

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.036

基于水足迹的河套灌区多目标种植结构优化调整与评价

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

摘要: 针对黄河水量逐年减少和农业面源污染日趋严重等因素导致内蒙古河套灌区农业用水短缺、生态环境不断恶化的问题,本文将水足迹概念(蓝水足迹、绿水足迹、灰水足迹)引入多目标优化模型和多目标决策评价模型,对灌区有限的水资源进行合理配置。以河套灌区为例,本文选取小麦、玉米、葵花、瓜类、番茄5种典型作物,从经济、社会、资源以及生态4个角度对作物的种植结构进行优化,并耦合模糊层次分析和TOPSIS法对多种优化方案(多目标优化方案、单目标优化方案、现状情景方案)进行评估优选。结果表明,在保障粮食作物产量的基本需求下,减少粮食作物小麦、玉米的种植面积,增加经济作物葵花、番茄和瓜类的种植面积,可以达到增加经济收入、保证社会公平性、提高水资源利用效率及减少粮食生产过程中给环境带来负面效应的目的。并且,评价结果表明多目标优化方案兼顾经济、社会、资源和生态多方面,优化结果优于单目标优化结果和现状情景。研究可为河套灌区及类似地区作物种植结构调整提供相应的理论依据和决策支持,助力灌区可持续发展。

关键词: 种植结构; 多目标优化; 评价; 水足迹; 河套灌区

中图分类号: S274.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)12-0346-12 OSID: 

Optimization and Evaluation of Multi-objective Planting Structure
in Hetao Irrigation District Based on Water Footprint

GUO Ping ZHAO Min ZHANG Yan ZHANG Xiaoxing ZHANG Fan
(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Agricultural water shortage is serious and ecological environment becomes deteriorating continuously due to the reducing available Yellow River water resources and serious agricultural non-point source pollution in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia. Based on these problems, the footprint concept was introduced into the multi-objective optimization model and multi-objectives decision evaluation model to allocate the limited water resources rationally. Taking Hetao Irrigation District as an example, the optimal planting structures of five main crops (wheat, corn, sunflowers, tomatoes and melons) were obtained considering the aspects of economy, society, resources and ecology. Meanwhile, multiple optimization schemes (multi-objective condition, single-objective condition and current condition) were evaluated and selected by integrating the FAHP model and TOPSIS model. Results showed that under the basic premise of food crop yield, reducing the planting area of wheat and corn, and increasing the cash crops (sunflowers, tomatoes and melons) were recommended. It can increase economic income, ensure social equity, improve irrigation water use efficiency and reduce the negative environmental effects simultaneously. Furthermore, the evaluation results showed that the multi-objective optimization scheme, taking into account the tradeoffs amongst economic, social, resources and environmental aspects, was better than both the single-objective condition and the current condition. The research result can provide theoretical decision support and promote sustainable development to Hetao Irrigation District and similar irrigation areas.

Key words: planting structure; multi-objective optimization; evaluation; water footprint; Hetao Irrigation District

0 引言

近年来,随着人口增长和各行业用水量增加,农业水资源短缺问题日趋严重,而农业水资源短缺问题是制约我国粮食安全的主要瓶颈之一^[1]。灌区是我国农业的用水主体和主要的粮食生产基地,改善农业灌溉水资源的不合理利用、提高灌区用水效率是解决农业水资源短缺问题的有效措施^[2-3]。并且,作物生产过程中大量化肥农药等施用所造成的灌区农业面源污染问题也亟需解决^[4]。因此,调整农业种植结构,合理配置有限的农业水资源,对灌区的可持续发展具有重要意义。

