

干旱区节水灌溉技术效率评估与优化模式构建

徐丹艳

温州市兴海水利建设有限公司 浙江 温州 325000

摘要：围绕干旱区节水灌溉技术效率评估与优化模式构建问题，界定了水利利用效率、灌溉均匀度、能耗产出比及作物水分生产率等效率内涵，构建了涵盖投入、产出与环境层面的评估指标体系。比较了参数化、非参数化与随机前沿分析三种评估方法的适用性及组合策略，识别了自然、技术与管理三类因素对效率的约束机制，定量分解了可控与不可控效率损失。

关键词：节水灌溉技术；效率评估；优化模式构建

引言：干旱区水资源紧缺与农业用水需求之间的矛盾日益突出，节水灌溉技术是缓解这一矛盾的关键手段。然而，不同技术在干旱区的实际效率存在显著差异，技术选择不当或管理缺失会导致效率大幅衰减。系统评估灌溉技术效率并据此构建优化模式，对提升干旱区水分利用水平具有重要意义。围绕节水灌溉技术效率评估与优化模式构建展开研究，旨在为干旱区灌溉系统的科学化提供理论支撑与技术路径。

1 干旱区节水灌溉技术体系与效率评估指标框架

1.1 干旱区主要节水灌溉技术类型及其特征

滴灌通过管道系统把水直接送到作物根部附近，用小流量缓慢渗入土壤，在干旱区一般用于经济价值较高的作物，能减少地表蒸发和深层渗漏。微喷灌以细微水滴形式喷洒到田间，覆盖范围比滴灌大，适合密植作物或需要调节田间小气候的情况。渗灌是把水通过地下埋设的管道或特殊材料引入作物根层，地表损失较小，适合透水性中等的土壤。低压管道输水用管道代替明渠配水，降低输水过程中的蒸发和渗漏损失，适合输水距离较长、地形相对平缓的干旱区。运行参数包括工作压力、流量、灌水定额、灌水周期等，需要根据干旱区的土壤类型、作物需水规律和气候条件来调整。

1.2 灌溉技术效率的内涵界定

水利利用效率指灌溉水从水源到被作物有效利用的程度，反映输水、配水及灌水过程中的水量损失情况，是衡量节水灌溉技术性能的基础维度。灌溉均匀度描述灌溉水分在田块或作物群体间的分布一致性，这一指标高低直接影响作物生长整齐度和单位面积产出水平。能耗产出比将能源消耗量与灌溉效益联系起来，干旱区节水灌溉往往伴随加压供水需求，能耗因素对技术经济可行性的约束作用比较明显^[1]。作物水分生产率表示单位水量所产出的作物经济产量或生物量，能综合反映水分投入

与农业产出之间的转化效率。

1.3 效率评估指标体系构建原则

指标选取的科学性要求每项指标有明确的物理意义或经济含义，能真实反映节水灌溉技术系统中投入与产出之间的数量关系，并有相应的监测或推算依据。可操作性强调，指标所需数据应在干旱区常规生产管理条件下能获取到，指标数量不宜过多，计算方法清晰，便于在不同灌区或田块尺度上推广应用。层次性要求指标体系按技术运行、农业生产、环境效应等不同层面进行分解，避免指标之间的重复和交叉。投入指标包括水量、电能或燃料消耗、劳动力工时以及管材、滴灌带等材料用量，用来表征节水灌溉系统的资源占用程度。产出指标涵盖作物经济产量、产值以及果实外观与内在品质特征，用于评估灌溉效益水平。环境指标重点关注深层渗漏水量及其对地下水资源的影响、土壤盐分累积趋势等负面效应，反映节水灌溉技术长期运行下的生态风险状况。

2 干旱区节水灌溉技术效率评估方法

2.1 参数化评估方法

参数化评估方法用作物系数法确定各生育阶段的作物需水量，再通过水量平衡方程算出灌溉水输入、土壤储水变化与有效耗水之间的数量关系，最后求得单方水产出值。该方法适用于单一节水灌溉技术在某个田块或灌区条件下的效率测算，可以把效率表达为产量与耗水量的比值。其理论框架清楚，所需参数主要是气象数据、土壤水分常数和作物生物学特性，在数据基础较好的区域比较好操作。不过，该方法对输入参数的准确性比较敏感，作物系数取值、土壤水分下限设定、有效降雨量估算方式都会影响效率结果。另外，由于用固定函数形式描述耗水过程，该方法不容易充分反映实际运行中的管理波动和空间差异。

2.2 非参数化评估方法

非参数化评估方法基于线性规划技术构造生产前沿面,不对投入产出之间的函数关系做预先假定,能有效处理多投入与多产出并存时的效率测算问题。该方法将节水灌溉技术效率分解为技术效率、纯技术效率与规模效率三个层次,其中纯技术效率剔除规模因素后考察管理水平的作用,规模效率判断当前灌溉规模是否处于最优区间。超效率模型解决了多个有效决策单元无法精细排序的问题,能对有效率值达到前沿面的技术进行区分^[2]。该方法的优势在于无需设定具体函数形式,避免了因函数误设导致的偏差。

