

考虑渠道渗漏的黄羊灌区农业水资源 多目标优化配置研究

潘琦, 郭萍, 张帆, 罗彪, 张效星
(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 为提高农业用水效率,以考虑灌区农业水分配全过程为基础,建立了多目标农业水资源优化配置模型。选取甘肃省武威市凉州区黄羊灌区总干渠下8条渠道和两种粮食作物(春小麦和地膜玉米)为研究对象,以灌区干渠及直属支渠灌溉损失最小和主要粮食作物经济效益最大为目标函数,设置3种不同的初始土壤含水率,分别使用几何加权法和最小偏差法对建立的多目标模型进行求解,结果表明:最小偏差法可以更好地解决该优化模型,且目标函数权重不宜偏向灌溉损失最小,否则会使经济效益降低; ET_a 相同条件下,播前灌溉比播后灌溉节水 $286.08 \times 10^4 \text{ m}^3$,播前灌溉节水效果更佳;在保证地区粮食安全前提下,为获得更大的经济收益,种植结构应向多种植玉米、少种植小麦调整。提出的农业水资源分配方案能够增大粮食作物产量、增加农民收益,为灌区管理决策提供一定的理论依据和指导。

关键词: 农业水资源; 多目标规划; 渠道渗漏; 几何加权法; 最小偏差法; 初始土壤含水率; 黄羊灌区

中图分类号: TV213.4; S274

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)04-0166-08

Study on multi-objective optimal allocation of agricultural water resources in Huangyang Irrigated Area considering canal leakage

PAN Qi, GUO Ping, ZHANG Fan, LUO Biao, ZHANG Xiaoxing

(College of Water Resources & civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve the agricultural water use efficiency, a multi-objective optimization model for optimizing agricultural water resources allocation was established considering the whole process of allocation of agricultural water resources. The research objects include eight canals and two grain crops (spring wheat and mulched maize) under the main canal of Huangyang Irrigated Area in Liangzhou District, Wuwei City, Gansu Province. The objective function is to minimize the irrigation loss of main and branch canals and to maximize the economic benefit of main grain crops. We set three kinds of different initial soil moisture content when solving the multi-objective model using geometric weighting method and minimum deviation method respectively. The results showed that the minimum deviation method performed better, and the weight of the objective function should not be biased towards minimizing the loss of irrigation, otherwise the economic benefits would decrease. Under the same ET_a , the pre-sowing irrigation saved $286.08 \times 10^4 \text{ m}^3$ of water than the post-sowing irrigation, so the water-saving effect of pre-sowing irrigation was better. On the premise of ensuring regional food security, the planting structure should be adjusted to planting more maize and less wheat to obtain more economic benefits. The allocation scheme of agricultural water resources proposed can not only increase the yield of grain crops and farmers' profit, but also provide theoretical basis and guidance for the decision making of this irrigated area management.

Key words: agricultural water resources; multi-objective planning; canal leakage; geometric weighting method; minimum deviation method; initial soil moisture content; Huangyang Irrigated Area

收稿日期:2020-05-31; 修回日期:2020-07-01

基金项目:国家自然科学基金项目(41871199); 国家重点研发计划课题(2016YFC0400207)

作者简介:潘琦(1997-),女,宁夏银川人,在读硕士研究生,主要从事水资源优化配置研究。

通讯作者:郭萍(1963-),女,黑龙江庆安人,博士,教授,博士生导师,主要从事水资源及环境系统不确定性研究。

1 研究背景

水资源短缺危机威胁着生态健康与人类生存,如何高效地利用有限水资源成为了国内外广泛关注的热点问题^[1-2]。水资源的可持续性关系到农业的可持续发展,然而,我国现存的农业用水效率不高、浪费现象严重等问题使得农业用水的供需矛盾日益剧增。因此,如何绿色、高效地使用有限水资源进行农业生产,缓解水资源的供需矛盾是当前我国农业发展中所面临的主要问题。国内外相关研究已经发现,农业水资源优化配置是解决上述问题的有效方法之一^[3-4]。灌区作为农业水资源管理的基本单位,其水资源配置不仅要考虑社会经济发展、生态健康、水文循环、作物生长状况等研究内容,还应涉及模型构建、算法设计等研究方法,是一个兼顾内容与方法的复杂系统问题^[5-6]。因此,从内容与方法角度进一步深入研究灌区水资源优化配置对于提高农业用水效率、实现农业水资源可持续发展有着至关重要的作用。

