

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.11.014

基于 RS、GIS 和蚁群算法的多目标渠系配水优化*

张智韬 刘俊民 陈俊英 汪志农 李援农
(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

【摘要】 针对渠系配水优化方法存在通用化程度不高的问题,依据作物的水分生产函数,建立以土壤含水率为基础,灌区各种作物该次灌水增产效益最大和灌区水费收入最高的多目标优化配水模型。通过 RS 技术快速获取灌区土地利用和土壤含水率信息,并以像元为求解单元,通过蚁群算法在 GIS 系统中对模型进行求解,获得各斗渠满足多目标条件下的最优灌溉配水量。所得结果符合灌区灌溉用水的实际情况,该优化配水方法具有通用性。

关键词: 渠系配水 优化 蚁群算法 RS GIS
中图分类号: S274.3; TP273 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)11-0072-07

Water Resources Allocation of Canal System Based on Multi-objective about RS, GIS and Ant Colony Algorithm

Zhang Zhitao Liu Junmin Chen Junying Wang Zhinong Li Yuannong
(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract

In view of the existing low efficiency of method problems about the optimization of water allocation of canal system, a multi-objective model about optimization water allocation was established to acquire the highest increased yield benefit and water income of the irrigation district under the basic of soil moisture and the water production function. The information of land use and soil moisture in irrigation area was gained easily by RS technology. The optimization water allocation in each branch under the condition of multi-objective could be obtained by the model solution with ant colony algorithm in GIS system of each the image pixels. The result accorded with the practical situation of water use in irrigation area. Therefore, this model can be widely used for decision makers to optimize water resources distribution.

Key words Allocation of canal system, Optimization, Ant colony algorithm, RS, GIS

引言

目前国内大多数灌区进行渠系水量调配时仍采用手工编制用水计划,经常造成渠系输水时间长、小流量配水、局部无效弃水和水量浪费现象。渠系配水优化是通过对各级渠道的配水水量、流量和配水次序的合理安排,减少整个渠系的弃水和水量损失,取得最大的增产效益。对此国内许多学者进行了大量研究,大致分为两类:一类是以满足一定约

束条件下的以灌区某次配水的增产效益最大或灌溉管理部门水费收入最高为目标进行优化配水,另一类是以满足一定约束条件下的渠系水量损失最小为目标进行优化配水^[1~5]。由于灌区某次配水的增产效益受作物种植制度、降雨、前期灌水、土壤水分、农产品价格等众多因素的影响,第一类方法需要参数多,确定上述参数难度很大,且模型复杂难以实现通用化。实际上目前大多数灌区在实际渠系配水过程中,根据下级渠道申报的用水量,在满足各种限

收稿日期: 2010-02-21 修回日期: 2010-07-05
* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD11B05、2007BAD88B05)和国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2010AA10A302)
作者简介: 张智韬,讲师,博士生,主要从事测量工程及3S技术在节水灌溉及水资源中的应用研究, E-mail: zhitaozhang@126.com
通讯作者: 刘俊民,教授,博士生导师,主要从事水资源与水环境工程研究, E-mail: jmlsx@yahoo.com.cn

制的条件下,由上级灌溉管理部门根据经验,以渠系水量损失最小为目标进行水量调配。近年来,开发了多种灌区灌溉用水管理 GIS 软件^[6~8],但由于考虑因素多,特别是针对某一具体灌区或渠系编制的,对其他灌区或渠系应用时需要对整个软件进行修改,不便于用户使用,而且这些 GIS 系统不能快速获得灌区实际的用水信息,只能以灌溉面积作为管理和分配水资源的基础,很难对灌区灌溉制度作出准确预报,难以在实际生产中指导灌区某次具体灌溉水的优化配置,导致灌区的灌溉管理工作常处于被动状态^[9~11]。

本文针对渠系优化配水方法中存在通用化程度不高的问题,将遥感技术(RS)和地理信息系统(GIS)进行有机的结合,并根据 RS 技术所获取数据的特点,建立作物供水增产优化配水模型,同时引入满足灌区水费收入最高为目标的配水模型,并以像元为求解单元,通过多目标优化问题的蚁群算法在 GIS 系统中对模型进行求解,获得各斗渠的最优配水量。

