

灌区用水决策支持系统的现状及展望^{*}

马孝义, 王波雷, 张建兴, 范严伟

(西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨陵 712100)

摘 要: 文章系统分析和回顾了井灌区、渠灌区灌溉决策支持系统和综合利用水库优化决策支持系统的国内外研究现状及发展历程。指出了各类型灌区用水决策支持系统存在的不足与缺陷, 并提出了一些改进措施与方法。在此基础上, 结合现阶段灌区用水的实际及管理中出现的问题, 提出了以后灌区用水决策支持系统的发展趋势。

关键词: 灌区; 决策支持系统; 专家系统

中图分类号: S274.3, TP311.52

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2008)04-0028-05

Current Status of Irrigation District Water Using Decided Supporting System and Its Prospects

MA Xiao yi, WANG Bo lei, ZHANG Jian xing, FAN Yan wei

(Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The studying and development situation of well irrigation, canal irrigation area and comprehensive water using resources optimal decision support system were reviewed and analyzed systematically on domestic and foreign. It indicated the defects and improvement of the every water using model in area. The development trend of water using decision support system in irrigation area based on the present water using situation and the problems of the irrigation area management were proposed.

Key words: irrigation district; decided system; expert system

1 引 言

灌区用水系统的开发已有很长的历史, 它是由自然生态和社会经济系统复合而成的一种大系统, 具有随机性、多目标性和实时性等特点。涉及土壤学、灌溉排水工程学、统计学、运筹学等多学科以及知识获取、数据可视化、高性能计算等综合技术, 影响因素众多、决策问题复杂^[1-4]。处理灌区用水决策问题所采用的方法经历了一个由常规方法到系统分析方法的转变过程, 并向着与人工智能技术、决策支持系统技术相结合的方向发展。20 世纪 60 年代以前, 人们普遍采用常规的方法进行水资源决策, 但常规方法考虑备选方案数目有限, 考虑问题不全面、不深入。问题本身具有明显的半结构化或非结构化的特征。近几十年来, 由于人们应用系统分析的方法对灌区用水问题进行了广泛而深入的理论研究和工程实践, 取得了丰硕的成果和实践效益。但很多研究表明, 理论和实践之间存在差距, 实质上, 系统分析方法对于处理半(非)结构化问题并非十分有效。20 世纪 60 年代末、70 年代初, 人工智能研究取得进展, 专家系统(ES)和决

策支持系统(DSS)随之诞生并且应用^[5-6], 从而引起计算机、管理等各方面专家以及各级决策人员的普遍关注, 并将其广泛地应用到各个领域, 这些也为灌区用水决策问题的解决提供了新的思路, 灌区用水决策支持系统就是在这样的背景下产生的。

决策支持系统迄今尚无统一的定义, 但普遍认为决策支持系统是一个面向问题的基于计算机技术, 人机交互信息系统(图 1), 一般由数据库及其管理系统、模型库及其管理系统和人机交互系统三个基本组成部分。具有以下特点: (1) 是决策者的助手, 但不替代决策者做决定; (2) 扩展和增强决策者的能力, 提高决策的有效性; (3) 基于计算机技术, 把模型分析技术的应用与传统的数据处理功能结合起来; (4) 以半结构化和非结构化问题为研究对象, 帮助决策者完成半结构化、非结构化问题决策^[7]; (5) 对环境的变化和使用系统人员的决策方法有较强的适应性; (6) 使得用户便于应用各种模型, 可告诉他们采用某决策可能产生的后果。90 年代后, 由于人工智能在决策支持系统(DSS)中的广泛应用, 使得智能决策支持系统得以建立, 它是决策支持系统的进一步发

^{*} 收稿日期: 2007 10 25

基金项目: 国家自然科学基金项目(项目编号: 50479052); 国家科技支撑计划课题(项目编号: 2006BAD11B04); 西北农林科技大学青年学术骨干计划资助课题

作者简介: 马孝义(1965-), 男, 陕西凤翔人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程方面研究。E-mail: xiaoyimasl@yahoo.com.cn

展。智能决策支持系统使人机交互具有自适应性和沉浸感,可进行图、文、声、像、形,甚至姿态等多模式交互。使用目标导向的、合作式的交互方法,再加上人工智能中语音、图象处理及理解等技术,从而可以建立更为自然的人机界面,以利于 DSS 的推广应用^[8]。它不仅能做定量计算分析,还可把专家的经验及对系统的知识运用到模型中,知识库中的知识一般以人机交互方式直接把专家的知识输入进去,还可通过学习方式自动获取知识,或改善已输入的知识其结构如图 2 所示。