近年来有许多学者围绕田间水循环和渠系水资源优化进行了一些研究。关于田间水循环的水资源优化问题通常借助水分生产函数和土壤水量平衡公式表示水分与作物之间的联系,从而建立优化模型。其中,借助 Jensen 模型建立优化模型的最为常见,如李莱^[7](2013年)和马波等^[8](2016年)应用 Jensen 模型,分别建立了单一作物灌溉制度优化模型和压砂地西瓜灌溉制度优化模型, Li 等^[9](2017年)和 Yue 等^[10](2020年)考虑田间水循环过程,同样结合了 Jensen 模型以得到系统的最大净效益。此外,也有一些学者使用其他水分生产函数^[11-12]。这类研究的目的是将农业水资源的分配微观化、具体化,使有限的水资源充分地被作物利用,在避免水分流失的基础上尽可能增大产量,以体现作物的经济价值。而围绕渠系优化配水的研究通常以输水渗漏损失最少为目标函数,对来水量、节点流量、灌水时间等变量进行约束,旨在给出编组合理、流量稳定、水量损失小的渠系配水方案^[13-17]。

多目标模型的构建与求解也是近年来国内学者们研究水资源优化配置的热点。多目标模型是指目标函数有两个及两个以上,且各目标之间存在冲突、目标侧重各有不同的模型。多目标模型的求解方法可以分为一般方法和智能算法,一般方法如评价函数法、模糊法等,智能算法如遗传算法、蚁群算法等^[18]。其中评价函数法作为求解多目标问题最常

见的方法,以其适用性强、便于理解等特点被广泛应用,包括几何加权法、最小偏差法、极大极小值法等。

灌区农业灌溉是一个自成体系的灌溉过程,它既包括渠道对农田的配水过程,又包括水分与作物之间的响应,二者缺一不可。之前的研究大多数以渠道渗漏或作物耗水这两个过程中的一个为侧重点,但实际上,不仅要考虑田间尺度的作物响应,还需要对配水渠道的相关信息进行收集和整理,并兼顾渠系的运行条件。基于此,本研究建立了考虑渠道渗漏的黄羊灌区农业水资源多目标优化配置模型,结合田间水循环机理,运用水资源优化配置研究中常见的几何加权法和最小偏差法求解,旨在提出一种合理的农业水资源分配方案,为灌区管理决策提供理论依据和指导。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域概况

甘肃省武威市黄羊灌区位于武威市东南方向,距离市区约 30 km,四周分别是古浪县、天祝县、杂木灌区、祁连山脉和腾格里沙漠。黄羊灌区地势南高北低,自西南向东北倾斜。南部的祁连山地可分为中高山地带和低山丘陵地带,山脉大致呈西北-东南走向。北部为走廊平原区,其地貌为山前洪积、冲积倾斜平原,自西南向东北呈扇形倾斜,海拔 1 647~1 960 m,纵坡 1/70~1/200,扇面地呈台阶式,是走廊灌溉农业的一部分。土壤以黄平土、黄立土为主,土层厚 1.5~5.0 m,土壤干容重 1.36 t/m³^[19],地下水埋深 150~200 m。

黄羊灌区属温带干旱气候带,降水、蒸发变化在该地区垂直分带性很强,多年平均降水量 180 mm,多年平均蒸发量 2 198 mm,多年平均气温 6.9℃,平均最高气温 19.4℃,平均最低气温 -8.4℃,多年平均风速 3.1 m/s,最大冻土深度 1.3 m,年日照时数 2 945 h。黄羊灌区主要的地表水资源是发源于祁连山北麓的黄羊河,是灌区人民赖以生存和工农业生产支柱。灌区水资源严重短缺,年平均缺水约 2×10^7 m³,供需矛盾突出。灌区现辖 1 乡 2 镇及 8 个机关农场,总人口 10.04×10^4 人,其中农业人口约有 8.4×10^4 人,设计灌溉面积 1.6×10^4 hm²。

本研究选取黄羊灌区总干渠下的 5 条干渠和 3 条直属支渠所辖的区域作为研究区域,这 8 条渠道所辖的区域近似于整个灌区的作物种植面积。灌区干渠和直属支渠分布示意图见图 1,各渠道基本信息见表 1。

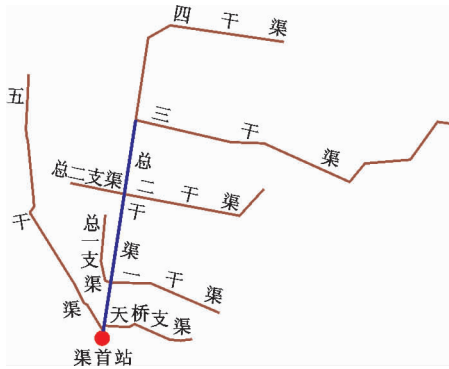


图1 黄羊灌区干渠和直属支渠分布示意图

2.2 数据来源

本研究使用的参考作物需水量 ET_0 由彭曼公式^[20]求得,数据来自2014-2018年中国气象数据

网。模型的其他参数选取见表2,黄羊灌区各干渠、直属支渠控制面积下的作物种植面积见图2。

表1 黄羊灌区干渠和直属支渠基本信息

渠道名称	控制面积/ hm ²	实际流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	长度/ km	渠系水利 用系数
一干渠	2433.33	4.0	8.46	0.9430
二干渠	1386.67	2.0	5.70	0.9430
三千渠	6383.87	6.0	13.78	0.9430
四干渠	5026.67	4.5	8.96	0.9430
五千渠	1140.00	2.0	13.50	0.9430
总一支渠	393.33	1.5	3.07	0.9302
总二支渠	553.93	1.5	2.08	0.9302
天桥支渠	473.33	1.0	5.94	0.9302

