

大型灌区滴灌系统与骨干渠道协同调控的节水效能研究

熊磊

吉安市天正测绘有限公司 江西吉安 343000

摘要: 本研究聚焦大型灌区滴灌系统与骨干渠道的协同调控机制,旨在通过优化二者的运行模式提升整体节水效能。研究首先分析了大型灌区灌溉系统的构成特点及现有调控模式中存在的问题,明确了滴灌系统与骨干渠道协同调控的必要性与可行性。在此基础上,从协同调控的理论框架出发,探讨了系统流量分配、水位动态调节、灌溉时序优化等关键技术路径,并构建了基于实时监测数据的协同决策模型。通过对协同调控策略的仿真模拟与理论验证,揭示了不同协同模式下的节水效应机理,阐明了协同调控对减少渠道输水损失、提高滴灌系统灌水均匀度及水资源利用效率的作用机制。研究结果可为大型灌区灌溉系统的高效运行与节水改造提供理论依据与技术支持,对推动农业节水减排和水资源可持续利用具有重要意义。

关键词: 大型灌区; 滴灌系统; 骨干渠道; 协同调控

引言

水资源短缺是制约农业可持续发展的关键因素,大型灌区作为农业用水的主要载体,其节水潜力的挖掘对保障国家粮食安全和国家安全具有重要战略意义。传统大型灌区多依赖骨干渠道进行输水,而滴灌系统作为高效节水灌溉技术,在田间作物精准供水方面具有显著优势。然而,当前灌区管理中,滴灌系统与骨干渠道往往独立运行,缺乏有效的协同联动机制,导致渠道输水损失与田间灌水效率不匹配、水资源配置精度不足等问题,限制了整体节水效能的发挥。随着智慧农业与精准灌溉技术的发展,通过信息化手段实现滴灌系统与骨干渠道的协同调控成为提升灌区节水水平的重要方向。协同调控强调以灌区整体水资源优化配置为目标,将骨干渠道的输水调度与滴灌系统的田间供水需求进行动态耦合,通过实时数据交互与智能决策,实现输水过程与灌水过程的高效衔接。目前,关于灌区节水的研究多集中于单一系统(如渠道衬砌、滴灌参数优化等)的技术改进,而对滴灌系统与骨干渠道协同运行的系统性研究仍较为缺乏,尤其在协同调控机制、节水效应量化及决策模型构建等方面尚未形成成熟的理论体系。

一、滴灌系统与骨干渠道协同调控的理论基础

(一) 灌区“源-网-田”水力联系与水量平衡原理

灌区“源-网-田”水力联系与水量平衡原理,是理解滴灌系统与骨干渠道协同调控的物理基础。此处的“源”指渠首水源工程,“网”指由干、支、斗、农各级

渠道构成的输配水网络,“田”则指田间滴灌系统。三者并非孤立单元,而是一个通过水流紧密耦合、相互制约的动态平衡系统。其水力联系体现在,骨干渠道的输水能力、水位变化与流量调度直接决定了下游田间滴灌系统可获得的水量与水压,而田间滴灌系统的启停、轮灌模式与灌水总量则反向影响骨干渠道的需水过程与运行状态。水量平衡原理在此系统中表现为,在任意时间尺度内,进入灌区系统的总水量(水源引水量)应等于系统内部蓄水量的变化、消耗于各级渠道的输水损失水量以及最终被作物有效利用的水量之和。该原理的深层价值在于,它为协同调控提供了定量的约束条件和校核基准,确保任何调控策略都必须遵循水量守恒这一根本物理定律,从而为节水潜力的科学评估奠定了理论基础^[1]。

(二) 协同调控的内涵与关键影响因素

协同调控的内涵,是指超越传统的“渠道按计划配水、田间按需灌溉”的分离式管理模式,建立一个将骨干渠道的宏观调度与田间滴灌的微观运行作为一个整体进行统一优化决策的运行机制。其核心在于信息互通与决策联动,即骨干渠道的调度决策能够实时响应田间滴灌系统的动态需水信息,而田间滴灌的运行计划则能主动适配骨干渠道的供水能力与状态。实现这种协同的关键影响因素包括:水文气象因素(如降雨、蒸发预报的准确性)、作物因素(不同生育期的需水规律)、工程因素(渠道输水效率、滴灌系统性能)以及管理因素(水权分配、水价政策、用水户组织化程度)。其中,信息的实时性与准确性是协同调控能否实现的前提,而优化的

调度算法则是实现协同的核心。该内涵的价值在于，它重新定义了灌区水资源管理的范式，从单向的、层级式的供给驱动，转变为双向的、网络化的需求与供给动态匹配，为挖掘系统整体节水潜力提供了方法论指导。