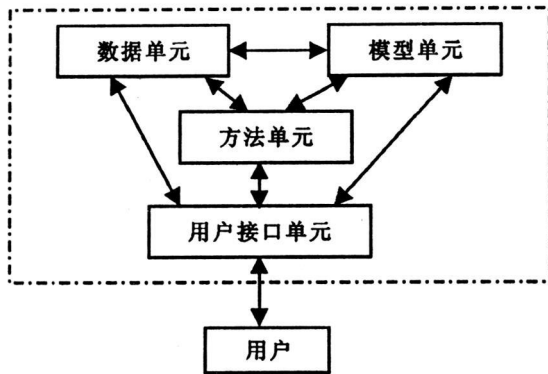


图 1 决策支持系统结构

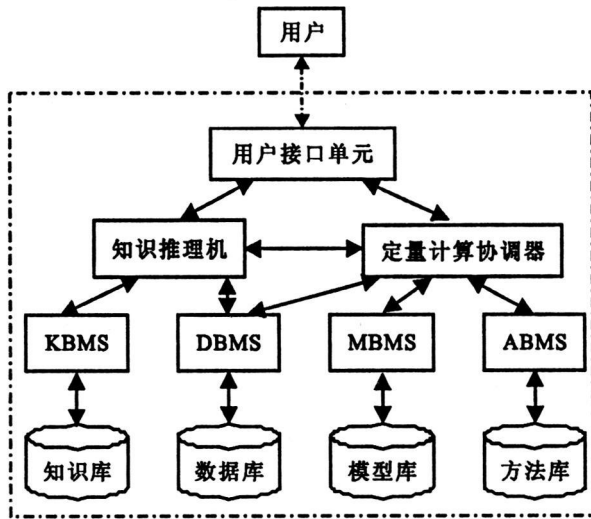


图 2 智能决策支持系统组成

2 灌区用水决策支持系统国内外研究简况

针对所解决问题的不同,有专门针对某一专业或行业的决策方式和决策内容设计的决策支持系统,灌区用水决策支持系统就是专门针对灌区水资源综合利用和优化调度而设计的决策支持系统。

2.1 井灌区灌溉决策支持系统

20 世纪 70 年代末 80 年代初,随着微机技术的迅速发展,国外开始研究人工智能技术、决策支持系统技术在灌区用水管理中的应用。1989 年德国政府在亚琛理工大学成立联合研究小组研究水资源保护的规划和管理应用 DSS。我国的井灌区灌溉决策支持系统则起步较晚,目前其主要思想是根据采集的土壤墒情、作物旱情、水源水情等信息,进行计算、分析、决策,做出灌溉预报,确定精确的灌溉时间和最佳

灌溉水量。利用决策结果对灌溉设备进行自动控制与监测,以达到高效、节水、节能的目的,同时多与计算机、各种程序语言和 3S 及遥感等高新技术结合。国内于 20 世纪 70 年代末开始研究专家系统,80 年代初期研究农业专家系统,但用于灌区用水决策方面的软件发展比较缓慢。尚虎君等运用了 Microsoft Access 和 VB 6.0,较早的提出了节水灌溉预报与决策专家管理数据库系统、计算机相结合的发展模式,解决了作物栽培管理及调控、节水灌溉预报决策、田间节水灌溉技术管理与决策、渠道量水及田间水量优化调配,渠系水资源优化配置等问题^[9],使得灌区的用水决策支持系统的开发取得一定的进展。王文娥等在对试验资料的定量分析和系统总结的基础上,利用“雄风”4.1 专家系统工具及 VB 语言,建立了河套灌区秋浇管理决策专家系统,包括早秋浇的原因和优点、秋浇决策预报、保墒调墒措施方案的确定及地下水位动态预报四个子系统^[10]。通过该套专家系统的建立,为灌区管理者提供了辅助决策,同时可以向灌区农民及其他情况相似的灌区推广该项技术,促进灌区管理的现代化、科学化。诸如此方面的决策系统如:王娟以 VB6.0 为开发平台开发了单井灌区及小型机电灌区管道灌溉计算机辅助设计系统,开发的该软件具有良好的人机对话机制,可协助用户完成井灌区和小型机电灌区的管道布置、各级管道流量推算、管道管径计算、田间排水沟间距的确定、水泵的选型、工程概算编制、工程经济分析、管网布置图的自动绘制、规划说明书的自动生成等,又能实现单井灌区和小型机电灌区灌溉管道的管径优化^[11]。以上这些系统的开发有效的解决了灌区的自动化控制及对水资源的综合调配,促进了灌区现代化,但是这些系统在与终端用户的衔接上开发不多,一般只能由专业技术人员进行操作,从而使得真正用水者(农户)积极性不是很高,这些软件的开发有待进一步完善。

