

黑河中游农业水资源多目标优化配置

张妍 郭萍* 张帆

(中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083)

摘要 针对黑河流域中游地区为追求经济发展而向黑河干流取水量过大导致的黑河下游地区地表水流量减少、生态环境恶化等问题,对该地区社会、经济等与水资源优化配置相关的资料数据进行收集、整理与分析,考虑地表径流随机性特征,构建考虑经济、社会、资源的灌溉水资源多目标优化配置模型,并使用层次分析法与线性加权法进行多目标问题求解。结果表明:将优化后的配水方案应用于黑河中游地区,其灌溉用水比实际节约 $3.358 \times 10^8 \text{ m}^3$,水分生产力提升 0.380 kg/m^3 ,用水费用节省 3.89×10^7 元,可以达到节水增产的目的,为该地区水资源管理部门提供一个满足可持续发展的农业水资源配置方案,同时,为类似地区的农业水资源优化配置提供方法依据。

关键词 多目标规划; 水资源优化配置; 随机规划; 黑河流域

中图分类号 S274.3

文章编号 1007-4333(2019)05-0185-08

文献标志码 A

Study on multi-objective optimization allocation of agricultural water resources in the middle reaches of Heihe River

ZHANG Yan, GUO Ping*, ZHANG Fan

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

Abstract With the rapid development of economic in the middle reaches of Heihe River, the water consumption has kept increasing, which causes a decrease of surface water flow and a serious deterioration of the ecological environment in the lower reaches. In order to obtain sustainable agricultural water-allocation scheme of the Heihe River basin, a multi-objective optimization model taking full consideration of the random feature of surface runoff is developed. The model has three objectives including economic, social and resource, which can be solved by the method integrating analytic hierarchy process (AHP) and the linear weighting method. The results show that: Comparing with the actual water allocation scheme, there is $3.358 \times 10^8 \text{ m}^3$ reduction in the total water consumption, 0.380 kg/m^3 the water productivity increasement and 3.89×10^7 Yuan in the water costs. In conclusion, the optimization scheme can not only save irrigation water and increase crop yield in the study area, but also provide local water resources management department a reasonable allocation scheme to maintain the sustainable development of agriculture. Additionally, this study can provide method for managing agricultural water resources in the similar areas.

Keywords multi-objective programming; water resources optimization allocation; stochastic programming; Heihe River basin

水资源是人类赖以生存和发展所不可缺少的重要资源。随着社会经济的发展,水资源供需问题日益突出,然而水资源浪费现象却日益严重,如何合理高效地利用水资源成为当下水资源研究领域的热点

问题^[1-2]。农业是我国的用水大户,根据《2016年中国水资源公报》,全国供水总量为6 040.2亿 m^3 ,其中农业用水3 768.0亿 m^3 ,占用水总量的62.4%,农业用水是我国水资源消耗的主要领域。灌溉用水

收稿日期:2018-07-29

基金项目:“十三五”国家重点研发计划课题(2016YFC0400207)

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

通讯作者:郭萍,教授,主要从事水资源规划及风险分析研究, E-mail:guop@cau.edu.cn

是农业用水的主要形式,我国农田灌溉水利用系数仅为0.542,灌溉效率低下是我国农业用水面临的主要问题^[3]。灌区是农业用水的主体,因而提高灌溉用水效率对发展可持续农业十分重要。

黑河流域是我国西北典型的内陆河流域,黑河中游流域地处青藏高原和内蒙古高原过渡地带,该区域集中了全流域90%以上的耕地和人口,是甘肃省最重要的产粮基地。黑河中游两岸地势平坦,光热资源充足,但由于受到温带大陆性气候影响,降水量少,蒸发量大,空气干燥。近年来,由于中游地区人口大量增加,工业发展迅速,农业生产规模扩大,使得用水量增加,进而很难保证下游湖泊湿地的生态健康。同时,当地水资源管理粗放,灌溉水利用率较低,浪费严重的问题,进一步加剧了当地水资源的供需矛盾,乃至影响到整个流域的生态环境以及经济可持续发展。因此,对有限农业水资源进行合理分配以提高农业水资源利用效率迫在眉睫。

