

农田水利灌溉节能模式创新探索

张 燕

济南市长清区人民政府平安街道办事处 山东 济南 250306

摘要：在全球水资源日益紧张与“双碳”目标的双重驱动下，传统高耗能、粗放式的农田灌溉模式已难以为继。本文聚焦于农田水利灌溉领域的节能模式创新，系统梳理了以高效节水技术、可再生能源利用和智能管控系统为核心的三大创新路径。文章深入剖析了低压管道输水、喷微灌等高效节水技术的节能机理；探讨了光伏提水、风光互补等绿色能源在灌溉泵站中的集成应用；并重点阐述了基于物联网、大数据和人工智能的智慧灌溉系统的构建逻辑与实践价值。研究表明，通过技术集成与模式重构，农田灌溉不仅能实现显著的节能降耗，更能同步提升水资源利用效率与农业生产效益。最后，文章提出了强化政策引导、完善标准体系、创新投融资机制等保障措施，以期为推动我国农业绿色低碳转型提供理论参考与实践指引。

关键词：农田水利；灌溉节能；高效节水；可再生能源；智慧灌溉

引言

水是农业命脉，能源是灌溉系统动力。我国农业灌溉在保障粮食安全的同时，存在巨大资源消耗问题。农业用水超全国总用水量60%，灌溉提水等环节能耗占比高。当下，全球气候变化加剧、水资源短缺常态化，我国又有“双碳”目标，高耗能、低效率的传统灌溉模式面临挑战。一方面，土渠输水、大水漫灌等落后方式输水损失大，既浪费水资源又增加提水能耗；另一方面，喷灌、微灌等节水技术区域配套动力系统依赖电网或柴油发电机，运行成本高、碳排放多。探索“节水、节能、减排、增效”的农田水利灌溉新路径，是实现农业可持续发展的关键。近年来，物联网等前沿技术发展，农田灌溉领域迎来变革，如“精准灌溉施肥关键技术与装备研发应用”成果、“光伏+滴灌”等示范项目，彰显出技术创新潜力。本文旨在系统探索农田水利灌溉节能模式创新，整合高效节水、绿色供能与智能管控三大维度，构建资源节约型现代农业灌溉体系。

1 高效节水技术：节能降耗的基础路径

节能与节水在农田灌溉中具有高度的协同效应。减少无效的水资源输送与使用，本身就是最直接、最有效的节能方式。因此，推广高效节水灌溉技术是实现灌溉节能的基石。

1.1 低压管道输水灌溉：从源头减少能耗

传统的明渠输水系统存在严重的渗漏和蒸发损失，为了补偿这些损失，往往需要从水源地抽取更多的水量，从而增加了水泵的运行时间和能耗。低压管道输水灌溉技术通过用塑料或混凝土管道取代土渠，将灌溉水封闭输送至田间，可将输水效率提升至95%以上。其节能

机理在于：首先，大幅减少了输水过程中的水量损失，从而直接降低了提水总量和相应的能耗。其次，管道系统内水流阻力小，所需的工作水头（即压力）远低于需要克服地形高差和渠道糙率的传统系统。这意味着可以选用功率更小的水泵，或者在相同扬程下获得更大的流量，显著提升了能源利用效率。对于地势平坦、集中连片的粮棉油等大田作物产区，低压管道输水是一种经济高效的节能选择。

1.2 喷灌与微灌技术：精准施水，按需供能

如果说低压管道解决了“送水”的节能问题，那么喷灌和微灌技术则致力于解决“用水”的精准化，从而实现更高层次的节能。（1）喷灌技术：通过加压设备和喷头，将水以细小水滴的形式均匀喷洒到作物冠层。与地面灌溉相比，喷灌能有效控制灌水定额，避免深层渗漏和地表径流，水分利用效率可提高20%-40%。虽然喷灌本身需要一定的加压能耗，但其节省的总提水量所带来的净节能效果是显著的。特别是近年来发展的变量喷洒技术，可根据田块内土壤墒情和作物长势的差异，动态调整不同区域的喷洒强度，进一步优化了水能配比^[1]。

（2）微灌技术（滴灌、微喷灌）：这是目前世界上最为节水的灌溉方式。它通过毛管上的灌水器，以极小的流量（滴灌通常为2-8升/小时）将水和养分直接、缓慢地输送到作物根区土壤。这种方式几乎消除了输水损失和田间蒸发，水分利用效率可达90%以上。由于工作压力低（滴灌一般为0.1-0.3MPa），其配套的加压泵功率需求远小于喷灌系统。更重要的是，微灌实现了对作物的“按需供水”，避免了任何过量灌溉，从根本上杜绝了因无效灌溉而产生的能源浪费。对于果树、蔬菜、花卉等高

