

基于遥感技术的区域作物需水量估算与灌溉制度优化

张雨波

盐池县农田建设服务中心

DOI:10.32629/etd.v6i12.19247

[摘要] 传统的作物需水量估算方法多依赖于点尺度的气象站数据和经验模型,难以满足大范围、高精度、动态化农业水资源管理的需求。遥感技术凭借其宏观、快速、周期性观测的优势,为区域尺度作物需水量(Evapotranspiration,ET)的精准反演提供了革命性的手段。本文系统梳理了遥感估算区域作物需水量的核心理论基础、主流反演模型(包括地表能量平衡模型、Penman-Monteith模型的遥感扩展、以及数据同化与机器学习方法),深入探讨了如何将高精度的遥感ET产品应用于灌溉制度的优化设计,包括灌溉时机、灌溉定额和空间配水方案的制定。通过分析当前研究中存在的挑战,如尺度转换、模型普适性、数据融合等问题,本文展望了未来结合多源遥感数据、人工智能算法与地面物联网感知网络的发展方向,旨在为构建智慧、高效、节水的现代农业灌溉管理体系提供科学依据和技术支撑。

[关键词] 遥感; 作物需水量; 蒸散发; 灌溉制度优化; 地表能量平衡; 数据同化

中图分类号: S274 文献标识码: A

Estimation of Regional Crop Water Requirement and Optimization of Irrigation Scheduling Based on Remote Sensing Technology

Yubo Zhang

Yanchi County Farmland Construction Service Center

[Abstract] Traditional methods for estimating crop water requirement mostly rely on point-scale meteorological station data and empirical models, making it difficult to meet the needs of large-scale, high-precision, and dynamic agricultural water resources management. Remote sensing technology, with its advantages of macroscopic, rapid, and periodic observation, provides a revolutionary means for the accurate inversion of crop water requirement (Evapotranspiration, ET) at the regional scale. This paper systematically reviews the core theoretical basis of remote sensing estimation of regional crop water requirement and mainstream inversion models, including the surface energy balance model, remote sensing extension of the Penman-Monteith model, as well as data assimilation and machine learning methods. It deeply explores how to apply high-precision remote sensing ET products to the optimization design of irrigation scheduling, including irrigation timing, irrigation quota, and spatial water distribution planning. By analyzing the challenges existing in current research, such as scale transformation, model universality, and data fusion, this paper looks forward to the future development direction combining multi-source remote sensing data, artificial intelligence algorithms, and ground-based IoT sensing networks, aiming to provide scientific basis and technical support for building a smart, efficient, and water-saving modern agricultural irrigation management system.

[Key words] remote sensing; crop water requirement; evapotranspiration; irrigation scheduling optimization; surface energy balance; data assimilation

引言

水是农业命脉,全球气候变化、人口增长及城市化进程,让农业用水面临巨大挑战。传统灌溉模式效率低,大量水资源被浪费。实现农业用水精细化、智能化管理,是保障国家粮食、生态安全及水资源可持续利用的战略需求。作物需水量(CWR)以蒸散

发(ET)量化,指特定条件下维持作物正常生长发育并获预期产量所需水分总量。准确估算区域尺度作物需水量,是制定科学灌溉制度、合理配置与调度水资源的前提。长期以来,基于FA0-56推荐的Penman-Monteith公式及其双作物系数法是估算参考作物蒸散发(ET_o)和实际作物蒸散发(ET_c)的标准方法,但该方法

依赖密集地面气象站点数据, 作物系数确定基于试验田均质条件, 难以反映大范围复杂状况。遥感技术兴起为解决难题提供新途径。卫星遥感能周期性获取大范围地表信息, 这些参数与地表能量交换和水分状况紧密相关, 使从“天”到“地”反演区域蒸散发成为可能。基于遥感的ET估算克服了点尺度观测不足, 还能动态监测作物水分胁迫, 为灌溉决策提供实时客观数据。因此, 深入研究基于遥感技术的区域作物需水量估算方法, 融入灌溉制度优化体系, 意义重大。

1 遥感估算区域作物需水量的理论基础与方法

1.1 作物需水量与蒸散发的概念

作物需水量(CWR)是指在适宜的土壤水分和肥力条件下, 为满足作物正常生长发育并获得高产所必需消耗于蒸腾和棵间蒸发的水量总和。在无水分胁迫的理想条件下, 作物需水量等于作物蒸散发量(ETc)。当土壤水分不足以满足作物需求时, 实际蒸散发(ETA)将小于潜在蒸散发(ETp)或作物需水量, 此时作物处于水分胁迫状态^[1]。因此, 遥感技术估算的核心目标是获得区域尺度的实际蒸散发(ETA)或潜在/充分供水条件下的蒸散发(ETc)。蒸散发过程本质上是地表能量平衡和水分循环的耦合体现。根据能量平衡原理, 到达地表的净辐射(Rn)主要用于加热空气(感热通量H)、加热土壤(土壤热通量G)和驱动水分相变(潜热通量LE), 即:

