

灌溉实时调度研究进展

顾世祥¹, 傅 骅¹, 李 靖²

(1. 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021; 2. 云南农业大学, 云南 昆明 650201)

摘要: 灌溉实时调度是农业水管理走向智能化、自动化和现代化的重要标志, 综合应用地理信息系统、卫星遥感技术、全球定位系统、计算机、人工智能、信息技术, 以及农业灌溉、气象学、系统工程等多学科的最新成果, 提高调度的灵活性、可靠性、实用性, 是灌溉实时调度今后的发展趋势。同时, 也面临着基础设施落后、技术力量薄弱、信息处理费用过高、卫星传输周期长等多方面的困难。综述了国内外在实时灌溉预报、渠系动态配水、土壤墒情监测、计算机辅助决策支持系统以及灌区空间信息管理等方面的最新研究进展和主要成就, 力求促进灌区用水管理研究的发展。

关键词: 灌溉管理; 实时调度; 地理信息系统; 卫星遥感技术; 进展

中图分类号: TV212.54; G353.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2003)05-660-07

实时调度即根据短期的来水和用水预报, 进行水资源系统的科学调度, 以确定短期的管理运行决策, 并使其与中长期最优运行策略偏差最小的短期调度, 需要具备预测预报系统、信息采集与处理系统、决策系统、计算机辅助支持工具以及自动操作系统等条件。灌溉实时调度包括作物需水量及灌溉实时预报、渠系动态配水、田间水分动态模拟监测、计算机辅助决策支持系统、灌区空间信息管理等内容。

1 实时灌溉预报

实时灌溉预报的基本原理就是对灌区内作物短期甚至逐日的水分变化作出准确预报, 第1类方法是在继承传统的中长期灌溉用水预报基础上发展的短期预报方法, 通过作物生长期田间土壤水分的逐日模拟, 以规定的土壤含水率(或水层)允许上下限作为发布灌溉的阈值, 遭遇突然的降水或灌溉补水则及时调整预报结果, 并对土壤水分变化曲线进行修正^[1,2]。目前, 短期气象和降水预测精度已大为提高, 作物需水量就成为田间水分平衡中惟一待定的未知项。由于作物系数、土壤水分参数在特定的田块和实际年份基本不变, 因而作物需水量预报的关键就是参考作物腾发量的预测。作物需水量可以通过分别计算植株蒸腾和株间蒸发量得到, 土壤潜在蒸发量、实际蒸发量计算公式^[3]:

$$E_p = c_1 ET_p e^{-c_2 LAI} \quad (1)$$

$$E_a = \frac{E_p}{t^{0.5}} \quad (2)$$

式中 E_p 、 E_a 、 ET_p 分别为土壤潜在蒸发量、实际蒸发量和作物潜在腾发量; LAI 为叶面积指标; c_1 、 c_2 为回归系数; t 为自土壤充分供水至计算时刻的时间间隔。

也有采用如下模型^[4]

收稿日期: 2002-05-20; 修订日期: 2002-10-30

基金项目: 云南省自然科学基金资助项目 (99E0015Q)

作者简介: 顾世祥(1972-), 男(彝族), 云南镇雄人, 云南省水利水电勘测设计研究院工程师, 硕士, 主要从事节水灌溉理论技术研究。E-mail: gushxang@public.km.yn.cn

$$ET_c = K_e K_s K_{cb} ET_0 + ET_0 (1.15 - K_{cb}) \left(\frac{-0.5 - p}{s - 0.5} \right)^{0.5} \quad (3)$$

式中 ET_c 、 ET_0 分别为作物需水量、参考腾发量； K_e 、 K_s 、 K_{cb} 分别为盐分反应系数、土壤水分胁迫系数、作物系数； s 、 p 分别为饱和含水率、实际含水率和调萎点。

或者是根据影响作物需水量的气象、作物、土壤因素的相互独立性，分别对各项进行预测计算^[5]：

$$ET_{ci} = \left[i \cdot \overline{ET_{0max}} \cdot e^{-\left(\frac{i - I_m}{A_0} \right)^2} \right] \cdot f_c(LAI_i) \cdot f_s(i - p) \quad (4)$$

