基于改进 NSGA-Ⅱ的作物灌水量与灌溉日期同步优化*

郄志红　韩李明　吴鑫淼
(河北农业大学城乡建设学院, 保定 071001)

【摘要】 在非充分灌溉条件下,基于农田水量平衡模拟模型和作物产量计算模型,以灌水日期和灌溉水量为决策变量,将作物相对产量最大和作物全生育期的总灌溉水量最小作为优化目标,建立了能够同时对灌水日期和灌溉水量进行优化的多目标优化模型。在模型求解方面,设计了适合于此类优化问题的染色体结构,在精英保留非劣排序遗传算法(NSGA-Ⅱ)的基础上提出了一种基于分组排序思想的改进遗传优化算法。以玉米的非充分灌溉制度优化为例进行了计算分析,结果显示总灌水量相同时该模型与文献[9]中的计算结果相比相对产量提高 0.07~0.20,达到相同相对产量可节约用水 7~15 cm。

关键词: 玉米　灌溉制度优化　多目标同步优化　GNSGA-Ⅱ　水分生产函数
中图分类号: S274.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2011)05-0106-05

Optimization of Crop Irrigation Quantity and Irrigation Date Based on the Improved NSGA-Ⅱ

Qie Zhihong　Han Liming　Wu Xinmiao
(*College of Urban and Rural Construction*, *Agricultural University of Hebei*, *Baoding* 071001, *China*)

Abstract

Under the condition of deficient irrigation, based on the field water balance model and crop yield calculation model, a multi-objective optimization model was put forward to optimize irrigation date and corresponding quantity of irrigation simultaneously. In this model, irrigation date and the quantity of irrigation water were regarded as optimization variables, and maximization of relative yield of crops and minimization of total quantity of irrigation water during whole growth stage were as the optimization objectives. In addition, in the respect of solving the model, a new genetic chromosome structure was designed for this kind of optimization problems. On the basis of non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-Ⅱ), an improved genetic algorithm based on grouping sort was put forward to solve the optimization model. The model was verified by irrigation schedule optimization of corn. Optimization result showed that relative yield of crops increased by 0.07~0.20 when the total irrigation water quantity was same, and the irrigation water quantity decreased by 7~15 cm when the same relative yield in comparison with the calculation results of literature [9].

Key words　Corn, Irrigation schedule optimization, Multi-objective synchronization optimization, Grouping non-dominated sorting genetic algorithm Ⅱ, Water production function

引言

国内外学者在作物水分生产函数以及非充分灌溉条件下的灌溉制度优化方面进行了大量深入研究[1~7],取得了较为满意的结果。但总的来看,大部分研究将各灌水阶段的灌水量作为优化变量,而未

收稿日期: 2010-08-13　修回日期: 2010-08-31
* 国家自然科学基金资助项目(40871254)、河北省自然科学基金资助项目(E2008000353)和国家科技支撑计划资助项目(2006BAD02-A-08)
作者简介: 郄志红,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉、工程结构优化研究,E-mail: qiezhihong@163.com

涉及具体灌水日期[2~3]。文献[4~5]提出了在灌水次数与灌水定额确定情况下以相对产量最高为目标的灌水日期优化,并指出根据具体情况确定合理的灌水日期,能在一定的灌溉定额下显著提高作物产量。

本文基于田间水量平衡模拟模型和作物相对产量计算模型,不受灌水定额和灌水次数限制,设定总灌水量最少与相对产量最大两个目标,同步优化灌水日期和灌水量。在喷灌等节水灌溉条件下,可实现更加灵活的灌溉制度优化,且一次优化出多个非劣解(即与不同的总灌水量相对应的最优灌水日期),以期为决策者提供多个参考方案。

1　农田水量平衡模拟与作物产量计算模型

1.1　农田水量平衡模拟模型

水量平衡模型是一种概念性模型,根据一定时段内土壤水分的输入和输出来确定土壤水分的变化[4]。田间水量平衡要素主要包括降雨、灌溉、腾发、土层排水等。根据作物在不同生长阶段根系的发育特点,将土壤沿竖向分为若干层(图 1),基于田间水量平衡原理建立平衡方程[9]为

$$W_{i,j}=W_{i-1,j}-E_{i,j}-T_{i,j}+P_{i,j}+I_{i,j}-D_{i,j}+C_{i,j} \quad (1)$$

式中　$W_{i-1,j}$、$W_{i,j}$——i 时段初、末土层 j 的土壤含水量

$E_{i,j}$——i 时段土层 j 的蒸发量

$T_{i,j}$——i 时段土层 j 的蒸腾量

$P_{i,j}$——i 时段进入土层 j 的降雨量(扣除了地面径流损失)

