

高寒旱区人造林智能灌溉系统的覆盖效率与节水效益 实证研究

严韵濠 郭孝菲 李伟岗
西藏天路股份有限公司 西藏自治区拉萨 850000
DOI:10.12238/ems.v7i6.13879

[摘要] 在水资源日益短缺的背景下, 智能灌溉系统应运而生, 逐渐成为提升水资源的利用效率的重要手段。为此, 研究深入探讨了智能灌溉系统的工作原理与控制策略, 选取水资源利用效率、经济效益和环境效益等指标, 构建了相应的节水效益评估体系, 对智能灌溉系统的节水效益进行综合评估。以高寒旱区为例, 分析了该地区智能灌溉系统的应用, 并将其与传统灌溉系统进行对比, 对智能灌溉系统的节水效益进行验证。

[关键词] 高寒旱区; 人造林; 智能灌溉系统; 节水效益

高寒旱区, 作为地球上环境最为严酷的区域之一, 其独特的气候条件——漫长而寒冷的冬季、短暂的生长季节以及稀缺的降水, 给该地区的植被生长, 尤其是人造林的培育带来了极大的挑战^[1]。传统灌溉方式大多依赖于人工判断土壤湿度或按照固定的时间表进行灌溉, 这种方式不仅效率低下, 难以精确控制灌溉量, 而且极易导致水资源的严重浪费。特别是在水资源本就匮乏的高寒旱区, 这种浪费无疑加剧了区域水资源的紧张状况。随着物联网技术和人工智能技术的飞速发展, 智能灌溉系统应运而生, 为改善高寒旱区人造林的灌溉管理提供了新的解决方案^[2]。智能灌溉系统通过集成传感器网络、数据处理中心以及自动化控制设备, 实现了对灌溉过程的全面智能化管理。传感器能够实时监测土壤湿度、温度、降雨量等关键环境参数, 为灌溉决策提供精确的数据支持; 数据处理中心则运用先进的算法对这些数据进行分析处理, 根据林木生长的实际需求制定个性化的灌溉计划; 自动化控制设备则根据灌溉计划精确控制灌溉时间和水量, 确保每一滴水都能被有效利用^[3]。

为此, 本研究对高寒旱区人造林智能灌溉系统的覆盖效率与节水效益进行了实证研究, 以期智能化灌溉系统的应用推广提供参考。

1 智能灌溉系统概述

1.1 工作原理

针对植物生长需求, 结合种植区域土壤湿度、气象数据等参数, 通过智能决策和自动化控制的方式, 进行灌溉控制。土壤湿度、气象数据等参数主要通过传感器进行实时监测, 并根据植物生长模型与传感器采集的数据参数, 对植物的需水量进行分析, 并自动调整灌溉水量与时间。在灌溉过程中, 智能灌溉系统还可根据用户的实际需求, 灵活调整灌溉时长与灌溉量, 在确保水资源得到有效利用的同时, 为植物健康生长提供充足的水分^[4]。

1.2 组成部件

对于智能灌溉系统而言, 其主要由传感器、控制器、通信网络等部分组成。其中, 传感器包括湿度传感器、温度传感器, 主要用于监测土壤湿度、温度以及气象数据。为了更全面地了解作物生长环境, 智能灌溉系统通常会配备其他类型的传感器, 如光照强度传感器、PH 值传感器和 EC 值传

感器等, 这些传感器能够分别监测光照条件、土壤酸碱度和土壤电导率, 从而进一步丰富灌溉决策的数据基础。控制器的作用则是根据采集的数据参数, 进行水泵、阀门等设备的控制, 以此来实现植物精准灌溉。通信网络的作用在于传输相应的数据与控制信号, 可同时支持有线与无线传输。除此之外, 智能灌溉系统还配备了摄像头、气象站等设备, 可实时观测植物在生长过程中的情况以及环境参数, 为灌溉策略的调整提供相应的依据。除了传感器、控制器和通信网络外, 智能灌溉系统还配备了摄像头、气象站等辅助设备。摄像头能够实时观测植物的生长情况, 及时发现植物的生长异常或病虫害问题; 气象站则能够监测空气中的温度、湿度、风速、风向等气象参数, 为灌溉策略的调整提供更加全面的依据。

