

灌区输配水损失分析与调度运行效率提升研究

倪昌良

新疆维吾尔自治区阿拉尔市第一师水利工程管理服务中心, 新疆 阿拉尔 843300

[摘要] 灌区输配水系统是农业水资源高效利用的关键部分, 渠道输水渗漏、蒸发损失、配水调度效率损失为主要的损失来源。目前灌区存在着工程设施维护不到位、配水计划与用水需求不能很好地对接、监测信息反馈慢、管理机制节水目标缺乏联动等问题。渠道衬砌后渗漏损失可减少 60%~90%, 渠系水利用系数可提高 10% 以上。数字孪生灌区可以达到水量调度和工程运行的精准化、智能化。从完善工程设施与节水改造、改善配水计划及调度管理、加大过程监测和信息化调度、加强运行管理与绩效考评四个途径给出综合性举措, 给灌区水资源高效利用给予参照。

[关键词] 灌区; 输配水损失; 调度运行

DOI: 10.64635/ja.2026.1530

中图分类号: S274

文献标识码: A

Research on Analysis of Water Conveyance and Distribution Losses and Improvement of Dispatching Operation Efficiency in Irrigation Districts

Ni Changliang

Water Conservancy Engineering Management Service Center of the First Division, Alar, Xinjiang 843300, China

Abstract: The water conveyance and distribution system of irrigation districts is a key component for the efficient utilization of agricultural water resources. Canal seepage, evaporation loss, and efficiency loss in water distribution dispatching are the main sources of water loss. At present, irrigation districts still face problems such as inadequate maintenance of engineering facilities, poor connection between water distribution plans and actual water demand, slow feedback of monitoring information, and insufficient linkage between management mechanisms and water-saving goals. After canal lining, seepage loss can be reduced by 60%–90%, and the water utilization coefficient of canal systems can be increased by more than 10%. Digital twin irrigation districts can realize more precise and intelligent water dispatching and engineering operation. Comprehensive measures are proposed from four aspects: improving engineering facilities and water-saving renovation, optimizing water distribution planning and dispatching management, strengthening process monitoring and informatized dispatching, and enhancing operation management and performance evaluation, providing reference for the efficient utilization of water resources in irrigation districts.

Keywords: irrigation district; water conveyance and distribution loss; dispatching operation

引言

灌区是保障国家粮食安全的基础工程, 全国 70% 以上粮食生产靠它来实现。但是传统的灌区普遍存在着灌溉用水效率低下的问题, 2024 年全国农田灌溉水有效利用系数仅为 0.580, 与发达国家 0.7~0.8 的水平还存在较大差距。本灌区位于塔克拉玛干沙漠边缘, 属于典型的暖温带极端大陆性干旱荒漠气候, 多年平均降水量只有 42.4 mm, 而年均蒸发量高达 2044.6 mm, 蒸发量是降水量的 48 倍, 水资源非常宝贵。输配水过程中水量损失大、调度运行效率低, 是造成灌区节水增效的瓶颈。2022 年水利部开始数字孪生灌区先行先试工作, 灌区现代化转型已经上升到国家战略需求。

1 灌区输配水系统运行特征与损失构成

灌区输配水系统由水源工程、渠首枢纽、各级输

配水渠道和田间工程组成, 是层层相接的网络系统, 其运行具有如下特点, 一是供水过程受降水、来水条件的影响, 季节性和年际变幅大; 二是用水需求随作物生育阶段的变化而变化, 表现出明显的周期性波动; 三是渠系水力学过程复杂, 明渠非恒定流有大滞后、强耦合的特点。

灌区输配水损失是由三种原因引起的。一是渠道渗漏损失, 渗漏损失量所占比例比总输水损失大 60% 以上。本灌区渠系基础条件差, 骨干渠道砌护率低, 末级渠系绝大部分是土渠, 渗漏严重。第二, 渠道水面蒸发损失, 在干旱地区灌区比较明显, 年蒸发损失可达输水总量的 3%~8%。本灌区夏季高温干燥, 蒸发损耗不容忽视。第三, 配水调度环节的效率损失, 即由于配水不当造成的弃水、闸门频繁调节产生的水

力振荡损耗、轮灌制度执行不合理造成的供水不均等。

2 灌区输配水损失的主要表现及影响因素

2.1 渠道输水过程中的水量损失

渠道输水损失主要是渗漏,受渠道衬砌方式、土质状况、输水流量、水位变化等综合影响。混凝土衬砌渠道渗漏损失比土渠低 70%~90%,复合土工膜衬砌防渗效果更好^[1]。渠道衬砌后渗漏损失可减少 60%~90%,但是衬砌渠道在运行中仍然存在伸缩缝渗漏、冻胀破坏造成的防渗性能下降等问题。本灌区冬季负温天数约为 75 天,冻胀破坏对渠道衬砌影响较大,运行 10~15 年防渗效果明显下降。输水流量也是重要的影响因素,小流量运行时渗漏损失比例增大,大流量运行时会加重渠床冲刷和侧渗。本灌区处于冲积平原地带,地下水位的季节性变幅较大,部分渠段运行水位高于地下水位,渗漏补给地下水后不能回收利用。