表2 Jensen模型的相关参数^[21]

作物名称	参数	月份					
		4	5	6	7	8	9
春小麦	水分敏感指数	0.07	0.15	0.08	0.01		
	ET_m /mm	92.01	126.73	186.10	185.59		
地膜玉米	水分敏感指数	0.04	0.12	0.20	0.31	0.22	0.03
	ET_m /mm	28.85	75.94	114.81	169.20	120.26	30.88

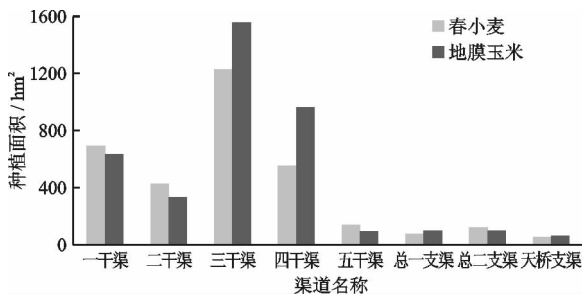


图2 黄羊灌区各干渠、直属支渠控制面积下的作物种植面积

此外,春小麦、地膜玉米的最大产量和净收益根据相关资料分别设置为7 287、10 915 kg/hm²和2.58、2.16元/kg,地表水价为0.2元/m³,土壤计划湿润层深度为0.8m。

2.3 研究方法

2.3.1 考虑渠道渗漏的农业水资源优化模型

(1) 目标函数

渠道渗漏是导致渠系水利利用效率低下的主要因素之一,要使农业灌溉的水量损失最小,就必须考虑渠道渗漏的影响,因此,建立各干渠及直属支渠灌溉损失最小模型如公式(1)~(3)^[22-23]:

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^8 F_i + \sum_{i=1}^8 [(1 - \eta_1) \cdot (W_i - F_i)] \quad (1)$$

$$F_i = \beta \cdot A \cdot L_i \cdot Q_i^{(1-m)} \cdot t/100 \quad (2)$$

$$W_i = \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^6 \frac{10 \cdot S_{ij} \cdot m_{jk}}{\eta_2 \cdot \alpha} \quad (3)$$

式中: i 为渠道编号,共有8条渠道; j 为作物种类,共有两种作物(春小麦、地膜玉米); k 为作物生育阶段; F_i 为渠道 i 的渗漏量,m³; η_1 为田间水利用系数,根据黄羊灌区调研资料取为0.9; W_i 为渠道 i 的配水量,m³; β 为防渗措施折减系数,取为0.5^[23]; A 为渠床土壤透水系数,取为3.4^[23]; L_i 为渠道 i 的长度,km; Q_i 为渠道 i 的实际流量,m³/s; m 为渠床土壤透水指数,取为0.5^[23]; t 为灌水时间,s; S_{ij} 为渠道 i 控制面积下作物 j 的种植面积,hm²; m_{jk} 为决策变量,为作物 j 在第 k 生育阶段的灌水量,mm; η_2 为灌溉水利用系数,根据黄羊灌区调研资料取为0.577; α 为两种作物耗水量占总耗水量的比例,取值为0.6。

对农业水资源进行优化的目的是为农田补充水分以保证农作物对水的需求,以此获得较高的产量和较为理想的收益,因此,引入水分生产函数 Jensen模型,建立主要粮食作物(春小麦、地膜玉米)经济效益最大模型如公式(4)~(7)^[24]:

$$\max f_2 = \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^2 [Y_{m,junit} \cdot S_{ij} \cdot \prod_{k=1}^6 (\frac{ET_{a,jk}}{ET_{m,jk}})^{\lambda_{jk}} \cdot \omega_j] - b \cdot \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^6 \frac{10S_{ij} \cdot m_{jk}}{\eta_2} \quad (4)$$

$$ET_{a,jk} = h_{jk} - h_{j(k+1)} + m_{jk} + P_{jk} + F_{jk} - K_{jk} \quad (5)$$

