

基于双区间规划的武威市民勤县 3 种作物灌溉水量优化模型研究

王航 郭萍* 张帆

(中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083)

摘要 针对农业水资源优化配置中降雨量的不确定性问题,在传统区间规划的基础上,引入双区间规划理论进行描述,以农民种植净效益最大为目标函数,建立地表水和地下水联合灌溉的作物灌溉水量优化模型。实例应用于武威市民勤县红崖山灌区,对灌区农业水资源优化配置进行研究,模型计算结果表明:利用双区间规划对作物进行灌溉水量的优化,春小麦、春玉米、籽瓜的灌溉定额分别为: $[[179.81, 191.81], [353.89, 365.89]]$ 、 $[[119.46, 141.46], [270.57, 292.57]]$ 、 $[[180.04, 213.04], [267.49, 290.49]]$, 相比于现状,节水量分别为 3%、27%、4%。利用双区间规划不仅能够更好的解决灌区多作物灌溉水量优化问题,而且能够给决策者提供更大的决策空间。

关键词 灌溉水量; Jensen 模型; 双区间规划; 非线性规划

中图分类号 S274.3

文章编号 1007-4333(2018)02-0072-07

文献标志码 A

Research on dual-interval programming for optimal irrigation model of three crops in Minqin County, Wuwei City

WANG Hang¹, GUO Ping^{1*}, ZHANG Fan¹

(College of Water Resource & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract Aiming at the uncertainty of rainfall in optimal allocation of agricultural water resources, based on the traditional interval planning, the theory of dual-interval planning was introduced, and the maximum net benefit of farmers' planting as the objective function was used, and the combination of surface water and groundwater irrigation optimization model of crop irrigation water was established in this study. Hong Yashan Irrigation District of Minqin County, Wuwei City was taken as study object. The results show that the dual-interval programming to optimize irrigation of crops, wheat, maize, seed melon. The irrigation quotas were: $[[179.81, 191.81], [353.89, 365.89]]$, $[[119.46, 141.46], [270.57, 292.57]]$, $[[180.04, 213.04], [267.49, 290.49]]$. Compared to the current situation, the amount of water saving reached 3%, 27%, 4%. It was found that the use of dual interval planning not only solved the problem of irrigation water optimization in irrigation area, but also provided greater decision space for decision makers and increased the practicability and reliability of the model.

Keywords irrigation water; Jensen model; a dual-interval programming; non-linear programming

我国有限的农业水资源严重制约了农业的发展。为合理利用和开发农业水资源,提高农业用水效率,增加经济效益,提高农民收入水平,就必须对农业用水水资源进行合理地优化配置^[1]。合理的水资源优化配置不仅能够减少水资源的消耗,而且能够提高作物产量,增加农民收益。因而在有限的灌溉水量约束条件下优化不同作物灌水量,对现代农

业灌溉具有深远意义。

对于干旱、半干旱地区农业, Jensen 模型是我国应用最为广泛用于反映作物产量与需水量关系的模型^[2]。高丽华^[3]利用 Jensen 模型对冬小麦在非充分灌溉条件下的产量进行研究,证实了 Jensen 模型能够如实反映阶段耗水量与最终产量的函数关系。缴锡云等^[4]分析了非充分灌溉中作物各生育阶

收稿日期: 2017-03-11

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201501017); “十三五”国家重点研发计划课题(2016YFC0400207)

第一作者: 王航, 硕士研究生, E-mail: 18801134371@163.com

通讯作者: 郭萍, 教授, 主要从事水资源及环境系统不确定性研究, E-mail: 09020@cau.edu.cn

段耗水量及产量对 Jensen 模型的敏感性；Liu 等^[5]为解决我国农业优化灌溉研究过程中的参数不确定性，引入了双区间规划，其结果表明双区间规划模型可以帮助当地确定稀缺水资源可持续发展分配方案。张帆等^[6]利用双区间规划模型对黑河流域中游主要农作物种植结构进行优化，不仅丰富了不同水文年决策情景，也为决策者在解决实际问题时提供了更多决策空间。程居富等^[7]将双区间规划引入农业灌溉水优化中，表明双区间规划可供决策者从主客观环境在更为自由的空間内选择最合适的决策方案，但其仅研究了单作物的灌溉水量优化，而实际的农业灌溉中往往是多作物同时进行灌溉。本研究旨在利用双区间规划模型解决灌区多作物间的农业灌溉水资源优化配置问题，以期达到农民种植净效益最大，且节约水资源用量的目的。