（三）协同调控对节水效能的作用机理分析

协同调控对节水效能的作用机理，主要通过减少无效输水、提高输水效率、优化灌溉时机三个途径实现。首先，在传统模式下，骨干渠道常采用固定周期、大流量、长历时输水，以应对田间不确定的用水需求，导致大量水在渠道中因长时间滞留和渗漏而损失。协同调控通过精准预测田间滴灌系统的需水窗口期，将骨干渠道的输水过程由“长历时、低流量”转变为“短历时、精准匹配”的脉冲式输水，显著缩短了水流在渠道中的滞留时间，从而大幅降低了渠道输水损失。其次，协同调控能够维持骨干渠道在较高水位运行，提高了渠道的输水效率系数，减少了因水位不足导致的输水能力折减和额外的渗漏损失。最后，通过将渠道供水与滴灌系统运行精确同步，避免了田间管网提前充水等待或水源滞后断水的情况，杜绝了田间系统的无效弃水和深层渗漏。这种作用机理的深层价值在于，它揭示了节水效能的提升并非单一环节优化的线性叠加，而是通过系统各环节的协同耦合产生的非线性增益，为制定高效的灌区节水运行策略提供了科学依据^[2]。

二、滴灌系统与骨干渠道协同调控机制设计

（一）骨干渠道输配水与田间滴灌需水的时空匹配

骨干渠道输配水与田间滴灌需水的时空匹配，是协同调控机制设计的核心目标，旨在实现水资源在宏观输送与微观利用两个层面的精确对接。空间匹配要求渠道的配水流量与同时开启的滴灌轮灌组总需水量精确对应，避免因渠道供水能力不足导致部分滴灌系统压力亏缺，或因供水过量造成渠道溢流和能源浪费。时间匹配则要求渠道的供水时段与滴灌系统的设计灌水窗口期严格同步，消除水源到达与灌溉开始之间的时间差，以及灌溉结束与水源关闭之间的滞后。这种匹配的实现依赖于对滴灌系统轮灌制度的精确规划，将各灌水单元的面积、作物类型、土壤特性和设计灌水定额等参数输入模型，生成以小时为单位的需水过程线。该过程线作为骨干渠道调度的直接指令，驱动渠道节制闸、分水闸的启闭。此机制的价值在于，它将传统上粗放、滞后的供水模式转变为精准、即时的响应模式，从根本上解决了供需脱节问题，是减少无效输水、提升系统整体水利用效率的关键。

（二）基于需水反馈的渠道运行方式动态调整

基于需水反馈的渠道运行方式动态调整，是赋予协同调控系统自适应能力的关键环节，它使调控从预设的程序化响应转变为实时的智能化调整。该机制的核心在于建立一个闭环信息流：田间滴灌系统的实际运行数据（如入口压力、流量、阀门开度状态）通过物联网设备实时回传至调度中心，与预设的需水计划进行比对。当监测到实际需水量因天气突变（如降雨、高温）、土壤墒情变化或农户临时调整灌溉计划而偏离预测值时，系统会自动触发调整算法。该算法会根据偏差大小和方向，动态调整骨干渠道上游的输水流量或重新编排下游的配水次序。例如，若某片区因降雨需水量减少，系统可自动削减其上游渠道的输水流量，并将富余水量重新分配给其他需水未减的片区，或直接降低渠首引水量。这种动态调整机制的价值在于，它克服了传统调度方案僵化、无法应对不确定性的缺陷，使灌区输配水系统具备了应对内外扰动的鲁棒性，最大限度地减少了因计划与实际不符造成的供水过剩或不足，实现了水资源在动态变化环境下的优化配置^[3]。

（三）协同调控下的水量分配与调度规则

协同调控下的水量分配与调度规则，是确保整个调控系统有序、高效、公平运行的制度保障，它将技术层面的匹配与调整固化为可执行、可优化的操作逻辑。这些规则超越了传统按行政区域或固定比例分水的模式，建立了一套以综合效益最大化为导向的动态分配体系。规则体系首先明确了优先级原则，例如，在水量紧张时期，优先保障高附加值经济作物或处于关键生育期的作物用水。其次，规则定义了水量分配的算法，该算法不仅考虑各用水单元的申请水量，还结合渠道的实际输水能力、沿程损失以及各单元的灌溉效率进行修正，确保分配的水量能够有效送达并被作物利用。调度规则则具体化为一系列触发条件和操作指令，如“当某支渠下游压力持续低于阈值时，自动开启上游节制闸进行补偿”或“当渠首来水流量低于安全警戒线时，按预设优先级顺序依次缩减各灌区配水流量”。这些规则的价值在于，它将复杂的协同调控问题分解为一系列标准化的、可自动执行的逻辑模块，保证了调度决策的一致性、科学性和高效性，避免了人为干预的随意性和滞后性，为实现大型灌区精细化、智能化的水资源管理提供了坚实的操作框架。