式中 i 为日序数(1~365)； i 为天气类型修正系数； $\overline{ET_{0max}}$ 为多年平均最大日 ET_0 均值； I_m 为对应的日序数； A_0 为经验参数； $f_c()$ 、 $f_s()$ 分别为作物系数函数、土壤水分胁迫系数函数。该数学模型及其改进方法在广西桂林、河北唐海、湖北漳河、山西霍泉等不同纬度、气候和作物种植区的应用结果表明，预测输入因子少，模型稳定，预报准确度较高。

由于作物需水量逐日预报的关键是参考作物腾发量，从而还可采用神经网络^[6]、随机过程^[7]、时间序列^[8]、灰色系统^[9]及多元线性、非线性回归等方法进行参考作物腾发量预测，再求出作物需水量。

对于旱作物，实时灌溉预报的第2类方法是依靠土壤墒情监测技术获得每一时刻的土壤水分状况，根据其变化趋势提前作出灌水预报，核心是求解一维土壤非饱和流方程。土壤墒情监测模拟主要有经验公式法、土层水量平衡法、土壤水动力学法、大孔流法及消退系数法等，具体测量技术有电容法、电阻(导)法、TDR(时域反射仪)、张力计等。此外，通过建立概念性土壤墒情监测模型，把土壤剖面分为饱和与非饱和区，后者又进一步细分为作物根系层及非根系层，考虑蒸发、作物栽培情况下的预测模型^[10]。

第3类方法是采用数学模型与监测手段相结合，利用定期测定田间土壤含水率对灌溉预报模型的模拟结果进行不断地修正，使整个生育期的预报和实测结果的误差平方和最小，发挥预报模型和实时监测技术的优势进行互补，提高调度的准确性和灵活性。如利用时域反射仪、土壤水分探头获取田块的实时含水量，以便携式叶面积仪测定作物叶面积指数，确定此时刻的作物系数，通过红外接口或数据下载输入灌溉制度模拟模型，寻求该田块的下一次补灌点发生日期及灌水量，模拟生育期内的作物籽实、植株、根系的生长过程。

经过在全球范围内长期的探索研究，联合国粮农组织(FAO)于1998年选定了 Penman-Montieth 方程作为全球范围内惟一有效使用的参考作物腾发量计算方法，此前一直沿用的改进 Penman 法，原因是在某些地区后者可能对作物需水量估算过大。并提出以小时为时段的参考作物腾发量数学模型^[11]：

$$ET_0 = \frac{0.408 (R_n - G) + \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 [e^0(T_{hr}) - e_a]}{1 + 0.34 u_2} \quad (5)$$

式中 R_n 为地面净辐射，MJ/m²·h； G 为土壤热通量，MJ/m²·h； $\frac{37}{T_{hr} + 273}$ 为饱和水气压曲线上 T_{hr} 处对应斜率； T_{hr} 为小时平均气温，℃； e^0 为湿度表常数，kPa； $e^0(T_{hr})$ 为 T_{hr} 时的饱和水气压，kPa； e_a 为小时平均水气压，kPa； u_2 为小时平均的 2 m 高处风速，m/s。

同时，对非标准条件下的作物系数模型进行补充完善，为实时灌溉预报奠定了坚实的理论基础。此前一直常用的单系数计算公式推荐作为农业灌溉工程规划设计、灌区中长期运行调度管理的适用方法。而本次补充的双系数作物系数公式则主要用于估算土壤水分蒸发、实时灌溉调度运用、灌区水质模拟以及科学研究应用等方面。双作物系数计算数学模型为

$$K_c = K_e + K_{cb} K_s K_{sa} \quad (6)$$

其中

$$K_e = K_r (K_{cmax} - K_{cb}) \quad (7)$$

$$K_{cb} = K_{cb}(Tab) + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left[\frac{h}{3} \right]^{0.3} \quad (8)$$