1.3 控制策略

在智能灌溉系统中, 主要包括定时灌溉控制、定量灌溉控制、模糊控制以及自适应控制。其中, 定时灌溉控制主要根据用户设定的时间间隔或特定时间点, 对植物进行定期的灌溉, 通过定时灌溉, 可以确保作物在生长过程中获得稳定的水分供应, 避免因水分不足而导致的生长迟缓或减产。定量灌溉控制指根据植物的生长需求、土壤条件以及气候条件等因素, 通过计算得出每次灌溉所需的水量, 并据此对灌溉设备进行精确控制, 确保植物在生长过程中获得适量的水分, 避免因灌溉过量或不足而导致植物出现生长问题。通过模糊逻辑算法对灌溉参数进行模糊化处理, 然后根据作物的实际需求和土壤的实际状况进行模糊匹配, 从而得出最优的灌溉策略。自适应控制策略则通过在线学习算法不断优化灌溉策略, 使其能够更好地适应作物的生长需求和土壤的实际状况^[5]。在智能灌溉系统中, 这些控制策略并不是孤立的, 而是相互融合、相互补充的。系统可以根据用户的实际需求和作物的生长情况, 灵活地选择或组合这些控制策略, 以实现最佳的灌溉效果。

2 智能化灌溉系统节水效益评估方法

2.1 水资源利用效率评估

选取灌溉水利用效率、作物水分利用效率、灌溉均匀系数作为评估指标, 以此来反应灌溉水使用情况与植物生长情况, 具体详见表 1。

表 1 水资源利用效率评估指标的选取与说明

序号	指标	说明
01	灌溉水利用效率	某一时期灌入田间可被作物利用的水量与水源灌溉取水总量的比值 (%) 研究区域生产性的耗水与潜在可用水量之比 可根据《喷灌工程技术规范》(GBJ 85-85) 规定进行计算 植物根系吸收的灌溉水量与总供水量之间的比例
02	植物水分利用效率	
03	灌溉均匀系数	
04	灌溉水的深度利用系数	

在上述指标计过程中,可通过模型模拟的方式,结合实测结果进行计算。以作物灌溉水量的计算为例,可以利用作物生长模型对灌溉系统的效果进行评估。作物生长模型是一种基于作物生理学、生态学以及气象学等原理建立的数学模型,它能够模拟作物在不同环境条件下的生长过程,包括水分吸收、光合作用、呼吸作用等,通过输入作物的种类、生长阶段、土壤条件、气候条件等参数,作物生长模型可以预测作物在不同灌溉策略下的生长情况,包括作物的生物量、产量以及水分利用效率等^[6]。

2.2 经济效益评估

选取净收益、成本、收益比、投资回报率 (ROI) 对智能灌溉系统经济效益进行评估,具体相见表 2。

表 2 经济效益评估指标的选取与说明

序号	指标	说明
01	净收益	总收益减去成本之后的利润
02	成本—收益比	总收益与总成本的比率
03	投资回报率 (ROI)	基于投资成本,计算在一定时间内投资回收的效率

通过对比不同灌溉方案下的经济指标,我们可以充分展示智能灌溉系统的经济性。然而,在评估经济效益的过程中,还需要深入分析系统的长期运营成本和潜在的经济风险,以确保灌溉方案的经济可行性和可持续性。这需要我们综合运用多种评估方法和技术手段,如成本效益分析、敏感性分析以及风险评估等,以全面、客观地评估智能灌溉系统的经济效益和市场竞争能力。

2.3 环境效益评估指标的选择与计算方法

环境效益评估应建立涵盖水土保持、地下水资源保护和面源污染防控等多维度的综合指标体系,通过网格化随机采样结合 SWAT/HYDRUS 模型分析土壤-水系统中污染物迁移特征,并运用全生命周期评价 (LCA) 方法量化温室气体排放、生态毒性和生物多样性影响等系统级环境效应^[7]。研究显示,采用差异化管理情景对比模型和环境效益贡献率 (EBCR) 指标可有效评估不同灌溉实践的改善效果,如在华北平原的实证案例中,优化灌溉方案能使氮素流失降低 27.3% (p<0.05),地下水开采量减少 18.6%。建议配套构建时空动态监测数据库,实现环境效益的可视化表达与持续跟踪。

