

基于水文分析的区域农田水利灌溉系统优化研究

黄亚滨 赵 爽 王 莉

湖北省恩施州水文水资源勘测局 湖北 恩施 445000

摘 要: 农田水利灌溉系统的运行效率直接影响一个地区的粮食生产和水的有效利用。传统的灌溉系统的设计更多的是依靠经验参数或者静态的水文资料, 不能够满足气候变化以及土地利用变化带来的挑战。本文以水文学为基础, 介绍了降水特征研究、径流计算、蒸散发量估算、土壤含水量观测、地下水资源的变化等对于灌溉系统优化的重要作用, 在此基础上提出了一种基于水文学的多源数据融合灌溉需水量预测方法、渠系配水优化方法、灌区水资源在时间和空间上的分配方法以及灌溉制度调整方法。通过分析得出, 把水文学的研究成果应用到灌溉系统的规划、建设和管理中去可以大幅度提高灌溉水的使用效率, 减少不必要的蒸发和渗漏浪费, 使灌区具有更好的抗旱防洪的能力。本文主要目的是为区域农田水利灌溉系统的合理优化提供一种水文学的方法论。

关键词: 水文分析; 农田水利; 灌溉系统优化; 水资源配置; 灌溉制度

引言

农田水利是农业生产的物质基础, 灌溉系统效率直接影响农作物产量以及水资源利用水平。在我国, 农业用水占全部用水量的 60% 以上, 但是灌溉水有效利用系数远低于世界先进水平, 在一些地方灌溉系统存在布局不合理、配水不准确、管理粗放等现象, 而全球变暖使得降水更加不稳定, 干旱和暴雨出现频率提高, 传统的依靠固定的设计保证率来建设灌溉系统的方式不能很好地适应水文不确定性, 所以怎样根据精确的水文学数据分析出一个适合本地区的农田水利灌溉系统就成为急需解决的问题。水文学是对水循环的过程和时间空间的变化进行研究的方法和技术手段, 包括降水、蒸发、径流、下渗、土壤水分运动以及地下水资源补充等内容的定量化描述与预报。把水文学的研究成果用于灌溉系统的改进上就可以从根本了解一个地区水资源的来源、转化和消耗情况, 从而更好地进行灌溉用水量的估算、水源工程建设规模的确定、渠道输配水能力的改善以及田间灌溉方式的选择等。

1 水文分析在农田水利灌溉系统中的作用机理

1.1 灌溉系统优化对水文信息的基本依赖

灌溉系统的根本任务是根据作物需水特点, 在其缺水时期利用工程技术手段补充其所需水分。而要完成这个任务必须解决三个最基本的问题: 灌多少水、何时灌水、从哪里引水。而这三个方面都离不开对当地水文过程的认识。灌水量是根据作物蒸散量、有效降雨量以及土壤持水量等因素来确定; 何时灌水是根据土壤湿度变

化情况以及短期降雨预报来进行决策; 而取水又是根据地表径流可利用量、地下水资源可开采量以及河道生态流量等进行估算^[1]。如果没有可靠水文资料作为支撑, 那么灌溉系统的优化就只能是“无米之炊”或者“拍脑袋”。

1.2 水文分析成果向灌溉参数的转化路径

水文学中产生大量信息需转换成适合灌溉工程使用的参数, 如降雨频率分析所得结果可转化为一定灌溉设计保证率下设计净雨量; 蒸散发计算成果可转变为作物系数以及参考作物蒸散量; 径流模拟成果可用于得到不同水文年型条件下河流可引水量; 地下水动态监测成果可用于确定井灌区合理井间距及单井出水量等。而进行上述工作就需要有水文模型与灌溉模型之间联系, 一般采用方法是开发水文-灌溉耦合软件, 在同一时间步长内使降水量、蒸发量、径流量以及灌溉水量同时进行计算, 从而能够及时了解各种灌溉措施对于整个水文循环所带来的变化, 防止个别地方灌溉造成更大范围内的缺水问题。

2 灌溉系统优化的关键水文分析内容

2.1 降水特性分析与有效降水量计算

降水是农田水分的主要来源。对某地区较长时期的降水资料进行统计分析, 如年际变化趋势、年内的分布情况、不同重现期的设计暴雨量以及设计干旱期等都是编制灌溉计划的基础。特别是要重视作物生长期降水量保证率问题, 因为即使是年降水量很丰富, 但如果集中在非生长期或者作物不需要水季节, 则对于灌溉作用不