为提高黑河流域的农业水利用效率,已有研究以黑河流域为研究区域构建了水资源优化配置模型,这些模型均可以实现使用更少的水以达到更高的经济效益目的^[4-6]。但由于近年来黑河生态环境遭受破坏,仅以经济效益最大为目标构建水资源优化模型已经不能满足现阶段黑河流域发展需求。为寻求符合当下黑河流域可持续发展的水资源配置方案,本研究拟构建考虑经济、社会、资源的灌溉水资源多目标优化配置模型,引入随机期望值模型表征不同水平年出现的随机性特征,并采用层次分析法与线性加权法相结合的方式求解此多目标模型,以期为该地区水资源管理部门提供不同水平年黑河中游水资源优化配置方案。

1 水资源优化配置模型

1.1 随机多目标模型

多目标规划是数学规划的一个分支,用于研究多个目标函数在给定区域上的最优化,又称多目标最优化,通常记为MOP(Multi-objective programming)。由于实际问题中许多都是多目标的,因此多目标规划已经广泛应用于经济、管理、环境等各个领域的决策中^[7-9]。可持续发展概念的提出要求水资源配置问题应当兼顾环境资源与社会效益等其他方面的目标而不是仅仅考虑经济效益。因此,近年来也有许多研究将多目标规划引入到水资源配置决策中^[10-11]。

多目标规划模型通常表示为^[12]:

$$\text{opt}F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)]^T \quad (1)$$

约束条件为:

$$g_i(x) \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: m 为目标函数的个数; n 为约束条件的个数; $f(x)$ 为目标函数; $g_i(x)$ 为约束函数; b_i 为约束右端项。

多目标规划的 m 个目标之间一般来说是不可公度的,且有可能相互矛盾,因此多目标规划不存在单一最优解,决策者可以通过不同的方法寻求有效解或者非劣解。

虽然多目标规划可以解决水资源分配过程中多个矛盾目标的协调问题,但水资源领域与其他领域不同之处在于,由于暴雨、干旱等天气原因会导致地表径流的随机性,从而导致目标函数的不确定性。仅使用多目标规划模型无法表征水资源系统中的随机性,而随机规划可以丰富不同水文年的决策情景,提供多情景水资源配置方案。因此本研究构建随机多目标模型进行水资源优化配置。

随机多目标规划模型中的每个目标函数 $f(x)$ 均用随机期望值表示,即

$$f_m(x) = \min E[f(x_1, x_2, \dots, x_L; y_1, y_2, \dots, y_P)] \quad (3)$$

约束条件:

$$g_k(x_1, x_2, \dots, x_L; y_1, y_2, \dots, y_P) \leq 0 \quad (4)$$

式中: x_l 为决策变量 $l=1, 2, \dots, L$; $y_p, p=1, 2, \dots, P$ 为随机变量; $g_k(x_1, x_2, \dots, x_L; y_1, y_2, \dots, y_P), k=1, 2, \dots, K$ 为约束函数。

1.2 多目标模型求解

传统的单目标优化模型往往可以通过LINGO软件编程求解获得满意的结果。由于LINGO软件无法直接处理多目标规划问题,因此要进行多目标优化模型的求解,首先需要使用合理的方法将多目标模型转化为单目标模型。传统的多目标求解方法有评价函数法、约束法以及交互法等^[13],评价函数法中的线性加权法因其简单直观有效等特点成为多目标规划求解最常用的方法之一,具体步骤如下:

1)统一量纲。求解各个目标函数的最大值 $f_{i\max}$ 及最小值 $f_{i\min}$,通过函数 φ_i 规范化各个目标函数 $f_i(i=1, 2, \dots, n)$ 。对于越大越优型的目标函数:

$$\varphi_i(x) = \frac{f_{i\max} - f_i(x)}{f_{i\max} - f_{i\min}} \quad (5)$$

对于越小越优型目标函数:

$$\varphi_i(x) = \frac{f_i(x) - f_{i\min}}{f_{i\max} - f_{i\min}} \quad (6)$$

2)按照各个目标函数的重要性不同,给定一组与目标函数 φ_i 对应的非负权系数 $\omega_i (i=1, 2, \dots, n)$, $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$, 令 $F(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i \varphi_i(x)$, 将多目标规划转化为单目标规划。目标函数权系数的确定与决策者的偏好结构信息有关,本研究采用可以反映决策者主观意识的层次分析法进行权重计算,判断矩阵重要性的比例标度参照文献[14]提出的改进层次分析法的比例标度。