1 优化配水数学模型

1.1 模型基础

对缺水灌区,在某次灌水中往往只能充分灌溉一部分面积,有一部分面积可能灌不上水,也有部分面积可能灌水不足(或称非充分灌溉)。为此根据作物产量与各生育阶段相对蒸发蒸腾量的关系,即 JENSEN 相乘模型^[12]

$$Y_a = Y_m \prod_{i=1}^n \left(\frac{T_i}{T_{m_i}} \right)^{\lambda_i} \tag{1}$$

式中 Y_a 、 Y_m ——某作物实际与潜在产量,kg/hm²
 T_i 、 T_{m_i} ——第 i 阶段作物实际的与潜在的蒸发蒸腾量,m³/hm²
 λ_i ——第 i 阶段缺水对产量影响的敏感指数
 n ——某作物全生育阶段数

由 JENSEN 相乘模型可以推出作物在 k 阶段灌溉时,作物的灌溉净增产量

$$\Delta Y = Y'_k - Y_k = Y_m \prod_{i=1}^{k-1} \left(\frac{T_i}{T_{m_i}} \right)^{\lambda_i} \left[\left(\frac{T'_k}{T_{mk}} \right)^{\lambda_k} - \left(\frac{T_k}{T_{mk}} \right)^{\lambda_k} \right] \tag{2}$$

式中 ΔY 、 Y'_k 、 Y_k —— k 阶段灌溉净增产量、灌溉和不灌溉条件下某作物预计产量,kg/hm²

T'_k 、 T_k —— k 阶段灌溉和不灌水条件下某作物实际的蒸发蒸腾量,m³/hm²

由于 k 阶段供水时,以前各阶段的实际用水情

况已知,所以 $Y_m \prod_{i=1}^{k-1} \left(\frac{T_i}{T_{m_i}} \right)^{\lambda_i}$ 可简化为一常数 $f(E)$,则式(2)可得到简化。

土壤含水率充分时,作物蒸发蒸腾量为

$$T_c = T_m = K_c T_0 \tag{3}$$

式中 T_c 、 T_0 ——某时段作物蒸发蒸腾量和参照作物蒸发蒸腾量,m³/hm²

K_c ——作物系数

土壤水分不足时,作物实际的蒸发蒸腾量为

$$T_{c,a} = K_w K_c T_0 \tag{4}$$

$$K_w = \frac{\ln(W+1)}{\ln 101} \tag{5}$$

$$W = \frac{\theta - \theta_p}{\theta_f - \theta_p} \tag{6}$$

式中 K_w ——土壤水分修正系数
 W ——土壤相对有效含水量
 θ ——土壤含水率
 θ_p ——凋萎系数
 θ_f ——田间持水率

由式(3)、(4)可得

$$\frac{T_{c,a}}{T_m} = \frac{K_w K_c T_0}{K_c T_0} = K_w \tag{7}$$

若 k 阶段为限额灌水时,则式(6)可写为

$$W_m = \frac{\theta_0 + \theta_m - \theta_p}{\theta_f - \theta_p} \tag{8}$$

式中 W_m ——在一定灌水定额下土壤相对有效含水量
 θ_m ——在一定灌水定额下使土壤增加的体积含水率

θ_0 ——初始土壤含水率

同理,若 k 阶段不供水,则式(6)可写为

$$W_0 = \frac{\theta_0 - \theta_p}{\theta_f - \theta_p} \tag{9}$$

式中 W_0 ——不供水条件下土壤相对有效含水量
将式(7)、(8)、(9)代入式(2)可得

$$\Delta Y = f(E) \left[\left(\frac{\ln \left(\frac{\theta_0 + \theta_m - \theta_p}{\theta_f - \theta_p} + 1 \right)}{\ln 101} \right)^{\lambda_k} - \left(\frac{\ln \left(\frac{\theta_0 - \theta_p}{\theta_f - \theta_p} + 1 \right)}{\ln 101} \right)^{\lambda_k} \right] \tag{10}$$

