 冰塞冰坝处置：突发事件发生后立即启动破冰除冰应急响应，调度专业设备赶赴现场作业，通过上下游闸门联动调控降低水位壅高幅度，避免堤岸溃决；(4) 供水保障与处置管理：输水系统无法正常运行时，启动应急供水预案，优先保障城市生活用水，通过应急调水、自备水源启用弥补供水缺口；建立统一指挥协调机制，明确部门职责分工，确保信息畅通、措施高效执行；应急处置后做好工程修复与冰情监测，及时评估调度效果并优化后续方案^[4]。

结束语：本文系统完成南水北调中线干渠冰期输水冰情分析与冰害防治措施研究，明确了冰情形成机理与演变规律，构建了科学的冰情监测体系，分析了主要冰害类型及风险等级，提出了物理防治与运行调控协同的综合方案。研究实现了冰情分析与防治措施的精准对接，有效提升了冰期输水安全保障能力。未来可进一步结合智能化监测技术优化冰情预判模型，推动防治措施的精细化与智能化升级，为跨流域调水工程冰期运行管理提供更全面的技术保障。

参考文献：

- [1] 史远.南水北调中线总干渠冰期输水运行的研究[J].水上安全,2025(12):79-81.
- [2] 宋晓雷,胡绍文.寒区水利枢纽冰害特征及防治技术分析[J].中国水利,2021(9):88-91.
- [3] 王静,刘文清.水利枢纽冰害监测与智能控制技术研究[J].水利科学与工程,2023,41(1):76-81.
- [4] 陈晓楠,李景刚,卢明龙,靳燕国.南水北调中线总干渠冰期输水运行实践分析[J].人民长江,2023,54(12):254-259.