

节水灌溉预报、管理与决策专家系统研究

汪志农, 尚虎军, 柴 萍

(西北农林科技大学农业水土工程研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘 要: 从节水灌溉的基本原理入手, 分析了灌溉预报中的各个参量, 提出了节水灌溉管理、决策的依据与方法, 并介绍了灌溉预报、管理与决策专家系统的理论基础, 系统结构, 即以框架库、规则组库和黑板 3 部分组成的综合知识体结构的知识表示技术。节水灌溉预报、管理与决策专家系统的研制、开发与推广、应用, 将会促进我国传统农业向现代化农业的转变, 为把高新农业技术送到亿万农民手中开辟了一条崭新的途径。

关键词: 节水灌溉; 灌溉预报; 灌溉管理; 农业专家系统

中图分类号: S 274 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2002) 02-0102-07

Study on Expert System of Water Saving Irrigation Forecast, Management and Decision Making

WANG Zhi-nong, SHANG Hu-jun, CHAI Ping

(Institute of Agricultural Soil and Water Engineering, Northwest Sci-tech
University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

Abstract: Starting with the basic principles of water saving irrigation, the authors analyzed each parameter of irrigation forecast and put forward the basis and methods of water saving irrigation management and decision making, also presented the theoretic foundation, system structure of expert system of irrigation forecast, management and decision making, such as knowledge expressing technology of synthetic knowledge structure composed of three parts of frames, regulations and blackboard. The development, exploitation and popularization of water saving irrigation forecast, management and decision making will promote our traditional agriculture transferring to modern one, opening a new way delivering the high and new agricultural technology to farmers.

Key words: water saving irrigation; irrigation forecast; irrigation management; agricultural expert system

我国北方各省区水资源紧缺, 干旱多发性一直是阻碍这一地区农业生产持续发展的一个最主要的制约因素, 而且供水危机已日益现实。而另一方面, 由于管理不善仍存在着严重的农业用水浪费现象, 特别是田间过量灌溉或因渠系水量调配不当。因此, 造成我国自流灌区灌溉水的利用率仍很低, 平均约为 0. 4。如果采用节水灌溉管理决策技术, 将灌溉水的利用率平均提高 10%, 按全国年农业用水量 4 000 亿 m³ 估算, 每年可节约水量 400 亿 m³。这对缓解我国水资源供需矛盾将起到极其重要的作用。

为此, 必须实施节水型的灌溉农业, 这是事关我国农业持续发展乃至国民经济持续发展的一项带战略性的根本大事。实践证明, 灌溉节水 50% 的潜力是在管理上。因此, 从水源到作物产量形成的整个用水过程中, 都要作好节水灌溉的管理工作。而节水灌溉预报、管理与决策专家系统的研究、开发与推广、应用, 将对我国北方缺水地区农田灌溉水的田间管理与科学决策提供科学依据及其方案。这对于普及、推广节水型的灌溉农业, 将会起到重大的推动作用^[1]。

¹ 收稿日期: 2002-02-25
基金项目: 国家重大科技产业示范工程项目“渠灌类型区农业高效用水模式与产业化示范”(99- 021- 01- 02)。
作者简介: 汪志农, 男, (1948-), 浙江杭州人, 博士, 西北农林科技大学水利与建筑工程学院教授。

1 节水灌溉预报、管理与决策专家系统的理论基础

人工智能专家系统是一个模拟人脑思维方式,以知识为基础的计算机软件系统。其特点在于把人(专家)在解决生产实际问题过程中所使用的启发性知识、判断性知识分成事实和规则,以一定的知识表示形式存入计算机,建立知识库,并采用合适的产生式系统(Production System),按输入的原始数据,选择合适的规则,进行推理、演绎,作出专家级的智能判断与决策。而且它的最大特点,可代表一个专门生产领域的专家群体,对该生产领域内的实际问题提供专家们的咨询、决策意见。

智能决策专家系统是人工智能中面向应用的重要分支之一。它的理论基础是知识表示和问题求解技术,知识和推理构成整个系统的两大要素。而智能决策专家系统的核心是知识,所以又常称为知识系统,或基于知识的系统(Knowledge-Based System)。国际上,把智能决策专家系统技术在学科方向上称之为知识工程(Knowledge Engineering)^[2]。