1.2 数学模型

1.2.1 目标函数

灌区各种作物该次灌溉的增产值最大和水费收入最高的目标函数。即

$$\Delta Y =$$

$$\max \left\{ \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M f(E)_j \left[\left(\frac{\ln \left(\frac{\theta_0 + \theta_m - \theta_p}{\theta_f - \theta_p} + 1 \right)}{\ln 101} \right)^{\lambda_{kj}} - \left(\frac{\ln \left(\frac{\theta_0 - \theta_p}{\theta_f - \theta_p} + 1 \right)}{\ln 101} \right)^{\lambda_{kj}} \right] \right\} \quad (11)$$

$$F = \max \left(\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M P_j W_{ij} \right) = \max \left(\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M P_j \frac{\theta_{mij} 100 H_j A}{\eta} \right) \quad (12)$$

式中 F ——水费总收入,元
 P_j ——第 j 种作物灌溉水费单价,元/ m^3
 W_{ji} ——第 j 种作物第 i 各像元毛灌水量, m^3
 η ——斗农渠水的利用系数
 M ——第 j 种作物的像元数,个
 N ——作物种类数
 H_j ——第 j 种作物允许土壤计划湿润层深度,m
 A ——单个像元面积, m^2

1.2.2 约束条件

(1)来水量约束

$$\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \frac{W_{ji}}{\eta} \leq Q T \eta_c \quad (13)$$

(2)最小灌溉水量约束

$$Q T \eta_c \geq \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \frac{W_{\min ji}}{\eta} \quad (14)$$

(3)土壤含水率约束

$$\theta_{\min} \leq \theta_0 \leq \theta_f \quad (15)$$

(4)灌溉后土壤含水率约束

$$\theta_{\min} \leq \theta_0 + \theta_m \leq \theta_f \quad (16)$$

(5)非负约束

$$\begin{aligned} \theta_0 &\geq 0 \\ \theta_m &\geq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

式中 $\theta_{\min}$ ——作物适宜土壤含水率下限
 Q ——渠首引水流量, m^3/s
 T ——某次灌水的用水时间,h
 $W_{\min ji}$ ——第 j 种作物的第 i 各像元的毛灌水量的下限
 η_c ——干支渠水的利用系数

2 基于 RS 技术的灌区数据采集

2.1 研究区概况

宝鸡峡二支渠灌区,从扶风县段家段开始(上段),途经杨凌区的五泉段(中段)、杨凌段(下段)后,流入漆水河,最后汇入渭水,其中五泉段地处东

经 $107^{\circ}56' \sim 108^{\circ}10'$,北纬 $34^{\circ}15' \sim 34^{\circ}21'$,年平均气温 12.9°C ,日照 $2\,196\,\text{h}$,年平均降水量 $600\,\text{mm}$,属大陆性暖温带季风气候,土壤为粘壤土。五泉段共有斗渠 14 条,正常允许引水流量为 $2.0\,\text{m}^3/\text{s}$,其灌溉面积为 $1\,671\,\text{hm}^2$ [13]。灌区以农业为主,兼有种植、设施农业、养殖及少数工业[14]。

2.2 基于 RS 技术的灌区信息采集

遥感数据采用中国遥感卫星地面站提供的 2006 年 3 月 28 日 Landsat5TM 数据分析处理,遥感图像处理包括如下几方面[15]:①辐射校正:遥感图像做了两方面的辐射校正处理,对由于大气影响的矫正,采用系统内提供的直方图均衡化处理;对由于噪声和磁带误码造成的影响采用斑点消除处理。②几何校正:用地面控制点(GCP)方法进行校正。同样标准的遥感图像可以生成 GCP 文件进行几何校正,亮度值采用“双线性插值法”。③图像增强:采用多波段合成方法,用最佳指数因子法确定最佳波段组合。④研究区域提取:利用经统一配准和投影的边界矢量图层对各波段图像进行切割得到所需图像。⑤获取灌区作物种植结构:本文以文献[13]的方法(同一地区),利用 TM 图像对宝鸡峡二支渠五泉段灌区作物种植结构进行提取。分别对各种土地利用类型进行主成分分析法、归一化植被指数法、坐标法以及非监督分类等方法的综合使用、分类提取。土地利用类型包括农田、果园(苹果园、猕猴桃园、桃园)、林地(针叶林、阔叶林)、道路、居民地、设施农业(大棚、小棚)、渠道等。⑥灌区土壤含水率信息获取:在 ERDAS8.4 的建模工具中,以文献[14]的遥感监测土壤含水率的归一化土壤湿度指数模型对宝鸡峡二支渠五泉段灌区土壤含水率信息进行提取(同一地区)。应用不同取土深度的模型,生成不同深度的遥感土壤体积含水率分布图,把生成的遥感土壤含水率分布图分为: $\leq 9.1\%$ 、 $9.1\% \sim 16.8\%$ 、 $16.8\% \sim 18.3\%$ 、 $18.3\% \sim 28.3\%$ 、 $\geq 28.3\%$,对以上等级分别定为:凋萎、干旱、轻旱、适宜含水率、涝。