$I_{i,j}$——i 时段进入土层 j 的灌溉水量

$D_{i,j}$——i 时段 j 土层的排水量

$C_{i,j}$——i 时段 j 土层利用的地下水量

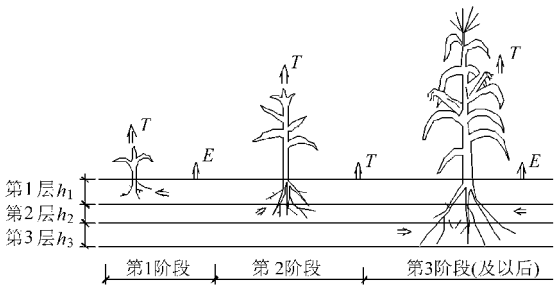

图 1　土层划分示意图

Fig. 1　Sketch map of soil layer

水量平衡各要素中,降雨量可根据当地的气象资料取得;灌溉水量是人为控制的;其他各项则需要根据一定的方法进行估算,具体方法可参考有关文献。因此进行农田水量平衡模拟的关键是估算各生育阶段的实际腾发量(E_i+T_i)与土层的排水量 $D_{i,j}$。

土层排水量为

$$D_{i,j}=\begin{cases}W_{i,j}-\beta_j & (W_{i,j}>\beta_j)\\ 0 & (W_{i,j}\leqslant\beta_j)\end{cases} \quad (2)$$

式中　β_j——土层 j 的田间持水量

假定 i 时段土层实际蒸发量 E_i 和潜在蒸发量 E_{Mi}之间存在关系[9]

$$E_i=E_{Mi}/t^{1/2} \quad (3)$$

式中　t——从最后一次土壤含水量(第 1 层)达到田间持水量为起始日期到 i 时刻天数

i 时段土壤实际蒸腾量 T_i 受土壤含水量 W 和潜在蒸腾量 T_{Mi}的影响,计算公式为[9]

$$T_i=\begin{cases}T_{Mi}W_i/(b\beta) & (W_i/\beta<b)\\ T_{Mi} & (W_i/\beta\geqslant b \text{ 或每次灌水或降雨后})\end{cases} \quad (4)$$

式中　b——土壤含水系数,可根据实验确定,一般取 $b=0.5$

利用以上各式逐日进行水量平衡计算,可计算得到作物整个生育期的日蒸发量 E_i 和蒸腾量 T_i,再累加为作物各生育阶段的蒸发、蒸腾量,进而可根据以下的作物产量计算模型计算相对产量。

1.2　作物产量计算模型

作物水分生产函数反映了田间水分的消耗与作物产量之间的关系,常用的作物水分生产函数的数学模型概括起来有两大类:静态模型和动态模型。本文采用常用的 Jensen 乘法模型,即

$$y/y_m=\prod_{i=1}^{N}\left(\frac{E_i+T_i}{E_{Mi}+T_{Mi}}\right)^{\lambda_i} \quad (5)$$

式中　y——作物实际产量

y_m——作物最高产量

λ_i——作物在第 i 生育阶段的缺水敏感指数

N——作物生育阶段数

E_i、E_{Mi}——作物在第 i 生育阶段实际蒸发量和潜在蒸发量

T_i、T_{Mi}——作物在第 i 生育阶段实际蒸腾量和潜在蒸腾量

2　优化模型与遗传编码设计

2.1　优化模型

以作物相对产量最高和全生育期的灌溉水量最少作为多目标优化的目标,建立优化模型如下:

目标函数

$$\max f_1=\begin{cases}0 & (\text{某一时段作物根系吸水作用的土层都达到凋萎系数含水量})\\ \prod_{i=1}^{N}\left(\frac{E_i+T_i}{E_{Mi}+T_{Mi}}\right)^{\lambda_i} & (\text{其他})\end{cases}$$

$$\min f_2=\sum_{i=1}^{N}x_i$$

约束条件:

(1)灌溉日期约束:即每次的灌水日期必须在作物的生育期内。

(2)土壤计划湿润层深度的约束

$$H_{j\min} \leqslant H_j \leqslant H_{j\max} \quad (j=1,2,\cdots,N)$$

式中 f_1——作物的相对产量

f_2——全生育期的灌溉水量,即各生育阶段灌溉水量之和

x_i——每次灌水的灌水量

$H_{j\min}$、$H_{j\max}$——第 j 生育阶段内允许的土壤最小及最大湿润层深度

2.2 遗传编码设计

灌水量与灌水日期的优化属于日程安排型优化,如直接将灌水的具体时间进行编码,则在染色体初始化以及交叉、变异操作后可能出现后面的灌水时间比前面某次灌水的时间更早的混乱现象,必须引入修复算子进行修复。这不但影响计算效率也与实际的遗传规律相悖[13]。本文将遗传染色体分为前后两部分,前一部分为各次的灌水量,后一部分为相对于上次灌水后时间间隔,如果是第一次灌水则为从作物生育期开始到本次灌水的时间(图 2)。若某次灌水量为 0,则表示该次不灌水。这样处理可以避免遗传操作后染色体编码的混乱问题。染色体中的基因位数与最大灌水次数对应(图 2 为最大灌水次数为 7 次的染色体编码结构)。最大灌水次数是一个决策者预想的灌水次数上限值,一般可以取得稍大一些,但灌水次数过多会使染色体较长,一定程度上会影响遗传优化的效率。可根据当地实际情况和灌水经验选定。遗传编码采用实数编码。

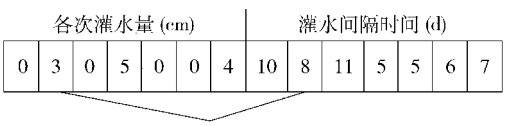

图 2 遗传染色体结构

Fig. 2 Genetic chromosome structure

3 基于分组排序思想的 NSGA-Ⅱ算法改进

3.1 NSGA-Ⅱ算法的不足

基于快速分类和精英保留策略的多目标遗传算法(NSGA-Ⅱ)具有收敛速度较快且非劣解的分布性好的优点。但由于该算法的群体排序方法是根据各个目标函数进行个体的 Pareto 排序,在处理含有约束条件的多目标优化问题时,会出现某些个体虽然不满足约束条件但由于其目标值较高而被作为非劣解前沿(ParetoFront)的点或近前沿面上的点,这样会大大影响计算结果的合理性或遗传计算的效率。同时,由于种群的生成和遗传操作都带有随机性,每一代种群中都可能包含不满足约束条件的个体。为减少不合格个体的竞争力,本文在 NSGA-Ⅱ基础上提出了处理约束条件的分组非支配排序遗传算法(group non-dominated sorting genetic algorithm Ⅱ,简称 GNSGA-Ⅱ)。

3.2 基于分组排序思想的 NSGA-Ⅱ算法改进

GNSGA-Ⅱ选择操作仍基于 Pareto 非劣排序,在个体排序之前首先将父代个体分为满足约束条件的个体组和违反约束条件的个体组。对于满足约束条件的个体组按照 NSGA-Ⅱ算法的排序方法进行组内个体排序。对于违反约束条件的个体,根据各目标的具体要求,定义对应于每个目标的“约束违反度”,即个体违反约束条件的程度的定量表示,将多个约束条件转化成多个要求约束违反度最低的目标函数,再按照 NSGA-Ⅱ算法的排序方法对组内个体进行排序。

GNSGA-Ⅱ的实质是通过分组操作,使满足条件的个体尽量向非劣解靠近,而不满足条件的个体尽量向可行域靠近,通过逐代的个体进化过程得到最终的非劣解。

4 基于 GNSGA-Ⅱ玉米非充分灌溉优化

4.1 应用实例

针对文献[9]中非充分灌溉条件下某灌区玉米作物的灌溉制度进行了实例计算。计算数据和模型参数包括:敏感指数 λ_i、田间持水量 β_i、初始含水量 W_i、生育阶段降雨量 I_i、生育期潜在腾发量 E_{Mi}、T_{Mi} 和实际腾发量 E_i、T_i。其中 E_{Mi}、T_{Mi} 参考文献[9],E_i、T_i 在程序中分别按式(3)和式(4)自动计算。