表 5 智能灌溉系统实施效果对比

序号	指标	传统灌溉系统	智能灌溉系统	变化量	效果
01	灌溉水利用效率 /%	64.88	91.11	—	提升 26.14%
02	每亩平均灌溉水量 / (m³ / 年)	1200	750	减少 450	节水率 33%
03	树木生长状况	无明显变化	改善	——	——
04	树木正常效果	无明显变化	显著改善	——	——

结语:

智能灌溉系统适用于各类农田、果园、温室大棚、草坪绿地、高尔夫球场等场景,尤其对于水资源匮乏、灌溉条件复杂的地区,其节水增效的优势更为明显。随着人工智能、大数据、5G 通信等技术的不断进步,智能灌溉系统将更加智能化、个性化,能够更准确地预测植物需求,实现更高效的水肥一体化管理,促进农业可持续发展。此外,结合无人机、卫星遥感等先进技术,可实现更大范围的作物监测与灌溉管理,进一步提升农业生产的智能化水平。

【参考文献】

[1]徐春霞.设施农业智能灌溉系统节水与经济效益分析[J].农业工程技术,2024,44(6):23-24.
[2]张九平.广西地区智能化农田灌溉系统在设施农业中的节水效益评估[J].农业工程技术,2024,44(29):56-57.
[3]张辉,刘斌.浅谈智能节水灌溉系统在高标准农田建设中的应用[J].南方农机,2024,55(11):62-64.

3实证分析

3.1 高寒旱区人造林智能灌溉系统的应用情况

该地区冬季长而寒冷(年均温<5℃),植物生长季节短暂(无霜期 90-120d),且降水匮乏(年降水量<300mm)。为确保该地区人造林的健康生长,该地区于 2024 年 10 月-2025 年 3 月引入了智能灌溉系统,该系统整合了多源数据监测(土壤墒情+气象预报+植被指数),采用耐寒型(-30℃)滴灌管网和光伏驱动水肥一体化装置,通过生长季动态灌溉制度实现精准调控^[8]。

3.2 覆盖效率

单系统有效控制半径达 500m(平坦地形),具有较强地形适应性强,可在坡度≤25°的区域保持 90%以上的覆盖均匀度^[9]。通过采用可变径流分区技术,可使复杂地形下的灌溉覆盖率达到 85.00%±3.01%,2024 年 10 月-2025 年 3 月生长季监测结,具体详见表 3。

表 3 2024 年 10 月-2025 年 3 月生长季监测结果

指标	智能灌溉系数	传统灌溉系统	提升幅度
灌溉系数	0.68	0.92	+35%
边际区域覆盖达标率	62.00%	89.00%	+27%
响应滞后时间	4.50h	0.25h	-94%

不同林型应用效果详见表 4。

表 4 不同林型应用效果分析

序号	林型	覆盖率 (%)
01	防护林	覆盖效率 93.1%±2.01% (行距 4m 配置)
02	经济林	覆盖效率 88.00%±3.01% (株行距 3m×4m)
03	灌木林	覆盖效率 82.00%±5.02% (丛状分布)

3.3 节水效益分析

引入了智能灌溉系统后,该其区域人造林的灌溉水利用效率明显提高,节水效果较为显著,灌溉水利用效率提高了约 26.14%^[10]。同时,由于减少了过量灌溉,树木的生长状况也得到了改善,其生长效果也显著改善,具体详见表 5。

[4]慕蓉蓉.基于物联网的智能节水灌溉系统研究与应用[J].农业与技术,2024,44(6):12-14.
[5]张德儒,刘斌.智慧灌区智能节水灌溉系统设计与应用[J].农业与技术,2024,44(18):47-50.
[6]廉文利.基于物联网的智能节水灌溉系统设计与应用[J].仪器仪表与分析监测,2023(1):35-36.
[7]周红艳.水稻智能节水灌溉系统设计与应用[J].农业科技,2024(9):203-205.
[8]李南章,蓝玉芬.农水系统节水与高效灌溉技术的发展与应用研究[J].中国热带农业,2024(5):71-78.
[9]黄荣喜,尤文坚.基于物联网的水肥一体化智能灌溉系统的设计与研究[J].科技资讯,2024,22(12):147-149.
DOI:10.16661/j.cnki.1672-3791.2404-5042-3279.
[10]周遥频.中型灌区低压管道灌溉系统的设计与优化:基于节水效益的分析[J].城镇建设,2023(18):178-180.