3 基于蚁群算法的模型求解

3.1 Pareto 蚁群算法(PACA)

Pareto 蚁群算法是一种多目标单种群蚁群算法,与单目标蚁群算法最大的不同就是各条路径上对应 k 个目标有 k 个信息素,用信息素向量 τ_i^k 表示[16~18]。在每只蚂蚁构造解的开始阶段随机确定 k 个目标的权重 p_k ,其中 $0 \leq p_k \leq 1, \sum_{k=1}^k p_k = 1$ 。

Pareto 蚁群算法采用伪随机比例规则选择下一

路径,即设定一个常数 q_0 ,生成一个在 $[0,1]$ 上均匀分布的随机变量 q ,则

$$P_m(i,j) = \max_{j \in L_m(i)} \left\{ \left[\sum_{k=1}^k p_k \tau_m^k(i,j) \right]^\alpha \eta_i^\beta \right\} \quad (q \leq q_0) \quad (18)$$

$$P_m(i,j) = \begin{cases} \frac{\left[\sum_{k=1}^k p_k \tau_m^k(i,j) \right]^\alpha \eta_i^\beta}{\sum_{j \in L_m(i)} \left(\left[\sum_{k=1}^k p_k \tau_m^k(i,j) \right]^\alpha \eta_j^\beta \right)} & (i \in L_m(i)) \\ 0 & (j \in L_m(i)) \end{cases} \quad (q > q_0) \quad (19)$$

式中 $P_m(i,j)$ ——蚂蚁 m 在第 i 步选择配水像元 j 的概率

$L_m(i)$ ——蚂蚁 m 在第 i 步所能选择的所有配水像元

$\tau_m^k(i,j)$ ——蚂蚁 m 在第 i 步所选择的像元 j 上对应目标 k 的信息素向量

$\sum_{k=1}^k p_k \tau_m^k(i,j)$ ——像元 j 上信息素向量的加权和

η_i ——可见度因子

α, β ——参数,分别反映了蚂蚁在运动过程中所积累的信息和启发信息在蚂蚁选择像元中的相对重要性

每当一只蚂蚁完成一次搜索时,进行信息素强度的局部更新。如果像元 (i,j) 是蚂蚁 m 所选择的配水像元之一,更新信息素强度为

$$\tau^k(i,j) = (1 - \rho_0) \tau^k(i,j) + \rho_0 \Delta \tau^k(i,j) \quad (20)$$

式中 $\rho_0 < 1$ 为常数, $(1 - \rho_0) \tau^k(i,j)$ 代表信息素的挥发; $\Delta \tau^k(i,j)$ 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中留在路径 (i,j) 上的信息量。

所有蚂蚁均完成一次检索时,对于当前最优方案上的像元,全局信息素更新为

$$\tau^k(i,j) = (1 - \rho_1) \tau^k(i,j) + \rho_1 \Delta \tau^k(i,j) \quad (21)$$

对其他像元,全局信息素更新为

$$\tau^k(i,j) = (1 - \rho_1) \tau^k(i,j) \quad (22)$$

式中 $0 < \rho_1 < 1$ 为常数, $(1 - \rho_1) \tau^k(i,j)$ 代表信息素的挥发。

3.2 基于 PACA 的多目标寻优过程

作为 Pareto 蚁群算法在多目标优化配水中的应用,本文以遥感图像像元为配水对象。由于蚂蚁只是选择待配水的像元,与线路长度无关,故启发式信息因子 η_i 及 α, β 参数均取 1。增产目标和水费收入目标对应的信息素分别为 $\tau^1(i,j)$ 、 $\tau^2(i,j)$ 。