1 原理介绍

1.1 双区间规划

由于客观事物具有多变性、复杂性以及决策者的主观思维的不确定性，使得模型中的参数不能精确量化。双区间规划是基于传统的区间规划衍生而来的。根据数据的分布特点，将区间规划的上下限，进一步划分为两个子区间，更好地解决现实问题中的复杂不确定性，为决策者提供更多的决策信息。

根据双区间规划特点，将传统区间规划的上下限进行二次划分，表示为： $[[a, c], [d, b]]$ 。参数的上下限由于数据分布特点被分解成为 $[a, c]$ 和 $[d, b]$ 。对于一个双区间 $[[a, c], [d, b]]$ ，在求解过程中一般要将其分为 $A: [a, d]$ 、 $B: [c, d]$ 、 $C: [a, b]$ 和 $D: [c, b]$ 4 种单区间情形的某些随机组合^[7]。并根据数据的分布特点归纳出 4 种单区间的随机组合的概率分布。

1.2 水分生产函数

Jensen 模型水分生产函数是反映作物产量与水分之间变化规律的连乘数学模型^[6]，表达式为：

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{k=1}^n \left(\frac{ET_{ak}}{ET_{maxk}} \right)^{\lambda_k} \quad (1)$$

式中： k 为农作物的不同生育期； Y_a 为农作物单位面积实际产量， kg/hm^2 ； Y_m 为作物单位面积最大产量， kg/hm^2 ； ET_{ak} 为作物第 k 生育阶段作物实际蒸散发量， mm ； ET_{maxk} 为作物第 k 个生育阶段作物最

大蒸散发量， mm ，由彭曼公式 $ET_{maxk} = K_c \times ET_0$ 确定作物在充分灌溉时的最大蒸散量。 λ_k 为作物第 k 个生育期作物敏感指数，为了确定作物缺水敏感系数，采取如下方法：

1) 将 Jensen 模型两边取对数，得： $\ln(Y_a/Y_m) = \lambda_k \sum_{i=1}^n \ln(ET_{ak}/ET_{maxk})$ ；

2) 令 $\ln(Y_a/Y_m) = Z$ ， $\ln(ET_{ak}/ET_{maxk}) = X_k$ ，则 Jensen 模型转化为多元线性回归模型： $Z = \sum_{k=1}^n \lambda_k X_k$ ；

3) 在 Excel 中进行多元线性回归分析即可得到各个生育阶段的缺水敏感指数^[8]。

1.3 双区间规划模型

由于农业用水受社会发展、生态变化等其他部门用水变化的影响，而这些用水部门在需求测算时往往会出现不确定性特征，这就导致在进行农业可用水量测算时会有更复杂的不确定性^[6]。考虑到作物灌溉水量(地表水、地下水)与降雨量有直接关系，利用 1985—2014 年降雨资料，分析 3 种作物各个生育期的降雨量分布，可以看出降雨量具有双区间数的特征，所以使用双区间数对降雨量进行表征。以 Jensen 连乘动态模型作为计算农作物产量与需水量关系的水分生产函数，建立基于经济效益最大的优化灌溉水量模型。

目标函数为：

$$\begin{aligned} \text{Max } f^{\pm} = & \sum_{i=1}^m A_i^{\pm} B_i^{\pm} Y_{max} \prod_{j=1}^n \left(\frac{SW_{ij}^{\pm} + [P_{ij}^{\pm}]^{\pm} + GW_{ij}^{\pm}}{ET_{maxij}} \right)^{\lambda_{ij}} - \\ C_1 \sum_{i=1}^m A_i^{\pm} \sum_{j=1}^n 10 \left(\frac{SW_{ij}^{\pm}}{\eta_1} \right) - & C_2 \sum_{i=1}^m A_i^{\pm} \sum_{j=1}^n 10^{\pm} \left(\frac{GW_{ij}^{\pm}}{\eta_2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