$$h_{jk} = 1000\gamma H(\theta_{jk} - \theta_w) \quad (6)$$

$$ET_{m,jk} = K_{c,jk} \cdot ET_{0,jk} \quad (7)$$

式中: $Y_{m,junit}$ 为作物 j 的单位面积最大产量, kg/hm^2 ; $ET_{a,jk}$ 为作物 j 在第 k 生育阶段的实际需水量, mm ; $ET_{m,jk}$ 为作物 j 在第 k 生育阶段的最大需水量, mm ; λ_{jk} 为作物 j 在第 k 生育阶段的水分敏感指数; ω_j 为作物 j 的净收益, $元/kg$; b 为水价, $元/m^3$; $h_{j(k+1)}$ 分别为作物 j 在第 $k, k+1$ 生育阶段的土壤含水量, mm ; P_{jk} 为作物 j 在 k 生育阶段的降水量, mm ; F_{jk} 为作物 j 在 k 生育阶段的地下水补给量, mm ; K_{jk} 为作物 j 在 k 生育阶段的地下水渗漏量, mm ; γ 为土壤干容重, g/cm^3 ; H 为计划湿润层深度, m ; θ_{jk} 为作物 j 在 k 生育阶段的土壤含水率 (本文涉及的土壤含水率均指质量含水率); θ_w 为土壤含水率下限, 取为田间持水量的 0.4 倍; $K_{c,jk}$ 为作物 j 在 k 生育阶段的作物系数; $ET_{0,jk}$ 为作物 j 在 k 生育阶段的参考作物需水量, mm 。

(2) 约束条件

① 渠道供水量约束

$$SQ_{i,min} \leq W_i \leq SQ_{i,max} \quad (8)$$

式中: $SQ_{i,min}$ 、 $SQ_{i,max}$ 分别为渠道 i 的最小、最大来水量, m^3 。

② 作物需水量约束

$$ET_{min,jk} \leq ET_{a,jk} \leq ET_{max,jk} \quad (9)$$

式中: $ET_{min,jk}$ 、 $ET_{max,jk}$ 分别为作物 j 在 k 生育阶段的最小、最大需水量, mm , 作物最小需水量取为最大需水量的 0.6 倍。

③ 土壤含水率约束

$$\theta_w \leq \theta_{jk} \leq \theta_f \quad (10)$$

式中: θ_f 为土壤含水率上限, 取为田间持水量, 即 0.211^[19]。

④ 灌溉水量约束

$$0 \leq m_{jk} \leq q_{jk} \quad (11)$$

式中: q_{jk} 为作物 j 在 k 生育阶段的可灌水量, mm 。

⑤ 产量约束

$$\sum_{i=1}^8 Y_{m,junit} \cdot S_{ij} \cdot \prod_{k=1}^6 (\frac{ET_{a,jk}}{ET_{m,jk}})^{\lambda_{jk}} \geq Y_{j,min} \quad (12)$$

式中: $Y_{j,min}$ 为作物 j 的最小产量, kg 。

2.3.2 模型求解方法 本研究使用两种最常见的改进的评价函数法——几何加权法和最小偏差法,

分别对模型进行求解, 探讨两种方法在该模型中的适用性和求解结果的可靠性。下面分别介绍两种方法的求解步骤。

(1) 几何加权法。几何加权法的具体求解步骤分述如下:

① 归一化处理。多目标规划的目标函数可能存在量纲不统一的问题, 为避免求解时目标冲突, 需要将目标函数规范化。首先求出每个目标函数的最大值 $f_{n,max}$ 和最小值 $f_{n,min}$, 然后对它进行归一化。

当目标函数求最大值时:

$$F_n(x) = \frac{f_{n,max} - f_n(x)}{f_{n,max} - f_{n,min}} \quad (13)$$

当目标函数求最小值时:

$$F_n(x) = \frac{f_n(x) - f_{n,min}}{f_{n,max} - f_{n,min}} \quad (14)$$

② 给定权重系数。根据目标函数重要性的不同, 给予目标函数一组或多组权重系数, 且权重系数之和必须为 1。对给定权重系数的多目标求积, 使得多目标优化问题变成简单的单目标优化问题, 其表现形式为:

$$u(f(x)) = \prod_{n=1}^N F_n(x)^{w_n} \quad (15)$$

③ 使用 Lingo 软件对公式 (15) 形式的单目标进行求解, 得到多目标优化问题的非劣解集。

(2) 最小偏差法。最小偏差法的求解步骤与几何加权法基本一致, 区别在于给定权重系数时, 最小偏差法的表现形式为:

$$\min u(f(x)) = \sum_{n=1}^N w_n \cdot F_n(x) \quad (16)$$

3 结果与分析

使用 Lingo 软件编写两种方法的多目标优化程序求解该农业水资源优化模型, 通过设置不同的初始土壤含水率得到一系列求解结果。

3.1 求解方法的适用性及结果的可靠性

设置初始土壤含水率 $\theta_{j1} = \theta_f$, 分别使用几何加权法和最小偏差法求解模型, 通过改变两个目标函数的权重来分析目标间的变化趋势。两种方法在不同目标函数权重下的求解结果分别见表 3、4。

由表 3、4 中的求解结果可知, 使用几何加权法时, 目标函数权重的改变没有明显体现出两个目标间的博弈关系, 且求解结果具有一定的波动性, 说明模型在这种方法下稳定性较差; 而使用最小偏差法时, 目标函数权重的改变可以较好地体现两个目标