1.1 知识表示

常用的知识表示方法有:产生式规则、框架、语义网络、谓词逻辑、模糊关系及模糊逻辑、人工神经网络学习等。

(1) 产生式规则(production rule)是最常用的知识表示方法,它的表示格式为:如果条件集合成立,则结论成立。亦即:IF(condition is satisfied) THEN(action)。

(2) 框架(frame)是 20 世纪 70 年代初,由美国麻省工学院 M. Minsky 提出一种知识表示的新理论。他从心理学的证据出发,认为人们在日常的认识活动中,使用了大批以前的经验中获取并经过整理的知识。该知识是以一种类似框架的结构存在人脑中。当人们面临新的情况,或者对问题的看法有重要变化时,总是从自己的记忆中找出一个合适的框架。然后根据实际情况对它的细节加以修改、补充,从而形成他对所观察到的事物的认识。所以框架也是一种表示定型状态的有层次的数据结构,它的顶层是固定的,表示某个固定的概念、对象或事件;其下层由一些称为槽(slot)的结构组成,每个槽有若干‘侧面’组成。框架下层的槽可以带子框架,子框架本身还可以进一步分层次^[3]。

框架的形式表达如下:

框架名: FRAME 节水灌溉;

状态槽: STATE 灌溉预报;

处理槽: PROCESS 作物需水量。

下面以灌溉预报与决策的框架库结构为例,来加以说明:

/* 提问集 */

ASK

节水灌溉预报管理决策专家系统= (灌溉预报原理,灌溉决策,灌溉制度),

灌溉决策= (灌溉决策计算,决策方案比较),

气象数据来源= (数据库,键盘输入),

选择作物种类= (小麦,玉米,油菜);

/* 开始知识体 */

BEGIN{

IF 节水灌溉预报管理决策专家系统= “灌溉预报原理”THEN {GGYB();};

IF 节水灌溉预报管理决策专家系统= “灌溉决策”THEN {GGJC();};

IF 节水灌溉预报管理决策专家系统= “灌溉制度”THEN {GGZD();};

KS GGYB

{ADVICE 略}

KS GGJC{

IF 灌溉决策= “灌溉决策计算”THEN {GGJCJS();};

IF 灌溉决策= “决策方案比较”THEN {JCFABJ();};

.....

} END

(3) 语义网络(Semantic Networks Representation)被用来描述基于网络结构的知识表示方法。语义网络最初是作为研究人脑的心理学模型而提出的,现在已成为人工智能专家系统中的一种标准的知识表示方法。语义网络由节点和描述节点间关系的弧连接而成。其中节点表示目标、概念或事件,弧则表示它们之间的关系。语义网络表示方法,可以把事物的结构、属性及因果关系,通过节点与弧链的形式,明显而简要地表示出来。自然直观,易于理解,也符合人们在处理问题时的思维习惯,如图 1 所示。

对基于网络结构的知识,宜采用规则组库的知识表示技术。上述的框架可自动调用规则组库执行。规则组库的结构形式如下所示^[4,5]:

DEFINES(宏定义)

END

RG 规则组名

KS YBYJC: 功能集

现以灌溉预报与决策专家系统中计算 ET₀ 值

的规则组库为例:

```
DEFINES /* 宏代换* /
ETC 实际作物蒸发蒸腾量(mm/d)
KC 作物系数
ET0参考作物蒸发蒸腾量(mm/d)
TEM 日平均气温( )
RH 日平均相对湿度(%)
END
RG GGYJ
KS YBYJC:ET0,ETC; /* 决策显示变量* /
RULE 10
IF N1 THEN ET0
RB{ET0= 2. 699 3+ 0. 304 2 · N1; }
RULE 11
IF TEM, N1 THEN ET0
```

```
RB{ET0= 0. 429 3+ 0. 102 5 · TEM
+ 0. 298 8* N1; }
RULE 12
IF TEM, RH, N1 THEN ET0
RB{ET0= 2. 8214+ 0. 916 · TEM
- 0. 0268 · RH + 0. 2658 · N1; }
RULE 13
IF TEM, RH, WIND, N1 THEN ET0
RB{ET0= 2. 1+ 0. 093 · TEM- 0. 022 · RH
+ 0. 311 · 0. 75 · WIND
+ 0. 279 · N1; }
.....
END;
KS GGYBYJC ( )
{RUN RULE GGYJ. YBYJC; }
```