大。有效降水量是能被作物所吸收利用的一部分降水,它应该包括地表径流损失、深层渗漏损失以及植株截留损失等。不同类型的土壤、不同的作物种类以及不同的耕作方式下有效降水量是有很大的区别的,在水文学上一般用 SCS-CN 曲线法或者水量平衡法来逐日计算^[2]。而在灌溉工程设计中,要把有效降水看成一种免费、优先使用的水资源,在确定灌溉制度时首先扣除这部分水量,从而尽可能降低人工灌溉对能量和物质的需求。

2.2 参考作物蒸散量与作物需水量估算

蒸散发是农田水分消耗的主要方式,精确测定作物蒸散量是制定灌溉指标的基础。参考作物蒸散量(ET₀)用彭曼-蒙蒂斯公式计算,需提供温度、湿度、风速、日照等气象参数,在无足够气象观测资料情况下也可使用 Hargreaves 公式或温度法代替,但精度较差。将 ET₀ 乘以作物系数 K_c 即为作物蒸散量 ET_c。作物系数根据作物种类、生长时期以及气候差异而有所不同,在水文工作中应当结合当地试验资料对 FAO 提出的 K_c 进行修正。对于一年多次种植的地区还需要计算总的区域需水过程,考虑到各种农作物种植比例以及播种期的不同所带来的影响。灌溉规划是以 ET_c 减去有效降水量后剩余需水量为基础再加上田间灌溉水利用效率和输配水过程中产生的损耗所得到的总灌溉需水量来决定水利工程建设规模。

2.3 径流模拟与地表水可引水量分析

对于以河流、水库等地面水资源为灌溉水源的灌区,在水文学上进行径流预报是必要的。利用概念性水文模型(如新安江模型、TOPMODEL)、分布式水文模型(如 SWAT、VIC)都可以对不同降雨情况进行流域产汇流过程预报,得到旬、月甚至年径流过程。而在灌溉规划设计中要关注两个方面的径流特性,一个是枯水期最小流量,决定无调节引水灌区最大可供水量;另一个是汛期洪峰流量,是渠首进水闸及冲沙设施设置依据。而对于有水库灌区,还需做水库径流调节计算,找出兴利库容与灌溉保证率之间关系^[3]。在进行灌溉工程优化过程中,也必须考虑到上游取水以及生态基流等因素,求得真正可利用灌溉水量,防止过度引水造成河流干涸或者生态环境恶化问题发生。

2.4 土壤水分动态与田间墒情监测

土壤是作物生长基质,同时也是天然调蓄水库。而土壤水分变化受到降雨、蒸发、作物蒸腾、入渗以及毛管上升水流等因素影响,在水文学上用土壤水分平衡公式来表示这一过程,其中田间持水量、凋萎含水量和土壤饱和含水量是三个重要参数,分别表示作物生长上

限、下限和最大值。采用时域反射仪、频域反射仪或中子仪等仪器对某一点进行定点观测,可以得到该点土壤水分随时间变化情况,进而反算出真实蒸散发量并用于改进水文模型参数。灌溉管理需要将墒情监测与灌溉系统结合在一起,在监测点土壤水分降低到一定程度(一般为田间持水量 50%-70%)后发出灌溉信号。这样基于墒情反馈机制闭环控制方式比基于定时灌溉方式更加节省水资源。

2.5 地下水动态与井灌适宜性评价

在井灌区或者井渠结合灌区,对地下水进行水文分析是灌溉优化的前提条件。要分析地下水位年际以及年内变化特征并找出其补给源(降水入渗、灌溉回水、侧向径流)与排泄方式(潜水蒸发、人工抽取、地下径流)。通过地下水数值模拟软件(如 MODFLOW)计算不同抽水量下相应水位下降情况,可以起到预防由于过量开采造成地面沉降或水质污染问题。在灌溉系统优化过程中还要明确该区域内可被开发的地下水最大数量,也就是多年平均补给量减去生态环境所需水量之后剩余部分。单井出水量以及降落漏斗大小主要由含水层渗透率、给水度以及井本身构造决定,在此基础上进行水文分析来选择最优井位,使得各口井之间相互影响最小但总出水量最大。

3 基于水文分析的灌溉系统优化方法

3.1 多源数据融合的灌溉需水量预测

传统灌溉需水量预测主要采用定额法,即根据历年统计的每亩平均用水量乘以灌溉面积进行计算,而未考虑不同水文年型以及作物实际需水量。基于水文分析的方法可以整合多种信息来源:利用数值天气预报中未来 7-15 天的气温、降雨量、辐射等信息驱动 ET₀ 预报模型;利用遥感反演得到的植被指数(NDVI、LAI)计算出当前作物系数 K_c;利用土壤水分同化系统获得初始墒情场。把它们代入到水文-灌溉耦合模型中就可以逐日预测未来一段时间内净灌溉需水量。与传统方法相比,这种方法可以减少大约 20%-30% 的误差,在一定程度上有利于灌区制定一周或者十天左右的供水计划。如果某个地方缺乏实时数据,则可以用典型水文年的方法,即根据以往降水量大小判断现在是丰水年还是平水年或者是枯水年,再选取相应年份的需求量过程线。