约束条件如下：

1) 地表水可供水量约束

$$\sum_{i=1}^m A_i^{\pm} 10 \sum_{j=1}^n (SW_{ij}^{\pm} / \eta_1) \leq Q^{\pm} \quad (3)$$

2) 地下水可供水量约束

$$\sum_{i=1}^m A_i^{\pm} 10 \sum_{j=1}^n (GW_{ij}^{\pm} / \eta_2) \leq G^{\pm} \quad (4)$$

3) 灌溉水量约束

$$\sum_{i=1}^m A_i^{\pm} \sum_{j=1}^n [10(SW_{ij}^{\pm} / \eta_1 + [P_{ij}^{\pm}]^{\pm} + GW_{ij}^{\pm} / \eta_2)] \geq W \quad (5)$$

4) 蒸发蒸腾约束

$$ET_{\min ij}^{\pm} \leq SW_{ij}^{\pm} + [P_{ij}^{\pm}]^{\pm} + GW_{ij}^{\pm} \leq ET_{\max ij}^{\pm} \quad (6)$$

5) 粮食安全约束

$$\sum_{i=1}^2 Y_{\max} \prod_{j=1}^n \left(\frac{SW_{ij}^{\pm} + [P_{ij}^{\pm}]^{\pm} + GW_{ij}^{\pm}}{ET_{\max ij}^{\pm}} \right)^{\lambda_{ij}} \geq \bar{Y} \times S \quad (7)$$

6) 其他约束

$$\begin{cases} P_{ij}^{\pm} \in [a, c]; SW_{ij}^{\pm} \neq 0, GW_{ij}^{\pm} \neq 0 \\ P_{ij}^{\pm} \in [d, b]; SW_{ij}^{\pm} \neq 0, GW_{ij}^{\pm} = 0 \\ (P_{ij}^{\pm} \leq ET_{\max ij}^{\pm}) \end{cases} \quad (8)$$

$$SW_{ij}^{\pm} = 0, GW_{ij}^{\pm} = 0 \quad (P_{ij}^{\pm} \geq ET_{\max ij}^{\pm}) \quad (9)$$

7) 非负约束

$$SW_{ij}^{\pm} > 0, GW_{ij}^{\pm} > 0 \quad (10)$$

式中： f^{\pm} 为种植净效益区间，元； i 为不同作物编号； j 为作物生育期编号； $SW_{ij}^{\pm}, GW_{ij}^{\pm}$ 为决策变量，分别为不同作物各个生育阶段地表水灌溉水量与地下水灌溉量，mm； P_{ij}^{\pm} 为不同作物各个生育阶段的有效降雨量，mm； $ET_{\max ij}$ 为作物在每个生育阶段的最大蒸散发量，mm； $ET_{\min ij}$ 为作物在每个生育阶段的最小蒸散发量，mm； Y_{\max} 为作物在充分灌溉时的最大产量，kg/hm²； B_i^{\pm} 为不同作物的收购价格，元/kg； A_i^{\pm} 为不同作物的种植面积，hm²； λ_{ij} 为*i*作物第*j*生育阶段敏感指数； C_1 为当地地表水水价，元/m³； C_2 为当地地下水水价，元/m³； η_1 为地表水灌溉水利用系数； η_2 为地下水灌溉水利用系数； Q^{\pm} 为地表水可用水量，m³； G^{\pm} 为地下水可用水量，m³； \bar{Y} 为最低人均粮食需求，kg； S 为当地人口总数； W 为作物最低灌水需求，m³。

1.4 模型求解

双区间解法步骤如下：1) 建立双区间模型；2) 根据数据的分布情况将双区间拆分为单区间组合；3) 将双区间模型表示为单区间模型形式；4) 将各个双区间拆分为2个子模型分别求解；5) 将各个子模型求解结果进行重组，最后得到双区间模型的解^[7]。

在作物种植面积、作物价格为区间数的情况下，将有效降雨量划分为单区间组合的形式，单区间数两两随机组合。在 $[a, d]$ 的情况下将上述模型划分为如下2个子模型。