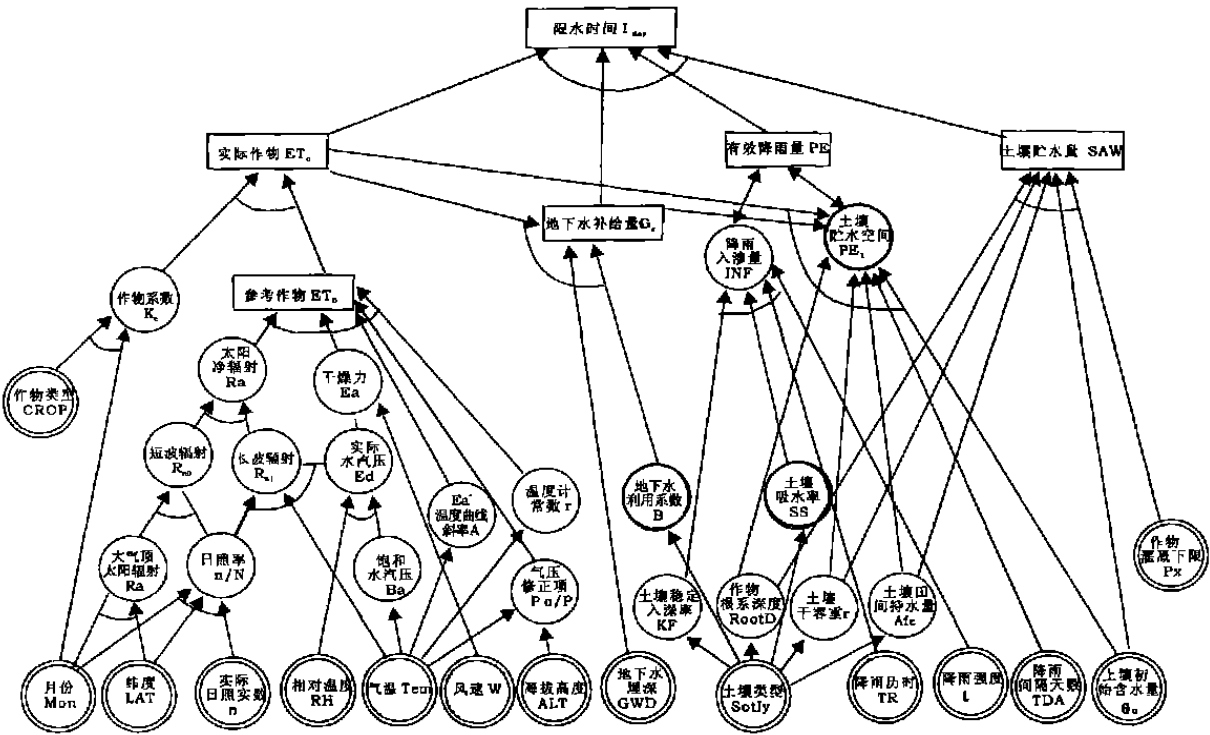


图 1 灌溉预报推理网络

1. 2 推理策略

推理是根据一定的原则, 从已知的判断得出另一个新判断的思维过程。推理中进行判断的依据叫前提, 由前提所推出的那个判断叫做结论。

(1) 反向推理(Backward Chaining)的思路是一种称作“假设-测试”的策略。先假定某一个目标, 然后自上而下去寻找以此目标为结论的规则集。如果此目标经推理达不到真值, 则说明此假设测试失败,

应选下一目标进行“假设-测试”, 直至选择到某一目标为真为止。如果所有目标全部搜索后, 无一目标为真, 则此次推理没有结果, 或叫无解。

(2) 正向推理(Forward Chaining)是以事实或数据驱动, 由用户提供的事实、数据开始, 自下向上进行推理。推理进行时, 逐一将用户提供的信息与各规则的条件进行匹配, 直至某条路径到达某个目标节点, 求得当前问题的解答。

