基于多源信息融合的黄河河套段总干渠冰凌智能预警方法

秦瑞娟[1]　王　震[1]　尹兆祥[1]　韩晋春[2]

1.内蒙古河套灌区水利发展中心总干渠分中心 内蒙古 巴彦淖尔 015000

2.内蒙古河套灌区水利发展中心总干渠分中心第三枢纽所 内蒙古 巴彦淖尔 015000

【摘　要】：黄河河套段总干渠冬春季受降温回暖、来水过程、渠道断面和闸门运行共同影响，冰凌堆积、卡冰抬水和突发开河会改变输水安全边界。本文分析冰凌预警的多源融合原理，识别气象、水文、冰情和工情数据在状态感知、等级判定、渠道调度中的作用，提出由数据清洗、特征融合、分级发布和反馈修正组成的预警方法。该方法把凌情演变、渠道响应和处置动作放在同一链条中，可减少单一测点误判，使巡查布防、闸门调整和分凌准备获得更清晰的提前依据。

【关键词】：多源信息融合；黄河河套段；总干渠；冰凌预警；渠道调度

DOI:10.12417/2811-0528.26.21.042

引言

黄河内蒙古段封河、开河过程具有明显的时段集中性，河套灌区总干渠又承担引水、分凌和调度衔接任务，凌汛期渠道安全不只取决于某一处水位或某一次巡查结果。冰凌洪水预测受气温、水温、水量、冰层厚度、溃决形式、河道边界和调度方式等因素共同影响，单源监测容易把局部封冻、短时流凌或闸前壅水误判为整体风险。近年黄河防凌调度强调跟踪天气、水情、冰情、工情变化并开展日会商、日调度，预警环节必须把不同来源的观测转化为同一风险判断。

1 多源融合冰凌预警基本原理

多源融合冰凌预警的基本原理，是把影响渠道冰凌演变的气象驱动、水力响应和工程控制状态放入同一判别框架[1]。气象要素提供降温、回暖和风力条件，水文要素反映来水、流速和闸前水面变化，冰情观测记录冰厚、冰盖连续性、堆积位置和开裂形态，工情状态说明闸门开度、渠道过水能力和分凌通道条件。融合方法不是把数据简单相加，而是按时间和断面统一口径，再识别不同来源之间的相互印证与冲突。当持续低温、水面抬升和闸前漂冰同步增强时，风险等级应高于单一气温指标；当变化来自计划调度且冰情观测稳定时，则应降低误报强度。

2 多源信息融合在冰凌预警中的意义

2.1 提高冰情状态感知完整性

总干渠冰凌风险沿渠道纵向分布不均，进水闸、弯道、桥涵、节制闸和低流速渠段的冰情表现差异明显[2]。单一人工巡查能发现局部堆冰，却难以连续把握上游来冰、渠内冰盖和闸前水面之间的变化顺序；单一水位过程能显示壅水，却不能区分冰塞、调度增流或下游顶托。多源信息融合把自动水位、来水过程、气温、现场视频、巡查记录和闸门运行记录合并后，可形成“驱动—响应—现象”的连续链条。预警人员据此识别初生流凌、稳定封冻、局部堆积和开河冲击等阶段，减少漏报和误报。

2.2 优化风险等级判定与响应灵活性

冰凌预警不能固定为单一水位或单一气温判断。黄河河套段总干渠的风险边界受渠道断面、冰厚、闸门开度和上游来水共同影响，同一运行状态在畅流期可能安全，在冰塞形成期却可能逼近渠岸或闸前控制边界。融合判定可把预警判据拆成基础判据、修正判据和触发判据三层：基础判据来自运行经验，修正判据随低温持续、冰厚增长和凌情变化调整，触发判据由现场堆冰、漂冰密度和闸门响应能力确认。这样处理后，预警等级能随凌情演变而升降，不必等到险情显现后才启动处置。

2.3 增强渠道运行可靠性与处置便捷性

总干渠冰凌预警最终要服务渠道运行。多源信息融合把预警等级与闸门控制、分凌通道、巡查布点和应急物资调配相连接，能够让处置动作更早、更具体。黄河开河期通过河套灌区总干渠泄水闸分凌的公开报道表明，分凌运行需要随渠道冰块融化和过水能力变化动态控制，这类调度要求预警结果同时说明风险位置、可承受运行状态和后续变化方向。当某一渠段水面抬升但下游过水条件尚可时，可优先安排巡查清障和闸门微调；当上游来冰、闸前壅水和现场堆积同步增强时，则应提前准备分凌、限流或局部排险。