随着科学技术的不断发展,各种新软件也不断的应用于井灌区系统的开发中。赵辉等利用计算机技术、遥控遥测技术和通讯技术开发研制的井灌区地下水限量开采自动控制系统在有效控制地下水开采的同时,结合数学模型,设定系统运行参数,自动对井群系统运行进行控制、监视和事故处理^[12],提高了水资源的利用率,促进了灌区节水工作的开展。王福卿等利用射频卡技术根据河北井灌区情况,研制出 IC 卡机井取水控制器,科学分析水资源承载能力,根据种植计划、(节水)灌溉定额、灌溉面积以及干旱程度(平水年、丰水年、干旱年),分配用水指标(水权),确定各农户允许用水量及机井总控制提水量,向农户预售水量,实现了井灌区的精确灌水^[13]。以上系统虽然解决了系统与终端用户的连接问题,但由于我国的井灌区一般面积较大,单个井的供水一般难以满足整个灌区的用水量,因此就需要对井群进行集中管理、统一调度,实现地下水的均衡开采,促使地下水资源的可持续开发利用。针对此类问题李亚民等以数学模型为基础,借助计算机技术、微控遥测技术和通讯技术,根据区域水资源、机井工程布局及灌溉配水计划,构建了井灌区水资源管理遥控遥测系统,自动对井群系统进行控制、监视和事故处理^[14]。齐学斌等利用计算机技术、单片机技术和通讯技术,结合地下水位

预报模型, 开发研制了井灌区井群无线自动控制系统。系统可根据区域水资源状况、机井工程布局及灌溉配水计划, 设定系统运行参数, 自动对井群系统运行进行控制、监视、计时计费 and 事故处理, 以实现对地下水限量开采^[5]。实际应用中也表明, 这些系统可实现灌区地下水资源的集中统一管理, 降低灌区运行管理费用, 提高灌区管理水平, 为井灌区灌溉管理的信息化奠定了基础。

图 3 为一典型井灌区管理系统, 该系统通过置于田间的传感器采集农田水分、气候、水情、土壤墒情等信息。这些信息经下位机处理后传至主机, 主机对这些信息进行率定, 将结果储存到相关实时数据库中, 并以模型库和知识库为支撑, 对这些信息进行计算、分析并给出作物精确灌溉时间、最佳灌溉水量、最佳开、关灌溉设备时间, 下位机发送控制指令, 控制灌溉设备的开启或关闭。包括人机交互界面、系统说明、系统设置、数据通讯、数据库管理、信息查询、模型管理、决策管理、知识支持、工程控制及帮助等模块功能子系统。

2.2 以灌排为主的渠灌区灌排管理决策支持系统

以灌排为主的渠灌区覆盖较大的地区, 包含灌区枢纽、各级灌排渠系及骨干渠系建筑的运行调度, 以灌排为主的渠灌区灌排管理 DSS 包括应灌区来水、用水分析、灌溉管理局、管理站及用户的取水、配水、排水计划和优化调度及用水总结等许多内容, 是一个较为复杂的 DSS 系统。梁季阳等针对柴达木盆地水资源规划管理的决策半结构化、多层次、多决策者等特征, 运用 V Foxpro 5.0 和 Access 97 等软件, 此设计开发了柴达木盆地水资源决策支持系统, 对区域内重大产业政策及水资源政策实施和调整的评估^[6]。刘桂宏等以 Windows 98 简体中文版为操作系统, Microsoft Access 为数据库, 采用 Borland C++ 编程语言为基础, 建立淮南市洪金灌区灌区灌溉管理监控自动化系统 (IAMS), 该系统集灌区水闸运行工程实时监测、闸门启闭远程遥控、工程信息库管理、水闸运行工况历史数据库管理、人事档案管理等功能为一体, 使灌区实现了计划用水, 合理分配水资源, 优化调度方案, 提高灌区管理水平^[7]。而遥测、遥感、各种地理信息系统及计算机网络等现代化通讯手段的广泛应用于灌区的现代化管理, 也促使灌溉水情信息的真实性、实时性提高。也使得管理者对灌区灌溉全部过程得以掌握, 从而使得灌溉决策准确化、科学化。这些都为灌区信息化建设创造了有利条件。王晓峰和李欣苗等针对关中灌区的普遍缺水的现状, 基于 GIS 建立了大型灌区信息管理决策支持系统 (IM DSS), 该系统使得关中灌区实现自动化测控和调度运行, 使得灌区实现了巨大的经济效益和社会效益^[18]。保翰张等以“3S”技术及水资源管理专业模型为支撑的, 集数据的采集、传输、存储、管理、分析、决策、输入、输出为一体, 设计了疏勒河流域水资源管理决策支持信息系统, 以进行疏勒河流域水资源的评价、科学管理和决策。该系统较运用网络技术较好的实现了人机交互, 使结果直观化、可视化, 应用简单、稳定、可扩充^[19]。段永刚等。建立以 GIS 技术为核心的可视化渠系配水管理系统, 以把灌区的基本情况和各种灌溉业务数据整合到电子地图上, 通过地图的查询, 及时、准确、直观的进行渠道配水。实现了渠系实时、科学的配水^[20]。