附加值经济作物，微灌的节能与经济效益尤为突出。

2 可再生能源驱动：构建绿色供能新模式

在解决了“少用水”的问题后，如何为必需的灌溉动力提供清洁、低成本的能源，成为灌溉节能模式创新的另一核心。将太阳能、风能等可再生能源与灌溉系统深度融合，是实现“零碳”或“低碳”灌溉的根本出路。

2.1 光伏提水灌溉系统：阳光驱动的绿色革命

太阳能光伏发电技术成熟、运维简单，且其发电高峰期（白天）与农业灌溉需求高峰期高度重合，使其成为驱动灌溉泵站的理想选择。光伏提水灌溉系统主要由光伏阵列、控制器、逆变器（或直流泵）和水泵组成。其工作原理是：光伏板将太阳能转化为直流电，经控制器稳压后，直接驱动直流潜水泵，或将直流电逆变为交流电后驱动交流水泵，从水源（井、塘、河）中提水进行灌溉。该系统最大的优势在于“自发自用”，完全摆脱了对市电或柴油的依赖，运行成本趋近于零，且无任何碳排放。尽管初期投资较高，但随着光伏组件价格的持续下降和政府补贴政策的支持，其全生命周期成本已具备很强的竞争力。在偏远无电地区或电价高昂的区域，光伏提水系统的优势更为明显。

2.2 风光互补及其他混合能源系统：提升供能稳定性

太阳能具有间歇性和不稳定性，阴雨天或夜间无法发电。为了解决这一问题，可以构建风光互补灌溉系统。该系统在光伏阵列的基础上，增加小型风力发电机，利用风能和太阳能在时间和地域上的互补性，为灌溉系统提供更稳定、连续的电力供应。此外，还可以将可再生能源系统与储能装置（如蓄电池）或传统电网相结合，形成“光/风-储-网”多能互补的混合供电模式^[2]。在光照充足时，优先使用绿电并为电池充电；在光照不足时，先使用电池储能，再考虑接入电网，从而最大限度地利用可再生能源，降低对外部能源的依赖和整体运行成本。

3 智慧灌溉管控：数据赋能的精细化管理

如果说高效节水技术和可再生能源是灌溉节能的“硬件”基础，那么以物联网、大数据和人工智能为核心的智慧灌溉系统，则是实现精准、高效、节能运行的“软件”大脑。它通过对全要素的感知、分析与决策，将节能理念贯穿于灌溉管理的每一个环节。

3.1 全要素感知网络：构建数字孪生农田

智慧灌溉的第一步是建立覆盖整个灌区的感知网络。通过在田间布设土壤温湿度传感器、气象站（监测降雨、温度、湿度、风速、光照）、作物长势摄像头以及管网压力/流量计等设备，实时采集与灌溉决策相关的

海量数据。这些数据通过LoRa、NB-IoT等低功耗广域网传输至云端平台，构建起一个与物理农田完全对应的“数字孪生”体。管理者无需亲临现场，即可全面、精准地掌握每一寸土地的“渴”与“需”。

3.2 智能决策与自动控制：从“经验灌溉”到“算法灌溉”

基于感知数据，智慧灌溉平台利用内置的作物需水模型、蒸散发模型和人工智能算法，能够精准计算出未来一段时间内不同地块的最佳灌溉时间、灌溉量和灌溉方案。例如，系统可以综合未来三天的天气预报（是否有雨）、当前土壤墒情（是否缺水）和作物生长阶段（需水规律），自动生成一个最优的灌溉指令。该指令可直接下发至田间的电磁阀、水泵变频器等执行机构，实现灌溉全过程的自动化控制。当土壤湿度低于设定阈值时，系统自动开启水泵和对应区域的阀门；当达到预设灌水量或监测到降雨时，又会自动关闭^[3]。这种“按需、按时、定量”的精准灌溉模式，彻底摒弃了传统依靠人工经验和固定周期的粗放式管理，将水和能源的浪费降至最低。同时，通过变频技术调节水泵转速，使其始终运行在高效区间，也能有效降低电耗。

3.3 远程监控与移动管理：提升运维效率

智慧灌溉系统通常配备有Web端和移动端（APP）管理界面。管理人员可以通过手机随时随地查看灌区的实时状态、历史数据、设备运行情况和报警信息，并能远程手动干预灌溉操作。这不仅极大地提高了管理效率，降低了人力成本，还能在设备出现故障（如管道破裂、水泵空转）时第一时间收到警报并处理，避免了因故障导致的能源和水资源浪费。