在蚂蚁每次构造解之前,随机确定增产目标权重 p_1 ($0 \leq p_1 \leq 1$),水费收入目标权重 $p_2 = 1 - p_1$ 。

对于局部信息素更新,式(20)中的 $\Delta \tau^k(i,j)$ 选取规则为

$$\Delta \tau^1(i,j) = \frac{1}{f_1(m)} \quad (23)$$

$$\Delta \tau^2(i,j) = \frac{1}{f_2(m)} \quad (24)$$

式中 $f_1(m)$ $f_2(m)$ ——第 m 只蚂蚁选择的配水方案按式(11)、(12)所得的目标函数值

对于全局信息素更新,式(21)中的 $\Delta \tau^k(i,j)$ 选取规则有两种:

(1) 只更新当前 Pareto 前沿中目标函数式(11)、(12)的最大值所选择的路径上的信息素,即

$$\Delta \tau^1(i,j) = \frac{1}{\max f_1} \quad (25)$$

$$\Delta \tau^2(i,j) = \frac{1}{\max f_2} \quad (26)$$

(2) 只更新当前 Pareto 前沿中综合目标最大值所选择的路径上的信息素,即

$$\Delta \tau^1(i,j) = \frac{1}{\max I} \quad (27)$$

$$\Delta \tau^2(i,j) = \frac{1}{\max I} \quad (28)$$

式中 $\max f_1$ 、 $\max f_2$ 和 $\max I$ ——当前 Pareto 前沿中目标函数式(11)、(12)和综合目标最大值

寻优过程中,针对各个目标分别进行信息素局部更新和全局更新,使蚂蚁朝着增产最大和水费收入最高目标各自的最优方向优化,每一次迭代得到的非支配解保存到最优解集中,从而使算法尽可能达到二者同时最优。

4 基于 GIS 的优化结果及分析

根据 RS 技术获得的宝鸡峡二支渠五泉段灌区土地利用现状图、各斗渠控制范围边界图、土壤含水率图和来水量,用基于 COM 组件技术编写的灌区灌溉需水量优化预报软件(未注册)进行水量优化和叠加运算。基本原理为,先视土地利用现状图和土壤含水率图为数字矩阵,矩阵边界外的区域值为零,用内置蚁群算法对模型进行求解,获得矩阵内(即各像元)各行列的值,即模型达到最佳时的土壤含水率,再以原土壤含水率图作为参照,应用文献[12]中的灌水定额及灌溉用水量计算公式,计算

各像元的毛用水量。最后以各斗渠控制范围边界图与所得结果进行统计运算,获得各斗渠范围内总的毛用水量。

宝鸡峡二支渠五泉段灌溉水利用系数由文献[19]查得,支渠水利用系数为 0.80,斗农渠水利用系数为 0.86,出水口 $M=14$,灌区土地利用类型中需要渠灌的为冬小麦和果园,作物种类数 $N=2$ 。配水渠道渠首流量为 $Q=2.0\text{ m}^3/\text{s}$,轮灌期设为 $T=10\text{ d}(240\text{ h})$ 。则总渠首引水流量为 $1\,728\,000\text{ m}^3$ 。由于 2006 年 3 月 28 日,灌区冬小麦正处于分蘖期,根据冬小麦灌溉制度^[12],计划湿润层深度确定为 0.4 m。灌区果园以苹果和猕猴桃为主,此时正是开花座果期,根据果园灌溉制度^[12],计划湿润层深度确定为 0.8 m。该灌区小麦执行水价为 0.24 元/ m^3 ^[19],果园参考执行水价为 0.32 元/ m^3 。冬小麦和果园的预计产量定为 450 kg 和 1 000 kg。2006 年 3 月 28 日为冬小麦拔节到抽穗期,即为关键需水阶段,此时果树为开花座果期,也为关键需水阶段,此时 λ 都取值为 0.29。灌区以壤土为主,此时,冬小麦和果园允许最大土壤体积含水率为 $\theta_{\max}=\theta_f=28.3\%$,土壤体积最小含水率为 $\theta_{\min}=0.4\theta_f=11.3\%$ ^[12,19]。采用 Pareto 蚁群算法进行模