子模型一：

$$\begin{aligned} \text{Max} f^+ = & \sum_{i=1}^m A_i^+ B_i^+ Y_{\max} \prod_{j=1}^n \left(\frac{SW_{ij}^+ + P_{ij}^+ + GW_{ij}^+}{ET_{\max ij}^+} \right)^{\lambda_{ij}} - \\ & C_1 \sum_{i=1}^m A_i^+ \sum_{j=1}^n 10(SW_{ij}^+ / \eta_1) - \end{aligned}$$

$$C_2 \sum_{i=1}^m A_i^+ \sum_{j=1}^n 10(GW_{ij}^+ / \eta_2) \quad (11)$$

约束条件：

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^m A_i^+ \sum_{j=1}^n [10(SW_{ij}^+ / \eta_1 + P_{ij}^+ + GW_{ij}^+ / \eta_2)] \geq W \\ & ET_{\min ij}^- \leq SW_{ij}^+ + P_{ij}^+ + GW_{ij}^+ \leq ET_{\max ij}^+ \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^2 Y_{\max} \prod_{j=1}^n \left(\frac{SW_{ij}^+ + P_{ij}^+ + GW_{ij}^+}{ET_{\max}^+} \right)^{\lambda_{ij}} \geq \bar{Y} \times S$$

$$\begin{cases} P_{ij}^+ \in [a, c]; SW_{ij}^+ \neq 0, GW_{ij}^+ \neq 0 \\ P_{ij}^+ \in [d, b]; SW_{ij}^+ \neq 0, GW_{ij}^+ = 0 \\ (P_{ij}^+ \leq ET_{\max ij}^+) \end{cases}$$

$$SW_{ij}^+ = 0, GW_{ij}^+ = 0 \quad (P_{ij}^+ \geq ET_{\max ij}^+)$$

$$SW_{ij}^+ > 0, GW_{ij}^+ > 0$$

子模型二：

$$\begin{aligned} \text{Max} f^- = & \sum_{i=1}^m A_i^- B_i^- Y_{\max} \prod_{j=1}^n \left(\frac{SW_{ij}^- + P_{ij}^- + GW_{ij}^-}{ET_{\max ij}^-} \right)^{\lambda_{ij}} - \\ & C_1 \sum_{i=1}^m A_i^- \sum_{j=1}^n 10(SW_{ij}^- / \eta_1) - \\ & C_2 \sum_{i=1}^m A_i^- \sum_{j=1}^n 10(GW_{ij}^- / \eta_2) \quad (13) \end{aligned}$$

约束条件：

$$\sum_{i=1}^m A_i^- \sum_{j=1}^n 10(SW_{ij}^- / \eta_1) \leq Q^-$$

$$\sum_{i=1}^m A_i^- \sum_{j=1}^n [10(SW_{ij}^- / \eta_1 + P_{ij}^- + GW_{ij}^- / \eta_2)] \geq W$$

$$ET_{\min ij}^+ \leq SW_{ij}^- + P_{ij}^- + GW_{ij}^- \leq ET_{\max ij}^-$$

$$\sum_{i=1}^2 Y_{\max} \prod_{j=1}^n \left(\frac{SW_{ij}^- + P_{ij}^- + GW_{ij}^-}{ET_{\max}^-} \right)^{\lambda_{ij}} \geq \bar{Y} \times S$$

$$\begin{cases} P_{ij}^- \in [a, c]; SW_{ij}^- \neq 0, GW_{ij}^- \neq 0 \\ P_{ij}^- \in [d, b]; SW_{ij}^- \neq 0, GW_{ij}^- = 0 \\ (P_{ij}^- \leq ET_{\max ij}^-) \end{cases}$$

$$(P_{ij}^- \leq ET_{\max ij}^-)$$

$$SW_{ij}^- = 0, GW_{ij}^- = 0; (P_{ij}^- \geq ET_{\max ij}^-)$$

$$SW_{ij}^- > 0, GW_{ij}^- > 0$$

2 实例应用

2.1 甘肃省民勤县概况

甘肃省武威市民勤县属温带大陆性干旱气候区，近5年年均降水量为110 mm，年均蒸发量为2 646 mm^[8]。民勤县位于甘肃省西北部，河西走廊东北部，石羊河流域下游，东、西、北3面被腾格里和巴丹吉林大沙漠包围。县境内无自产地表径流，唯一的地表水源是南部进入境内的石羊河^[7]。民勤县