3)求解单目标优化问题:

$$\max F(x) = \max \sum_{i=1}^n \omega_i \varphi_i(x) \quad x \in X \quad (7)$$

2 实例应用

2.1 模型构建

本研究以每月各灌区地表水及地下水配置水量为决策变量,经济目标以系统净经济效益最大为指标,社会目标以水分生产力最大为指标,资源目标以灌溉损失最小为指标,构建多目标水资源优化配置模型。

目标函数如下:

1)水分生产力最大

$$\max F_1 = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^H m_i p_h a_{ih}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H p_h (s_{ijh} \alpha_i \beta_i + g_{ijh} \beta_i + e_{ijh})} \quad (8)$$

2)灌溉水量损失最小

$$\min F_2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H p_h s_{ijh} (1 - \alpha_i) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H p_h [(s_{ijh} + g_{ijh})(1 - \beta_i)] \quad (9)$$

3)净经济效益最大

$$\max F_3 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H p_h [B_i \cdot Y_i (s_{ijh} \alpha_i \beta_i + g_{ijh} \beta_i + e_{ijh}) - C_{ijh} - D_{ijh}] \quad (10)$$

式中: i 为不同灌区编号, $i=1, 2, \dots, I$; j 为不同灌水时段, $j=1, 2, \dots, J$; h 为不同流量水平, $h=1, 2, \dots, H$; m_i 为灌区 i 的单位面积作物产量, kg/hm^2 ; p_h 为各流量水平发生概率; a_{ih} 为灌区 i 在流量水平为 h 时的灌溉面积, hm^2 ; α_i 和 β_i 分别为灌区 i 的渠系水利用系数及田间水利用系数; s_{ijh} 和 g_{ijh} 分别为

h 流量水平下灌区 i 在第 j 个灌水时段的地表水及地下水灌溉水量, m^3 ; e_{ijh} 为 h 流量水平下灌区 i 在第 j 个灌水时段的有效降雨量, m^3 ; B_i 为灌区 i 的作物单价, $\text{元}/\text{kg}$; Y_i 为灌区 i 的单方水产量, kg/m^3 ; C_{ijh} 和 D_{ijh} 分别为 h 流量水平下灌区 i 在第 j 个灌水时段的水资源管理费用及供水费用, 元 。

约束条件如下:

1)地表水及地下水可供水量约束

$$s_{ijh} \leq S_{ijh} + I_{i(j-1)h} \quad \forall i, j, h \quad (11)$$

$$g_{ijh} \leq G_{ijh} \quad \forall i, j, h \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^J G_{ijh} \leq G_m \quad \forall i, h \quad (13)$$

式中: S_{ijh} 、 G_{ijh} 和 I_{ijh} 分别为 h 流量水平下灌区 i 在第 j 个灌水时段的地表水、地下水可用水量及地表水余水量, m^3 ; G_m 为总时段内地下水可用水量, m^3 。

2)水量平衡约束

$$I_{i(j-1)h} = I_{i(j-2)h} + S_{i(j-1)h} - s_{i(j-1)h} \quad \forall i, j, h \quad I_{i1h} = 0 \quad (14)$$

3)输水约束

$$Q_{\min} T_j \leq s_{ijh} \leq Q_{\max} T_j \quad \forall i, j, h \quad (15)$$

式中: Q_{\min} 和 Q_{\max} 分别为灌区 i 最小输水流量和最大输水流量, m^3/s ; T_j 为第 j 个灌水时段内的灌水时间, s 。

4)需水约束

$$\sum_{j=1}^J (s_{ijh} \alpha_i \beta_i + g_{ijh} \beta_i + e_{ijh}) \geq R_i \quad \forall i, h \quad (16)$$

式中: R_i 为灌区 i 的最小净需水量, m^3 。

5)粮食安全约束

$$Y_i \sum_{j=1}^J (s_{ijh} \alpha_i \beta_i + g_{ijh} \beta_i) \geq P_i N \quad \forall i, h \quad (17)$$