型解算时,参数设置为:蚂蚁个数取 100,初始信息素设为 1, $q_0=0.5$, $\rho_0=0.1$, $\rho_1=0.1$, $\alpha=0.1$, $\beta=0.2$,迭代 1 000 次^[17~18]。软件操作界面如图 1 所示。

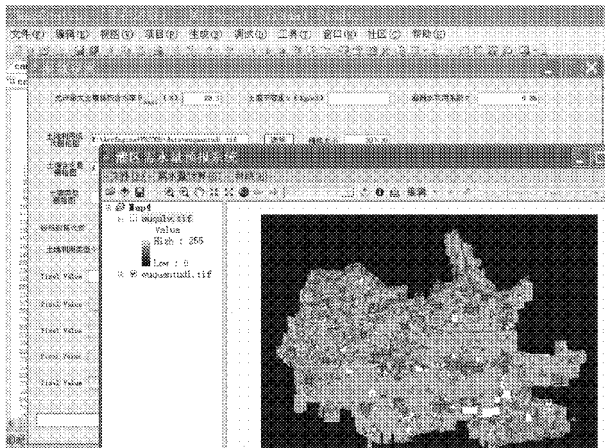


图 1 灌区需水量优化预报软件主界面
Fig.1 Main window of the predicted water requirement software in irrigation area

由灌区灌溉需水量优化预报软件进行水量优化和叠加运算,得到全灌区增产净效益和水费收入最大时,各斗渠分配的小麦用水量、果园用水量,以及总用水量和总水费收入。结果见表 1。

表 1 宝鸡峡二支渠五泉段各斗渠需水量及水费收入
Tab.1 Water requirement and income from water charge of each branch of Wuquan segment of the second branch in Baojixia irrigation area

斗口号	总面积 /hm ²	灌水量 /m ³	果园			冬小麦		
			面积 /hm ²	需水量 /m ³	平均灌水定额 /m ³ ·hm ⁻²	面积 /hm ²	需水量 /m ³	平均灌水定额 /m ³ ·hm ⁻²
15	145.0	170 642	89.9	114 330	1 094	55.1	56 312	879
16	50.7	49 102	25.3	30 443	1 033	25.3	18 659	633
16 付	25.3	24 020	10.6	13 499	1 091	14.7	10 521	616
17	282.7	272 985	118.7	144 682	1 048	164.0	128 303	673
18	168.4	136 162	65.7	62 092	813	102.7	74 070	620
19	181.7	95 124	40.0	40 903	880	141.8	54 221	329
19 付	50.0	31 570	17.6	11 240	549	32.4	20 330	540
20	163.6	89 522	36.0	40 824	975	127.6	48 698	328
21	53.3	60 603	38.4	45 003	1 008	14.9	15 600	898
22	159.3	151 866	66.9	85 045	1 093	92.4	66 821	622
23	49.0	58 212	33.3	43 757	1 129	15.7	14 455	793
24	100.0	49 389	12.0	11 423	819	88.0	37 966	371
25	167.5	124 243	47.2	56 650	1 031	120.3	67 593	483
26	74.3	68 961	38.6	36 550	814	35.6	32 412	782
Σ	1 670.9	1 382 400	640.3	736 440	989	1 030.5	645 960	539
水费总收入/元		390 691	235 661			155 030		

从表 1 可知,灌区来水水量为 1 728 000 m³,考虑支渠渠道输水损失,有效来水量,即到达斗口的计费水量为 1 382 400 m³,在此情况下,为使灌区增产最大和水费收入到达最高,经模型算得,小麦总分配水量为 645 960 m³,果园总分配水量为 736 440 m³。水费总收入为 390 691 元。