(3) 混合推理 (Forward and Backward Chaining) 即正向推理与反向推理配合进行。它运用这两种推理各自的优点。可以先通过某些已知数据或事实的驱动去选择合适的目标, 然后再反向推理, 这样既减少了反向推理选择目标的盲目性, 又克服了单纯应用正向推理漫无目标的盲目性^[3, 4]。

2 节水灌溉预报、管理与决策专家系统的结构

从上节可知, 智能决策专家系统主要包含知识库和推理机两大部分。而事实上, 一个完整的智能决策专家系统应由四部分组成: 即知识库、推理机、解释器、学习器。各部分之间的关系如图 2 所示^[1]。

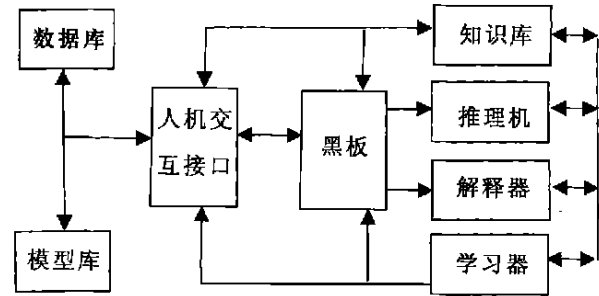


图 2 智能决策专家系统的结构及组成

(1) 知识库(Knowledge Base) 用来存放决策支持系统提供的专门知识。在这里, 知识以一定的形式表示, 在系统中它独立于其它各部分, 这是专家系统结构的一个重要特征。

(2) 推理机(Inference Engine) 推理机的功能, 是根据一定的推理策略, 从知识库中选择有关知识, 对用户提供的证据进行推理, 直到得出相应的结论为止。推理机包括推理方法和控制策略两部分。

(3) 解释器(Explanatory Interface) 专用于向用户解释“为什么”, “怎样”之类的发问。例如显示中间推理结果, 或整个推理路径。它的功能强弱反映了该决策支持系统的透明性和可信任程度。

(4) 学习器或知识获取 (Knowledge Acquisition) 根据系统运行经验, 自动、不断地修正和补充知识库的内容, 达到自学习的功能。又称为知识获取或机器学习。

(5) 黑板(Black Board) 又称中间数据库, 它存放并显示各种中间推理结果和通讯信息, 是人机交互接口与决策支持系统之间非常重要的联接通道。

(6) 人机交互接口 (Man-machine Interface) 又叫用户界面, 即用户与决策支持系统进行双向信息交换的部分。一般是用来进行数据、信息或命令的输入, 结果的输出和信息的显示等。

(7) 数据库(Data Base) 存放系统历史的、或动态的有关数据。

(8) 模型库 (Model Base) 产生并存放知识库所需的各种预测预报模型。其预报的精度及准确性直接影响系统决策的可靠性与科学性^[2~5]。

3 节水灌溉预报、管理与决策专家系统的开发

本专家系统把近几年来国内外对节水灌溉管理的最新研究成果: 如作物水分生产函数、非充分灌溉、调亏灌溉、分根交替灌溉以及节水灌溉信息的监控技术等加以集成, 并立足田间, 面向农户。通过人机对话, 只要事先将当地的气象、土壤、作物等参数建立起数据库, 即可快速、准确地作出节水灌溉预报与决策方案。

在节水灌溉实践中, 一般均采用农田水量平衡原理, 即:

$$I + P + G = ET + D + R \pm ASW \quad (1)$$

式中: I ——时段 T 内的灌水量(mm); P —— T 时段内的降水量(mm); G ——时段 T 内的地下水补给量(mm); ET —— T 时段内的作物蒸发蒸腾总量(mm); D ——深层渗漏量(mm); R ——地面径流量(mm); ASW ——时段初土壤的有效储水量(mm)。

预报未来灌水时间:

$$t = (P_e + ASW) / (ET_c - G_e) \quad (2)$$

式中: t ——预报的未来灌水间隔天数(d); P_e ——有效降雨量(mm); G_e —— T 时段内平均每天地下水有效补给量(mm/d); ET_c —— T 时段内平均每天作物蒸发蒸腾量(mm/d); 其余符号意义同前。