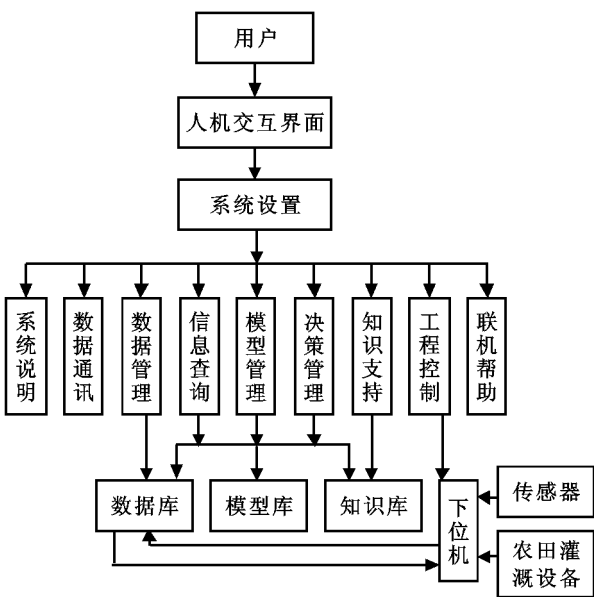


图 3 典型井群灌溉决策支持

以下以宋松柏等针对内蒙古河套灌区开发的河套灌区灌排信息管理 DSS^[21] 为例做简要说明。该系统分为 DSS 运行结构、模型部件和数据部件 3 部分。总体结构设计分为运行结构设计和结构管理设计。运行结构设计是指应用决策支持系统原理进行程序结构设计, 编制相应的计算机程序, 程序运行结果即为河套灌区灌排管理决策值。管理结构设计则是完成模型库和数据库管理, 实现决策支持系统模型共享和数据共享。运行结构设计主要包括总控程序设计和模型程序设计。总控程序设计包括人机交互设计和模型控制运行设计。人机交互设计主要采用窗口、菜单技术, 实现系统运行情况, 中间计算结果, 模型运算结果的输出。模型控制运行设计按照总控流程控制模型运行。河套灌区灌排管理决策支持系统分为数据采集与传输子系统、数据库子系统、水情预报发布子系统、灌溉进度发布子系统、水情分析子系统、用水计划子系统、用水总结子系统、灌排评价子系统、工程评价子系统、系统维护等 10 个子系统; 管理结构设计主要包括模型库管理系统设计和数据库管理系统设计。其中, 数据库的设计除满足一般查询、修改、添加、删除、报告生成、打印等要求外, 还具有与整个系统和各模型的数据接口, 使系统的运行操作方便、迅速, 数据引用统一。数据库的设计是开放的, 随着问题的深入可以增减子数据库。

2.3 综合利用水库优化决策支持系统

国外对这方面的研究已有很长的历史, 一般的综合利用水库优化调度 DSS 除传统的数据采集与传输、数据库管理、水文预报、灌溉用水计划、兴利调度计划、度汛计划、实时兴利、水库优化和系统维护等功能外, 还应包括工业用水、城市供水、实时防洪等。国外在这方面的研究比较早, 1955 年, 美国的 Little 等提出了水电系统随机动态规划调度模型, 对水库优化调度问题进行了研究, 从而标志着用系统科学的方法研究水库优化调度的开始^[22]。在水库优化调度中, 所采用的方法主要有美国德克萨斯 A & M 大学和德克萨斯水资源研究所 (TWRI) 于 1984- 1996 年针对美国德克萨斯州