2.3 随机前沿分析方法

随机前沿分析方法把实际灌溉效率与理论前沿效率之间的偏离程度分解为技术无效率项与随机扰动项两个部分,实现对效率损失来源的定量识别。技术无效率项反映的是可控因素造成的效率降低,比如灌溉制度设计不合理、设备性能下降或操作水平较低等。随机扰动项则归因于不可控因素的影响,包括气候条件波动、土壤特性空间变异性以及观测误差等。该方法能对各项影响因素的统计显著性进行检验,明确哪种因素对效率损失起主导作用。该方法的优势在于把随机因素纳入评估框架,降低极端事件或测量误差对效率评价的干扰。

2.4 评估方法的适用性比较与组合策略

不同评估方法在数据需求、模型假设与结果解释方面存在明显差异。参数化方法所需数据量较少且计算简便,适用于单技术类型的快速效率测算,但无法处理多投入多产出关系。非参数化方法无需函数假设,能处理复杂投入产出结构并给出效率分解结果,但对异常值敏感且无法分离随机误差。随机前沿方法可以区分技术无效率与随机误差,适合环境波动较大的区域应用,但需要较大的样本量和可靠的函数设定。综合评估中可采用分阶段组合策略,先利用非参数化方法筛选出效率较低的技术单元,再针对重点单元用随机前沿方法分析效率损失的结构性原因。

3 干旱区节水灌溉技术效率的影响因素与损失识别

3.1 自然因素对效率的约束

土壤质地决定了水分在土体中的运移速率与存储能力。砂性土壤持水空间小,滴灌条件下容易产生深层渗漏;粘性土壤则可能限制水分横向扩散,影响灌溉均匀度。蒸发强度直接影响灌溉水从地表或作物冠层返回大气的速度,高蒸发环境下微喷灌与明渠输水的无效耗水比例明显上升。降雨补给量的多寡及季节分布特征会改变作物实际需水与灌溉供水之间的平衡关系,若灌溉调度没有根据降雨事件及时调整,可能造成水利用效率降

低。地下水位埋深较浅的区域,土壤毛细水上升可为作物提供部分水分补给,但也可能带来盐分累积风险,对渗灌等技术的运行边界形成约束。不同自然因子对各类节水灌溉技术的效率制约程度不一样,评估时需要识别主导性环境约束条件。

3.2 技术因素对效率的影响

设备老化导致管材内壁粗糙度增加、接头密封性下降以及灌水器流量发生漂移,系统运行效率随服役年限延长呈现渐进式衰减趋势。设计参数偏差表现为工作压力与灌水器额定压力不匹配、管径选择不当造成水头损失过大、灌水器间距与土壤扩散能力不协调等,这类偏差从源头上限制了技术效率的发挥^[3]。堵塞频率升高使得部分灌水器出流量减少或完全失效,田间灌水均匀度急剧恶化,局部区域出现供水不足,系统整体效率随之降低。维护水平涉及过滤设备清洗、灌水器更换、管道修复以及系统压力定期检测等环节,维护缺失会使设备性能逐步偏离设计状态,累积性损失很难通过单次调整完全恢复。

3.3 管理因素对效率的作用

灌溉制度制定的合理性表现为灌水定额与灌水间隔是否契合作物不同生育阶段的需水规律,制度偏差会引发水分亏缺或过量灌溉两种后果,都会降低作物水分生产效率。用水户操作规范性涵盖阀门启闭的控制精度、灌水时间的执行准确度以及轮灌组切换的及时性,操作失误会造成水量分配失衡,使实际运行状态偏离方案设计值。信息化管理水平基于土壤墒情监测、气象数据与作物生长信息的综合分析,能为灌水决策提供定量依据,减少经验判断带来的误差。管理因素对效率具有双向调节作用:高水平的系统化管理可以部分弥补技术与自然条件的不足,而粗放管理则可能使先进节水技术的实际效率降至常规水平以下,放大初始设计缺陷的负面影响。

3.4 效率损失的定量识别与归因

依据评估结果,将观测到的节水灌溉技术效率与理论前沿效率之间的差距定义为效率损失总量,通过定量分解方法把这一总量划分为可控因素损失与不可控因素损失两部分。可控因素包括设备维护状况、系统参数校准状态、灌溉制度执行精度以及操作人员熟练程度等可通过管理干预加以改善的方面,这部分损失有降低空间。不可控因素涵盖土壤质地空间变异性、区域蒸发强度、年度降雨波动特征以及地下水位动态变化等外部条件,反映了自然环境对技术效率的上限约束水平。归因结果能够为效率提升措施的制定提供方向性依据,优先干预贡献权重较大的可控因素,可以获得更明显的技术效率