整个系统的推理过程为: 先由已知的气象资料推求 ET_0 值, 由作物类型、生长月份或累积积温($> 15^\circ\text{C}$) 来估算 K_c 值, 从而可得 $ET_c = K_c \cdot ET_0$; 再由土壤类型、入渗特性、初始含水量以及地下水埋深, 来确定有效降雨量(P_e), 地下水有效补给量(G_e) 以及土壤有效储水量 ASW 。

(1) 多元线性回归 ET_0 预报模型。依据西北农大灌溉试验站 1998 年 7~9 月夏玉米生长阶段, 大型蒸渗仪自动采集的日平均气温(T_{em})、日照时数(N_1)、风速(W)、及相对湿度(RH) 等资料, 采用彭曼公式计算出每天的参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 值, 并依据上述实测的四项气象参数, 应用 STATISTIC 统计软件, 进行了多元线性回归的分析处理。

得:

$$ET_0 = 2.1 + 0.093Tem - 0.022RH + 0.31W + 0.279N_1 \tag{3}$$

其多元回归系数: $R = 0.992$

考虑在生产实际中, 往往得不到比较齐全的气象资料。为此, 分别统计分析了气温(Tem)、相对温度(RH)、及日照时数(N_1) 与 ET_0 值的回归公式为:

$$T_0 = 2.8214 + 0.916Tem - 0.0268RH + 0.2655N_1 \tag{4}$$

多元回归系数: $R = 0.984$

又进一步了分析气温(Tem)、日照时数(N_1) 二项气象因子与 ET_0 的回归方式:

$$ET_0 = 0.4293 + 0.1025Tem + 0.2988N_1 \tag{5}$$

多元回归系数: $R = 0.969$

最后分析了实际日照时数(N_1) 与 ET_0 的相关公式:

$$ET_0 = 2.6993 + 0.3042N_1 \tag{6}$$

相关系数: $R = 0.924$

(2) 作物系数 K_c 值的确定。作物系数 K_c 是作物蒸发蒸腾量 ET_c 与参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 的比值, 即 $K_c = \frac{ET_c}{ET_0}$ 。其值的大小与作物种类和生育阶段等有关。一般可根据作物田间需水量试验数据来推求, 或查有关地区作物系数表。也有人通过田间试验观察, 认为作物系数 K_c 与作物叶面积指数(LAI) 有关。即:

$$K_c = aLAI + b \tag{7}$$

式中: a 、 b ——经验系数。根据西北农大灌溉试验站资料分析, 该站冬小麦的 a 、 b 值分别为 0.22 和 0.18。

根据西北农大灌溉试验站 1998 年 6 月至 1999 年 6 月夏玉米、冬小麦生长期大于 15 的积温与 K_c 值的非线性回归分析, 发现夏玉米拟合得相当紧密, 回归系数 $R = 0.998$; 而冬小麦 $R = 0.854$, 均可满足生产实际要求。

夏玉米:

$$K_c = 1.022 - 25.42x + 861.61x^2 - 5964.78x^3$$
$$R = 0.998 \tag{8}$$

冬小麦:

$$K_c = 1.349 - 1.496x + 176.073x^3 - 4377.46x^3$$
$$\tag{9}$$

式中: X 分别为夏玉米与冬小麦生长期大于 15 的积温 DD 除以 10 000。

$$\text{即: } X = DD/10\,000 \tag{10}$$

(3) 确定地下水补给量 G_e 。地下水补给量 G_e 与

作物蒸发蒸腾量 ET_c 、土壤特性及地下水埋深 GWD 有关。一般多根据当地的实际资料回归经验公式。如陕西洛惠渠为:

$$G_e = Q \cdot ET_c \quad (\text{mm/d}) \tag{11}$$

$$Q = B - 0.15GWD \tag{12}$$

式中: ET_c ——作物蒸发蒸腾量(mm/d); B ——地下水补给系数。与作物类型、土壤特性及地下水埋深有关, 可查下表 1; GWD ——地下水埋深(m)。