间的博弈关系,说明模型在这种方法下较为稳定。可以得出,最小偏差法更适用于该模型,且求解结果更为可靠。但是使用最小偏差法求解时,若 f_1 的权

重较大,即过于追求灌溉损失量最小时,模型输出的各个指标均无变化,因此可以认为在农业灌溉时应该考虑灌溉损失但不能过分顾及灌溉损失。

表3 几何加权法在不同目标函数权重下的求解结果

f_1 权重	f_2 权重	产量/ 10^4 t		渠道配水量/ 10^4 m ³	灌溉损失量/ 10^4 m ³	灌溉损失率/ %	经济效益/ 10^4 元
		春小麦	地膜玉米				
0.1	0.9	2.100	3.600	6 813.62	1 027.47	0.131	12 376.37
0.2	0.8	2.100	3.600	6 774.13	1 023.52	0.131	12 381.10
0.3	0.7	2.125	3.733	7 668.89	1 112.99	0.127	12 624.95
0.4	0.6	2.100	3.600	6 767.69	1 022.87	0.131	12 381.88
0.5	0.5	2.100	3.600	6 763.01	1 022.40	0.131	12 382.44
0.6	0.4	2.129	4.189	8 606.07	1 206.71	0.123	13 509.53
0.7	0.3	2.129	4.189	8 606.06	1 206.71	0.123	13 509.52
0.8	0.2	2.129	4.189	8 606.06	1 206.71	0.123	13 509.52
0.9	0.1	2.129	4.189	8 606.06	1 206.71	0.123	13 509.52

表4 最小偏差法在不同目标函数权重下的求解结果

f_1 权重	f_2 权重	产量/ 10^4 t		渠道配水量/ 10^4 m ³	灌溉损失量/ 10^4 m ³	灌溉损失率/ %	经济效益/ 10^4 元
		春小麦	地膜玉米				
0.1	0.9	2.137	4.189	8 654.37	1 211.54	0.123	13 523.69
0.2	0.8	2.137	4.189	8 654.37	1 211.54	0.123	13 523.69
0.3	0.7	2.110	4.189	8 488.62	1 194.97	0.123	13 474.85
0.4	0.6	2.100	4.189	8 427.07	1 188.81	0.124	13 455.42
0.5	0.5	2.100	3.600	6 761.24	1 022.23	0.131	12 382.65
0.6	0.4	2.100	3.600	6 761.24	1 022.23	0.131	12 382.65
0.7	0.3	2.100	3.600	8 654.37	1 022.23	0.106	12 382.65
0.8	0.2	2.100	3.600	8 654.37	1 022.23	0.106	12 382.65
0.9	0.1	2.100	3.600	8 606.06	1 022.23	0.106	12 382.65

上述结果表明,当使用最小偏差法且设置目标权重为 $f_1 = 0.3$ 、 $f_2 = 0.7$ 时,作物总产量、渠道配水量、灌溉损失量及作物产生的经济效益均处于适宜水平,没有贴在模型约束的上下限,因此将该方法该目标权重下的结果作为本研究的最优解进行具体分析和讨论。

3.2 渠道配水量分析

分别设置初始土壤含水率 $\theta_{i1} = \theta_f$ 、 $0.9\theta_f$ 、 $0.8\theta_f$ (下文3.3~3.4节土壤含水率设置与之相同),得到的各渠道配水量结果如表5所示。由表5可知,当初始土壤含水率等于田间持水量时,渠道的总配水量为 $8 488.62 \times 10^4$ m³;当初始土壤含水率小于田间持水量时,渠道的总配水量为 $8 654.37 \times 10^4$

m³,达到了渠道供水能力的上限,说明初始土壤含水率越小,作物生长所需的灌水量就越多。结合图2可以看出,初始土壤含水率对各渠道中种植面积大的作物的耗水有较明显的影响,例如作物种植面积最大的三干渠在初始土壤含水率小于田间持水量时的渠道供水量比两者相等时的供水量多 77.89×10^4 m³,而种植面积最小的天桥支渠在初始土壤含水率小于田间持水量时的渠道供水量只比两者相等时的供水量多 0.98×10^4 m³。

同时,优化的配水量结果可以帮助灌区管理者更好地控制渠道引水量,控制面积大的渠道应多引水,保证作物生长,控制面积小的渠道则不应过多引水,以免增加渠道额外的渗漏量,降低水资源的利用

效率,造成水资源浪费现象。

3.3 灌水量、土壤含水率分析

模型求解得到的春小麦和地膜玉米各月份灌水量及土壤含水率如图3~6所示。由图3和4可以看出,春小麦各月份的灌水量较为平均,而地膜玉米各月份的灌水量差距较大,主要集中在6~7月,这与表2中两种作物在各月份的最大需水量情况是一致的。图3中,当 $\theta_{j1} = 0.9\theta_f$ 时,6月的灌水量为0,原因是5月土壤含水率已经达到了上限(见图5),6月土壤水和降水已可满足作物生长需求,在追求灌溉损失最小和经济效益最大目标的前提下,可以不用灌溉。图4中,当 $\theta_{j1} = \theta_f \cdot 0.9\theta_f$ 时,7月的灌水量均超过了160 mm,原因是7月的土壤含水率接近下限(见图6),如果不及及时灌溉,后期作物可能会因为土壤含水率达到

