

基于多年降雨资料的作物灌溉制度多目标优化*

吴鑫淼 王 晶 郅志红
(河北农业大学城乡建设学院, 保定 071001)

摘要: 在非充分灌溉制度条件下, 基于农田水量平衡模拟模型和作物产量计算模型并考虑随机降雨的影响, 以灌溉日期和灌溉水量为决策变量, 将多年作物相对产量均值最大、多年作物相对产量方差最小以及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溉日期和灌溉水量进行优化的多目标优化模型。以玉米的非充分灌溉制度优化为例用上述模型及算法进行了计算分析, 并与典型年法得到的优化结果进行了对比, 结果表明: 基于多年降雨资料的优化灌溉制度具有较强的适应性和鲁棒性, 可以避免由于灌溉日期安排不合理而导致的减产或绝收问题。

关键词: 玉米 灌溉制度 多目标同步优化 典型年法 降雨随机
中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)04-0108-05

Multi-objective Optimization of Crop Irrigation Schedule Based on Years of Rainfall Data

Wu Xinmiao Wang Jing Qie Zhihong
(Institute of Urban and Rural Construction, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)

Abstract: Under the condition of insufficient irrigation schedule, 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 the model, irrigation date and the quantity of irrigation water were regarded as optimization variables, and the mean maximization of years of relative yield of crops, minimization of total quantity of irrigation water during whole growth stage and minimization of years of relative yield variance were as the optimization objectives. The model and algorithm were verified by irrigation schedule optimization of corn. Compared with typical year method, the results showed that irrigation system based on years of rainfall data had strong adaptability and robustness, and to some extent, could be avoided due to irrigation date arrangement reasonable to cut or no grain yield problem.

Key words: Corn Irrigation schedule Multi-objective synchronization optimization Typical year method Rainfall randomness

引言

灌溉制度优化是节水灌溉的重要途径之一, 早期灌溉制度的优化方法主要采用动态规划法^[1]。然而传统优化算法不能保证达到全局最优解, 且随

着状态变量及阶段划分数量的增加, 求解复杂程度迅速增加。因此, 许多学者探索求解此问题的有效算法^[2-13]。付强等采用改进的加速遗传算法(RAGA)与多维动态规划(DP)相结合, 提出了遗传动态规划模型(RAGA-DP)解决了多维动态规划法在求解作

收稿日期: 2012-08-06 修回日期: 2012-09-20
* 国家自然科学基金资助项目(40871254)、“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD02-A-08)和河北省自然科学基金资助项目(E2008000353)
作者简介: 吴鑫淼, 教授, 主要从事节水灌溉和工程结构研究, E-mail: wuxinmiao001@163.com
通讯作者: 郅志红, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉和工程结构研究, E-mail: qiezhihong@163.com

物非充分灌溉制度优化过程中的反复试算、易早熟及陷入局部最优而难于求得真正的最优解的问题^[4]。该研究将灌水阶段的灌水量作为优化变量,未涉及具体灌溉日期优化。霍军军等建立了以灌溉日期为决策变量、以最大相对产量为决策目标的灌溉制度优化模型,在降雨资料选择上,选择了生育期总降雨量与接近此时段内多年平均总降雨量相近的年份^[6]。郅志红等以灌水日期和灌溉水量为决策变量,将作物相对产量最大、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^[11]。上述研究均将降雨作为固定值考虑,而针对某年(一般为典型年)的降雨情况优化出的灌溉制度对其他年份未必适用,这在一定程度上限制了优化灌溉制度的应用。本文在已知多年降雨资料的条件下,通过灌溉水量和灌溉日期优化,以期得到适应性较强的灌溉制度。

1 农田水分状态模拟与相对产量模型

1.1 基于水量平衡的农田水分状况的动态模拟

农田水量平衡模拟模型计算是灌溉制度优化的基础,该模型是一种概念性模型,基本方程为

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

式中 $S_{i-1,j}$ 、 $S_{i,j}$ —— i 时段初、末土层 j 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
 $I_{i,j}$ —— i 时段进入土层 j 的灌溉水量
 $D_{i,j}$ —— i 时段土层 j 的排水量
 $Q_{i,j}$ ——根系层底部的水分交换量(以向下渗漏为正)