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} \quad (9)$$

$$K_{sa} = 1 - \frac{b}{100 K_y} (EC_e - EC_{\text{threshold}}) \quad (10)$$

式中 K_e 、 K_{cb} 、 K_s 、 K_{sa} 分别为土壤蒸发系数、基本作物系数、土壤水分胁迫系数、土壤盐分胁迫系数； $K_{cb(Tab)}$ 为不发生水分胁迫、管理条件良好、 RH_{\min} 和 u_2 分别近似等于 45% 和 2 m/s 情况下的基本作物系数（已将各种作物整理成表格供查询使用）； K_r 为取决于表层土壤水分蒸发累计深度的土壤蒸发减少系数； K_{cmax} 为降雨和灌溉之后的 K_c 最大值； h 为作物中后期 20% RH_{\min} 80% 时的平均高度，m； RH_{\min} 为平均最低相对湿度，%； TAW 为土壤总可利用水量，mm； RAW 为土壤实际可利用水量，mm； D_r 为根系层水分消耗量，mm； EC_e 为作物根区饱和土壤浸提液的平均电导率，dS/m； $EC_{\text{threshold}}$ 为当作物产量首次减少低于最大期望产量时的 EC_e 阈值，dS/m； K_y 为产量反应系数； b 为减少单位 EC_e 对应的作物产量减少量，%/ (dS m^{-1})。

2 渠系动态配水技术

渠系水情监测和配水模式研究是灌区渠系动态配水技术的主要方面，在多水源灌区，还要预测分析灌区内部小型蓄引提工程的可供水量，制定渠道操作计划，包括各干支渠系统的灌溉需水量、放水口开闸时间、放水延续时间及取水流量。渠系动态配水的数学模型需要考虑各配水口下的作物种类、土壤水分状况、当地利用水量、渠道过水能力以及轮灌组合等方面，一般利用多阶段决策过程^[12,13]，或者是二次规划方法^[14]，以灌溉供水效益最大为目标。将灌溉配水渠道概化为一组导管，每根导管向下面的一个或几个斗口供水，即为一个轮灌组，采用 0~1 规划法求解一个灌水周期内各斗口的最佳轮灌组合，以达到整个配水渠道配水时间最短、流量稳定和输水损失最小^[15]。也有采用线性规划模型进行渠道配水研究，以净灌溉总收益最大为目标，并考虑了各级渠道实际放水时间、渠道输水、最小流量等约束条件，已成功地应用于印度的 Golawar & Golapar 渠灌区^[16]。或采用大系统递阶模型将整个灌溉区分解成作物层、支斗渠配水层、全灌区范围等层，各层以缺水水量作为协调变量，以灌溉净效益最大、灌溉亏缺水最小等为目标函数^[17,18]。而遗传算法作为一种快捷的模型求解算法也开始应用于灌区实时优化配水模型的解算^[19]。

渠系动态配水计划的实现多采用传感器，电子检测技术和远动技术，自动监测渠首水源及斗口水位流量，及时传输到管理中心，制定或修正已发布的配水计划，通过闸门远动控制放水量。广西青狮潭灌区管理局的 SCADA 系统由中心站、遥测中继站、自动气象站、渠道水情监测站、田间遥测站等组成^[26]，以超短波的 230 MHz 频段进行通讯，渠道水情采用自报式 RTU 终端，当渠道水位发生 1 cm 或田间水层 1 mm 的变化即自动采样并传回中控系统，也可人工定时或 1~6 h 不同间隔地自动发送实测信息；田间监测系统大多为澳大利亚 ICT 公司研制的自动设备部分消化吸收，叶面积、光合测定等手动项目通过检查置数器录入观测数据，再发往中心站。应用于江苏省洪金灌区的 IAMS 系统将灌区多媒体信息与集散型闸群测控系统融为一体，提高了调度的可视化水平，系统可通过无线电台发布灌溉信息，以国际互联网与相关单位交换资料，现场测控终端机核心部件为 MCS-96 系列产品^[21]。也有采用现场智能单元 LIU 与中控系统进行实时通讯，接受中心发布的操作指令，系统通讯协议是 MDLC 协议，以有线、PSTN 或 RS485 等方式均能进行正常的的数据及图像传输；运用超声波传感器测量水闸、拦河坝、泵站的上下游水位，闸门开度用高精度闸位传感器测量，数据经 LIU 处理后显示或传回中心；主要建筑物运行状态监控采用视频遥测单元 VRU 采集所连接各摄像头的信息，传输给 RTU 上的无线图像传输系统 RIX，以 JPEG 格式定时、随机或人工控制向中心传送该建筑物的运行工况图像^[22]。