改善成效。

4 干旱区节水灌溉技术优化模式构建

4.1 优化模式构建的目标函数与约束条件

优化模式构建将水分利用效率最大化设为核心目标,该目标函数反映单位灌溉水所转化的作物经济产量或生物量,同时兼顾灌溉均匀度与能耗产出比等次要效率指标的综合协调。水资源总量构成首要约束条件,优化方案下的取水规模不得超过区域可分配的地表水与地下水可利用量的安全阈值。作物需水量约束要求各生育阶段的灌水定额与灌水间隔严格匹配作物的耗水规律,避免水分供应偏离生理需求范围。设备投资约束体现为初始建设成本需限定在可接受的资金占用水平内,不同节水技术的投资强度差异较大。运行成本约束涵盖能源消耗、维护材料更换以及劳动力支出等周期性费用,保证优化模式在预期使用年限内具有经济可持续性。

4.2 基于效率评估结果的技术适配模式

依据效率评估与损失识别的量化结果,可将干旱区灌溉条件划分为不同的主导约束类型,并据此匹配差异化的技术组合模式。自然约束型区域主要受土壤持水能力弱、蒸发强度大或地下水位过高等环境因子限制,适配低能耗渗灌,通过将水分直接输送到作物根系集中层来减少地表蒸发损失,并在浅地下水条件下合理利用毛细上升水。管理约束型区域的核心障碍在于灌溉制度执行偏差与操作规范性不足,适配智能控制滴灌,借助自动化阀门、定时启闭与流量调节功能降低人为操作误差对效率的干扰。技术约束型区域存在设备老化、设计参数偏差或灌水器堵塞频率过高等问题,适配管网改造方案,通过更换关键部件、优化管径配置与增设过滤设施,将系统性能恢复至设计水平。

4.3 多技术耦合的系统优化模式

多技术耦合模式突破单一节水设备优化的局限,强调灌溉技术与农艺措施及水资源调配手段之间的协同关系。灌溉技术层面根据田块尺度、土壤条件与作物类型选择滴灌、微喷灌或渗灌等不同形式的组合应用,在同一灌区内实现分区分类供水。农艺措施层面包括覆盖耕作减少土面蒸发、调亏灌溉控制非关键期耗水以及合理密植优化群体结构,这些措施与灌溉技术配合可进一步提升单位水量的产出效率^[4]。水资源调配层面涉及地表水

与地下水的联合调度、非传统水源的安全利用以及蓄水设施的调节作用,保障灌溉系统的水源供应稳定性。

4.4 优化模式的动态调整机制

优化模式需建立动态调整机制以响应灌溉系统的时变特性,该机制依据季节变化、作物生长阶段与监测反馈数据实施周期性修正。季节变化引起蒸发强度与降雨补给量的波动,旱季需提高灌水频率并适度增加定额,雨季则相应降低供水强度以避免冗余灌溉。作物生长阶段划分为苗期、营养生长期、开花结实期与成熟期,各阶段的需水敏感程度与耗水强度存在明显差异,灌溉参数需按生育进程分段设定。监测反馈数据包括土壤含水量、灌水器工作压力与出流量、气象要素实时值等,通过对比实际运行状态与设计状态的偏差,识别需要调整的关键参数^[5]。动态修正流程按照数据采集、偏差识别、参数调整与效果验证四个环节循环运行,每次修正完成后将更新后的参数作为下一轮运行的基准,形成模式迭代与持续优化的技术路径。

结束语: 干旱区节水灌溉技术效率评估与优化是提升水资源利用水平的关键环节。构建涵盖投入、产出与环境维度的评估指标体系,结合参数化、非参数化与随机前沿分析方法,能够系统识别自然、技术与管理因素对效率的约束机制及损失来源。在此基础上,以水分利用效率最大化为目标,构建基于主导约束的技术适配模式、多技术耦合的系统优化模式及动态调整机制,形成评估驱动优化的技术路径,为干旱区节水灌溉系统的科学化管理与持续改进提供理论支撑。

参考文献:

- [1]刘明涛,罗飞.干旱区节水灌溉技术研究进展[J].中国农村水利水电,2020,(5):1-5.
- [2]张海涛,刘红,张强.节水灌溉技术在干旱区的应用与效果分析[J].农业科技,2021,42(12):123-127.
- [3]干旱区绿洲地下水生态水位阈值研究进展[J].翟家齐;董义阳;祁生林;赵勇;刘宽;朱永楠.水文,2021(01).
- [4]宁夏石嘴山市引黄灌区地下水时空变化特性及影响因素[J].张娜;韩小龙;汤英;张红玲;刘学军.干旱区研究,2020(05).
- [5]马建华.高效节水灌溉技术应用与技术要点分析[J].现代农机,2023,(04):60-62.