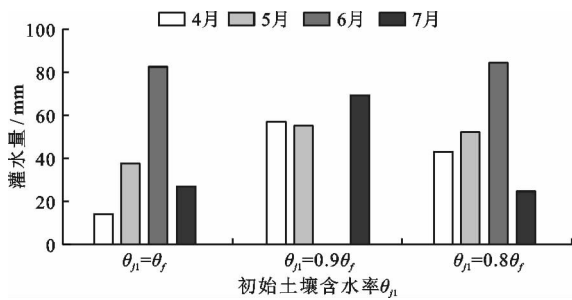


图3 不同初始土壤含水率下春小麦各月份灌水量

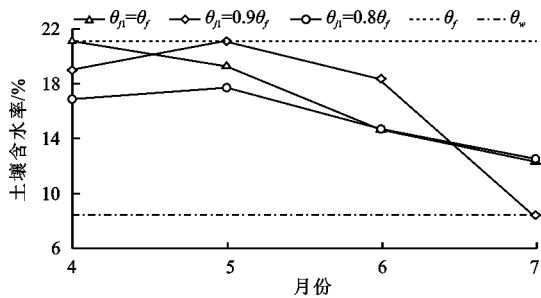


图5 不同初始土壤含水率下春小麦各月份土壤含水率

为探索初始土壤含水率的大小在水资源优化配置中的实际指导意义,本节通过使初始土壤含水率在田间持水量的基础上再增加10%,分析灌区的配水情况。首先,由公式(3)和(6)计算出播种前灌水使 $\theta_{j1} = 1.1\theta_f$ 时的耗水量为 $470.82 \times 10^4 \text{ m}^3$;然后将前文中 $\theta_{j1} = \theta_f$ 时求解出的 ET_a 作为输入变量,同时土壤含水率约束上限放宽至 $1.1\theta_f$,初始土壤含水率设为 $1.1\theta_f$,其余条件和参数均不变,再次求解模型,得到渠道配水量为 $7731.72 \times 10^4 \text{ m}^3$,相比 $\theta_{j1} = \theta_f$ 时减少了 $756.90 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的配水量。可以发现,在忽略土壤水下渗等因素的前提下,在 ET_a 相同时,播前灌溉比播后灌溉节水 $286.08 \times 10^4 \text{ m}^3$,说明通过播前灌溉

凋萎含水量而枯死,造成大面积减产。

表5 各渠道配水量计算结果 10^4 m^3

渠道名称	初始土壤含水率		
	$\theta_{j1} = \theta_f$	$\theta_{j1} = 0.9\theta_f$	$\theta_{j1} = 0.8\theta_f$
一干渠	1 218.84	1 234.46	1 234.46
二干渠	676.51	680.42	680.42
三千渠	3 058.36	3 136.25	3 136.25
四千渠	2 123.74	2 186.22	2 186.22
五千渠	683.74	687.64	687.64
总一支渠	190.25	190.25	190.25
总二支渠	326.40	327.38	327.38
天桥支渠	210.77	211.75	211.75
总计	8 488.62	8 654.37	8 654.37

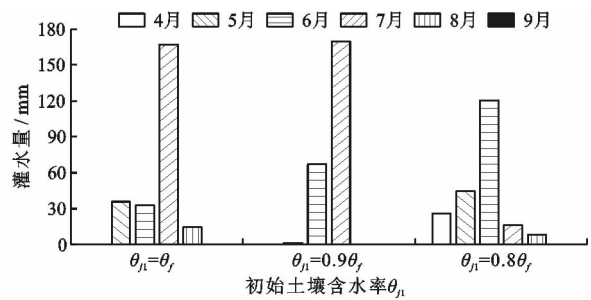


图4 不同初始土壤含水率下地膜玉米各月份灌水量

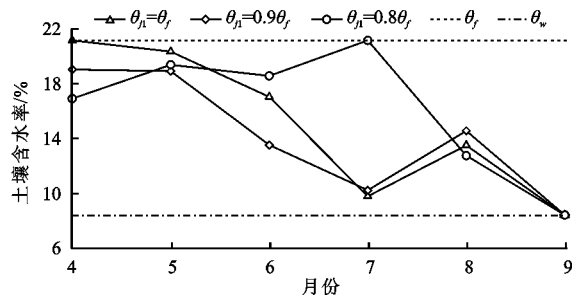


图6 不同初始土壤含水率下春地膜玉米各月份土壤含水率

提高土壤含水量可以在一定程度上达到节水增产的目标,从而实现“落地田间”的农业水资源优化配置。然而,播前土壤含水量也不宜过大,如果土壤含水量过大,一方面会使土壤孔隙度减小,种子难以进行呼吸作用,根区会泡水腐烂,影响作物发育^[23],另一方面会造成水资源的浪费,违背节水的初衷。