3 计算机辅助决策工具

FAO 推荐使用 Martin Smith 等发表的灌溉规划及管理工具 CROPWAT 软件包^[23]，采用 Penman-Montieth 方程计算作物需水量，还具有拟定灌溉制度和农业供水计划、利用全生育期的作物水分生产函数估算有限供水情况

下的作物减产损失等功能。此外，灌溉计划管理信息系统 SIMIS 作为辅助灌溉计划和灌区管理的计算机软件，可提供英、法及葡萄牙等语种环境，不仅存储有灌区工程基本信息，还可进行灌溉规划、配水计划拟定、统计分析、水费计算、维护活动控制以及运行评价指标等方面的辅助分析与管理^[24]。MIKE 11 & MIKE SHE 系统包含了渠道水力学模拟及灌区水文、作物冠层截留和腾发、地面径流、地下饱和和非饱和区水流、灌溉制度、作物生长等组成的流域水文模型^[25]。Singh G 等建立了用于模拟土豆灌溉制度的模型 SimISP，通过叶气孔阻力推求作物蒸腾。Cabelguenne M. 等对原来的管理工具 EPIC 作改进性研究，考虑了不同生育阶段缺水的产量效应，根据设定的目标把可利用水量在全生育期作最优分配，新的实时灌溉管理及气象预测工具 EPIC-PHASE 以日为计算步长^[23]。CROSOWAT 通过预测作物生育期内根系区土壤水分动态和作物参数，对土壤、水系统的影响及边界条件的恰当考虑使得模拟结果更符合实际^[28]。

管理信息系统、专家系统、决策支持系统等在灌溉运行管理中的应用是灌溉系统走向智能化、现代化的体现^[36]。Holsapple C. W. 等在 1976 年开发出第一个用于流域管理的决策支持系统，Raman H. 把传统的计算机程序与专家系统结合起来进行干旱管理，根据干旱程度和不同的年初蓄水量，采用线性规划模型进行作物种植结构优化^[30]。Palmer R. N. 等通过对西亚图、华盛顿地区遭受的 1987 年特大旱灾进行分析，为解决城市生活、养鱼、航运及生态保护诸方面的约束，利用规则库对西亚图水管理处的工作人员以交谈的方式获取调度经验，指导今后系统面临干旱时的调度决策^[31]。灌区决策支持模型 CADSM 能模拟作物需水过程和产量，预测土壤盐份及水分胁迫对产量的影响，向用户提供不同类型渠系的配水计划，对各种供水决策进行用水效率和生产率、公证性评价。Jacucci G 等研制的面向欧洲地中海各国农业机构和农户的决策支持系统 HYDRA-DSS^[32]，引入信息模型以提高灌溉实践的可预见性，包含了一套对不同水平年作物生长模拟模型、优化模型及农业气象、土壤信息系统，并采用地理信息系统、图形用户界面等先进技术。George B. A. 等开发了参考作物腾发量预测的决策支持系统，根据用户输入的数据型式，选择最适合的计算方法使预测精度最高^[33]。

《华北地区节水型农业技术与示范》项目对我国缺水最严重的华北地区冬小麦、夏玉米、棉花等主要灌溉作物的各种节水措施进行系统地研究、总结，提出节水型农业体系概念，并将研究成果采用 Turbo Prolog、dBASE、Turbo C 等语言编写成包含知识库、推理机、动态数据库、人-机接口和知识获取 5 个子系统模块的华北地区节水型农业技术体系决策咨询系统 NCWSA^[34]。HQIWADSS 属于 Lotus 1-2-3 电子表格软件应用于农业灌溉管理的第 3 代研究成果，系统包括基本资料与信息管理、作物需水量预报、田间水分动态模拟、渠系动态配水计划、图形显示、模型参数及变量查询、结果输出及系统文件操作等，已成功应用于山西省洪洞县霍泉灌区的灌溉管理实践。中国农业大学开发研制出土壤水分运动和作物生长耦合模型 SWAF 1.0，其土壤水运动方程采用有限元数值方法求解，具有农田水分循环系统模拟、灌溉制度模拟器、农田水分利用效率分析、作物生产潜力分析、节水调控的潜力分析、四水转化模拟等功能^[35]。