假定作物生育期最多可进行 7 次灌水,以每次灌水的灌水量 x_i、灌水时间间隔 t_i 为优化参数,则待优化的决策变量有 $x_1,x_2,\cdots,x_7$、$t_1,t_2,\cdots,t_7$14 个,即 $\boldsymbol{Y}=(x_1,x_2,\cdots,x_7,t_1,t_2,\cdots,t_7)^{\mathrm{T}}$,采用实数编码形式,灌水时间间隔取为整数。选择:种群规模 $p=200$,最大进化代数 $g=1\,000$,随机联赛规模 $n=2$,交叉概率 $P_c=0.9$,变异概率 $P_m=0.1$。

4.2 结果与分析

采用自行编制的基于 GNSGA-Ⅱ的灌溉制度优化程序进行优化计算,经过 1 000 次遗传迭代计算后的优化结果如图 3 所示。从寻优结果中选取部分非劣解如表 1 所示。

由图 3 可知,玉米产量随灌水量的增加而增加,初始阶段增加幅度较大,灌水量在 20 cm 以后,产量增加的幅度明显减小,即灌水边际效益逐渐减小。

为说明灌水量与灌水日期同步优化的效果,按

表 1　玉米非充分灌溉制度优化部分非劣解

Tab. 1　Parts of Pareto solutions of deficient irrigation schedule of corn

序号	灌水量/cm	灌水日期/d	灌溉定额/cm	相对产量	序号	灌水量/cm	灌水日期/d	灌溉定额/cm	相对产量
	2.0	19				2.0	19		
	0	33				1.7	33		
	9.9	41				9.3	43		
1	0	53	13.9	0.837	6	3.2	56	20.1	0.900
	2.0	63				1.7	67		
	0	70				1.0	74		
	0	78				1.2	81		
	2.0	19				2.0	19		
	1.0	34				3.1	33		
	9.7	44				9.8	42		
2	0	56	15.0	0.859	7	3.4	55	22.1	0.902
	2.3	64				1.5	67		
	0	71				1.1	73		
	0	82				1.2	81		
	2.0	19				2.1	19		
	1.0	34				4.0	33		
	9.6	44				9.8	42		
3	2.8	56	16.4	0.880	8	3.3	54	22.9	0.904
	0	68				1.3	66		
	1.0	75				1.1	73		
	0	83				1.3	81		
	2.0	19				2.3	18		
	1.1	34				9.7	32		
	9.3	44				6.6	43		
4	2.4	56	17.2	0.884	9	3.0	54	24.5	0.905
	0	68				1.8	73		
	1.3	75				1.1	81		
	1.1	83				0	89		
	2.0	19				3.8	18		
	1.1	34				10.0	32		
	10.0	44				7.1	44		
5	2.5	56	19.0	0.898	10	2.7	54	27.8	0.908
	1.1	68				2.0	74		
	1.1	75				1.2	82		
	1.2	83				1.0	90		

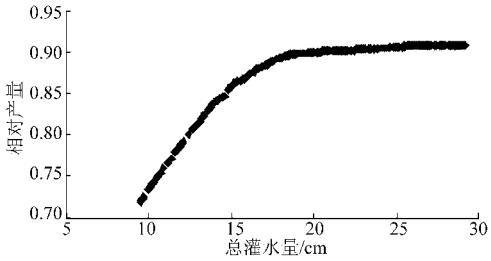

图 3　GNSGA－Ⅱ经过 1 000 次迭代后的结果

Fig. 3　Result after 1 000 times iterative computations of GNSGA－Ⅱ

文献[9]的固定灌水日期只对相应的灌水量进行优化，并将其结果与同步优化的结果进行对比(图 4)。结果显示：当总灌水量在 10～23 cm 范围内时，

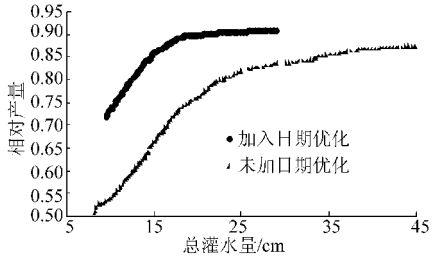

图 4　灌水量与灌水日期同步优化与单独优化灌水量的结果对比

Fig. 4　Comparison of synchronization optimization to irrigation quantity and irrigation date with irrigation quantity optimization