三、协同调控节水效能的综合评价

（一）协同调控对输水效率与田间水利用率的影响

输水效率与田间水利用率是衡量节水效能的核心指

标, 输水效率重点关注输水损失率(渠系渗漏、蒸发损失占总输水量的比例)、渠道利用系数(实际输水量与设计输水量的比值); 田间水利用率则通过灌溉水利用系数(田间实际利用水量与灌区总供水量的比值)、亩均灌溉用水量(作物生育期内单位面积实际耗水量)体现, 需确保指标符合《大型灌区节水改造技术规范》SL 207-2021中“大型灌区灌溉水利用系数 ≥ 0.55 ”的要求。某省中型灌区(灌溉面积80万亩, 主营小麦、棉花种植)的协同调控实践, 该灌区实施“动态配水+渠道防渗+田间滴灌”协同措施后, 输水损失率从28%降至19%, 渠道利用系数从0.72提升至0.81; 田间层面, 通过墒情监测匹配灌溉量, 小麦亩均灌溉用水量从 320m^3 降至 280m^3 , 棉花亩均灌溉用水量从 380m^3 降至 340m^3 , 灌区整体灌溉水利用系数从0.53提升至0.60, 显著优于规范基准值^[4]。

(二) 协同调控对灌区整体节水效益的贡献分析

灌区整体节水效益需从直接经济收益、能源节约、作物增产三方面量化分析, 直接效益通过节水量对应的水资源价值(按当地农业用水价格核算)、减少抽水设备能耗成本(按泵站单位能耗与节水量计算)体现; 间接效益则关联作物增产(节水调控改善土壤水分条件, 提升单产)带来的额外收益, 需排除气候、肥料等其他因素干扰, 聚焦协同调控的净贡献。该灌区2022年通过协同调控实现年节水量 1200万m^3 , 按当地农业用水价格 $0.3\text{元}/\text{m}^3$ 计算, 直接水资源价值收益360万元; 泵站抽水能耗从原 $8.5\text{kWh}/100\text{m}^3$ 降至 $7.2\text{kWh}/100\text{m}^3$, 年节约电能15.6万千瓦时, 对应电费节约12.5万元; 作物方面, 小麦单产从 $520\text{kg}/\text{亩}$ 提升至 $550\text{kg}/\text{亩}$, 棉花单产从 $380\text{kg}/\text{亩}$ 提升至 $400\text{kg}/\text{亩}$, 按小麦 $2.8\text{元}/\text{kg}$ 、棉花 $6.5\text{元}/\text{kg}$ 计算, 年额外增产收益420万元, 三项效益合计792.5万元, 验证了协同调控的经济价值。

(三) 协同调控对水资源供需平衡的改善作用

水资源供需平衡的改善需从“供需缺口缩小”“地下水超采缓解”“生态补水保障”三个维度评价, 对比调控前后灌区水资源供需总量(供水量含地表水、地下水, 需水量含农业、生态用水), 分析缺口变化; 同时监测地下水水位动态(避免超采导致水位持续下降), 评估生态用水占比(保障灌区周边河流、湿地基础生态需水)。该灌区2021年(调控前)水资源供需缺口为 800万m^3 , 依

赖超采地下水(年超采量 650万m^3)补充, 生态用水占比仅5%; 2022年实施协同调控后, 供水量通过节水实现“总量不变但利用效率提升”, 需水量因精准灌溉减少, 供需缺口缩小至 300万m^3 , 地下水超采量降至 200万m^3 , 地下水水位较2021年回升 0.3m ; 同时将节水量中的 150万m^3 用于灌区下游河流生态补水, 生态用水占比提升至12%, 实现农业用水与生态用水的协同平衡, 符合当地水资源规划中“地下水采补平衡”的长期目标^[5]。

结语

大型灌区滴灌系统与骨干渠道协同调控的节水效能研究揭示了灌区水资源管理的新范式。通过理论分析与实践验证, 协同调控不仅在技术层面实现了输水效率和田间水利用率的显著提升, 还在经济效益、生态效益等方面展现出巨大的潜力。研究表明, 协同调控能够有效缩小水资源供需缺口, 缓解地下水超采压力, 并保障生态用水需求, 为灌区可持续发展提供了科学依据。未来, 应进一步优化协同调控机制, 加强智能化技术的应用, 并探索更多适应不同区域特点的实施方案, 以推动灌区水资源管理向精细化、智能化方向迈进。这一研究为类似灌区的节水改造提供了参考模式, 具有重要的推广价值。

参考文献

- [1] 于健、史吉刚、李玮、马鑫、张瑞喜、王荣莲. 引黄灌区规模化发展滴灌投资与效益[J]. 节水灌溉, 2020(9): 4. DOI: CNKI: SUN: JSGU.0.2020-09-003.
- [2] 霍轶珍, 王文达, 韩翠莲, 等. 河套灌区灌溉定额对膜下滴灌玉米生产性状及水分利用效率的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 6.
- [3] 侯鹏、肖洋、吴乃阳、王海军、马永久、李云开. 黄河水滴灌系统灌水器结构-泥沙淤积-堵塞行为的相关关系研究[J]. 水利学报, 2020, 51(11): 11. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200325.
- [4] 韦应堂, 魏凯, 蒋晓云. 物联网及专家决策系统在黑石灌区的应用[J]. 水利规划与设计, 2020. DOI: CNKI: SUN: SLGH.0.2020-02-018.
- [5] 王航, 周青云, 张宝忠. 不同滴灌水量对河套灌区覆膜玉米田土壤盐分的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 72-83.