$E_{i,j}$ 、 $T_{i,j}$ 、 $D_{i,j}$ 的计算同文献[11]。

1.2 相对产量

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。本文采用应用较普遍的 Jensen 乘法模型,即

$$\frac{y}{y_m} = \prod_{i=1}^N \left(\frac{E_i + T_i}{E_{Mi} + T_{Mi}} \right)^{\lambda_i} \quad (2)$$

式中 y ——作物实际产量
 y_m ——作物最高产量
 λ_i ——作物 i 生育阶段的缺水敏感指数
 E_i 、 E_{Mi} ——作物 i 生育阶段实际蒸发量和潜在蒸发量
 T_i 、 T_{Mi} ——作物 i 生育阶段实际蒸腾量和潜在蒸腾量
 N ——作物生育阶段数

E_i 、 T_i 均可以通过农田水量平衡关系表示为灌溉水量 x_i 的函数。

根据水量平衡模拟得到田间腾发过程,利用作物水分生产函数模型即可估算出灌溉制度下的作物相对产量。

2 基于多年降雨资料的灌溉制度优化模型

在已知多年降雨分布情况下,以多年作物相对产量均值最高、全生育期的灌溉水量最少以及多年作物相对产量方差最小作为多目标优化问题的目标,建立多目标优化模型如下:

目标函数

$$\begin{cases} \max f_1 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^J f_1^j = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \prod_{i=1}^N \left(\frac{E_{i,j} + T_{i,j}}{E_{Mi,j} + T_{Mi,j}} \right)^{\lambda_i} \\ \quad \text{(如第 } j \text{ 年某一时段作物根系吸水作用的土层含水率达到凋萎系数含水量,则 } f_1^j = 0 \text{)} \\ \min f_2 = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N x_{i,j} \\ \min f_3 = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \left[\prod_{i=1}^N \left(\frac{E_i + T_i}{E_{Mi} + T_{Mi}} \right)^{\lambda_i} - f_1^j \right]^2 \end{cases} \quad (3)$$

约束条件

(1) 灌溉日期约束

$$d_{\min} \leq d_i \leq d_{\max} \quad (4)$$

(2) 土壤计划湿润层深度的约束

$$H_{\min i} \leq H_i \leq H_{\max i} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

式中 f_1 ——多年作物相对产量均值
 f_2 ——多年全生育期的灌溉水量即各年生育阶段灌溉水量之和
 f_3 ——多年作物相对产量方差
 x_i ——每次灌水的灌水量
 $d_{\min}$ 、 $d_{\max}$ ——生育期的最小及最大天数
 d_i ——从生育期开始到第 i 次灌水时的天数
 $H_{\min i}$ 、 $H_{\max i}$ ——第 i 生长阶段内允许的土壤最小及最大湿润深度

3 应用实例

3.1 基本情况

某灌区种植玉米作物,生育期从6月1日到10月7日,共129 d。已知1959年到1995年37年的降雨资料。各项数据和模拟参数,如:敏感指数 λ_i 、有效含水量 A_i 、初始含水量 S_i 、生育期潜在蒸发量 E_{Mi} 等见文献[14]。

假定作物生育期最多可进行 m 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为 $Y = (X, T)$ 其中 $X = (x_1, x_2, \dots,$

x_7), $T = (t_1, t_2, \dots, t_m)$ 。优化模型的求解,采用基于改进的 GNSGA-II 的作物灌溉制度优化多目标优化算法^[11]。