灌水量相同的条件下,后者的相对产量可比前者提高 0.07 ~0.20;相对产量相同时,后者可比前者节约用水 7 ~15 cm。

5 结束语

在农田水量平衡模拟模型和作物产量计算模型的基础上,建立了能同时优化灌水日期、灌水量的多目标优化模型,设计了合理的染色体结构,改进了非支配排序多目标遗传算法,提出了基于约束分组排序的改进方法——GNSGA - Ⅱ,并以玉米的灌溉制度优化为例进行了计算与结果分析。实例的优化结果表明,基于本文模型优化出的灌溉制度的节水、增产效果好于单独对灌水量进行的优化,结果显示总灌水量相同时该模型与文献[9]中的计算结果相比可提高相对产量 0.07 ~0.20,达到相同相对产量可节约灌溉用水 7 ~15 cm。

参 考 文 献

1 王玉宝,吴普特,赵西宁,等. 我国农业用水结构演变态势分析[J]. 中国生态农业学报,2010,18(2):399 ~404.
Wang Yubao, Wu Pute, Zhao Xining, et al. Development tendency of agricultural water structure in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(2): 399 ~404. (in Chinese)

2 何春燕,张忠, 何新林,等. 作物水分生产函数及灌溉制度优化的研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 8(3): 42 ~45.
He Chunyan, Zhang Zhong, He Xinlin, et al. Research progress on the crop water production functions and optimal irrigation schedule[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2007, 8(3): 42 ~45. (in Chinese)

3 付强,王立坤, 门宝辉,等. 推求水稻非充分灌溉下优化灌溉制度的新方法——基于实码加速遗传算法的多维动态规划法[J]. 水利学报,2003, 34(1):1 180 ~1 183.

4 尚松浩. 作物非充分灌溉制度的模拟-优化方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版,2005,45(9):1 179 ~1 183.
Shang Songhao. Simulation-optimization method for crop irrigation scheduling with limited water supplies [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2005, 45(9): 1 179 ~1 183. (in Chinese)

5 霍军军,尚松浩. 基于模拟技术及遗传算法的作物灌溉制度优化方法[J]. 农业工程学报,2007, 23(4):23 ~28.
Huo Junjun, Shang Songhao. Optimization method for crop irrigation scheduling based on simulation technique and genetic algorithms [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(4): 23 ~28. (in Chinese)

6 张兵,袁寿其,张建生,等. 遗传算法参数对优化灌溉模型寻优过程的影响[J]. 农业机械学报,2008,39(10):129 ~133.
Zhang Bing, Yuan Shouqi, Zhang Jiansheng, et al. Different genetic algorithms parameter effect for searching [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39 (10):129 ~133. (in Chinese)

7 Ortega J F, De Juan J A, Tarjuelo J M, et al. MOPECO: an economic optimization model for irrigation water management [J]. Irrigation Science, 2004, 23(2): 61 ~75.

8 Dong Wenwen, Qie Zhihong, Wu Xinmiao, et al. Calculation of parameters of crop water production function of Jensen model based on simplex particle swarm optimization algorithm [C]// Proceedings of the Chinese Control and Decision Conference, 2008: 3 863 ~3 867.

9 李寿声,张展羽. 农田水利规划 BASIC 程序集[M]. 南京:河海大学出版社,1991.

10 王秀丽,李淑慧,陈皓勇,等. 基于非支配遗传算法及协同进化算法的多目标区域电网规划[J]. 中国电机工程学报,2006,26(12):12 ~15.
Wang Xiuli, Li Shuhui, Chen Haoyong, et al. Multi-objective and multi-district transmission planning based on NSGA - II and cooperative co-evolutionary algorithm [J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(12):12 ~15. (in Chinese)

11 赵君莉,杨善学,王宇平. 改进的非支配排序遗传算法 INSGA - Ⅱ[J]. 西安科技大学学报,2006,26(4):529 ~531.

12 陈小庆,侯中喜,郭良民,等. 基于 NSGA - Ⅱ的改进多目标遗传算法[J]. 计算机应用,2006,26(10):2 453 ~2 456.

13 吴鑫淼. 基于寿命周期成本理论的水工结构设计与维修计划优化[D]. 天津: 天津大学, 2008: 72 ~96.
Wu Xinmiao. Design and maintenance scheme optimization of hydraulic structure basing on life cycle cost theory[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008: 72 ~96. (in Chinese)

14 王新坤,袁寿其,朱兴业,等. 轻小型移动喷灌机组低能耗遗传算法优化设计[J]. 农业机械学报,2010,41(10):58 ~62.
Wang Xinkun, Yuan Shouqi, Zhu Xingye, et al. Optimization of light-small movable unit sprinkler system using genetic algorithms based on energy consumption indicators [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10):58 ~62. (in Chinese)