式中: N 为最小粮食需求量, $\text{kg}/\text{人}$; P_i 为灌区 i 的人口, 人 。

6)非负约束

$$s_{ijh} \geq 0 \quad \forall i, j, h \quad (18)$$

$$g_{ijh} \geq 0 \quad \forall i, j, h \quad (19)$$

$$I_{ijh} \geq 0 \quad \forall i, j, h \quad (20)$$

2.2 基础数据

本研究选取黑河中游 17 个灌区作为研究区域,分别是大满、盈科、西浚、上三、安阳、花寨、平川、板桥、鸭暖、廖泉、沙河、梨园河、友联、六坝、罗城、新坝和红崖子灌区(灌区编号依次为 1, 2, ..., 17),其行政区包括甘肃省张掖市的甘州区、临泽县和高台县。模型求解所需数据参考 2010—2015 年张掖市水资

源管理年报、年鉴以及相关文献与试验资料等。不同流量水平根据莺落峡断面 1944—2014 年历史数据采用距平百分率进行划分,各流量水平的发生概率为:特丰流量 0.132 3,偏丰流量 0.207 2,中等流量 0.322 4,偏枯流量 0.220 5,特枯流量 0.117 6。

粮食需求为 400 kg/人,地表水、地下水供水成本分别为 0.05、0.08 元/m³[15]。作物需水量采用作物系数法确定,其中参考作物蒸发蒸腾量采用 Penman-Monteith 公式[16]计算。灌水时段为 4—9 月。模型计算所需主要相关数据见表 1 与表 2。

表 1 黑河中游地区各灌水时段的降水及作物生长基础数据

Table 1 Precipitation and crop growth monthly data in the middle reaches of Heihe River

月份 Month	平均降水量/ mm Average precipitation	平均 ET ₀ / mm Average ET ₀	作物系数 Crop coefficient					
			大田玉米 Field corn	制种玉米 Seed corn	小麦 Wheat	蔬菜 Vegetable	棉花 Cotton	油料作物 Oil crop
4 月 April	3.74	117.06	0.20	0.22	0.30	0.44	0.07	0.37
5 月 May	3.98	150.17	0.44	0.50	1.15	0.80	0.60	0.86
6 月 June	20.14	157.43	0.53	1.16	1.15	1.00	0.88	1.03
7 月 July	24.96	159.07	1.46	1.20	0.93	0.99	1.15	1.05
8 月 August	29.96	142.56	1.14	1.20	—	0.57	0.97	0.64
9 月 September	20.58	100.90	1.22	0.60	—	0.55	0.78	—

注:ET₀ 为参考作物蒸发蒸腾量。

Note:ET₀ is the evapotranspiration of reference crop.

表 2 黑河中游 17 个灌区主要指标基础数据

Table 2 Basic data of 17 irrigation areas in the middle reaches of Heihe River

灌区 Irrigation area	人口/万人 Population	单位面积 作物产量/ (kg/hm ²) Crop yield per unit area	渠系水 利用系数 Canal water use coefficient	田间水 利用系数 Field water use coefficient	管理费用/ (元/m ³) Management cost	水分生产力/ (kg/m ³) Water productivity
大满 Daman	7.65	10 201	0.65	0.84	0.053 9	1.73
盈科 Yinke	16.44	10 395	0.73	0.78	0.049 8	1.60
西浚 Xijun	7.20	12 520	0.67	0.84	0.061 3	1.76
上三 Shangsansan	4.47	10 097	0.67	0.78	0.082 0	1.44
安阳 Anyang	1.43	5 471	0.65	0.77	0.065 7	0.85
花寨 Huazhai	0.88	5 697	0.62	0.82	0.162 0	1.62
平川 Pingchuan	2.02	8 169	0.65	0.84	0.036 5	1.00
板桥 Banqiao	1.76	8 008	0.64	0.80	0.043 4	0.92
鸭暖 Yanuan	1.14	7 941	0.58	0.84	0.035 8	0.75
廖泉 Liaoquan	1.77	8 187	0.64	0.80	0.045 8	1.03
沙河 Shahe	4.08	8 321	0.81	0.84	0.045 2	1.12
梨园河 Liyuanhe	4.25	7 165	0.76	0.80	0.055 1	1.20
友联 Youlian	4.71	7 661	0.66	0.84	0.047 7	0.92
六坝 Liuba	1.07	6 871	0.70	0.84	0.059 3	0.90
罗城 Luo Cheng	1.38	6 526	0.61	0.80	0.036 1	0.93
新坝 Xinba	1.49	6 096	0.67	0.80	0.053 2	0.95
红崖子 Hongyazi	0.67	6 509	0.66	0.76	0.068 5	2.03