粮食生产以优质小麦、玉米为主^[8],是甘肃省重要的商品粮基地县。民勤县总共有 3 个灌区,红崖山灌区、昌宁灌区和环河灌区,其中以红崖山灌区是最大的灌区。近年来,随着石羊河上游来水量的减少和地下水位的逐年下降,水资源短缺逐步成为限制民勤经济、社会发展的瓶颈,水资源供需矛盾日益

突出^[8]。

2.2 相关参数的确定和计算

参考《西北旱区流域尺度水资源转化规律及其节水调控模式——以甘肃石羊河流域为例》^[9]以及气象站搜集到的民勤县气象资料得出 3 种作物不同生育阶段的 ET_{max} 和 λ (表 1)。

表 1 3 种作物不同生育阶段的最大蒸散量 ET_{max} 和敏感指数 λ

Table 1 Maximum evapotranspiration ET_{max} and sensitivity index of three kinds of crops at different growth stages

作物种类 Crop species	参数 Parameter	生育阶段 Growth stage				
		1	2	3	4	5
小麦 Wheat	划分日期	03-21—05-21	05-22—6-10	06-11—6-30	07-01—7-30	
	ET_{max}	233.95	149.47	141.60	156.60	—
	λ	0.264 6	0.178 5	0.083 8	0.104 1	
玉米 Corn	划分日期	04-12—05-21	05-22—06-20	06-21—07-20	07-21—09-18	
	ET_{max}	67.89	113.58	155.91	245.46	—
	λ	0.221 9	0.359 7	0.316 2	0.485 5	
籽瓜 Seed melon	划分日期	05-02—06-20	06-21—06-30	07-01—07-30	07-31—08-19	08-19—09-18
	ET_{max}	90.50	26.44	126.39	45.84	53.59
	λ	0.085 9	0.030 3	0.096 1	0.064 1	0.042 6

模型目标函数中,作物各个生育阶段的有效降雨量为双区间参数。利用 SPSS 软件对每个生育阶段的有效降雨量做正态分布的检验,结合双区间规划的特点,即中间区间 $[c, d]$ 为重要性高的区间,设其概率为

1,所以在有效降雨量双区间划分过程中,中间区间为 $(\mu \pm \sigma)$ 。双区间的上下限区间将用于控制有效降雨量实际区间的上下限。表 2~4 分别示出小麦、玉米、籽瓜的各个生育期有效降雨量的划分结果以及概率统计。

表 2 小麦各生育期有效降雨量的双区间划分

Table 2 The dual-interval division of effective rainfall in wheat growth period

生育阶段 Growth stage	降雨量/mm Rainfall		出现次数 Occurrence frequency		出现概率 Occurrence probability			单区间组合 Single-interval combination	
	下 Limit 子 区间 Lower limit interval	上 Limit 子 区间 Upper limit interval	下 Limit 子 区间 Lower limit interval	中 间 区 间 Middle interval	上 Limit 子 区间 Upper limit interval	下 Limit 子 区间 Lower limit interval	中 间 区 间 Middle interval		上 Limit 子 区间 Upper limit interval
1	[3,6]	[34,37]	3	24	1	0.75	1	0.25	0.75A+0.25D
2	[2,4]	[24,26]	1	26	1	0.50	1	0.50	0.50A+0.50D
3	[2,4]	[39,41]	4	23	1	0.80	1	0.20	0.80A+0.20D
4	[2,7]	[52,57]	4	22	2	0.67	1	0.33	0.67A+0.33D

注:A 表示区间 (a, d) ,D 表示区间 (c, b) 。其中: a, d 表示双区间数下 Limit 子区间和上 Limit 子区间的下 Limit 值; c, b 表示双区间数下 Limit 子区间和上 Limit 子区间的上 Limit 值。下表同。

Note:A is the interval (a, d) , and D is the interval (c, b) . Where a and d denote the lower limit of the lower interval subinterval and upper bound subinterval; c and b denote the upper limit of the lower limit subinterval and upper bound subinterval. The table below.

