

灌溉工程设计与节水效果分析

吴 振 汪庆发 邱乾勇

南京市水利规划设计院股份有限公司 江苏 南京 210000

摘要：本文聚焦灌溉工程设计与节水效果分析。阐述了灌溉工程设计理论基础，涵盖基本原理与节水灌溉技术分类；介绍设计方法与优化，包括流程、关键参数及节水优化措施；构建节水效果评价体系，选取评价指标并介绍评价方法；最后通过北方干旱区与西北半干旱区两个实践案例，验证设计方法的可行性与节水效果，为灌溉工程设计与节水提供理论支持与实践参考。

关键词：灌溉工程；节水设计；水利用效率

引言：水资源短缺是制约农业发展的重要因素，合理设计灌溉工程并实现高效节水至关重要。灌溉工程通过人工干预实现水资源合理分配与高效利用，满足作物水分需求。节水灌溉技术多样，不同技术适用场景与节水特性各异。科学的设计方法与优化措施能提升工程节水性能，而完善的节水效果评价体系可客观评估工程效益。本文将深入探讨灌溉工程设计及节水效果，助力农业可持续发展。

1 灌溉工程设计理论基础

1.1 灌溉工程基本原理

灌溉工程的核心原理是通过人工干预实现水资源的合理分配与高效利用，满足作物全生育期的水分需求，同时维持土壤肥力与生态平衡。其基本原理涵盖水分传输、土壤-作物-大气连续体（SPAC）水分运动规律、作物需水机理三大核心维度。在水分传输方面，需依据流体力学原理设计输水系统，确保水流匀速、稳定输送，减少渗漏与蒸发损失；SPAC系统理论揭示了水分从土壤经作物根系吸收、茎秆传导至叶片蒸腾的全过程，为灌溉时间与灌溉量的确定提供科学依据；作物需水机理则明确了不同作物在各生育阶段的临界水分需求，如小麦拔节期、玉米抽雄期的需水敏感期，需通过精准供水保障作物正常生长^[1]。另外，灌溉工程还需兼顾水土资源匹配性，结合区域气候、地形、土壤质地等自然条件，实现水资源供需平衡，避免次生盐渍化、土壤板结等生态问题。

1.2 节水灌溉技术分类

节水灌溉技术按输水方式、灌水方式及控制模式可分为三大类，各类技术具有明确的适用场景与节水特性。第一类为输水节水技术，核心是减少输水过程中的渗漏损失，主要包括渠道防渗技术与管道输水技术。渠道防渗技术通过混凝土衬砌、土工膜铺设等方式降低渗漏系数，适

用于大型灌区的长距离输水；管道输水技术采用PVC、PE等管材构建输水网络，输水效率可达95%以上，广泛应用于大田作物与设施农业。第二类为田间节水技术，聚焦于提高水分利用效率，主要有滴灌、喷灌、微喷灌等方式。滴灌通过滴头将水分精准输送至作物根系区，节水率达60%-80%，适用于果树、蔬菜等经济作物；喷灌模拟自然降雨，均匀度高，适用于大田小麦、玉米等作物；微喷灌兼具滴灌与喷灌优势，可兼顾水分供应与田间降温增湿。第三类为智能控制节水技术，融合传感器、物联网、大数据等技术，实现灌溉过程的自动化、精准化调控，是现代节水灌溉的发展方向。

2 灌溉工程设计方法与优化

2.1 设计流程与步骤

灌溉工程设计是一项系统性工程，需遵循“调研分析-方案设计-参数计算-施工图设计-方案评审”的完整流程，确保设计方案的科学性、可行性与经济性。第一步为调研分析阶段，需全面收集项目区域的自然条件、水文水资源状况、作物种植结构、土壤特性、现有灌溉设施等基础资料，通过实地勘察与监测，明确项目需求与约束条件，如灌溉保证率、节水目标、作物需水总量等，为后续设计提供依据。第二步为方案设计阶段，根据调研结果确定灌溉方式（如滴灌、喷灌、渠道防渗灌溉等）、输水系统布局、灌溉分区划分等核心内容，结合区域地形地貌进行总体布局规划，确保系统运行高效、管理便捷。第三步为参数计算阶段，精准计算设计流量、输水管径、渠道断面尺寸、灌溉周期、单次灌溉量等关键参数，计算过程需严格遵循《节水灌溉工程技术规范》等国家标准，确保参数的合理性与准确性^[2]。第四步为施工图设计阶段，绘制详细的施工图纸，包括总平面图、输水系统结构图、设备安装图等，明确材料规格、施工工艺与技术要求。第五步为方案评审阶段，组