2.3 结果分析

2.3.1 多目标规划方案与单目标规划方案的比较

为验证多目标模型的合理性,分别以经济、社会、资源目标为目标函数构建了3个单目标模型,并使用与多目标规划模型一致的约束条件,计算通过这几个模型所得优化配置方案的灌溉水量、水分生产力、损失水量、净效益等指标与多目标规划模型进行对比,结果见表3。

可以看出,多目标模型的灌溉水总量与资源模型是一样的,都是最少的,但其水分生产力、损失水量以及净效益却不同,其原因在于2个模型的地表水与地下水用水比例不同,资源模型以损失水量最少为目标。由于在使用地表水灌溉过程中发生了渠系渗漏损失和田间渗漏损失2类渗漏损失,而地下

水在运输过程中仅存在田间渗漏损失,因此资源模型趋向于使用更多的地下水。而多目标模型协调了3个目标的配水结果,所用的地下水少于资源模型,因而损失水量比资源模型多了132万 m^3 。多目标模型的净经济效益比社会模型增加了1.378亿元,水分生产力比经济模型增加了0.123 kg/m^3 。由这些数据可以看出,多目标规划模型在尽可能用更少水量的前提下,使得优化后的水分生产力、损失水量以及净经济效益都达到较好水平,避免单目标模型为了追求单一指标最高而使其他指标降低,平衡了各个目标函数之间的矛盾。因此与以往单目标模型相比,多目标规划模型所得到的配水方案更加全面,不失为一种更优的配水方案。

表3 不同优化模型下黑河中游地区各项指标结果比较

Table 3 Compare the results of multi-objective and single-objective optimization models in the middle reaches of Heihe River

指标 Target	多目标模型 Multi-objective model	单目标模型 Single-objective model		
		社会模型 Social model	资源模型 Resource model	经济模型 Economic model
灌溉水量/亿 m^3 Irrigation water	11.499	11.502	11.499	13.001
水分生产力/(kg/m^3) Water productivity	1.262	1.313	1.260	1.139
损失水量/亿 m^3 Water loss	5.241	5.618	5.228	5.983
经济净效益/亿元 Economic net benefit	21.498	20.120	21.074	25.090

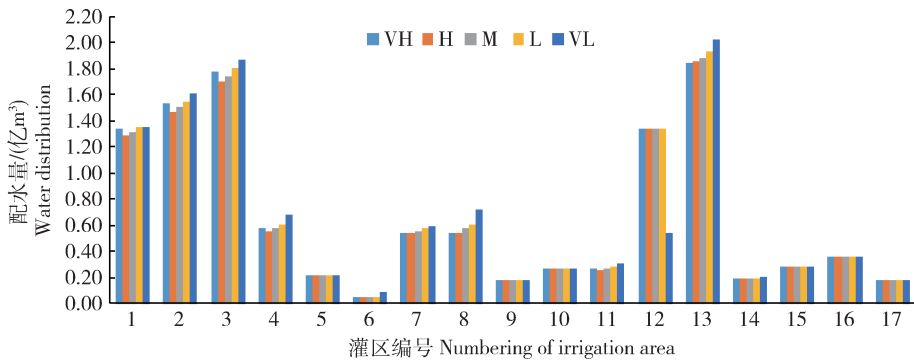
2.3.2 多目标规划优化方案分析

多目标模型各个灌区不同水平年水量配置结果见图1。可见,大部分灌区在不同的水平年配水总量并不会出现太大波动,这是因为灌溉总量并不仅仅与来水年份有关,还与当年的作物种植面积、温度和湿度等因素有关,这些因素影响灌区总作物需水量从而也决定灌区不同水平年的灌溉用水。而梨园河灌区在特枯水年灌溉配水出现明显降低的情况,这是因为梨园河灌区是临泽县6个灌区中粮食作物种植面积最大的灌区,其中,高耗水带田面积比为30%,用水效率低。因此在特枯水年来水较少的情况下,梨园河灌区粮食作物种植面积有所减少,从而