表3 玉米各生育期有效降雨的双区间划分

Table 3 The dual-interval division of effective rainfall in maize growth period

生育阶段 Growth stage	降雨量/mm Rainfall		出现次数 Occurrence frequency			出现概率 Occurrence probability			单区间组合 Single-interval combination
	下限子 区间 Lower limit interval	上限子 区间 Upper limit interval	下限子 区间 Lower limit interval	中间 区间 Middle interval	上限子 区间 Upper limit interval	下限子 区间 Lower limit interval	中间 区间 Middle interval	上限子 区间 Upper limit interval	
1	[2,4]	[31,33]	3	24	1	0.75	1	0.25	0.75A+0.25D
2	[4,5]	[42,43]	1	26	1	0.50	1	0.50	0.50A+0.50D
3	[5,10]	[42,47]	6	21	1	0.86	1	0.14	0.86A+0.14D
4	[17,31]	[60,74]	6	20	2	0.75	1	0.25	0.75A+0.25D

表4 籽瓜各生育期有效降雨的双区间划分

Table 4 The dual-interval division of effective rainfall in the growth period of seed melon

生育阶段 Growth stage	降雨量/mm Rainfall		出现次数 Occurrence frequency			出现概率 Occurrence probability			单区间组合 Single-interval combination
	下限子 区间 Lower limit interval	上限子 区间 Upper limit interval	下限子 区间 Lower limit interval	中间 区间 Middle interval	上限子 区间 Upper limit interval	下限子 区间 Lower limit interval	中间 区间 Middle interval	上限子 区间 Upper limit interval	
1	[5,10]	[39,54]	4	19	5	0.44	1	0.59	0.44A+0.59D
2	[1,2]	[14,15]	4	23	1	0.80	1	0.20	0.80A+0.20D
3	[2,7]	[52,57]	4	22	2	0.67	1	0.33	0.67A+0.33D
4	[4,8]	[32,36]	7	20	1	0.88	1	0.12	0.88A+0.12D
5	[6,14]	[27,35]	6	14	8	0.43	1	0.57	0.43A+0.57D

根据《武威统计年鉴 2015》^[10]以及《红崖山灌区节水改造专项计划》^[11]得到当地地表水水价为 0.24 元/m³,灌溉水利用系数为 0.55;地下水水价

0.26 元/m³,灌溉水利用系数 0.85;由蔡旗断面来水量^[12]推求红崖山灌区地表水来水量为[6 650, 7 290]万 m³,作物种植信息及价格见表 5。

表5 3种作物种植信息及价格

Table 5 Planting information and price of three kinds of crops

作物种类 Crop species	最大产量 Y _{max} /(kg/hm ²) Maximum yield	种植面积/hm ² Planting area	价格/(元/kg) Price
小麦 Wheat	8 136.08	[4 026.00,4 428.00]	[2.40,2.70]
玉米 Corn	12 247.91	[8 682.00,9 552.00]	[2.60,2.80]
籽瓜 Seed melon	3 078.08	[786.00,864.62]	[8.00,9.00]

3 模型结果及分析

当降雨量处于下限区间时,降雨量偏小,采用井灌和渠灌结合的方式进行灌溉。由于当降雨量处于上限区间的情况,降雨量偏大,为了满足当地减少地

下水开发强度的要求,所以不采用井灌,全部用地表水进行灌溉。

表 6 示出优化后 3 种作物各个生育期地表水与地下水的灌溉水量。可见:小麦的各个生育期的灌溉水量呈递减趋势,玉米各个生育期灌溉水量呈现

表 6 3 种作物不同生育阶段优化后的灌溉定额

Table 6 Optimized irrigation quota in different growth stages of three crops

mm

生育阶段 Growth stage	灌溉类型 Irrigation type	小麦 Wheat		玉米 Corn		籽瓜 Seed melon	
1	渠灌	[63.9,78.1]	[80.0,83.0]	[19.3,21.3]	[11.2,13.2]	[35.5,39.4]	[45.5,60.5]
	井灌	[58.8,47.6]	0	[14.0,14.1]	0	[36.0,37.1]	0
2	渠灌	[44.4,50.4]	[48.7,50.7]	[33.7,37.1]	[28.6,29.6]	[10.9,11.5]	[14.1,15.1]
	井灌	[33.9,30.9]	0	[24.7,20.3]	0	[10.9,11.3]	0
3	渠灌	[40.9,46.9]	[30.0,32.0]	[45.3,53.7]	[31.0,36.0]	[54.3,58.0]	[82.0,87.0]
	井灌	[33.0,29.0]	0	[30.4,29.1]	0	[52.5,53.8]	0
4	渠灌	[45.4,50.4]	[21.3,26.3]	[64.8,71.4]	[48.7,62.7]	[16.6,19.0]	[14.4,18.4]
	井灌	[33.7,33.7]	0	[39.2,46.0]	0	[16.7,18.3]	0
5	渠灌					[17.1,24.6]	[24.0,32.0]
	井灌					[17.1,17.6]	0