表 1 地下水补给系数 B 值

作 物	砂壤土	中壤土	黏壤土
冬小麦	0.4	0.5	0.6
夏玉米	0.3	0.4	0.5
棉 花	0.3	0.4	0.5

(4) 确定有效降雨量 P_e 。

$$\text{即: } P_e = P - R - D \tag{13}$$

式中: P ——为某次降雨的降雨总量(mm); R ——为地面径流量(mm); D ——为深层渗漏量(mm)。

有效降雨量的大小, 不仅与降雨特性, 即降雨强度 I 、降雨历时 t_r 、降雨总量 P 有关; 而且还与土壤特性, 即土壤的质地、土壤的初始含水量、以及土壤渗吸速度 k_s 、地下水埋深以及作物植被, 根系层深度等因子有关, 呈现出十分复杂的动态变化过程。

(5) 确定土壤有效贮水量 ASW 。

$$ASW = 10 \cdot Hr(\theta - \theta_{FC} \cdot g_x/100) (\text{mm}) \tag{14}$$

式中: H ——为作物根系活动层深度(m); r ——为土壤干容量(t/m^3); θ_{FC} 、 θ_0 ——分别为土壤田间持水率与初始含水量(占干土重 % 计); G_x ——为作物适宜灌溉的土壤水分下限指标, 占田间持水率的(%)。其值的确定与作物类型及作物生长阶段有关。

在进行灌溉决策时, 除了考虑作物生长所处的生育阶段、作物生长适宜的土壤水分下限指标外, 最终的决策将取决于本次灌水的边际收益($P_y - \Delta y$)是否大于边际资源成本($P_x - \Delta x$)^[6~10]。

4 节水灌溉预报、管理与决策专家系统的应用

整个系统首先显示主菜单, 用户只要用鼠标选中“灌溉预报原理”, 即可得节水灌溉预报的基本思路, 如下图 3 所示。若用户选中“灌溉决策”, 则屏幕显示人机对话窗口, 要求再次确定“灌溉决策计算”, 并要求分别输入作物类型、土壤初始含水量及土壤