2.2 配水调度环节的效率损失

配水调度效率损失主要表现在三个方面,第一,大多数灌区的经验式管理容易造成配水不均,渠道上下游供水矛盾突出,渠尾实际配水量有时只达到设计流量的 60%~70%。本灌区采用传统的经验调度方式,下游地区在用水高峰期水量不能得到保证。其二,在轮灌制度执行过程中,各级渠道输水时间、流量不能精确匹配,造成水资源在各个干支渠中配水不均,产生弃水浪费,干支渠轮灌组转换期间的弃水量可占单次配水总量的 5%~15%。本灌区渠系复杂,轮灌转换时弃水现象较多。第三,闸门群联合调节时,节制闸和分水闸的联动响应滞后,单闸调节容易造成多米诺式的连锁水力波动,使一些渠段出现超水位或者欠水位的情况。

3 灌区输配水损失与调度运行中存在的问题

3.1 输配水工程设施运行维护不足

灌区骨干工程、田间工程老化失修比较普遍。我国大型灌区骨干渠道砌护率平均为 55%,中型灌区不到 40%。本灌区骨干渠道砌护率低,引水渠、部分干渠仍为土渠断面,量水设施配备不足。部分灌区衬砌渠道由于冻胀、基础不均匀沉降等原因造成破损,防渗功能大幅度降低。本灌区渠道冻胀破坏问题突出,防渗能力逐年下降。工程维护资金投入少,日常巡检、维修保养制度执行不力,小病拖成大病,又加重了长期运行成本。

3.2 配水计划与实际用水需求衔接不畅

灌区配水计划的编制大多依靠历史经验以及作物

种植结构概化数据,缺少动态响应的能力。不同的水文年型下灌溉需求差别很大,而配水计划不能根据年型的变化及时调整^[2]。本灌区配水计划仍然依靠传统的经验,不能对大河来水的变化以及作物需水的动态变化做出反应。由于缺少精确的用水预报,供水调度依靠人工观测水位来决定渠系运行流量,存在着准确度不高、实时性差的问题。本灌区仍然使用人工定时观测的方式进行水情信息的采集,水情信息采集频率低、时效性差。气象预报和作物需水模型耦合的不确定性造成需水预报相对误差一般在 15%~25% 左右,配水计划同实际需水存在系统偏差。

3.3 输配水过程监测与信息反馈滞后

灌区水情监测体系不够完善,全国大中型灌区水情自动监测覆盖率平均约为 30%。本灌区水情自动监测覆盖率很低,信息化建设严重滞后,水量调度主要靠人工经验判断。水情信息的反馈周期较长,调度指令不能根据实时工况进行动态调整。本灌区闸门的控制仍然依靠人工现场启闭,没有建立远程控制系统,应急调度响应能力较差。传统灌区信息采集与调度指令下发耗时 1~2 天,所以调度指令的及时性受到很大的影响。

3.4 调度运行管理机制与节水目标协同性不足

灌区现行管理制度中,节水考核指标和用水效益没有有效的联系。用水量收费制度落实不到位,超定额用水没有经济约束,农业水价一般只占运行维护成本的 60%~70%,水价杠杆对节水的激励作用没有得到充分发挥。灌区管理权责交叉、部门间协调不到位,调度管理专业知识匮乏,基层人员素质良莠不齐,培训体系不健全,综合管理水平有待提高。

4 灌区输配水损失控制与调度运行效率提升措施

4.1 完善输配水工程设施与节水改造

推进灌区骨干渠道和末级渠系的衬砌防渗改造,U 型渠道比梯形渠道抗冻胀、减小水力糙率的效果更好^[3]。针对本灌区干旱蒸发强烈、渠道渗漏严重的问题,首先要对骨干输水通道进行衬砌防渗改造,在冻胀严重的渠段采用 U 型渠道和抗冻胀衬砌结构。对已经修建好的衬砌渠道加强日常养护工作,及时修补伸缩缝破损、冻胀裂缝。配套建设渠系建筑物,在干渠控制断面及重要分水口设置量水设施,实现分水计量到片区、到单元,为精准配水提供数据支持。

4.2 优化灌溉用水计划与水量调度机制

创建多时间尺度的需水预报和配水计划编制体

系，短期用 3 到 5 天滚动周期，中期用旬或者月为尺度，长期用灌溉季节为对象，形成三级衔接的预报、调度、执行链条。根据本灌区水库冬蓄春灌、秋蓄冬灌、夏季低库运行的分期调度模式，建立与水库蓄放水计划相协调的动态配水方案，实现水库调蓄和渠系配水的无缝衔接。根据本灌区渠系错综复杂的特点，应该首先在干渠系统上建立渠—闸动态协同配水模型，然后逐步向支斗渠延伸，形成全渠系协同调度的能力。灌区信息化基础薄弱，短期内不能完全实现智能决策的时候，可以采取离线优化和在线经验调整相结合的方式，逐渐积累数据、优化参数，促使调度方式由经验型向模型辅助型转变。