为对比基于降雨典型年的灌溉制度优化结果的适用性,除采用式(3)模型进行直接优化外,还按特定降雨水文年(典型年)的降雨条件优化相应灌溉制度。典型年的选取方法为:将收集到的当地 1959 年到 1995 年 37 年的降雨资料,按作物生育期总降雨量进行频率分析,通过绘制皮尔逊-III 型曲线选择频率 $P = 10\%$ 的丰水年(1995 年生育期降雨量为 778.6 mm), $P = 50\%$ 的平水年(1989 年生育期降雨量为 376.6 mm), $P = 90\%$ 的枯水年(1968 年生育期降雨量为 213.8 mm)。

3.2 优化结果与分析

3.2.1 基于典型年的优化结果

按丰水典型年(1995 年)、平水典型年(1989 年)和枯水典型年(1968 年)的降雨分布情况进行多目标优化,优化出的灌水量-相对产量关系如图 1 所示。可以看出丰水年、平水年以及枯水年总趋势是相同的,即相对产量随着灌水总量的增加而增加。但由于降雨量的差异,丰水年灌水总量在 30 cm 时,相对产量就能达到 0.96;平水年灌水总量在 40 cm 时,相对产量能达到 0.95;而针对枯水年,灌水总量达到 50 cm 时,相对产量才能达到 0.92。

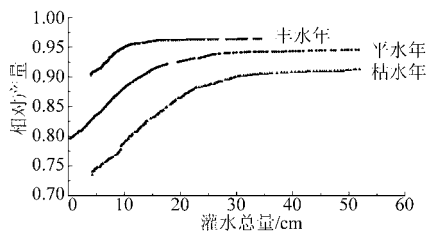


图 1 基于典型年降雨的优化结果

Fig. 1 Optimization results based on typical year method

3.2.2 基于多年降雨直接优化的结果

根据 37 年降雨资料,按式(3)~(5)的优化模型优化灌溉制度,其结果如图 2~3 所示。由图 2 可以看出,当灌水总量达到 12 cm 时,多年相对平均产量上升曲线趋于平缓。由图 3 中可以看出,随着灌水总量的增加,相对均方差呈减小趋势,即相对产量离散性减小。当灌水总量达到 15 cm 以上时,相对产量稳定在 0.93 以上,且相对均方差数量级达到,说明已无相对产量为零的情况。

从基于多年降雨的优化结果中选取部分灌溉制度非劣解列于表 1,决策者可以根据不同时段的可用水量和对产量的期望选取合适的灌溉制度。

3.2.3 两种优化结果的适用性评价

从每个典型年对应的灌溉制度优化结果中,任

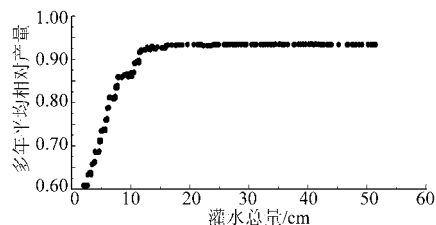


图 2 相对产量关系优化结果

Fig. 2 Optimization results of relative yield of crops

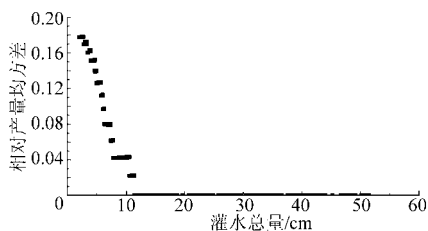


图 3 均方差关系的优化结果

Fig. 3 Optimization results of relative yield variance

意选定一个非劣解(灌溉制度),计算 1959 年到 1995 年 37 年降雨条件下实施该灌溉制度的灌水总量、平均相对产量以及平均相对产量均方差,计算结果如图 4~5 所示。

将按丰水典型年制定的灌溉制度应用于已知降雨资料的所有年份,其多年平均相对产量随灌水总量的变化总体为上升趋势,而及相对产量均方差为下降趋势,但呈现较强的阶跃性和随机性。当灌水总量小于 11 cm 时,平均相对产量仅约为 0.56,均方误差约为 0.19(说明有的年份产量为零),另外,在灌水总量在 27~29 cm 时,相对产量降低,均方差升高,说明即使提高灌水量,由于灌溉日期安排不合理仍然达不到预期目的。