类型, 计算机即可作出农田灌溉的决策依据及相应的决策方案, 如图 4 所示。

若用户继续选择“灌溉制度”, 则计算机屏幕要

求选择作物种类, 并显示该作物的节水灌溉制度, 如图 5 所示。

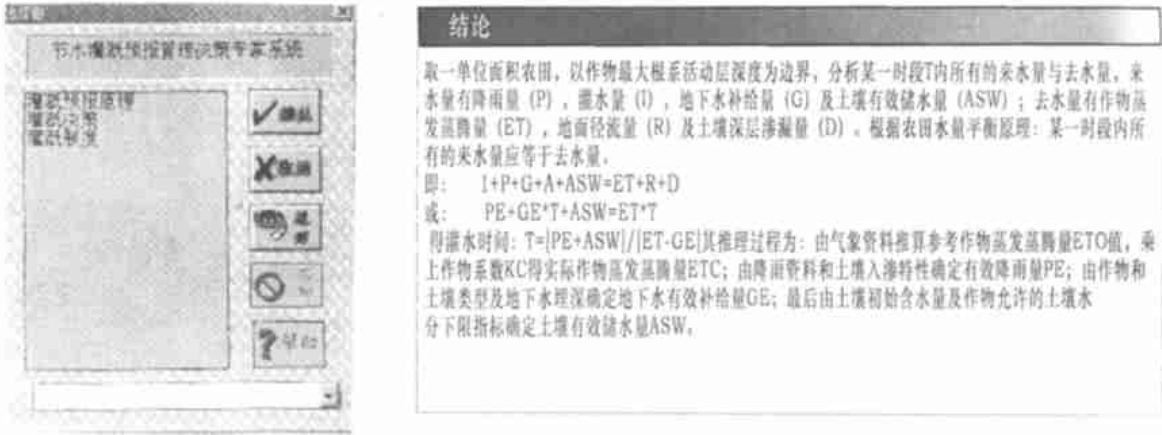


图 3 节水灌溉预报、管理与决策专家系统主菜单

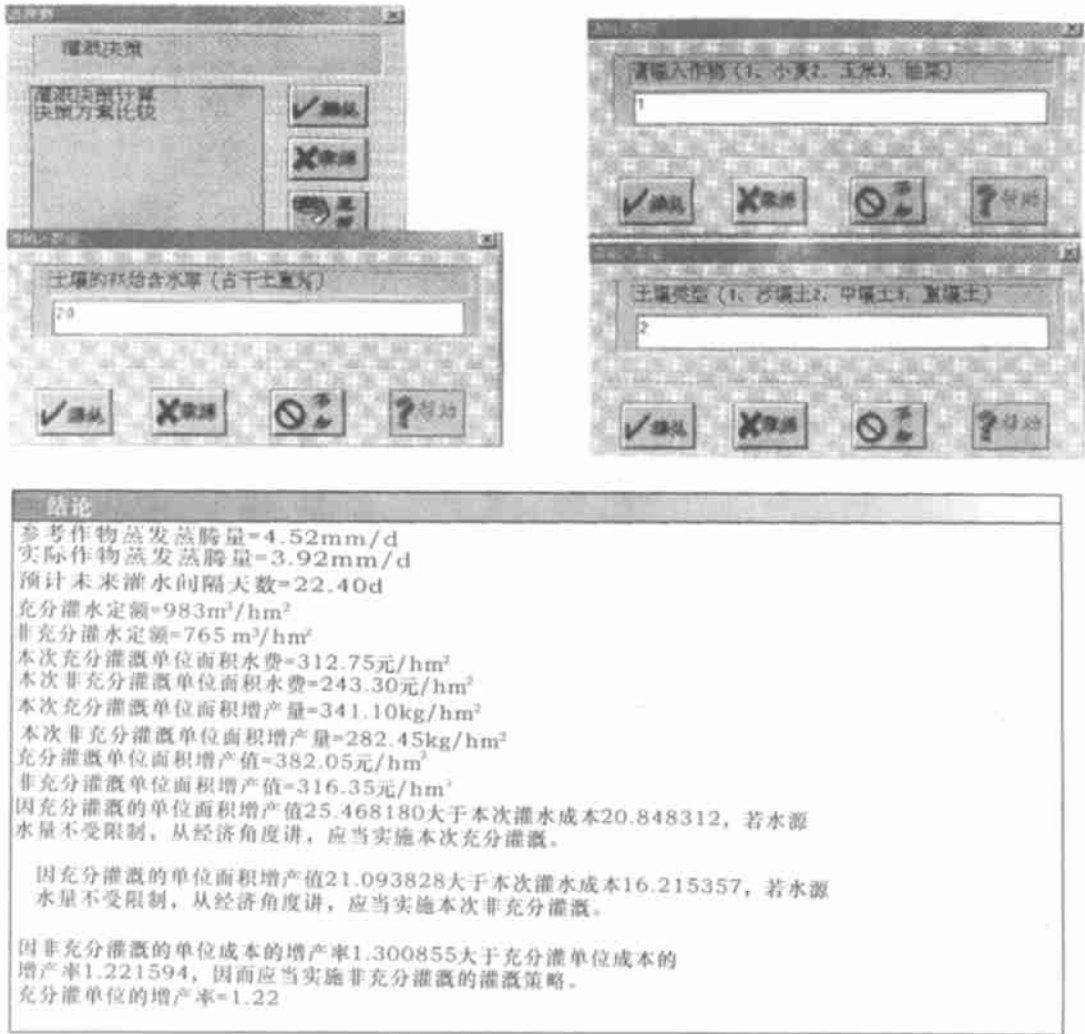


图 4 节水灌溉预报与决策的依据与方案

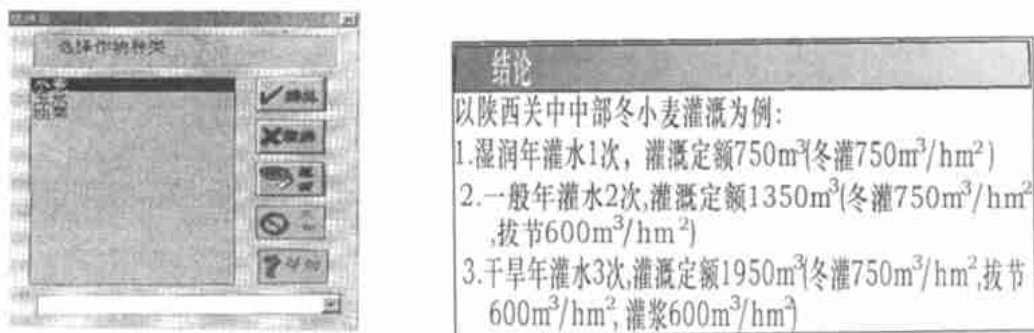


图 5 冬小麦节水灌溉制度

5 结 论

本文将计算机前沿技术——人工智能中的专家系统技术,如何在节水灌溉预报、管理与决策中的应用进行了研究与开发。该专家系统已在节水灌溉的管理实践进行了应用,取得了较理想的成效。该系统可为我国北方缺水地区,特别是西北黄土高原地区,有限农业水资源的科学管理与田间灌溉决策提供决策的依据与方案。随着我国信息技术和网络通讯技术的日益普及,今后必定要开通全国的乃至各地区的农业信息网络。而本文的研究成果将对农业信息网络提供有关节水灌溉咨询与管理决策等项服务。因此今后应用的前景将会更加广阔,而且随着研究、开发的不断深化,必将形成一个新的交叉学科——农业知识工程,而且极具生命力。21 世纪将由生

物工程与信息技术占先导地位,而农业是永不衰竭的行业。农村信息网络与农业专家系统的结合,将成为中国农业现代化独具特色的创举,并将加速缩短农业现代化与低素质农民间的差距,促进我国农业的跨越式发展,为迎接新的农业科技革命作出贡献。为此,研究、开发与推广、应用智能型的节水灌溉预报、管理与决策专家系统,可作为“跨越”我国农民文化科技素质低和农村社会化服务体系较为薄弱的突破口,尽快迎头赶上世界知识经济与技术竞争的焦点“前沿高新技术”。特别是面对中央对西部大开发的战略部署及 21 世纪农业新的科技革命,智能决策专家系统的推广应用将是传统农业向现代化农业转变的重要标志,也是科教兴农的重大突破,而且为把高新农业技术送到亿万农民手中开辟了一条崭新的途径^[14]。

参考文献:

- [1] 汪志农,熊运章. 节水灌溉决策支持系统的研究[J]. 西北农业大学学报. 1998 (26): 71– 75.
- [2] N. J. 尼尔逊(美). 人工智能原理[M]. 北京: 科学出版社. 1983.
- [3] 施鸿宝,王秋荷. 专家系统[M]. 西安: 交通大学出版社. 1991.
- [4] 何华灿. 人工智能基础[M]. 北京: 清华大学出版社. 1988.
- [5] 熊范纶著. 农业专家系统及开发工具[M]. 北京: 清华大学出版社. 1999.