导致灌区配水量在满足粮食安全约束的前提下也随之减少。

图2示出多目标模型优化后平水年17个灌区4—9月的配水方案,在整个配水时段内,配水量呈现先增加后递减的趋势,主要集中在6、7、8月,这与当地主要粮食作物——玉米、小麦的需水规律一致。各月份配水量占总配水量的比例分别为5.41%(4月)、13.39%(5月)、22.05%(6月)、30.27%(7月)、17.09%(8月)、11.78%(9月)。

整体上看,水资源在17个灌区中并不是均匀分配的,仅大满、盈科、西浚、梨园河和友联5个灌区的配水量就达到地区总配水量的68%,造成这种现象



VH、H、M、L 和 VL 分别代表特丰水年、丰水年、平水年、枯水年和特枯水年。

VH, H, M, L and VL represent the very high flow, high flow, medium flow, low flow and very low flow, respectively.

图1 黑河中游 17 个灌区不同水平年配水量优化结果

Fig. 1 Water allocation results in different hydrological years among 17 irrigation areas

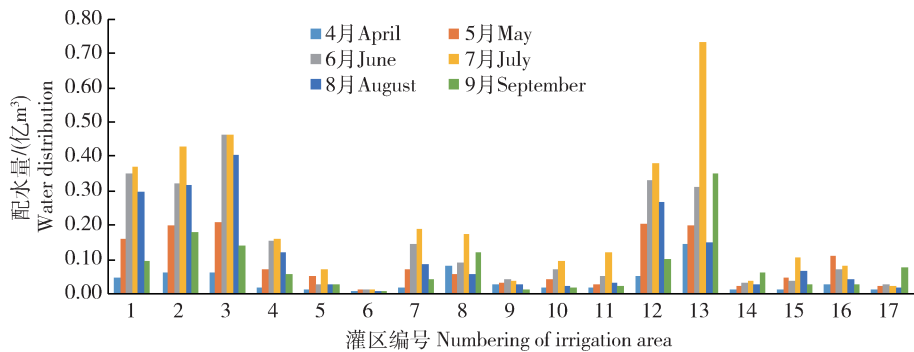


图2 黑河中游 17 个灌区平水年 4—9 月配水量优化结果

Fig. 2 Water allocation results during April-September under medium flow among 17 irrigation areas

的原因与各灌区作物种植面积有关,经计算,大满、盈科、西浚、梨园河和友联 5 个灌区粮食作物种植面积占地区总粮食作物种植面积的 71%,经济作物种植面积占地区总经济作物种植面积的 57%,不同灌区配水量与作物种植面积呈现正相关关系。

为检验优化方案是否对当地的水资源管理有实用性,本研究选取 2015 年作为现状水平年来与相应水平年的优化方案做对比。2015 年的莺落峡径流量为 20.82 亿 m³,属于丰水年,因此取多目标模型丰水年优化结果与现状水平年进行比较(表 4)。模型在黑河流域中游大部分灌区的水量配置结果比实际要少。这是因为,为了保证黑河下游的生态健康,优化模型的地表水可利用量遵循了黑河分水曲线,根据分水曲线得到的黑河中游实际的可利用水量比实际情况要偏小。同时,在优化模型的 3 个目标函数中,水分生产力最大与灌溉损失最小这两个目标函数均趋向于使用更小的水而使目标函数达到最优,而这 2 个目标函数的权系数也较大,因此可以从

地区整体角度减少灌溉用水。其中,在大满、西浚、板桥、鸭暖、友联等灌区减少水量更为明显。大满和西浚主要是由于模型在配置水量时减少了地下水的配置,现状水平年在这两个灌区地下水配置达 0.69、0.40 亿 m³,而甘州区地下水开采量允许值为 2.01 亿 m³,这 2 个灌区的地下水开采就已经达到整个甘州区地下水开采允许值的一半。因此在灌溉取水的过程中应当优先考虑地表水的使用,适当减少大满、西浚等灌区的地下水用量可以减缓甘州区地下水开采量过大所带来的环境压力。从整体上看,模型将地表水作为黑河流域主要的农田灌溉取水来源,在地表水供应不足的情况下才应考虑加大地下水的开采,这样的取水模式可以有效防止过度开采地下水所导致的地面沉降,植被退化等环境问题,有助于发展可持续农业。

对比黑河中游地区整体的灌溉水量、水分生产力、用水费用及单方水净效益等指标的优化值与现状值(表 5)可以看出,模型优化得到的单方水净效益

表 4 黑河中游 17 个灌区现状与优化配水量的比较

Table 4 Comparison of water allocation between optimization and actual results among irrigation areas 亿 m³