递增趋势,并且玉米各个生育期灌溉水量双区间 $[[a,c],[d,b]]$ 出现了上下限区间交换的情况,导致这个情况产生的原因是玉米各个生育期的缺水敏感系数较大,降雨量的大小对玉米的产量影响较大。当降雨量处于 $[a,c]$ 区间时,对比地表水与地下水的灌溉量,可得地下水灌溉水量与地表水灌溉水量增减趋势一致,是由于地下水与地表水的价格相差不大,所以,想要进一步减少地下水的开采量,应当适当提高地下水的价格。

对于当地的决策者而言,可以根据当年的实际降雨量大小来选择不同的灌水方案。在选择灌水方案时,决策者选择双区间中概率为 1 的区间即 $[c,d]$ 是相对平均的决策;如果降雨量偏小时,可以选择保

守决策即地下水与地表水联合灌溉,但这种决策对水资源的消耗较大。而决策者预判未来的降雨量充足时,可以考虑选择风险决策即只考虑地表水灌溉,从而大幅减少了地下水的开采,保证当地控制地下水位下降的目的。缺点是存在有影响作物产量的风险。

灌区作物优化后的灌溉定额与实际灌溉定额见图 1。当降雨量偏大时,作物灌溉水量在 $[a,c]$ 区间,3 种作物节水效果均很明显;出现降雨量偏小的情况时,作物灌溉水量在 $[d,b]$ 区间,春小麦与籽瓜的灌溉水量与现状无明显差异,春玉米节水量明显。综上,采用本次规划方法制定出来的灌溉制度与当地现状的灌溉定额相比,明显节约了农业水资源,尤其大幅降低了地下水的开采量。

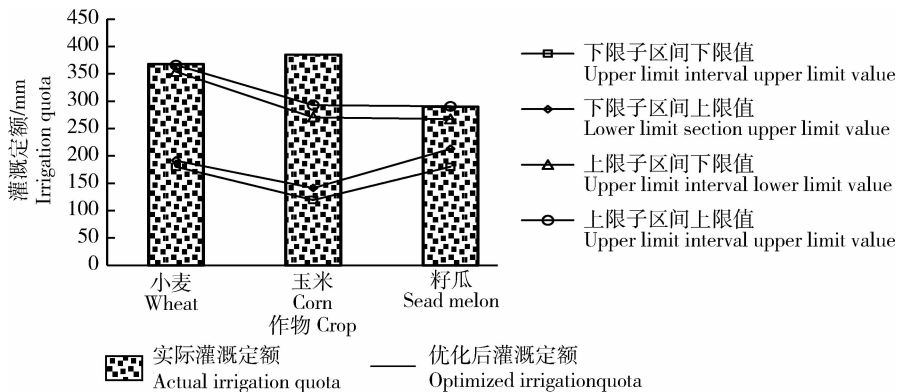


图 1 武威市民勤县优化后的灌溉定额与实际灌溉定额对比

Fig. 1 Comparison of irrigation quota with actual irrigation quota in Minqin county of Wuwei city after optimization

4 结束语

本研究以 Jensen 水分生产函数为基础,建立了基于灌区 3 种作物的灌溉水量优化模型。从水资源优化配置结果可以看出,双区间规划能够更好的解决灌区作物灌溉水量优化中的降雨量不确定性的问题。并且作物优化后灌溉定额相比于现状,春小麦、春玉米、籽瓜均有所下降,地下水开采量的减少较为明显。但是,灌区多作物的水资源优化配置是一个复杂的系统,所以此次在进行水资源优化配置模型研究的过程中还有很多不足:1)目标函数仅考虑了水资源的成本,未考虑其他成本,如施肥、种子等。2)今后有待考虑灌溉方式以及种植模式对灌区水资源优化配置研究的影响。