从表 1 和土地利用分类图可知,灌区果园面积约为小麦面积的 60%,但水量分配多于小麦分配量。这是由于果园为高经济作物,并且单价水费比小麦高,所以在供水不足条件下进行水量分配时,有明显的倾向。从平均灌水定额和平均灌水率也可以看出(灌区冬小麦灌水定额^[12,19]约 900 m³/hm²,果园灌水定额约 1 200 m³/hm²),冬小麦平均灌水定额为 539 m³/hm²,平均灌水率为 59.9%,而果园平均灌水定额为 989 m³/hm²,平均灌水率为 82.4%,远

高于冬小麦。

5 结论

(1) 在 RS 和 GIS 技术基础上建立的模型,使管理者对灌区的管理主动性增强,即在每次灌水前,管理决策部门就能根据供水量对全灌区的用水单位进行合理分配,使灌区本次供水的增产值和水费收入同时达到最高。

(2) 在对多目标优化配水模型进行解算时,所采用蚁群算法的全局搜索能力和收敛速度比遗传算法有很大的提高。

(3) 本模型的不足之处是不利于大田作物的灌溉,当来水不足时,只能保证经济作物的充分灌溉。所以,在实际运行时,可以适当提高非经济作物的权值。

参 考 文 献

1 王密侠,汪志农,尚虎军,等. 陕西关中灌区水费计收方式与水资源合理利用[J]. 农业工程学报,2005,21(2):11~14.
Wang Mixia, Wang Zhinong, Shang Hujun, et al. Water fee collecting methods and reasonable utilization of water resources in Guanzhong Irrigation District of Shaanxi Province[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2):11~14. (in Chinese)

2 顾世祥,傅骅,李靖. 灌溉实时调度研究进展[J]. 水科学进展,2003,14(5):660~666.
Gu Shixiang, Fu Hua, Li Jing. Advances in real-time irrigation operation[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(5):660~666. (in Chinese)

3 马孝义,于国丰,李安强,等. 渠系配水优化编组通用化软件的研发与应用[J]. 农业工程学报,2005,21(1):119~123.
Ma Xiaoyi, Yu Guofeng, Li Anqiang, et al. Research and development of general software for optimal irrigation water distribution and its application[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1):119~123. (in Chinese)

4 Singh R, Kroes J G, Dam J C, et al. Distributed ecohydrological modelling to evaluate the performance of irrigation system in Sirsa district, India: I. Current water management and its productivity[J]. Journal of Hydrology, 2006, 329(3~4):692~713.

5 汪志农,熊运章. 灌溉渠系配水优化模型的研究[J]. 西北农业大学学报,1993,21(2):64~69.
Wang Zhinong, Xiong Yunzhang. Optimal water allocation model of irrigation canal system[J]. Journal of Northwest University of Agriculture, 1993, 21(2):64~69. (in Chinese)

6 赵文举,马孝义,刘哲,等. 基于自适应遗传算法的渠系优化配水模型研究[J]. 系统仿真学报,2007,19(22):5137~5140.
Zhao Wenju, Ma Xiaoyi, Liu Zhe, et al. Study of optimal water delivery scheduling models based on adaptive genetic algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(22):5137~5140. (in Chinese)

7 张国华,张展羽,邵光成,等. 基于粒子群优化算法的灌溉渠道配水优化模型研究[J]. 水利学报,2006,37(8):1004~1008.
Zhang Guohua, Zhang Zhanyu, Shao Guangcheng, et al. Optimization model for discharge distribution of irrigation channels based on particle swarm optimizer[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(8):1004~1008. (in Chinese)

8 Reddy J M, Wilamowski B, Cassel-Sharmasarkar F C. Optimal scheduling of irrigation for lateral canal[J]. ICID, 1999, 48(3):1~12.

9 段永刚,汪志农,尚虎军,等. 3S 及其集成技术在灌区信息管理中的应用[J]. 节水灌溉,2007(8):136~140.
Duan Yonggang, Wang Zhinong, Shang Hujun, et al. The application of 3S and integration in the information management system of irrigation district[J]. Water Saving Irrigation, 2007(8):136~140. (in Chinese)

10 Amor V M, Kiyoshi H D, Ashim D G, et al. Combining remote sensing-simulation modeling and genetic algorithm optimization to explore water management options in irrigated agriculture[J]. Agricultural Water Management, 2006, 83:221~232.