$$R_n = G + H + LE$$

其中, 潜热通量LE与蒸散发ET之间存在如下关系:

$$LE = \lambda ET$$

式中, λ 为水的汽化潜热。因此, 只要能通过遥感手段准确估算出Rn、G和H, 即可间接求得ET。

1.2 主流遥感反演模型

1.2.1 基于地表能量平衡的模型

这类模型以物理机制为核心, 代表模型有SEBAL和METRIC。(1)SEBAL模型: 由Bastiaanssen等人提出。该模型首先利用遥感影像反演地表温度、反照率、植被指数等参数, 计算净辐射(Rn)和土壤热通量(G)。其核心创新在于利用两个极端假设的锚点(一个代表完全湿润的冷像元, 另一个代表完全干燥的热像元)来校准显热通量(H), 从而避免了对大气边界层参数的直接测量。SEBAL模型结构相对简单, 但对锚点选取的主观性较强。(2)METRIC模型: 由Allen等人在SEBAL基础上发展而来。METRIC同样基于地表能量平衡方程, 但其校准方式更为严谨。它利用地面气象站的风速和气温梯度数据来内部校准显热通量, 减少了对锚点的依赖, 提高了模型在不同气候区的适用性和精度^[2]。METRIC模型已被证明在农田尺度上能提供高精度的日蒸散发估算。

1.2.2 遥感-Penman-Monteith耦合模型

FAO-56 PM模型是估算参考作物蒸散发(ETo)的金标准。其表达式为:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

其中, Δ 为饱和水汽压曲线斜率, γ 为干湿表常数, T为平均气温, u_2 为2米高处风速, $e_s - e_a$ 为饱和与实际水汽压差。遥感-Penman-Monteith耦合模型的核心思想是利用遥感数据来估算PM模型中的关键阻力项或作物系数。(1)阻力模型: 将PM模型改写为包含冠层阻力(r_c)和空气动力学阻力(r_a)的形式。遥感数据(如NDVI、LAI)可用于估算冠层阻力 r_c , 而 r_a 则可通过遥感反演的地表粗糙度长度等参数结合气象数据计算。(2)作物系数法: FAO-56推荐使用双作物系数法($K_{cb} + K_e$)来计算 $ET_c = (K_{cb} + K_e) * ET_o$ 。研究表明, 遥感植被指数(如NDVI)与基础作物系数 K_{cb} 之间存在良好的经验关系。通过建立NDVI- K_{cb} 的经验或半经验关系, 可以动态地获取空间化的 K_{cb} 值, 进而计算出空间分布的 ET_c 。这种方法物理意义明确, 易于与现有灌溉管理系统对接。

1.2.3 数据同化与机器学习方法

面对日益丰富的多源遥感数据(光学、热红外、微波)和再分析气象数据(如ERA5、GLDAS), 数据同化和机器学习方法展现出强大的潜力。(1)数据同化: 通过将遥观测数据(如LST)作为约束条件, 不断修正陆面过程模型(如Noah-MP、VIC)的内部状态变量(如土壤含水量), 从而输出物理一致且时空连续的ET序列。这种方法能有效弥补遥感数据受云影响导致的时间不连续性。(2)机器学习: 将遥感数据(LST, NDVI, Albedo等)、气象数据(T, P, u_2 , RH等)作为输入特征, 以地面涡度相关(EC)塔观测的ET作为标签, 训练机器学习模型(如XGBoost, LSTM, Transformer)。训练好的模型可以快速、高效地生成高时空分辨率的ET产品。谷歌地球引擎(GEE)平台上的OpenET项目就是此类方法的成功应用典范。

2 基于遥感ET的灌溉制度优化

精准的遥感ET产品不仅是对水资源消耗的“诊断”, 更是指导灌溉实践的“处方”。将遥感ET融入灌溉制度优化, 可以从时间、数量和空间三个维度实现精细化管理。

2.1 灌溉时机的确定

传统的灌溉时机多依据固定的生育期或经验判断, 容易造成灌溉滞后或过量。基于遥感的作物水分胁迫监测为此提供了客观依据。(1)水分胁迫指数: 通过计算作物水分胁迫指数(CWSI)或温度植被干旱指数(TVDI)等指标, 可以直观地识别出田块内哪些区域的作物正处于水分胁迫状态。当胁迫指数超过预设阈值时, 即触发灌溉指令^[3]。(2)土壤有效储水量动态平衡: 结合遥感ET(代表水分支出)和降雨/灌溉数据(代表水分收入), 可以动态模拟根区土壤有效储水量(AWC)的变化。当AWC降至作物临界耗水阈值(如田间持水量的50%-60%)时, 即为最佳灌水时机。遥感ET为这一动态平衡计算提供了关键的、空间化的“支出”项。