4 创新模式的集成应用与综合效益

单一技术的应用固然能带来节能效果，但真正的突破在于将高效节水、绿色供能与智能管控三大创新路径进行有机集成，形成一个协同增效的整体解决方案。

4.1 典型案例：光伏驱动的智慧水肥一体化系统

一个典型的集成模式是“光伏+滴灌+智慧管控+水肥一体化”。在某大型果蔬种植基地，建设了分布式光伏电站，为整个园区的滴灌系统提供全部动力。田间部署了土壤墒情和气象监测站，并安装了可远程控制的施肥机和滴灌电磁阀。农场主通过手机APP，可以清晰地看到每个大棚的土壤湿度曲线和未来几天的灌溉建议。系统根据预设的作物生长模型，自动将水溶肥按精确比例注入灌溉管道，并通过滴灌带直达作物根部。整个过程无需人工值守，水、肥、能源的利用效率均达到了行业领先水平。据测算，该模式相比传统灌溉，节水、节肥、综合

能耗降低近,同时作物产量和品质也得到了显著提升。

4.2 综合效益分析

这种集成创新模式带来的效益是多维度的:(1)经济效益:虽然初期投入较高,但长期来看,节省的水费、电费、肥料费和人工成本,足以覆盖投资并在数年内收回成本。(2)生态效益:大幅减少了水资源开采和化石能源消耗,降低了农业面源污染(因精准施肥),有助于保护生态环境和应对气候变化。(3)社会效益:提升了农业生产的现代化、智能化水平,解放了农村劳动力,为乡村振兴和农业高质量发展注入了新动能。

5 推广挑战与对策建议

5.1 挑战

尽管农田水利灌溉节能模式前景广阔,但在大规模推广过程中仍面临诸多挑战。首先,初始投资成本高是制约农户采纳的首要障碍。一套完整的智慧光伏灌溉系统涉及光伏板、智能控制器、传感器网络及滴灌设施,前期投入远超传统灌溉方式,尤其对于小农户而言负担沉重。其次,技术标准与规范体系尚不健全。市场上相关设备品牌众多,接口协议不一,兼容性差,缺乏统一的设计、施工及验收标准,导致系统集成困难,后期维护成本高,甚至影响整体效能。再次,农民的技术接受度与操作能力有待提升。许多农民,特别是年长者,对复杂的智能设备存在畏难情绪,习惯于传统的经验式管理,对新技术的信任度和学习意愿不足。最后,专业化的后期运维服务体系严重缺失。智慧灌溉系统一旦出现故障,普通农户难以自行诊断和修复,而市场上缺乏响应迅速、收费合理的专业服务团队,使得系统“带病运行”或“闲置不用”的现象时有发生。

5.2 建议

为有效破解上述难题,亟需采取系统性的对策。第一,强化顶层设计与政策引导。各级政府应将农田灌溉节能纳入乡村振兴和“双碳”战略的总体规划,设立专项资金,并加大财政补贴和税收优惠力度。同时,积极探索将农业节能量、节水量纳入碳交易或水权交易市场,通过市场化机制激励用户投资。第二,加快构建统

一的技术标准体系。由行业协会牵头,联合科研机构与龙头企业,尽快制定涵盖设备选型、系统集成、数据接口、施工验收及运行维护的全链条技术规范,推动产业健康发展^[4]。第三,大力创新投融资与服务模式。积极推广“合同节水管理”、“能源费用托管”等商业模式,引入社会资本。由专业的能源服务公司(ESCO)负责项目的投资、建设和运营,用户只需按实际节约的水、电费分成付费,从而实现“零投入、享节能”。第四,加强示范引领与人才培育。在全国不同区域建设一批高标准、可复制的示范工程,组织农民现场观摩。同时,依托农技推广站、职业院校等平台,开展针对性强、通俗易懂的技术培训,培养一批既懂农业又懂数字技术的“新农人”,为新模式的落地生根提供坚实的人才保障。

6 结语

农田水利灌溉节能模式的创新,是一场涉及技术、能源和管理范式的深刻变革。它不仅是应对资源环境约束的必然选择,更是推动农业现代化、实现乡村振兴的战略举措。通过大力推广以低压管道、喷微灌为代表的高效节水技术,积极构建以光伏、风电为核心的绿色供能体系,并深度融合以物联网、AI为支撑的智慧管控平台,我们完全有能力打造出一个资源节约、环境友好、高效智能的现代农业灌溉新格局。未来,随着技术的不断迭代和政策的持续完善,农田水利灌溉必将从“能耗大户”成功转型为“绿色典范”,为保障国家水安全、粮食安全和生态安全作出更大贡献。

参考文献

- [1]马红玉.节能灌溉技术在农田水利中的应用探究[J].棉花科学,2025,47(12):116-118.
- [2]赵亮.农田水利工程建设中节能灌溉技术运用分析[J].农业开发与装备,2025,(01):185-187.
- [3]岳川.农田水利工程建设中节能灌溉技术的应用[J].农业与技术,2023,43(11):52-54.
- [4]俞高元.“双碳”目标下水利灌溉水泵节能降耗的挑战与策略研究[J].当代农机,2025,(06):28-29.