织专家对设计方案进行技术可行性、经济合理性、生态安全性评审,根据评审意见优化完善设计方案。

2.2 关键参数设计

关键参数设计是灌溉工程设计的核心环节,直接决定工程的灌溉效果与节水性能,主要包括设计流量、灌溉制度参数、输水系统参数三大类。设计流量是确定输水管道管径、渠道断面尺寸及水泵选型的核心依据,需根据灌溉面积、作物需水强度、灌溉周期等因素计算确定,公式为设计流量=灌溉面积×作物最大需水强度×灌溉水利用系数,其中灌溉水利用系数需结合灌溉方式选取,滴灌系统一般取0.9-0.95,渠道防渗灌溉系统取0.7-0.85。灌溉制度参数包括灌溉定额、灌溉周期、灌溉次数,需根据作物品种、生育阶段、土壤持水量等因素确定,如小麦全生育期灌溉定额一般为200-300m³/亩,灌溉周期在需水敏感期为7-10天,非敏感期为15-20天。输水系统参数设计需兼顾输水效率与投资成本,管道输水系统需根据设计流量与允许流速确定管径,渠道输水系统需根据设计流量、边坡系数、糙率等参数计算断面尺寸,确保水流平稳、渗漏损失最小。

2.3 节水优化措施

为进一步提升灌溉工程的节水性能,需从技术、管理、生态三个维度采取针对性的优化措施。在技术优化方面,可采用复合防渗技术提高输水系统的防渗效果,如渠道采用“混凝土衬砌+土工膜”双层防渗结构,管道系统选用高强度、低渗漏的PE管材,并定期进行管道检漏与修复;优化灌溉方式组合,根据作物类型与生育阶段采用“滴灌+喷灌”交替灌溉模式,在需水敏感期采用滴灌精准供水,在非敏感期采用喷灌兼顾水分与通风;引入变频调速技术,根据管网压力变化自动调节水泵转速,减少能源消耗与水资源浪费。在管理优化方面,建立健全灌溉用水管理制度,实行定额用水、按量收费,激励用户节约用水;加强灌溉设施的日常维护与管理,定期清理渠道、检修管道与设备,确保系统长期高效运行;开展节水技术培训,提高农户的节水意识与操作技能。在生态优化方面,结合雨水集蓄利用技术,建设蓄水池、集雨沟等设施,收集雨水用于灌溉,减少对地下水的依赖;推广水肥一体化技术,将肥料溶解于灌溉水中,实现水肥同步供应,提高肥料利用率,减少面源污染。

3 节水效果评价体系构建

3.1 评价指标选取

节水效果评价体系的构建需遵循科学性、系统性、可操作性原则,选取能够全面反映灌溉工程节水性能、经济收益、生态影响的评价指标,主要包括水资源利

用效率指标、经济收益指标、生态环境指标三大类。水资源利用效率指标是核心评价指标,包括灌溉水利用系数、作物水分生产效率、节水率^[1]。灌溉水利用系数反映灌溉系统的水资源利用程度,计算公式为实际灌溉用水量与总供水量的比值,滴灌系统应 ≥ 0.9 ,喷灌系统应 ≥ 0.85 ;作物水分生产效率指单位灌溉水量所产生的作物产量,单位为kg/m³,是衡量节水效果与生产效益的关键指标,小麦应 $\geq 1.5\text{kg/m}^3$,葡萄应 $\geq 2.0\text{kg/m}^3$;节水率指相较于传统灌溉方式节约的水量占传统灌溉用水量的比例,应 $\geq 50\%$ 。经济收益指标包括亩均增收额、投资回收期,亩均增收额反映节水灌溉对作物产量与品质的提升效果,投资回收期反映工程的经济效益,一般应 ≤ 5 年。生态环境指标包括土壤盐渍化程度、地下水位变化、面源污染负荷,土壤盐渍化程度应控制在轻度以下,地下水位应保持相对稳定,面源污染负荷应较传统灌溉减少30%以上。

3.2 评价方法

为客观、准确地评价灌溉工程的节水效果,需采用定性定量相结合、静态与动态相结合的评价方法,常用的评价方法包括层次分析法、模糊综合评价法、数据包络分析法(DEA)。层次分析法通过构建递阶层次结构,将复杂的评价问题分解为多个层次的评价指标,通过两两比较确定各指标的权重,该方法能够充分考虑各指标的相对重要性,提高评价结果的科学性,适用于指标权重难以量化的情况。模糊综合评价法针对评价指标的模糊性与不确定性,通过建立模糊评价矩阵,运用模糊数学理论对各指标进行综合评价,能够全面反映各指标的影响程度,适用于评价指标难以精确量化的场景,如生态环境指标中的土壤盐渍化程度。数据包络分析法(DEA)是一种基于相对效率的评价方法,无需预设指标权重,通过构建决策单元的生产前沿面,计算各决策单元的相对效率值,能够客观评价灌溉工程的节水效率与综合效益,适用于多输入、多输出的评价问题。在实际评价过程中,可结合多种评价方法的优势,如采用层次分析法确定指标权重,结合模糊综合评价法进行综合评分,提高评价结果的准确性与可靠性。