2.2 灌溉定额的计算

灌溉定额是指一次灌水时单位面积上的灌水体积(mm或 m^3 /ha)。其计算核心是补充根区土壤水分亏缺。(1)基于ET的净灌溉需水量: 在两次灌溉之间, 作物的净灌溉需水量(Net

Irrigation Requirement, NIR) 可近似等于该时段内的累积作物需水量($\sum ET_c$)减去同期的有效降雨量(P_e)。即: $NIR = \sum ET_c - P_e$ 。利用高时空分辨率的遥感 ET_c 产品,可以精确计算任意田块在任意时段的NIR。(2) 考虑灌溉效率: 实际灌水定额 (Gross Irrigation Requirement, GIR) 还需考虑灌溉系统的效率(IE): $GIR = \frac{NIR}{IE}$ 。通过将遥感ET与不同灌溉方式(滴灌、喷灌、畦灌)的效率参数结合,可以为不同田块定制最经济的灌水定额。

2.3 空间配水方案的制定

大中型灌区内部作物类型、土壤质地、地形地貌各异,实行“一刀切”的配水方案必然导致水资源浪费。遥感ET为实施“按需分配”的变量灌溉 (Variable Rate Irrigation, VRI) 提供了数据基础。(1) 分区管理: 利用遥感影像对灌区进行土地利用/覆被分类,并结合土壤图,将灌区划分为若干个管理单元 (Management Zones)。对每个单元,分别计算其累积ET和灌溉需水量^[4]。(2) 智能配水: 将各管理单元的灌溉需水量作为权重,对灌区总的可供水量进行优化分配。这可以通过建立线性规划或优化模型来实现,目标函数可以是 minimized 总缺水量、最大化经济效益或保障粮食安全。最终生成的空间配水图可以直接指导现代化灌溉系统的自动化控制。

3 案例分析与应用前景

以我国华北平原某大型灌区为例,该区域长期面临地下水超采问题。研究团队利用Sentinel-2和Landsat-8卫星数据,结合地面气象站数据,采用改进的SEBAL模型反演了整个生长季的日尺度ET。结果表明,该方法能清晰刻画出不同作物(冬小麦、夏玉米)的耗水时空格局,并成功识别出因灌溉不足而导致的水分胁迫区域。基于此ET产品,研究团队为灌区管理部门制定了动态的月度配水方案,并为农户推送了基于手机APP的个性化灌溉建议。初步应用显示,该方案在保证作物产量的前提下,可实现约15%的节水效果。未来,随着Sentinel系列、Landsat Next、高分系列等卫星的持续运行,以及无人机遥感的普及,遥感ET产品的时空分辨率将进一步提升。同时,深度学习等AI技术将更深入地融入ET反演流程,提高模型的鲁棒性和泛化能力。更重要的是,

遥感ET将与地面物联网(IoT)传感器网络(如土壤墒情传感器、气象微站)深度融合,形成“天空地”一体化的农业水信息感知体系。在这个体系中,遥感提供宏观、周期性的“面”信息,物联网提供微观、连续的“点”验证与补充,二者相互校验、协同分析,共同驱动智慧灌溉决策系统的闭环运行,最终实现农业水资源的最优配置与高效利用。

4 结语

本文探讨了基于遥感技术估算区域作物需水量及其在灌溉制度优化中的应用。遥感技术通过反演地表参数,为精准估算区域蒸散发提供了有力工具,克服了传统方法局限。多种模型不断提升ET产品精度与实用性,将其应用于灌溉管理,可实现灌溉制度科学化、精细化,是农业节水、保障粮食安全的关键。但该领域仍面临挑战,如模型在复杂下垫面普适性不足、多源异构数据融合与尺度效应问题、遥感ET到田间灌溉指令标准化流程缺失等。展望未来,研究应着重于以下方向:(1) 发展物理机制与数据驱动相融合的混合模型,兼顾物理可解释性与数据适应性;(2) 深化“天空地”一体化协同观测与数据融合技术,构建无缝、高精度的农业水信息立方体;(3) 加强遥感ET产品在智慧灌溉决策支持系统中的集成应用研究,打通从科学研究到田间实践的“最后一公里”。通过多学科交叉与技术创新,基于遥感的区域作物需水量估算与灌溉优化必将为全球农业的绿色、可持续发展贡献核心力量。

[参考文献]

- [1] 秘翌彤, 张晓影, 王宽豪, 等. 基于遥感技术的作物生产研究进展[J]. 中国农学通报, 2025, 41(27): 149-156.
- [2] 王姝运. 基于遥感技术的大棚作物用水量测算——以清水河流域为例[J]. 河北水利, 2024, (11): 42-44.
- [3] 张军伟, 闫宏昌. 无人机遥感技术辅助农业精准灌溉的策略研究[J]. 河北农机, 2025, (02): 19-21.
- [4] 杨静蓉. 无人机遥感技术在农田水利灌溉管理中的革新应用[J]. 河北农机, 2024, (24): 46-48.