参考文献 References

- [1] 王怀博,田军仓,宋露露.作物优化灌溉制度理论与方法研究进展[J].中国农村水利水电,2014(6):21-25
Wang H B, Tian J C, Song L L. Research progress in optimization theory and method of crop irrigation system[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014 (6): 21-25 (in Chinese)
- [2] 杨路华,夏辉,王富庆.非充分灌溉制度制定过程中 Jensen 模型的求解与应用[J].灌溉排水学报,2002,21(4):13-15
Yang L H, Xia H, Wang F Q. The solution and application of Jensen model in the process of making full irrigation system [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2002, 21 (4) 13-15 (in Chinese)
- [3] 高丽华.基于 Jensen 模型的冬小麦非充分灌溉研究[D].天津:天津农学院,2014
Gao L H. Study on non sufficient irrigation of Winter Wheat Based on Jensen model [D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2014 (in Chinese)
- [4] 缴锡云,雷志栋.非充分灌溉制度对 Jensen 模型的敏感性分析[J].灌溉排水学报,2005,24(2):10-12
Jiao X Y, Lei Z D. Sensitivity analysis of no full irrigation system to Jensen model [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2005, 24 (2): 10-12 (in Chinese)
- [5] Liu J, Li Y P, Huang G H. A dual-interval fixed-mix stochastic programming method for water resources management under uncertainty[J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2014, 88 (13): 50-66
- [6] 张帆,郭萍,李茱.基于双区间两阶段随机规划的黑河中游主要

农作物种植结构优化[J].中国农业大学学报,2016,21(11):109-116

Zhang F, Guo P, Li M. Based on Double interval two stage stochastic programming in the middle reaches of Heihe main crop planting structure optimization [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(11): 109-116 (in Chinese)

- [7] 程居富,郭萍,李茱.双区间规划在单一作物水资源优化配置中的应用[J].节水灌溉,2014(12):48-53
Cheng J F, Guo P, Li M. Double interval programming in single crop water resources optimization allocation [J]. *Water Saving Irrigation*, 2014 (12): 48-53 (in Chinese)
- [8] 李茱,郭萍,付银环.民勤县主要作物优化灌溉制度制定及风险分析[J].灌溉排水学报,2013(1):91-95
Li M, Guo P, Fu Y H. Optimization and risk analysis to develop Yinhuai irrigation system of main crops in Minqin County [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013 (1): 91-95 (in Chinese)
- [9] 康绍忠.西北旱区流域尺度水资源转化规律及其节水调控模式[M].北京:中国水利水电出版社,2009
Kang S Z. *Water Resources Transformation Rule and Water Regulation Mode in Arid Northwest River Basin Scale* [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2009 (in Chinese)
- [10] 武威市统计局,国家统计局武威调查队.武威统计年鉴[M].武威:武威市统计局,2015
Wuwei Bureau of Statistics, Wuwei Investigation Team of National Bureau of Statistics. *Wuwei Statistical Yearbook* [M]. Wuwei: Wuwei Bureau of Statistics, 2015 (in Chinese)
- [11] 甘肃省水利水电勘测设计研究院.红崖山灌区节水改造工程专项计划[M].兰州:甘肃省水利水电勘测设计研究院,2008
Gansu Province Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute. *Hongyashan Irrigation Water-Saving Transformation Project Plan* [M]. Lanzhou: Gansu Province Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute, 2008 (in Chinese)
- [12] 桂泽瑛,郭萍.石羊河流域变化环境下的水库调度决策研究:以红崖山水库为例[J].节水灌溉,2015(5):42-45
Gui Z Y, Guo P. Study on reservoir dispatching decision-making in the changing environment of Shiyang River Basin: Taking Hongyashan Reservoir as an example [J]. *Water Saving Irrigation*, 2015 (5): 42-45 (in Chinese)
- [13] 武威市人民政府.武威市人民政府关于印发武威市行业用水定额的通知[M].武威:武威市人民政府,2013
Wuwei Municipal People's Government. *Notice of Wuwei Municipal People's Government on Printing and Distributing Industrial Quota of Wuwei City* [M]. Wuwei: Wuwei Municipal People's Government, 2013 (in Chinese)