将平水典型年制定的灌溉制度应用于已知降雨资料的所有年份的情况稍好,基本没有出现灌水量增大而平均相对产量减少的情况,但图 4b、5b 中的数据点同样呈现较大的跳跃性,尤其是在灌水总量达 17 cm 时平均产量仍处于较低水平,灌水效果较图 4a 更差。

将枯水典型年制定的灌溉制度应用于已知降雨资料的所有年份的情况与前两者类似,且效果最差。

由上述结果可以看出:由于各年降雨量和降雨时程分布的不同,针对某些典型年降雨条件优化出的灌溉制度适应性较差。而在基于多年降雨直接优化的结果(图 2、3)中,多年平均相对产量及相对产量均方差随灌水总量的变化趋势性强,曲线平滑,无明显跳跃性和随机跳动现象,当灌水总量达 12 cm 时,平均相对产量可达 0.9,均方误差在 10^{-5} 量级,说明无产量为零的年份,其适应性较好。

表 1 基于多年降雨条件的优化结果 (部分灌溉制度非劣解)
Tab.1 Optimization results based on years of rainfall data

序号	灌水量 /cm	灌水天数 /d	总灌水量 /cm	多年相对 产量均值	多年相对产量 相对均方差	序号	灌水量 /cm	灌水天数 /d	总灌水量 /cm	多年相对 产量均值	多年相对产量 相对均方差
1	3.31	10	15.61	0.926	2.68×10^{-6}	4	4.99	10	22.3	0.933	1.98×10^{-6}
	3.37	17					6.02	18			
	3.56	35					3.27	27			
	3.14	42					1.64	34			
	1.14	56					3.03	41			
	1.09	76					1.74	61			
2	3.72	8	17.63	0.931	2.30×10^{-6}	5	1.61	80	23.62	0.933	1.96×10^{-6}
	3.22	16					4.98	10			
	1.32	26					5.86	18			
	3.82	33					3.16	27			
	3.48	40					2.07	34			
	1.07	56					3.45	41			
3	1	76	18.76	0.933	2.17×10^{-6}	6	2.13	61	24.59	0.934	2.12×10^{-6}
	3.82	9					1.97	80			
	3.34	17					4.09	9			
	1.34	26					5.41	17			
	4.44	33					2.2	26			
	3.58	41					6.04	33			

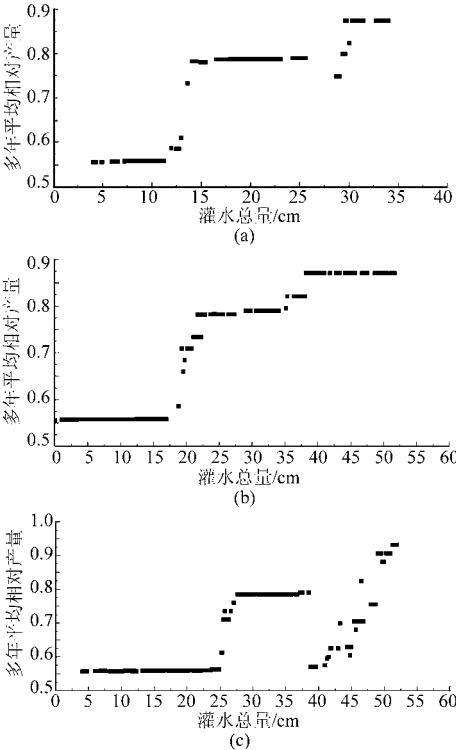


图 4 灌水总量-多年平均相对产量关系优化结果
Fig.4 Optimization results total quantity of irrigation water
vs average multi-annual relative yield of crops
(a) 丰水典型年 (b) 平水典型年 (c) 枯水典型年