4 灌区空间信息管理

近年来，国际上开始利用地球资源卫星传输的遥感信息对灌区作物分布、田间水分状况、化肥农药喷施、灌溉进程等进行实时监测，以 GIS 与 RS 相结合进行灌区空间信息的管理分析，利用 GPS 对灌区内部的监测点进行精确定位。采用卫星遥感监测技术进行灌溉管理的物理学基础，是根据地表水分及植被在可见光、近红外、热红外波段的反射特性，以植物冠层温度差作为土壤水分相关的参量，并用覆盖度对冠层温度进行修正，再经大气校正后得到通用植被指数 NDVI，其与生物量、覆盖度及叶面积指数的相关性分析可得土壤含水率^[36,37]。

国际水管理研究院 (IWMI, 前身为 IIMI) 从 1997 年开始进行一项长期的计划，研究利用 RS、GIS 及水文模型在政策、策略以及措施层次上辅助灌溉管理，并且作为方法探索在印度的 Bhadra 工程进行了试点。Heinemann A. B. 等应用 GIS 作为灌区信息系统平台，选择农业与环境地理信息系统 AEGIS/WIN 和决策支持系统工

具 DSSAT 相结合, 考虑了作物的需水量、灌溉退水、肥料流失等因素, 以及土壤、气象因素的影响, 建立县级区域的作物空间需水模型, 并成功地用于巴西 Parana 州的 Tibagi 流域^[38]。Ines A. V. M. 等将 GIS 和作物生长模型有机结合起来应用于菲律宾 Ilocos Norte 境内的 Laoag 流域 1996 年 10 月~1997 年 9 月年度水稻、玉米、花生等作物的水分生产率预测^[39]。印度的 Ray S. S. 等利用卫星遥感技术 RS 和 GIS 工具进行了 Gujarat 境内 MRBC 灌区的年作物腾发量估算^[40]。Kite G 和 Droogers P. 根据土耳其西部 Gediz 河谷的实际应用情况, 从预测精度、技术成本、实用性等多方面对卫星遥感、水文模型以及田间监测三种途径预测作物实际腾发量进行了比较, 结果表明, 难以对上述三种技术手段进行清晰的优劣比较, 田间实时监测数据看来是要可靠一些, 但是 RS 更适用于大范围的监测, 最好是将方法集成于一体运用, 则得到的结果最佳^[41]。Bastiaanssen W. G. M. 试图建立一个基于 RS 数据使用条件下的新一代灌溉评价指标, 用于量化实际的费用效益比, 特别是现在不同国家及不同灌区通过遥感实测所得标准化数据收集的费用正在持续下降情况下显得十分必要^[42]。由于借助于地球资源卫星、GPS、GIS 等现代化技术进行农业灌溉管理与传统的二维平面管理体系发生重大飞跃, 灌区管理的目标成为单位面积耕地在公平供给单位水量情况下的作物产量最大, 管理的重点也转移到灌溉系统运行状态的监测和评价、评价结果的问题诊断、灌溉举措的研究以及农户的参与等方面^[43]。