3.2 渠系配水优化模型与输水效率提升

渠系是灌溉系统骨架,其输配水效率影响灌溉水利用系数,在此基础上建立渠系配水优化模型,目标是使渠道渗漏损失最小或者轮灌组流量均匀或者总灌溉时

间最短,而受到渠道过流量限制、水位相接和农田需水时间限制。需要水文参数有不同土壤条件下渠道渗漏系数(与地下水位埋深有关)、不同闸门开度下水位-流量关系曲线以及渠道沿途蒸发损失率等。优化得到各分水口开启时间和闸门开度。对已建渠系来说,优化主要是轮灌制度改变,即把灌区分成几个轮灌组,一组内同时放水,组间按次序轮流,从而降低渠道中退水和空流时间^[4]。水文分析也可用来评估渠道防渗效果,比较改造前后渗漏损失量,得出每投入一元钱所节省水量,为防渗工程提供参考依据。

3.3 灌区水资源时空配置策略

在多水源灌区(地表水、地下水、再生水、雨水集蓄等)中,水文分析是水资源优化配置的基础。从时间上看,依据径流丰枯程度以及农作物需水特点,“丰蓄枯用”、“以丰补欠”。即在汛期将河道多余径流充入水库或者补充地下水;而在枯水期优先使用地表水,保留作为战略储备的地下水。从空间上看,根据各地不同的水文地质情况及农作物种类,实行分区分类供水:地下水埋藏浅、水质好的地方大力发展井灌;靠近河流或渠道的地方以地表水灌溉为主;地形较高、离水源较远的地方提倡雨水集蓄补水。水文分析中对水资源的评估也可用来确定合理的灌溉规模,在设计灌溉面积大于当地可利用水量的情况下,要改变种植方式或引进外部水源,否则会造成灌溉设施利用率低甚至地下水位不断降低。

3.4 灌溉制度的动态调整方案

灌溉制度是指灌水时间和灌水量及灌溉周期等。传统的灌溉制度一般按固定的生育时期来安排,比如小麦起身期浇一次水,灌浆期浇第二次水等,这些固定的灌溉制度不能应对降水的变化。而基于水文学的方法则是通过反馈调整的方式进行灌溉管理,在根区水势不断被土壤水分平衡模型所预报的情况下,如果预计在未来的一天之内根区含水量会低于灌溉下限,则发出灌溉的通

知;然后根据短期降水预报判断是否推迟灌溉(如果有下雨就用自然降水代替灌溉);最后再根据现有的土壤水分亏缺状况确定最合适的灌溉量,使得灌溉之后的土层含水量恢复到田间持水量的85%-95%左右。这种方法能够充分利用水文预报的信息,可以减少不必要的灌溉以及过度灌溉的问题,在灌溉工程的设计时也应留有足够的空间以满足动态灌溉制度的需求,如分片分区设置的田间阀门,墒情遥测装置,灌溉管理系统等。

4 结语

基于水文分析的区域农田水利灌溉系统优化,实质上是把对水循环的认识应用于实际灌溉中。以水文分析对于灌溉的作用为切入点,介绍了降雨量分析、蒸发量估算、径流计算、土壤含水量观测以及地下水资源评价等内容,在此基础上提出多种来源的数据相结合的需水量预测方法、渠道配水优化方法、水资源空间时间分配方法以及动态灌溉制度的方法。通过研究发现,将水文分析贯穿到灌溉系统的设计、施工、运行和管理之中,可以有效提高灌溉水利用率,使灌区具有更强抵御气候波动和极端水文条件的能力。未来的研究工作可考虑开发适用于不同作物种植模式下的分布式水文-灌溉耦合模型;利用强化学习进行智能化灌溉控制;建立跨灌区范围的大数据共享平台,促进水文研究成果共享应用。

参考文献

- [1] 田胜林. 农田水利设施优化改造对灌溉效率的提升作用[J]. 山东农机化, 2026, (2): 47-48.
- [2] 高克成. 高标准农田水利灌溉设施技术的优化设计与实施效果分析[J]. 河北农业, 2026, (1): 129-130.
- [3] 唐健. 农田水利灌溉质量提升优化策略研究[J]. 河北农业, 2025, (12): 127-128.
- [4] 代景强. 农田水利工程优化灌溉系统的关键技术分析[J]. 河北农机, 2025, (23): 136-138.