3 冰凌智能预警的融合方式

3.1 融合气象水文冰情数据识别凌情

凌情识别宜先建立统一的数据时间轴，把气温、风速、来水过程、闸前水面、闸门开度、冰厚、流凌密度和巡查描述按

断面归集[3]。数据进入模型前应剔除明显失真值，例如传感器结冰导致的水位突跳、视频遮挡造成的漂冰误识别、人工记录时间滞后引起的错配。随后按渠道位置建立特征组：进水口重点关注来水和闸前状态，弯道和桥涵重点关注漂冰堆积，开阔直渠重点关注冰盖连续性和冰下过流。机器判别可采用规则树、权重评分或轻量分类模型，但每个输出都要保留可解释变量。

3.2 建立分级模型形成提前预警判据

分级模型应把预警分为关注、警戒、处置和紧急四个层次，每一层对应不同触发条件和运行动作[4]。关注级侧重趋势发现，警戒级要求至少两个来源互相印证，处置级对应渠道过水能力下降、关键断面接近控制边界或巡查确认卡冰，紧急级用于冰塞快速发展或可能影响渠堤安全的状态。分级判据采用“趋势+判据+确认”的组合，避免单点异常即升级，也避免现场确认滞后造成预警过晚。每一次等级变化都应记录触发变量、断面位置和建议动作。判据形成后还应保留人工复核入口，巡查人员可把漂冰堵塞、闸门卡阻、岸坡渗漏等模型难以直接识别的异常写入同一事件记录，使系统判断与现场经验保持一致。多源数据进入预警分级的关系见图 1。



图 1 多源融合冰凌预警流程示意

图 1 把气象要素、水文要素、冰情观测和工情状态放在同一输入端，经数据清洗后进入特征融合，再输出风险分级和预警发布；调度反馈回接到特征融合节点，说明预警方法需要把处置后的水位回落、堆冰消散和误报原因继续用于阈值修正。

3.3 跟踪凌情动态修正预警判据

凌情动态是总干渠冰凌预警中最直接的修正依据。冰盖形成后，渠道阻力增大，同样的运行条件可能带来更高的闸前响应；局部冰塞出现时，异常抬水可能先于明显来水变化；开河期冰块下泄又会造成短时波动。判据修正应以断面历史运行经验为基准，结合当日凌情变化、上游来冰强度和闸门调节幅度进行动态调整。若来水未明显增加而闸前持续抬水，应把冰阻影响作为主要解释；若调度动作导致水面变化，但冰情观测稳定、下游通道顺畅，则不宜机械升级。

3.4 按凌情场景联动调度提升预警适配度

预警适配度取决于等级能否转化为合适的调度场景。封冻初期重点是控制流速突变，减少冰盖破碎和局部堆积；稳定封冻期重点是保持运行平稳，安排重点断面巡查；开河前后重点是识别上游来冰、闸前壅水和下游承泄能力之间的矛盾。多源融合结果应把场景对应到运行动作：关注级增加观测频次，警戒级开展断面巡查和闸门预置，处置级启动分段调度和人员布防，紧急级联动抢险和下游告警。调度反馈再回写模型，使判据逐步贴合总干渠凌情节奏。对跨闸段联动场景，还应明确上下游通报顺序，防止单个断面的处置动作改变相邻渠段的冰水组合状态。

4 结语

基于多源信息融合的黄河河套段总干渠冰凌智能预警方法，应以渠道冰凌形成、发展和开河冲击的连续过程为对象，把气象、水文、冰情观测和工情状态转化为统一判据。其核心不在于堆叠数据来源，而在于识别不同来源之间的因果顺序、相互印证和冲突解释。通过完整感知、动态判据、分级模型和调度反馈，预警结果能够从单点报警转向断面定位、趋势判断和处置建议。后续运行中，还应持续积累闸门调度、分凌过程、渠道响应和现场冰情记录，使判据修正更贴合不同渠段的过水能力与凌情特征。这种方法适合先在重点闸前、弯道和桥涵渠段试运行，再逐步扩展到全线断面。

参考文献：

[1] 冯龙,向志雨,董祥伟,等.基于油液多参数与 RBF 网络多源信息融合的大型装备齿轮传动系统故障诊断方法[J].矿冶,2026,35(4):699-711.

[2] 宋英杰,卢建平.多源信息融合技术在破碎机齿板磨损状态监测与寿命预测中的应用[J].煤矿机械,2026,47(9):195-199.

[3] 朱利忠,张展,焦益军,等.基于多源信息融合的配电设备温度状态监测技术研究[J].信息与电脑,2026,38(16):23-25.

[4] 张玉彦,李文浩,闫玲娣,等.基于多源信息融合的矿山辊磨机故障诊断方法[J].河南理工大学学报(自然科学版),2026,45(5):40-47.