23 个流域水资源状况,基于 Arcview 开发了一个水可用性模拟(WAM)系统。该模型模拟一个流域或按水资源分配优先制排序的多个流域地区的水资源管理,对水的可用性和可靠性进行水文上的和体制上的评估^[23]。20 世纪 90 年代初期,英国泰晤士集团水务公司基于 GIS,为墨西哥的里奥莱尔马河/查帕拉湖做的总体规划系统—WaterWare(江河流域综合规划决策支持系统),建立流域的水量水质平衡,以达到对流域的综合治理^[24]。其他的决策支持系统还有加拿大 Manitoba 大学土木系开发的 IDSREZES,以及后来的水库管理评价 DSS 系统 HERMES 等等。90 年代以后水资源规划与管理决策支持系统方面的研究主要集中在大量引进新的计算机技术,各种预处理、后处理技术、计算机图像技术及地理信息系统采用,各种高级计算机语言、面向过程语言及可视化应用的出现,以及 ES“外壳”工具的开发,都使将 ES 引入 DSS 成为可能。

我国灌区和区域水资源管理 DSS 的研究起步较晚,始于 20 世纪 80 年代末,目前尚处于初步阶段。开始阶段侧重于对单一水库或者是一个流域的水资源情况进行综合管理,调控及各种监控。1990—1993 年,黄委会研制黄河流域水资源经济模型。为黄河的水资源调控和相关综合治理奠定了一定的基础。卢玲等(1999)运用虚拟现实造型语言,并结合 GIS 开发了黑河水资源决策支持系统,支持系统中的应用在网上显示了三维虚拟的黑河流域全景图,并且能够在各种位置、以各种视角和各种缩放比例对黑河全貌及其细节进行,实现了黑河流域的网络化^[25]。宋松柏等(2002)以石头河水库为例,开发研制了综合利用水库优化调度 DSS。石头河水库优化调度决策支持系统研制分为运行结构设计和结构管理设计。运行结构设计是指应用决策支持系统原理进行程序结构设计,编制相应的计算机程序,为水库优化调度决策服务。管理结构设计则是完成模型库和数据库管理,实现系统模型共享和数据共享^[26]。随着各种技术的不断成熟和相继应用于水资源的综合管理决策系统,研究的对象也从单一的水库或流域发展到多个水库或流域,甚至有向大区域水资源管理的发展趋势。1991—1993 年,华北水资源研究中心主持并组织近 10 个单位开展了华北地区宏观经济水规划模型的研究,建立了京津唐地区宏观经济水规划 DSS。此外,武汉水利水电大学对南方灌区,西北农林科技大学对北方灌区水资源管理 DSS 分别进行了大量研究。由于灌区和区域所涉及的范围大小、用水目标及问题的复杂程度不同,灌区和区域水资源管理 DSS 的结构和内容差别较大。

3 GIS 和可视化技术在灌区和区域水量调度决策支持系统中的应用

3.1 灌溉决策系统与地理信息系统的集成

地理信息系统(Geographic Information System, GIS)是以采集、存储、管理、描述、分析地球表面及空间和地理分布有关的数据信息系统。它是以地理空间数据库为基础,在计算机软、硬件环境的支持下,对空间相关数据进行采集、管理、操作、存储、分析、模拟和显示,并采用地理模型分析方

法,适时提供多种空间和动态的地理信息,为研究、综合评价、管理、定量分析和决策服务而建立起来的一类计算机应用系统。它的空间数据包括地图、遥感、统计等多种数据类型。由于灌区涉及到大量渠道或管道系统、地形、气象、水文、水源、作物、土壤特性等与地理密切相关信息,要实现精准化灌溉,就应充分考虑其地理特征。把 GIS 与 DSS 集成后,能充分利用 GIS 的数据地理分布特征及它的灵活多变的地理分析能力,形成基本于 GIS 的空间 DSS,就可直观地在地图上反应各种数据;并可对地理空间数据进行编码、存储、存取、快速查询、空间分析和空间运算;可利用空间数据进行综合评价,对其发展过程和未来发展趋势进行模拟和预测;可对各种不同决策方案进行比较,以做出最优决策。