灌区 Irrigation area	优化 Optimization result		现状(2015 年) Status quo (2015)	
	地表水	地下水	地表水	地下水
	Surface water	Groundwater	Surface water	Groundwater
大满 Daman	1.26	0.03	1.15	0.69
盈科 Yinke	1.46	0.00	1.07	0.43
西浚 Xijun	1.70	0.00	1.60	0.40
上三 Shangsansan	0.55	0.00	0.78	0.00
安阳 Anyang	0.10	0.12	0.26	0.00
花寨 Huazhai	0.03	0.02	0.09	0.00
平川 Pingchuan	0.54	0.00	0.58	0.10
板桥 Banqiao	0.23	0.31	0.82	0.04
鸭暖 Yanuan	0.12	0.05	0.50	0.09
廖泉 Liaoquan	0.14	0.12	0.35	0.08
沙河 Shahe	0.26	0.00	0.40	0.12
梨园河 Liyuanhe	1.34	0.00	1.30	0.15
友联 Youlian	1.39	0.46	1.72	0.70
六坝 Liuba	0.15	0.04	0.14	0.09
罗城 Luocheng	0.29	0.00	0.38	0.02
新坝 Xinba	0.16	0.20	0.30	0.10
大满 Daman	0.18	0.00	0.17	0.00
总计 Total	9.89	1.36	11.61	3.00

表 5 黑河中游地区各项指标现状值与优化后的结果比较

Table 5 Comparison of indicators between current and optimized results in the middle reaches of Heihe River

指标 Target	优化 Optimization result	现状(2015 年) Status quo (2015)
灌溉水量/亿 m ³ Irrigation water	11.249	14.607
水分生产力/(kg/m ³) Water productivity	1.505	1.125
用水费用/亿元 Water-use cost	1.206	1.595
单方水净效益/(元/m ³) Net water benefit	1.600	1.669

比现状水平年略低，但灌溉用水比实际减少了 3.358 亿 m³，水分生产力提升了 0.380 kg/m³，节省了用水费用 0.389 亿元。这是因为，模型在构建与求解时，如约束条件的选定以及目标函数的权系数确定，都侧重于资源与社会两大要素，弱化了经济效益目标。而在实际的灌溉取水中，为了追寻更大的经济效益，农民们常常灌溉更多的水，造成更大的水资源浪费，不能满足农业可持续发展要求。因此，决策者在进行水资源配置决策时，应当把农业发展和水资源合理开发利用结合起来，尽可能减少农业发展对资源的浪费及环境的破坏。在满足地区作物需

水量的前提下，从地区整体角度减少灌溉用水以提高水分生产力降低灌溉损失。

3 结束语

本研究在充分考虑地表径流的随机性的基础上，从经济、社会、资源角度构建了灌溉水资源随机多目标优化配置模型，并将其应用于解决黑河中游地区灌溉水资源优化配置问题。在求解过程中，使用层次分析法与线性加权法将多目标规划问题转换为线性规划问题，使得所构建模型可以通过 LINGO 软件进行编程求解，由此得到不同水文年下各灌区

各月份的配水量。通过实例验证多目标规划优化模型与单目标模型相比,其所得配水方案可以使得各项指标均处在较好位置,避免单目标模型为了追求单一指标最高而导致其他指标不理想的情况,平衡各个目标之间的矛盾。

优化后的配水方案表明,在地区总配水时应遵循优先使用地表水的原则,尽量减少地下水的开采;在灌区间配水时,灌区的配水量与灌区作物种植面积呈正相关关系;在月份间配水时,应重点保证6月、7月、8月的配水量,使配水规律与作物需水规律一致。将优化后的配水方案与现状水平下各个灌区实际配水结果相比较可以发现,按照优化后的配水方案进行黑河中游各个灌区灌溉用水的分配,虽然地区整体的单方水净效益下降了 $0.069 \text{元}/\text{m}^3$,但可为地区减少灌溉总用水 3.358亿 m^3 ,提升水分生产力 $0.380 \text{kg}/\text{m}^3$,节省用水费用 0.389亿元 。基于现阶段黑河流域中游快速发展的绿洲农业背景下,略微降低经济效益以达到节水增产、减少开支的水资源配置方案是可行的。同时,本研究构建的随机多目标规划模型得到的水资源优化配置结果不仅可以为该地区水资源管理部门提供一个满足农业可持续发展的多情景的决策方案做参考,也可以为类似地区的水资源优化配置提供方法依据。