4.3 强化输配水过程监测与信息化调度

加快灌区水情自动监测系统建设，对水位、流量、闸位等数据实行自动采集并实现远程传输，采集频率不小于每 15min/ 次。本灌区应该在引水干渠、水库进出水口、主要分水枢纽等重要节点上设置自动监测点，逐步实现水情信息的实时采集和远程传输，摆脱完全依靠人工观测的落后局面。建立渠道水力学仿真模型，根据本灌区引水渠道长、水力响应滞后的特点，采用前馈—反馈—解耦集散控制技术，改善闸门群联合调度，有效地抑制了由于单个闸门调节造成的水力振荡。数字孪生灌区把调水优化、输水仿真、智能控制、精准配水、高效用水作为关键技术体系，促使灌区调度由依靠经验来驱动转变为依靠数据、机理以及知识来驱动的范式改变。本灌区可以利用现有的水库调度运行方案以及渠系资料，先建立渠道水力仿真模型和水库—渠系联合调度数字模型。由于信息化水平低，数字孪生的建设要分步进行，近期主要针对关键节点的实时监测，中远期逐步实现全灌区的数字映射和智能决策。

4.4 健全调度运行管理与绩效评价机制

完善灌区用水计量和收费制度，实行按方收费、超用加价的水价制度，建立阶梯式水价体系。本灌区要按照农业水价综合改革的要求，逐步实行精准计量到户、按方收费到田的制度，用经济杠杆来引导用水户自觉节水。健全渠系水利用系数测算方法，建立输配水损失定期评价和公示制度，实行第三方监测评估。严格按照泵站和渠系运行调度规程进行操作，科学制定优化运行调度方案，实行梯级调度来保证工程安全和供水可靠。提出利用多规则协同为基本的水库群多目标全年统一调度模型，用以提高速度、精度和帕累托解质量三个方面的协调统一。根据本灌区水库分期

蓄水运行实际情况，建立水库—渠系联合调度模型，把冬蓄春灌、秋蓄冬灌、夏灌低库运行各个阶段纳入全年统一调度框架中，达到水库调蓄和渠系配水的全局最优。将节水成效作为灌区管理绩效考核指标体系中的一个部分，以渠系水利用系数、灌溉水有效利用系数、配水计划执行率等为主要指标来落实节水责任。加强基层调度管理人员专业技术培训，健全岗位培训体系和持证上岗制度，根据灌区专业知识不丰富的实际情况，定期开展调度规程、水量计算、信息化操作等专项培训，着力提高管理队伍的专业素质和业务能力。建立调度运行考核奖惩制度，把配水计划执行率、供水保证率、渠系水利用系数等主要指标纳入岗位绩效考核范围，促使管理水平不断改善。

表 1 灌区输配水损失控制主要措施与预期效果

措施类别	具体措施	预期效果
工程设施改造	渠道衬砌防渗、渠系建筑物配套	渗漏损失减少 60% ~ 90%
调度模型优化	渠—闸动态协同配水模型、智能算法优化	渗漏损失减少 10.81% ~ 31.15%，渠系水利用系数提升 11.09% ~ 27.66%
信息化调度	水情自动监测、数字孪生灌区建设	调控周期延长至 12.5h，滞后时间增加 3.5h
管理机制完善	水价改革、绩效考核、多目标调度模型	供水保障率提升，节水目标协同性增强

5 结语

灌区输配水损失控制和调度运行效率提高是项系统工程，必须从工程设施、技术手段、管理机制三个方面共同推进。工程上衬砌防渗改造和渠系配套属于减小物理损失的主要途径，技术上水情自动监测，渠道水力仿真以及数字孪生给予精准调度赋予支撑，管理方面水价改革和绩效考核是激发节水内生动力的制度保证。对于位于沙漠边缘、水资源极其匮乏的灌区来说，减少每一点输水损失都有十分重要的生态和经济意义，节水优先的战略意义更加明显。三个层次互相联系，任何一个单一的改善都不能达到系统的最优。目前，以数字孪生、智能算法为代表的最新一代信息技术给灌区精细化管理赋予了新的技术途径。由于灌区信息化基础差、专业人员缺乏，提高路径要采取工

程改造先打基础、监测体系及时跟进、数字技术分步实施的梯次推进方式，在硬件建设的同时加强人才队伍培训和管理机制改革，保证各项措施落到实处。未来应该在传统工程节水措施的基础上，加快数字孪生灌区关键技术的研发和应用，推进灌区调度由经验型向智慧型转变，不断改善水资源的利用效率和供水保障能力。

〔参考文献〕

- [1] 蒋云钟，冶运涛. 数字孪生灌区内涵解析及建设思路与关键技术[J]. 中国水利, 2025(13): 24-33.
- [2] 吴彩丽，白美健，张宝忠，等. 灌区渠道系统输配水能力可行域研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(3): 51-57.
- [3] 栾岚. 青龙山灌区“数字孪生灌区”建设成效与发展研究[J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52(11): 90-93.

作者简介：倪昌良（1971.08—），男，汉族，四川安岳人，大专学历，职称：工程师，研究方向：灌区水利调度运行。