将 GIS 技术引入灌区用水管理必将使灌区用水数据的显示更加直观化,极大地提高管理者的工作效率。同时,可使管理者既能通过图形宏观地了解和把握灌区用水总体情况,又能通过各种快捷查询手段了解各种非图形因素的情况,使管理者可获得的信息量成倍提高。夏继红、周明耀等以农田灌溉决策支持系统为案例,对决策支持系统与地理信息系统的集成化技术进行研究。在系统中,采用了电子地图引擎、统一数据结构和对标识号(ID)的多维索引,实现信息的快速查询以及地理信息库与决策信息库之间的关联。该灌溉决策支持系统可充分利用地理信息系统灵活多变的地理分析能力,帮助农田用水管理人员有效地进行限制条件下的灌溉水量最伏分配和灌溉调度,实现节水增效的目标。

GIS 具有开放性和可扩展性,利用 GIS 的开发函数库能二次开发出专用地理信息系统软件。GIS 系统也有良好的可集成性,利用 COM 体系结构,将 GIS 与灌溉管理专家系统、现代通讯技术、全球定位系统等其他系统之间进行无缝集成,可实现灌区管理中各类信息的游览查询、灌溉辅助决策、灌水预报、渠系水流虚拟三维可视化等多种功能。

3.2 可视化技术在灌区水量调度决策支持系统

可视化的基本含义是将科学计算中产生的大量非直观的、抽象的或者不可见的数,借助计算机图形学和图像处理等技术,用几何图形、色彩、纹理、透明度、对比度及动画技术为手段,以图形图像信息的形式,直观、形象地表达出来,并进行交互处理,这一技术正成为科学发现和工程设计以及决策的强有力工具。

随着计算机技术的快速发展,尤其是可视化语言的应用,菜单、图符等已逐渐成为计算机软件的人机交互界面的标准形式。而以往的管理信息系统(MIS)和 DSS 往往是基于字符的。即使采用了窗口、菜单等图示化技术,也往往局限于单纯的人机交互界面。这并不能满足用户对 DSS 的期望。DSS 用户不仅要求 DSS 使用方便,还需要了解 DSS 是如何提供决策支持的。为此人们将可视化技术引到 DSS 的开发过程中,以面向对象的思想方法和图形交互界面为主要特色,形成可视化 DSS。可视化 DSS 由于在开发过程中运用面向对象技术,DSS 的模块一般具有可移植性和可扩充性,从而对复杂问题有更好的适用性。同时由于灌溉工程决策者的决策活动大多依据于灌区空间地理信息,对它们的图

形化表达能够使用户有身临其境的感觉;对灌区的各级渠道用水实时监控和图形化显示可以使决策者随时根据配水过程的实时进度做出科学决策,增加 DSS 对用户的可理解性和对决策支持的有效性。

王煜等研究的黄河三门峡以下非汛期水量调度决策支持系统是一个面向实际应用的可视化决策支持系统。该 DSS 应用可视化技术开发以方案库、方案管理子系统、方案数据库、方案数据库管理子系统、模型库为主要构成的决策支持系统;并且开发了可视化的方案管理、可视化的方案数据库管理、可视化的模型管理、人机交互方式的模型可视化求解、可视化的方案数据的输出、可视化的系统管理等子系统^[27]。与传统的决策支持系统相比,可视化决策支持系统能够采用更加立现形象的人机信息交互和面向对象的信息加工处理方法,从而在决策方法、方式、效率、质量等方面有较大进步。

4 灌区用水决策支持系统发展趋势

基于灌区用水决策支持系统的现状和灌区用水管理具体需要,可以认为灌区用水决策支持系统发展有下列趋势:

4.1 智能型灌区用水决策支持系统

智能型灌区用水决策支持系统是灌区用水决策支持系统的一个重要发展趋势。水资源决策中除部分结构化程度高的问题可以用数学模型表达之外,有很多是无法定量表示的,况且很多模型维数高、计算量大,寻求基于知识的模型,可使灌区用水 DSS 不仅具有定性知识推理功能和定量知识的计算功能,而且将这两者高度融合起来, IDSS 是解决灌区用水决策问题的理想途径。处理同时含有定量和定性问题的图例策略,知识的表达方式是 IDSS 研究的一个重要课题,专家系统和人工神经网络模型对灌区用水知识的表达机制是灌区用水 IDSS 值得研究的方向。