参考文献 References

[1] 翁文斌,王忠静,赵建世.现代水资源规划[M].北京:清华大学出版社,2004
Weng W B, Wang Z J, Zhao J S. *Modern Water Resources Planning* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004 (in Chinese)

[2] The United Nations World Water Development Report 2016: *Water and Jobs* [M]. UNESCO Pub.; Berghahn Books, 2014

[3] 中华人民共和国水利部.中国水资源公报 2016 [M].北京:中国水利水电出版社,2017
The Ministry of Water Resource of the People's Republic of China. *China Water Resources Bulletin 2016* [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2017 (in Chinese)

[4] Li M, Guo P, Zhang L D. Multi-dimensional critical regulation control modes and water optimal allocation for irrigation system in the middle reaches of Heihe River basin, China [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 76: 166-177

[5] Li M, Guo P. A coupled random fuzzy two-stage programming model for crop area optimization: A case study of the middle Heihe River basin, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 155: 53-66

[6] Zhang C L, Zhang F, Guo S S. Inexact nonlinear improved fuzzy chance-constrained programming model for irrigation water management under uncertainty [J]. *Journal of Hydrology*,

2018

[7] 张华,何波,杨超.基于粗糙集和多目标规划的多物流配送中心选址[J].工业工程与管理,2008,13(2):69-73
Zhang H, He B, Yang C. Approaches for distribution center location based on rough set and multi-objective programming [J]. *Industrial Engineering and Management*, 2008, 13(2): 69-73 (in Chinese)

[8] 叶晓甦,杨俊萍.基于多目标规划模型的PPP项目定价方式研究[J].统计与决策,2012(6):74-77
Ye X S, Yang J P. Study on the pricing method of PPP project: Based on a multi-objective programming model [J]. *Statistics and Decision*, 2012(6): 74-77 (in Chinese)

[9] 范英,张晓兵,朱磊.基于多目标规划的中国二氧化碳减排的宏观经济成本估计[J].气候变化研究进展,2010,6(2):130-135
Fan Y, Zhang X B, Zhu L. Estimating the macroeconomic cost of CO₂ emission abatement in China based on multi-objective programming [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2010, 6(2): 130-135 (in Chinese)

[10] 杨献献,郭萍,李茉.面向生态的黑河中游模糊多目标水资源优化配置模型[J].节水灌溉,2016(5):65-70
Yang X X, Guo P, Li M. A fuzzy multi-objective optimal allocation model of water resource oriented ecology in the middle reaches of the Heihe River [J]. *Water Saving Irrigation*, 2016(5): 65-70 (in Chinese)

[11] 李茉,郭萍.基于双层分式规划的种植结构多目标模型研究[J].农业机械学报,2014,45(9):168-174,130
Li M, Guo P. Multi-objective optimization model of planting structure based on two-level fractional programming [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9): 168-174, 130 (in Chinese)

[12] 刘成良,任传栋,高佳.多目标规划在邯郸水资源优化配置中的应用[J].水资源研究,2008(3):14-16
Liu C L, Ren C D, Gao J. The application of multi-objective programming on optimal distribution of water resource in Handan [J]. *Water Resources Research*, 2008(3): 14-16 (in Chinese)

[13] 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(6):107-110
Qiao C, Zhang G L. Geometric weighting method for solving multi-objective programming problems [J]. *Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition*, 2011(6): 107-110 (in Chinese)

[14] 张晨光,吴泽宁.层次分析法(AHP)比例标度的分析与改进[J].郑州工业大学学报,2000(2):85-87
Zhang C G, Wu Z N. Improvement and analysis of scale of AHP [J]. *Journal of Zhengzhou University of Technology*, 2000(2): 85-87 (in Chinese)

[15] Jiang Y, Xu X, Huang Q Z, Huo Z L, Huang G H. Optimizing regional irrigation water use by integrating a two-level optimization model and an agro-hydrological model [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 178: 76-88

[16] Gong L, Xu C Y, Chen D. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 329(3-4): 620-629