- [6] Wang Zhinong, Kang Shaozhong, et al. Study on management and decision-making expert system for water saving irrigation[A]. Proceeding of International Conference on Engineering and Technological Science, Technology Innovation and Sustainable Agriculture[C]. [s.l.]: New World Press. 2000, 303– 309.
- [7] 陈亚新,康绍忠. 非充分灌溉原理. 水利水电出版社, 北京, 1995 年 9 月.
- [8] R E Plant, R D Horrocks, et al. CALEX/ COTTON: An integrated expert system application for irrigation scheduling[J]. Transaction of the ASAE, 1992, 35 (6): 11– 12.
- [9] Caridady Qcerin J M. Expert system in agriculture 6th International of Congress for Computer Technology in Agriculture[M]. Wageningen, June, 1996.
- [10] Wang Zhinong, Xiong Yunzhang, et al. Study on expert system of irrigation forecast and decision-making for water saving[A]. Proceeding of Chinese-Israeli Bilateral Workshop on Water-Saving Agriculture[C]. 北京: 水利水电出版社, 2000, 237– 243.
- [11] 熊运章, 宋松柏, 等. 计算机在农业水土工程中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社. 1999.
- [12] 汪志农, 薛建新, 等. 陕西关中灌区斗渠管理体制深化改革研究[J]. 农业工程学报. 2000 (4): 64– 67.
- [13] 汪志农, 熊运章. 陕西省旱情决策子系统的研制与应用[J]. 干旱地区农业研究[J]. 1997(3): 90– 95.
- [14] 卢良恕. 21 世纪我国农业科学技术发展趋势与展望[J]. 世界农业. 1998(10): 6– 9.