4.2 分布式多目标灌区用水群决策支持系统

灌区水资源多重功能的多目标利用,要求开发灌区多目标决策支持系统。灌区水资源决策涉及多个地区和部门的利益,由多个部门的多个决策者共同做出,故灌区多目标群决策支持系统比较适合当前我国的集体决策方式。随着计算机网络的日益发展,分布式 DSS 也是一种重要趋势。决策过程、决策模式、不同群体的数据库、知识库和模型库的设计和相互接口都是进一步研究的课题。

4.3 集成式灌区用水决策支持系统

单一基于信息的系统、或单一基于模型的系统、或单一基于知识的系统都无法满足复杂水资源决策的需要,将各种方法、知识、工具集成化,形成面向具体问题的综合决策支持系统是解决灌区用水问题的理想途径。集成式灌区用水 DSS 应具有数据自动采集和处理、综合信息预警、紧急情况报警和系统监控等功能。由于灌区用水决策所需的数据量大、类型多,因此各种类型的数据采集和通讯系统特别是各种计算机网络通讯技术发展将促进灌区用水 DSS 的进一步开发和使用。同时各种途径采集数据的准确性问题将得到进一步重视,另外各种通用软件的进一步应用和友好界面采用将促进

灌区用水决策支持系统的进一步发展。如各种数据库管理、计算机图形软件、网络开发平台技术为管区管理用水决策提供了友好界面,节省很多编程工作,用户友好界面如语言识别、图像识别将进一步推动灌区用水 DSS 的发展。

参考文献:

[1] Ahmed I. On the determination of multi- reservoir operation policy under uncertainty [D]. Tucson, Arizona: The university of Arizona, 2001.

[2] Foufoula E, Kitanidis P K. Gradient dynamic programming for stochastic optimal control of multi- dimensional water resources systems [J]. Water Resources Research, 1988, 24(8): 1345- 1359.

[3] 倪建军, 徐立中, 李臣明, 等. 水库调度决策研究综述 [J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(6): 63- 66.

[4] 尤祥瑜, 谢新民, 孙仕军, 等. 我国水资源配置模型研究现状与展望 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004 2(2): 133- 140.

[5] Karamouz M, Vasiliadis H V. Bayesian stochastic optimization of reservoir operation using uncertain forecast [J]. Water Resources Research, 1992, 28(5): 1221- 1232.

[6] 高洪深. 决策支持系统(DSS) 理论方法案例(3 版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[7] 王忠静. 石羊河水资源规划决策支持系统 [J]. 甘肃水利水电技术, 1995(4): 7- 11.

[8] 兰壮丽, 赵勇, 张文宇. 基于神经网络的智能 DSS 研究 [J]. 西安科技学院学报, 2004, 24(2): 207- 210.

[9] 尚虎君, 汪志农, 柴萍. 节水灌溉管理数据库及其管理系统的研究与开发 [J]. 水土保持研究, 2002, 9(2): 97- 101.

[10] 王文娥, 汪志农. 河套灌区秋浇管理决策专家系统的开发 [J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(5/ 6): 564- 566.

[11] 王娟. 单井灌区及小型机电灌区低压管道灌溉计算机辅助设计系统开发 [D]. 江苏: 扬州大学, 2005.

[12] 赵辉, 齐学斌, 高胜国. 井灌区地下水限量开采自动控制系统的研制与应用 [J]. 农业工程学报, 2001, 14(5): 32- 34.

[13] 王福卿, 高明山, 金江波. 井灌类型区节水灌溉监控设施- IC 卡机井取水控制器 [J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(5): 62- 64.

[14] 李亚民, 赵辉, 邵景力, 等. 井灌区灌溉管理无线遥控遥测系统的研制与应用 [J]. 水利水电技术, 2004, 35(2): 54- 56.

[15] 齐学斌, 高胜国, 赵辉, 等. 北方井灌区井群无线自动控制系统的开发研制 [J]. 水利学报, 2005, 36(2): 232- 237.