5 结 语

将计算机、人工智能、信息技术、地理信息系统、卫星遥感、全球定位系统等现代高新技术与传统的作物栽培、气象学、灌溉排水、系统工程、经济学等学科基本理论相结合, 提高灌溉实时调度的灵活性、准确性、实用性, 是灌溉实时调度今后的发展趋势。同时, 也面临着基础硬件设施落后、技术力量薄弱、信息处理成本较高、卫星传输周期长等多方面的困难, 只能在实施灌区信息化建设的过程中, 依靠国家加大投入才能逐步实现。灌溉实时调度是农业灌溉现代化管理的核心及重要组成部分, 也是我国正在提倡水利现代化的一个方面。在设施农业、精确农业水利信息化蓬勃发展的今天, 它具有更加广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 李远华. 实时灌溉预报的方法与应用[J]. 水利学报, 1993(12):46-51.
- [2] Gwing J W, Ejeji C J. Real-time scheduling of supplemental irrigation for potatoes using a decision model and short-term weather forecasts [J]. Agricultural Water Management. 2001, 47(2):137-153.
- [3] Sriramany S, Murty V V N. A real-time water allocation model for large irrigation systems[J]. Irrigation and Drainage Systems, 1996, 10(3):109-129.
- [4] Walker W R, Prajanwong S, Allen R G, et al. USU command area decision support model-CADSM[A]. Netherland: In: Crop-Water-Simulation Models in Practice[C]. Netherland: Wageningen Press, 1995. 231-271.
- [5] Mao Z. Forecast of crop evapotranspiration[J]. ICID Bulletin, 1994, 43(1):23-36.
- [6] 顾世祥, 王士武, 袁宏源. 参考作物腾发量预测的径向基函数法[J]. 水科学进展, 1999, 10(2):123-128.
- [7] Tsakiris G. Daily potential evapotranspiration modeling[J]. Agricultural Water Management, 1988, 13(2):145-158.
- [8] Mari o Miguel A, Tracy John C, Taghavi S Alireza. Forecasting of reference crop evapotranspiration[J]. Agricultural Water Management, 1993, 24(4):163-187.
- [9] 郭宗楼, 白宪台, 马学强. 作物需水量灰色预测模型[J]. 水电能源科学, 1995, 13(3):265-271.
- [10] 蒋洪庚, 夏自强, 陈海芳, 等. 概念性土壤墒情模型在霍泉灌区的应用研究[J]. 水文, 1999(6):12-16.
- [11] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guideline for computing crop requirement[M]. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO of UN Rome, Italy. 1998. 51-202.
- [12] Reza J, Roldán J, Alcaide M, et al. Optimisation model for water allocation in deficit irrigation systems: , [J]. Agricultural Water Management, 2001, 48(2):103-132.
- [13] Paul S, Panda S N. Optimal irrigation allocation: A multilevel approach[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 2000,

- 126(3):149 - 156.
- [14] Wardlaw R, Barnes J. Optimal allocation of irrigation water in real time[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 1999, 125(6):345 - 354.
- [15] Wang Z, Reddy J M, Feyen J. Improved 0 - 1 programming model for optimal flow scheduling in irrigation canals[J]. *Irrigation and Drainage Systems*, 1995, 9(3):105 - 116.
- [16] Shyam R, Chauhan H S, Sharma J S. Optimal operation scheduling model for a canal system[J]. *Agricultural Water Management*, 1994, 26(4):213 - 225.
- [17] ShangGuan Z P, Shao M G, Horton R, *et al.* A model for regional optimal allocation of irrigation water resources under deficit irrigation and its applications[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 52(2):139 - 154.
- [18] Rao N H, Sarma P B S, Chander S. Optimal multicrop allocation of seasonal and intraseasonal irrigation water[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(4):551 - 559.
- [19] Wardlaw R, Bhaktikul K. Application of genetic algorithm for water allocation in an irrigation system[J]. *Irrigation and Drainage*, 2001, 50(2):159 - 170.
- [20] 刘晶, 陈智. 灌溉节水监测技术在青狮滩灌区水情自动化系统中的应用[J]. *水利水电技术*, 2002, 33(1):62 - 67.
- [21] 刘桂宏, 孙健. 灌区灌溉管理监控自动化系统的开发和应用[J]. *灌溉排水*, 2001(1):65 - 68.
- [22] 张仁田, 肖坚, 鞠茂森. 灌区实时自动控制技术与优化运行系统关键技术[J]. *中国农村水利水电*, 2002(3):9 - 11.
- [23] Smith M. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management[M]. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 46. Rome, Italy, 1992, 1 - 65.
- [24] FAO. Land and Water Digital Media Series[M]. FAO, Rome, Italy. 1999. 1 - 43.
- [25] Singh R, Refsgaard J C, Yde L, *et al.* Hydraulic-hydrological simulation of canal-command for irrigation water management[J]. *Irrigation and Drainage Systems*, 1997, 11(3):185 - 213.
- [26] Singh G, Brown D M, Bour A G. Modelling soil water status for irrigation scheduling in potatoes: , [J]. *Agricultural Water Management*, 1993, 23(4):329 - 358.
- [27] Cabelguenne M, Debaeke Ph, Puech J. Real time irrigation management using the EPIC-PHASE model and weather forecasts[J]. *Agricultural Water Management*, 1997, 32(3):227 - 238.
- [28] Joshi M B, Murthy J S R, Shah M M. CROSOWAT: A decision tool for irrigation schedule[J]. *Agricultural Water Management*, 1995, 27(3):203 - 223.
- [29] Bakker-Dhaliwal R, Bell M A, Marcotte P, *et al.* Decision Support Systems(DSS): information technology in a changing world[J]. *IRRN Review Philippines*, 2001, 26(2):5 - 12.
- [30] Raman H, Mohan S, Rangacharya N C V. Decision support for crop planning during droughts[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1992, 118(2):229 - 241.
- [31] Palmer R N, Hohmes K J. Operation guidance during droughts: Expert System approach[J]. *Journal of water resources planning and management*, 1988, 114(6):647 - 666.
- [32] Jacucci G, Kabat P, Verrier P J, *et al.* HYDRA: A decision support model for irrigation water management[A]. In: *Crop-Water-Simulation Models in Practice*[C]. Netherland:Wageningen Press, 1995. 315 - 332.
- [33] George B A, Reddy B R S, Raghuvanshi N S, *et al.* Decision support system for estimating reference evapotranspiration[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2002, 128(1):1 - 10.
- [34] 胡毓骥, 李英能. 华北地区节水型农业技术体系[M]. 北京:中国农业出版社, 1995. 280 - 306.
- [35] 李保国, 龚元石, 左强, 等. 农田土壤水的动态模型及应用[M]. 北京:科学出版社, 2000. 194 - 199.
- [36] Thiruvengadachari S, Sakthivadivel R. Satellite remote sensing for assessment of irrigation system performance: A case study in India[M]. IFMI Research Report 9, International Irrigation Management Institute. Colombo, Sri Lanka. 1997. 1 - 23.
- [37] Sakthivadivel R, Thiruvengadachari S, Amerasinghe U, *et al.* Performance evaluation of the Bhakra Irrigation System, India, Using Remote Sensing and GIS techniques[M]. IWMI Research Report 28, International water Management Institute. Colombo, Sri Lanka. 1999. 1 - 22.
- [38] Heinemann A B, Hoogenboom G, de Faria R T. Determination of spatial water requirements at county and regional levels using crop models and GIS[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 52(3):177 - 196.