农业种植结构是由经济、社会、资源、生态多个子系统组成的复合系统^[5],为避免只追求经济效益,种植结构多目标优化模型受到了国内外学者越来越多的关注^[6-8]。但是以往的多目标种植结构优化模型多数是以种植业的直接用水量作为水资源限制或最小化条件,忽略了作物蒸发与水资源污染对水资源消耗量的影响^[9]。水足迹将作物耗水划分为蓝水、绿水和灰水,包括作物生长过程中消耗的直接水资源和间接水资源^[10-13],将蓝、绿、灰水足迹同时纳入种植结构优化模型,可以更全面真实地反映作物需水情况,帮助决策者确定更加合理可靠的种植结构调整方案^[14-15]。虽然优化模型可以得出种植结构规划方案和水资源分配方案,但是如何确定水资源配置优化结果和优化方案的合理性,还需要进一步引入合适的评价方法对方案进行评估和优选^[16]。水资源优化配置综合评价体系是典型的多层次、多目标决策系统^[17],而 TOPSIS 法是最常用的多目标决策方法之一,多项研究验证了该方法的适用性^[18]。TOPSIS 法应用过程中涉及各指标权重的计算,常用的方法是层次分析法,但是传统的层次分析法常常忽略人为判断的模糊性,在一致性检验方面也逊色于模糊层次分析法^[19-20]。而耦合模糊层次分析法和 TOPSIS 法等多种评价方法是解决这类问题的有效手段。

本研究将水足迹理论及量化方法引入到多目标种植结构优化模型及评价模型中,探讨水足迹的相关理论及量化方法,计算各灌域各作物生产过程中产生的蓝水、绿水和灰水足迹,构建基于水足迹的多目标种植结构优化模型,从经济、社会、资源和生态多方面确定基于水足迹的评价指标体系,并通过模糊层次分析法计算各评价指标权重,利用 TOPSIS 评价模型对各种种植结构优化方案进行综合评价,将模型应用于河套灌区,评估模型的适用性,以提高灌区水资源利用效率,为灌区管理者提供合理的水资源

优化配置方案,助力灌区可持续发展。

1 材料与方法

1.1 技术路线图

本文从水足迹研究视角,建立多目标水资源优化配置模型和多目标决策评价模型相结合的一体化框架,在种植结构优化调整的基础上,利用评价方法对优化结果和优化方案进一步评估和优选,为决策者选择合适的优化方案及未来灌区规划发展提供相应的建议。技术路线图如图 1 所示。

1.2 水足迹测量方法

蓝水足迹是指在生长发育过程中所消耗的地下水 and 地表水,本研究中主要是作物消耗的灌溉用水量;绿水足迹是指生产过程中消耗的降雨量,主要是指生长发育过程中吸收和利用的有效降雨量;而灰水足迹是稀释污水所需水量^[21-22]。

蓝、绿水足迹采用 ALLEN 等^[23]提出的方法进行测算,计算式为

$$W_{\text{blue}} = 10 \sum_{d=1}^D ET_{\text{blue}}/Y \tag{1}$$

$$W_{\text{green}} = 10 \sum_{d=1}^D ET_{\text{green}}/Y \tag{2}$$

式中 W_{blue} ——蓝水足迹, m^3/kg
 W_{green} ——绿水足迹, m^3/kg
 ET_{blue} ——蓝水蒸腾量, mm/d
 ET_{green} ——绿水蒸腾量, mm/d
 d ——生育期时间, d
 Y ——作物单位面积产量, kg/hm^2

灌溉需水量为作物的蒸散发量和有效降雨量的差值,计算式为

$$ET_{\text{blue}} = \max(0, ET_c - P_{\text{eff}}) \tag{3}$$

$$ET_{\text{green}} = \min(ET_c, P_{\text{eff}}) \tag{4}$$

式中 ET_c ——作物蒸散发量, mm
 P_{eff} ——有效降雨量, mm

本文的作物需水量近似等于作物的蒸散发量,采用作物系数法来确定,参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 采用 Penman - Monteith 公式计算^[24],有效降雨量采用美国农业部提出的计算公式^[25],即

$$ET_c = \sum_{d=1}^D K_c ET_0 \tag{5}$$

$$P_{\text{eff}} = \begin{cases} P(4.17 - 0.02P)/4.17 & (P < 83) \\ 41.7 + 0.1P & (P \geq 83) \end{cases} \tag{6}$$