11 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.

- 12 汪志农. 灌溉排水工程学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- 13 张智韬, 黄兆铭, 李援农. 遥感影像土地利用方法研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(6B): 20~21.
Zhang Zhitao, Huang Zhaoming, Li Yuannong, et al. The study of deriving land use information from TM image[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(6B): 20~21. (in Chinese)
- 14 张智韬, 李援农, 杨江涛, 等. 土壤含水率遥感监测模型及精度分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 152~155.
Zhang Zhitao, Li Yuannong, Yang Jiangtao, et al. Study of model and accuracy of monitoring soil moisture by remote sensing [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 152~155. (in Chinese)
- 15 仇肇悦. 遥感技术应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1998.
- 16 潘永昌, 王军. 基于蚁群算法的配水树状管网优化布置[J]. 安徽建筑工业学院学报: 自然科学版, 2007, 15(6): 28~31.
Pan Yongchang, Wang Jun. Optimization layout of tree water-pipe network by ant colony algorithms[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry: Natural Science Edition, 2007, 15(6): 28~31. (in Chinese)
- 17 符杨, 孟令合, 胡荣, 等. 改进多目标蚁群算法在电网规划中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 57~62.
Fu Yang, Meng Linghe, Hu Rong, et al. Application of improved multi-objective ant colony algorithm in power network planning[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 57~62. (in Chinese)
- 18 Ippolito M G, Sanseverino E R, Vuinovich F. Multiobjective ant colony search algorithm for optimal electrical distribution system strategically planning[C]//CEC2004 Congress on Evolutionary Computation, 2004.
- 19 汪志农, 雷雁斌, 周安良, 等. 灌区管理体制变革与监测评价[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- 20 张智韬, 李援农, 陈俊英, 等. 基于 3S 技术和蚁群算法的灌区渠系优化配水[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(7): 37~41.
Zhang Zhitao, Li Yuannong, Chen Junying, et al. Optimization of water allocation management for irrigated canals based on 3S technology and ant colony algorithm[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2010, 38(7): 37~41. (in Chinese)

(上接第 71 页)

- 6 Feizi M. Long term effect of using saline water on soil salinity and sodicity[C]//Proc. 10th Afro-Asian Confr. Bali, Indonesia, 1998: 89~95.
- 7 巨龙, 王全九, 王琳芳, 等. 灌水量对半干旱区土壤水盐分布特征及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 86~90.
Ju Long, Wang Quanjiu, Wang Linfang, et al. Effects of irrigation amounts on yield of winter wheat and distribution characteristics of soil water-salt in semi-arid region[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(1): 86~90. (in Chinese)
- 8 张建军, 唐小明, 党翼. 灌水量及其分配方式对冬小麦水分利用效率-光合特性和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(1): 85~90.
Zhang Jianjun, Tang Xiaoming, Dang Yi. Effects of irrigation quantity and irrigation ways on water use efficiency, photosynthetic characters and yield of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2008, 28(1): 85~90. (in Chinese)
- 9 苏莹, 王全九, 叶海燕, 等. 微咸水不同入渗水量土壤水盐运移特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(4): 43~48.
Su Ying, Wang Quanjiu, Ye Haiyan, et al. Study on water and salt transporting feature of soil with different infiltration amount of saline water[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(4): 43~48. (in Chinese)
- 10 吴忠东, 王全九. 微咸水波涌畦灌对土壤水盐分布的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 53~58.
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Effect of saline water surge flow border irrigation on soil water-salt distribution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 53~58. (in Chinese)
- 11 吴忠东, 王全九. 利用一维代数模型分析微咸水入渗特征[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 21~26.
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Infiltration characteristics of brackish water by one dimensional algebraic model[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 21~26. (in Chinese)
- 12 张永波, 王秀兰. 表层盐化土壤区咸水灌溉试验研究[J]. 土壤学报, 1997, 34(1): 53~59.
Zhang Yongbo, Wang Xiulan. Experimental investigation of saline water irrigation at surface layer salification soil region[J]. Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(1): 53~59. (in Chinese)