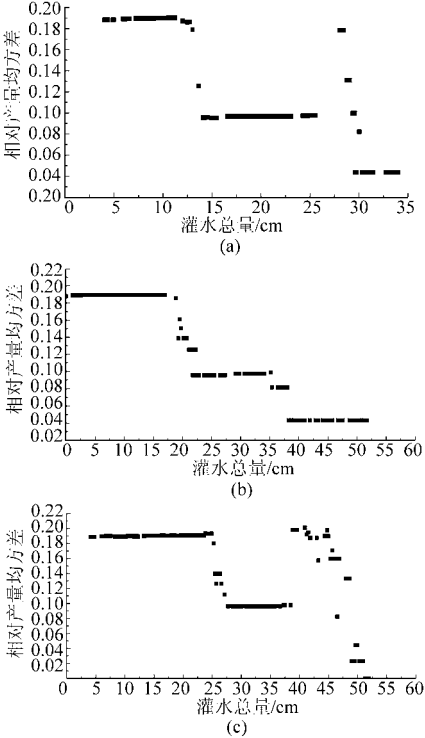


图 5 灌水总量-相对产量均方差关系优化结果
Fig.5 Optimization results total quantity of irrigation water
vs average multi-annual relative yield variance
(a) 丰水典型年 (b) 平水典型年 (c) 枯水典型年

4 结论

(1)根据已知的多年降雨资料以多目标直接优化灌水量和灌水日期,得出对应不同灌水量的多个灌溉制度即非劣解,决策者可以根据时段可利用水量和相对产量的期望选取灌溉制度,同时对应每个灌溉制度非劣解都有一个相对产量均方差,亦可供

决策者参考。

(2)与基于典型年降雨条件的优化灌溉制度相比,基于既有多年降雨条件的优化灌溉制度,其多年平均相对产量及相对产量均方差随灌水总量的变化趋势性强,曲线平滑,无明显阶跃性和随机跳动现象,说明其适应性强,鲁棒性好。

参 考 文 献

- 郭宗楼. 旱作物节水灌溉制度优化方法[J]. 灌溉排水,1992,11(4):35~37.
- Shenals A E, Bras R L. The irrigation scheduling problem and evapotranspiration uncertainty[J]. Water Research,1981,17(5):1328~1338.
- 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,2007,18(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,2007,18(3):42~45. (in Chinese)
- 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):123~128.
Fu Qiang, Wang Likun, Men Baohui, et al. A new method of optimizing irrigation system under non-sufficient irrigation—multi-dimensional dynamic planning based on RAGA[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2003,34(1):123~128. (in Chinese)
- 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):1179~1183.
Shang Songhao. Simulation-optimization method for crop irrigation scheduling with limited water supplies[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2005,45(9):1179~1183. (in Chinese)
- 霍建军,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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007,23(4):23~28. (in Chinese)
- Srinivasa Raju K, Kumar Nages D. Irrigation planning using genetic algorithms[J]. Water Resources Management, 2004(18):163~176.
- José Fernando Ortega Álvarez, José Arturo de Juan Valero, José María Tarjuelo Martín-Benito, et al. MOPECO: an economic optimization model for irrigation water management [J]. Irrigation Science, 2004,23(2):61~75.
- Dong Wenwen, Qie Zhihong, Wu Xinmiao. Calculation of parameters of crop water production function of Jensen model based on simplex particle swarm optimization algorithm[C]//Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2008:3863~3867.
- 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)
- 郗志红,韩李明,吴鑫淼. 基于改进 NSGA-II 的作物灌水量与灌溉日期同步优化[J]. 农业机械学报,2011,42(5):106~110.
Qie Zhihong, Han Liming, Wu Xinmiao. Optimization of crop irrigation quantity and irrigation date based on the improved NSGA-II [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(5):106~110. (in Chinese)
- 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(10):2453~2456.
- Li Shuang, Wu Xinmiao. Corn insufficient irrigation schedule multi-objective genetic optimization considering the randomness of rainfall[C]//Civil Engineering in China-Current Practice and Research Report, 2010 International Conference on Civil Engineering,2010:977~981.
- 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.