3.4 作物实际需水量及产量分析

模型求解得到的春小麦和地膜玉米作物的实际需水量见表6。由表6可知,在初始土壤含水率不同的条件下,春小麦 ET_a 与 ET_m 的比值在0.622~0.627之间,地膜玉米 ET_a 与 ET_m 的比值在0.85~1.00之间,地膜玉米 ET_a 的满足情况明显优于春小

麦,这是由于地膜玉米的单产大于春小麦的单产,水资源优先配给地膜玉米是为了优先满足其生长,从而使灌区得到更大的经济效益。结合我国农作物种植结构变化实际情况^[25],建议类似黄羊灌区的西北干旱区灌区可以转变种植结构,在保证粮食安全需求的基础上尽量多种植玉米,减少小麦的种植量。

根据地膜玉米各月份的 ET_a 值可知,在有限的水资源供给条件下,初始土壤含水率会对作物整个生育期的 ET_a 造成影响,播种前土壤越湿润,作物整个生育期的 ET_a 满足情况越好,因此一定量的播前灌溉是十分有必要的,有利于灌区作物产量和经济效益的提高。

表6 不同初始土壤含水率下春小麦和地膜玉米各月份的实际需水量

作物名称	初始土壤含水率 与 ET_m	月 份						总计	ET_a/ET_m
		4	5	6	7	8	9		
春小麦	$\theta_{i1} = \theta_f$	55.21	92.23	111.66	111.35			223.01	0.627
	$\theta_{i1} = 0.9\theta_f$	55.21	89.24	111.66	111.35			223.01	0.622
	$\theta_{i1} = 0.8\theta_f$	55.21	89.24	111.66	111.35			223.01	0.622
	ET_m	92.01	126.73	186.10	185.59			371.69	
地膜玉米	$\theta_{i1} = \theta_f$	28.85	75.94	114.81	169.20	120.26	30.88	539.94	1.000
	$\theta_{i1} = 0.9\theta_f$	21.31	63.93	106.56	165.16	117.21	30.88	505.06	0.935
	$\theta_{i1} = 0.8\theta_f$	19.25	57.74	96.24	149.17	105.86	30.88	459.14	0.850
	ET_m	28.85	75.94	114.81	169.20	120.26	30.88	539.94	

模型计算得出的不同初始土壤含水率下黄羊灌区春小麦和地膜玉米的总产量如表7。由表7可看出,初始土壤含水率越小,作物产量也越小,当 $\theta_{i1} = 0.8\theta_f$ 时,两种作物的产量均为最小产量(约束条件的下限值)。可以预见,当初始土壤含水率更小时,在渠道供水量一定的情况下,两种作物的产量均会受到较大程度的影响,再次说明了播前灌溉的重要作用和必要性。

表7 不同初始土壤含水率下黄羊灌区春小麦和地膜玉米的总产量

初始土壤含水率	总产量/ 10^4 t	
	春小麦	地膜玉米
$\theta_{i1} = \theta_f$	2.110	4.189
$\theta_{i1} = 0.9\theta_f$	2.100	3.942
$\theta_{i1} = 0.8\theta_f$	2.100	3.600

4 讨 论

(1)本研究兼顾了渠系运行条件和作物对水分的响应,建立了以干渠及直属支渠的灌溉损失最小和主要粮食作物的经济效益最大为目标的多目标模型,提出了一种包括不能过分顾及灌溉损失、一定量的播前灌溉能够节水增产、为增加经济效益应调整灌区种植结构的农业水资源分配方案,该方案能够为灌区管理决策提供一定的理论依据和指导。

(2)黄羊灌区是以渠灌为主的灌区,地下水埋

深较深,因此本研究在土壤平衡公式中假设地下水补给量和渗漏量很小,对于田间水循环的影响可以忽略不计,从而使得该模型适用于地下水埋深较深的渠灌区。对于地下水埋深较浅的地区,应当充分考虑地下水补给量以及土壤盐渍化问题;对于不是以渠灌为主的井灌区或井渠混合灌区,还应当考虑地表水和地下水联合调度的情况。

(3)根据历年统计资料估算,黄羊灌区春小麦和地膜玉米的总产量在 $5.7 \sim 6.0 \times 10^4$ t,本研究在初始土壤含水率为田间持水量时,灌区春小麦和地膜玉米的总产量可以达到近 6.3×10^4 t,由此可见,按照本研究的优化结果进行农业灌溉可以增大粮食作物产量,增加农民收益。

5 结 论

本研究通过考虑渠道渗漏损失,以石羊河流域黄羊灌区干渠及直属支渠的灌溉损失最小和主要粮食作物(春小麦、地膜玉米)的经济效益最大为目标,引入水分生产函数,建立了农业水资源多目标优化配置模型,得到的结论如下:

(1)通过改变目标函数的权重来探讨几何加权法和最小偏差法在模型中的适用性和求解结果的可靠性,结果表明最小偏差法在该模型中的适用性和可靠性较强,灌溉损失在农业灌溉过程中是不可避免的,因此不能过度追求灌溉损失最小,否则会造成作物经济效益的降低。

(2)通过情景设计,分析在3种不同初始土壤含水率条件下的渠道配水量、各月份灌水量、土壤含水率、实际作物需水量以及产量的变化情况,结果显示初始土壤含水率变化会引起各项指标的变化,初始土壤含水率越高,渠道配水量、各月份灌水量会减少,土壤含水率、实际作物需水量以及产量则会增大。定量分析初始土壤含水率为田间持水率的1.1倍时的参数变化,发现在 ET_0 相同的前提下,播前灌溉比播后灌溉节水效果更佳,说明播前灌溉对于农业水资源优化配置是十分重要和必要的。

(3)整个生育期内地膜玉米的灌水量和产量均大于春小麦,说明多种植地膜玉米可以使灌区获得更多的经济收益,灌区管理者和生产者可以在保证粮食安全的前提下调整作物种植结构。尽管如此,本研究仍有一些不足,例如计算渠道渗漏损失的方法较为传统、没有给出灌区种植结构调整的结果等,在今后的研究中将会改进模型并使用更加智能的求解方法,使农业水资源配置方案更加符合西北干旱地区灌区的实际情况。

参考文献:

- [1] 吴泽宁,索丽生. 水资源优化配置研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(2):1-5.
- [2] 关鑫. 基于水-能源-粮食关联性的粮食安全研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2019.
- [3] 张志鑫. 不确定条件下灌区多水源优化配置模型研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2016.
- [4] LI Mo, FU Qiang, SINGH V P, et al. Managing agricultural water and land resources with tradeoff between economic, environmental, and social considerations: A multi-objective non-linear optimization model under uncertainty [J]. *Agricultural Systems*, 2020, 178:102685.
- [5] 曾雪婷,李永平. 基于节水目标的干旱地区水权交易模型研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(7):91-93+98.
- [6] LI Mo, FU Qiang, GUO Ping, et al. Stochastic multi-objective decision making for sustainable irrigation in a changing environment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 223:928-945.
- [7] 李茉. 民勤县灌溉水资源优化配置不确定性模型研究[D]. 北京:中国农业大学, 2013.
- [8] 马波,田军仓. 基于Jensen模型的压砂地西瓜灌溉制度优化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(6):123-129+155.
- [9] LI Xuemin, HUO Zailin, XU Bing. Optimal allocation method of irrigation water from river and lake by considering the field water cycle process [J]. *Water*, 2017, 9(12):911.
- [10] YUE Qiong, ZHANG Fan, ZHANG Chenglong, et al. A full fuzzy-interval credibility-constrained nonlinear programming approach for irrigation water allocation under uncertainty [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 230:105961.
- [11] 欧定华,夏建国,张莉,等. 多作物种植结构和灌溉水量优化模型及算法研究[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(12):1515-1525.
- [12] TANG Yikuan, ZHANG Fan, WANG Sufen, et al. A distributed interval nonlinear multi-objective programming approach for optimal irrigation water management in an arid area [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 220:13-26.
- [13] 赵文举,马孝义,张建兴,等. 基于模拟退火遗传算法的渠系配水优化编组模型研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5):210-214+113.
- [14] 高伟增,曹玉松,张江维. 渠系配水优化遗传算法求解[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(19):11725-11727.
- [15] 郭珊珊,郭萍,李茉. 基于多目标遗传算法的渠系配水优化模型[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(7):71-77.
- [16] 刘叶,殷国玺. 两级灌溉渠系优化配水模型及算法研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(2):239-244.
- [17] 沈来银,胡铁松,周姗,等. 基于SHAW模型的河套灌区秋浇渠系优化配水模型研究[J]. 水利学报, 2020, 51(4):458-467.
- [18] 乔辰,张国立. 几何加权法求解多目标规划问题[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2011, 38(6):107-110.
- [19] 何斌生,汪开宏,马景胜. 黄羊灌区春小麦播前喷灌储水灌溉技术[J]. 甘肃水利水电技术, 2002, 38(2):117-118.
- [20] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements: FAO Irrigation and Drainage, paper No. 56 [R]. Rome: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [21] 张刘东. 石羊河流域灌区水资源管理与决策模型研究[D]. 北京:中国农业大学, 2015.
- [22] ZHANG Fan, GUO Shanshan, ZHANG Chenglong, et al. An interval multi-objective approach considering irrigation canal system conditions for managing irrigation water [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211:293-302.
- [23] 郭元裕. 农田水利学(第三版)[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1997.
- [24] 佟玲. 西北干旱内陆区石羊河流域农业耗水对变化环境响应的研究[D]. 杨陵:西北农林科技大学, 2007.
- [25] 李天祥,朱晶. 近十年来中国粮食内部种植结构调整对水土资源利用的影响分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(9):96-102.