式中 P ——旬降雨量, mm
 K_c ——作物系数

采用 HOEKSTRA 等^[21]在《水足迹评价手册》中的测算方法计算灰水足迹,总灰水足迹为各水体的

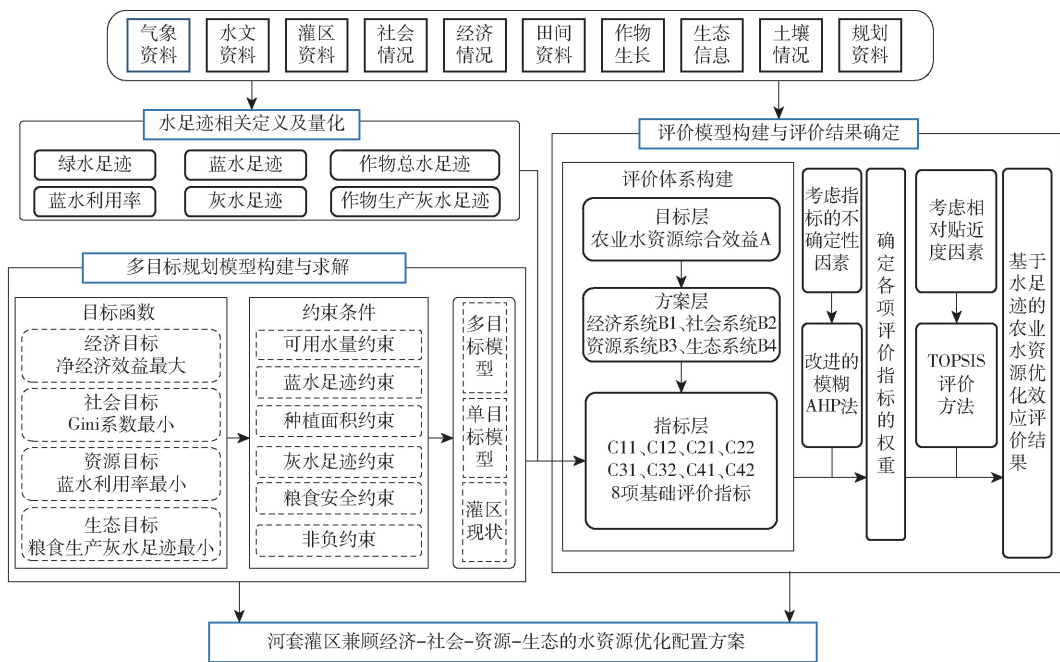


图1 技术路线图

Fig.1 Technical framework

灰水足迹之和,计算式为

$$W_g = \sum W_{gj} \quad (j = 1, 2, \cdots, n) \tag{7}$$

其中 $W_{gj} = \max \{ P_{g1j}, P_{g2j}, \cdots, P_{gmj} \}$ (8)

$$P_{gij} = \frac{P_{ij}}{C_{ij-\max} - C_{ij-\text{net}}} \tag{9}$$

$(i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n)$

$p_{ij} = \lambda_{ij} \mu_i t_i$ (10)

式中 W_g ——总灰水足迹, m^3
 W_{gj} ——第 j 类水体的灰水足迹, m^3
 P_{gij} ——第 i 种灰水足迹, m^3
 p_{ij} ——向 j 类水体中投入的污染物质, kg
 $C_{ij-\max}$ ——第 i 种污染环境允许的最大质量浓度, kg/m^3
 $C_{ij-\text{net}}$ ——第 i 种污染环境中的本底质量浓度, kg/m^3
 λ_{ij} ——向 j 类水体投入污染物质的比例系数
 μ_i ——污染物淋失率
 t_i ——总污染物质, kg

1.3 基于水足迹的多目标种植结构优化模型

本文构建的优化模型兼顾经济(净经济效益最大)、社会(Gini 系数最小)、资源(蓝水利用率最小)和生态(粮食生产灰水足迹最小),实现多个目标之间的协调。约束条件包括可用水量约束、蓝水足迹约束、种植面积约束、灰水足迹约束、粮食安全约束和非负约束等。