- [39] Ines A V M, Gupta A D, Loof R. Application of GIS and crop growth models in estimating water productivity[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 54(3):205 - 225.
- [40] Ray S S, Dadhwal V K. Estimation of crop evapotranspiration of irrigation command area using remote sensing and GIS[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 49(3):239 - 249.
- [41] Kite G, Droogers P. Comparing estimates of actual evapotranspiration from satellites, hydrological models, and field data: A case study from western turkey[M]. IWMI Research Report 42, International Water Management Institute Research Report. Colombo, Sri Lanka. 2000, 1 - 32.
- [42] Bastiaanssen W G M, Brito R A L, Bos M G, *et al.* Low cost satellite data for monthly irrigation performance monitoring: Benchmarks from Nilo Coelho, Brazil[J]. *Irrigation and Drainage Systems*, 2001, 15(1): 53 - 79.
- [43] Ambast S K, Keshari A K, Gosain A K. Satellite remote sensing to support management of irrigation systems: concepts and approaches[J]. *Irrigation and Drainage*, 2002, 51(1):25 - 39.

Advances in real-time irrigation operation^{*}

GU Shi-xiang¹, FU Hua¹, LI Jing²

(1. *Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research,*

Kunming 650021, China; 2. Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract : Irrigation real-time operation is an important mark of agriculture water management heading for intelligent, automation and modernization. Its future lies in synthesizing geographical information system, satellite remote sensing, global position system, computer, artificial intelligence, information technical, and agriculture irrigation, meteorology, system engineering, and improving the flexibility, reliability, and adaptability of irrigation operating. Meanwhile, it is faced with more difficulties such as the basic facilities backward, technical resources weak, and information process expensive, satellite transmission period longer, and so on. In order to promote development of irrigation water management research, this paper reviews the important advances and latest achievements in the research of real-time irrigation forecast, channel water dynamic allocation, field moisture monitor, computer assist decision support system and irrigation space information management.

Key words : irrigation water management; real-time operation; geographical information system; satellite remote sensing; advances

* The project is supported by Natural Science Foundation of Yunnan Province (No. 99E0015Q).