通过模拟结果可以看到, 当时间步长较小时(如取 $\Delta t=1$ min), 两种数值方法的模拟结果都比较稳定。但当时间步长增大时(如取 $\Delta t=5$ min, $\Delta t=10$ min) 有限差分法的数值结果出现了明显的数值振荡, 而有限体积法有效地克服了这种现象, 因而它的数值稳定性较好。

5 结 语

给出了一维非饱和土壤溶质运移的有限体积数值模型, 分别对不同参数的土壤进行了数值模拟, 模拟结果是很有效的。由于用有限体积法得出的离散方程, 积分守恒对任意一组控制体都能得到满足, 对整个计算区域自然也得到满足。该方法即使在粗网格情况下, 也显示出准确的积分守恒, 而有限差分法仅当网格足够细时, 才可避免数值振荡。因而, 有限体积法不仅具有较强的灵活性, 能够满足复杂边界问题的需要, 而且数值稳定性较好, 是一个值得推荐的数值计算方法。

参考文献:

[1] 徐冰, 郭克贞, 王耀强. 土壤中溶质运移的研究现状及问题[J]. 内蒙古水利, 2003(3): 20-22.

[2] 宓永宁, 周林飞, 姜文俊. 土壤中溶质的运移与数值解讨论[J]. 沈阳农业大学学报, 1996, 27(S1): 73-75.

[3] 徐力刚, 杨颈松. 土壤水盐运移的简化数学模型在水盐动态预报上的应用研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(1): 9-11.

[4] 徐力刚, 杨劲松, 张妙仙. 种植作物条件下粉砂壤质土壤水- 盐运移数值模拟研究[J]. 土壤学报, 2004, 41

(1): 50-55.

[5] 王福利. 降雨淋洗条件下溶质在土壤中运移的初步研究[J]. 土壤学报, 1992, 29(4): 20-24.

[6] 王福利. 用数值模拟方法研究土壤盐分动态规律[J]. 水利学报, 1991(1): 1-8.

[7] 姚德良, 朱进生. 土壤水盐运动模式研究及其在干旱区农田的应用[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 287-289.

[8] 陈启生, 戚隆溪. 有植被覆盖条件下土壤水- 盐运动规律研究[J]. 水利学报, 1996(1): 38-46.

[9] 程先军, 许迪. 地下滴灌土壤水运动和溶质运移的数学模型及验证[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6): 1-3.

[10] 武新乾, 张德生. 非均匀土壤中溶质运移的数值模拟[J]. 纺织高校基础科学学报, 2003, 16(1): 5-9.

[11] 雷志栋. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 25-37.

[12] 李韵珠, 李保国. 土壤溶质运移[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 131-138.

[13] Versteeg H K, Malalasekera W. An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method[M]. Longman: Prentice Hall Press, 1995: 85-154.

[14] 高新科, 张富仓, 刘俊杰. 非饱和土壤溶质运移数值模拟的初步研究[J]. 西北农业大学学报, 1996, 24(2): 66-69.

[15] 钱作勤, 郑雪晴, 张谢东. 有限体积法在求解传热学中温度场的应用初探[J]. 武汉造船, 1998(6): 7-10.

(上接第 32 页)

[16] 梁季阳, 蒋业放, 成立, 等. 柴达木盆地水资源决策支持系统的设计与开发研究[J]. 自然资源学报, 2000, 15(1): 80-85.

[17] 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, 20(1): 65-68.

[18] 王晓峰, 李欣苗. 关中地区大型灌区信息管理决策支持系统应用研究[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(3): 134-135.

[19] 保翰璋, 姚檀栋, 李文君, 等. 疏勒河流域水资源管理决策支持信息系统设计[J]. 遥感技术与应用, 2000, 17(6): 337-343.

[20] 段永刚, 汪志农, 尚虎君. 基于组件式 GIS 渠系配水管理系统的设计[J]. 节水灌溉, 2006(6): 7-12.

[21] 宋松柏, 李世卿, 刘建国. 内蒙古河套灌区灌排信息管理决策支持系统[J]. 灌溉排水, 2001(1): 69-73.

[22] Little J D C. The use of storage water in a hydroelectric system [J]. Operations Research, 1955, 3: 187-197.

[23] P. A. 沃伯斯. 美国得克萨斯州的流域水资源管理模式[J]. 水利水电快报, 2004, 25(17): 1-5.

[24] 孔祥林. 决策支持系统在墨西哥里奥莱尔马流域的应用[J]. 水利水电快报, 2005, 26(7): 9-11.

[25] 卢玲, 程国栋. VRML 技术在黑河水资源支持系统中的应用[J]. 遥感技术与应用, 1999, 14(2): 15-20.

[26] 宋松柏, 冯国璋, 王双银, 等. 综合利用水库优化调度决策支持系统[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 358-362.

[27] 王煜, 夏连强, 侯传河, 等. 可视化技术在水量调度决策支持系统中的应用[J]. 水利水电技术, 2002, 33(2): 36-39.