4 灌溉工程设计与节水效果实践案例分析

4.1 案例一:北方干旱区渠道防渗灌溉工程(以小麦种植区为例)

本案例位于北方干旱区小麦种植基地,该区域年降水量不足200mm,蒸发量达1500mm以上,水资源匮乏,传统土渠灌溉渗漏损失严重,灌溉水利用系数仅为0.45,小麦产量低且不稳定。为解决水资源短缺问题,设计建

设渠道防渗灌溉工程,工程覆盖灌溉面积1万亩,主要种植冬小麦。在设计过程中,采用“混凝土衬砌+土工膜”复合防渗技术,渠道断面采用梯形结构,边坡系数为1:1.5,糙率取0.014,设计流量为1.2m³/s,通过水力计算确定渠道底宽1.5m,水深1.0m。灌溉制度设计为小麦全生育期灌溉4次,分别在拔节期、孕穗期、灌浆期、乳熟期,单次灌溉定额为60m³/亩,总灌溉定额为240m³/亩。工程建成运行后,经监测,渠道防渗效果显著,灌溉水利用系数提升至0.82,较传统灌溉节约水资源45%以上;小麦水分生产效率从1.0kg/m³提高至1.8kg/m³,亩均产量从400kg提高至550kg,亩均增收300元;同时,由于渗漏水量减少,区域地下水位下降趋势得到有效遏制,土壤盐渍化程度明显减轻,生态环境得到改善^[4]。该案例表明,渠道防渗灌溉工程在北方干旱区小麦种植区具有显著的节水效果与经济、生态效益,为同类区域灌溉工程设计提供了参考。

4.2 案例二:西北半干旱区滴灌工程(以葡萄种植园为例)

本案例位于西北半干旱区葡萄种植园,该区域年降水量300-400mm,降水分布不均,传统漫灌方式水资源浪费严重,且易导致葡萄根系腐烂、品质下降。为实现葡萄优质高产与节水目标,设计建设智能滴灌工程,种植园面积500亩,品种为赤霞珠葡萄。工程设计采用水肥一体化智能滴灌系统,输水管道选用PE管材,滴头采用压力补偿式滴头,滴头流量为2L/h,间距0.5m,确保水分均匀输送至葡萄根系区。智能控制系统部署土壤湿度传感器300个、气象站2座,实时监测土壤水分、气温、湿度、蒸发量等数据,通过物联网平台实现灌溉过程的自动化调控。灌溉制度根据葡萄生育阶段优化设计,萌芽

期灌溉定额30m³/亩,开花期40m³/亩,膨果期60m³/亩,着色期30m³/亩,全生育期总灌溉定额160m³/亩。工程运行后,监测数据显示,滴灌系统灌溉水利用系数达0.93,较传统漫灌节水65%;葡萄水分生产效率达2.5kg/m³,果实含糖量提高1-2个百分点,优质果率从70%提高至90%,亩均产量从1500kg提高至1800kg,亩均增收2000元以上;由于精准供水,土壤湿度保持在适宜范围,葡萄根系生长环境改善,病虫害发生率降低,减少了农药使用量,生态效益显著。该案例验证滴灌工程在西北半干旱区葡萄种植园的适用性与优越性,其智能控制与水肥一体化技术的应用,为经济作物节水灌溉工程设计提供宝贵经验。

结束语

灌溉工程设计与节水效果分析对农业水资源高效利用意义重大。通过科学的设计流程、精准的关键参数把控以及多维度节水优化措施,可显著提升工程节水性能。构建的节水效果评价体系能全面评估工程效益。实践案例表明,合理设计灌溉工程在不同区域均能取得良好节水、经济与生态效益。未来应持续探索创新,推动灌溉工程设计与节水技术不断进步,保障农业可持续发展。

参考文献

- [1]周生营.水利工程中节水灌溉技术的实践分析[J].砖瓦世界,2023(5):178-180.
- [2]盛金奇.农业灌溉区的灌溉管理与节水增效的路径分析[J].农业灾害研究,2024,14(5):263-265.
- [3]柴育林,卫守祥,李小飞,等.高效节水灌溉工程首部标准化定型研究及应用[J].水上安全,2024(21):22-24.
- [4]李耀伟.农业水利工程中高效节水灌溉技术探讨[J].农业灾害研究,2025,15(3):277-279.