1.3.1 净经济效益

采取常用的计算灌区净经济效益的方法^[26],计

算公式为

$$\max F_1 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J B_j S_{ij} Y_{ij} - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J T_{cj} S_{ij} - C_w \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J M_j S_{ij} \tag{11}$$

式中 F_1 ——经济目标值,元
 i ——灌域编号 j ——作物编号
 C_w ——水价,元/ m^3
 B_j ——不同作物单价,元/ kg
 S_{ij} ——不同灌域不同作物种植面积, hm^2
 Y_{ij} ——不同灌域不同作物单位面积产量, kg/hm^2
 T_{cj} ——不同作物种植成本,元/ hm^2
 M_j ——不同作物灌溉定额, m^3/hm^2

1.3.2 Gini 系数

Gini 系数可以有效评估灌区各灌域之间水土资源分配的公平性^[27]。Gini 系数在 0 ~ 1 之间,计算结果越靠近 0 表明水资源分配的公平性越高。本文的 Gini 系数表示任意两个灌域之间每单位灌溉面积灌溉用水差值与整个灌区平均值的比值,其计算公式为

$$\min F_2 = \frac{1}{2I \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{M_j S_{ij}}{S_{ij}}} \cdot \left| \frac{\sum_{j=1}^J M_j S_{ij}}{\sum_{j=1}^J S_{ij}} - \frac{\sum_{j=1}^J M_{kj} S_{kj}}{\sum_{j=1}^J S_{kj}} \right| \tag{12}$$

式中 F_2 ——社会目标值

S_{ij} 、 S_{kj} —— l 、 k 灌域不同区域的种植面积, hm^2
 M_{lj} 、 M_{kj} —— l 、 k 灌域不同区域的灌溉定额,
 m^3/hm^2

1.3.3 蓝水利用率

蓝水利用率是作物蓝水足迹占作物水足迹的比例, 蓝水利用率越小, 说明该作物消耗的蓝水足迹越少, 即水资源的利用效率越高^[15], 可以有效反映水资源的利用状况, 其计算公式为

$$\min F_3 = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J S_{ij} Y_{ij} W_{\text{blue}ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J S_{ij} Y_{ij} W_{ij}} \times 100\% \quad (13)$$

式中 F_3 ——资源目标值, %
 W_{ij} ——不同灌域不同作物水足迹, m^3/kg
 $W_{\text{blue}ij}$ ——不同灌域不同作物蓝水足迹, m^3/kg

1.3.4 作物生产灰水足迹

采用作物生产灰水足迹概念(在作物生产期内生产单位粮食产生的污染物, 稀释到环境污染临界浓度所需要的水量) 量化单位作物生产带来的负面效应^[28], 其计算公式为

$$\min F_4 = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{M_{aij} S_{ij}}{C_m - C_{ai}} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{M_{bij} S_{ij}}{C_m - C_{bi}}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J S_{ij} Y_{ij}} \quad (14)$$

式中 F_4 ——生态目标值, m^3/kg
 M_{aij} ——不同灌域不同作物夏灌时期的氮素淋失量, kg/hm^2
 M_{bij} ——不同灌域不同作物秋浇时期的氮素淋失量, kg/hm^2
 C_m ——环境中允许的最大污染物质量浓度, kg/m^3
 C_{ai} ——夏灌时不同区域地下水初始氮素质量浓度, kg/m^3
 C_{bi} ——秋浇时不同区域地下水初始氮素质量浓度, kg/m^3

1.3.5 约束条件

(1) 可用水量约束

对于每个灌域, 其灌溉用水量不得超过农业的可用水总量, 即

$$\sum_{j=1}^J M_j S_{ij} \leq N_i \eta_{1i} \eta_{2i} \quad (\forall i) \quad (15)$$

式中 N_i ——农业可用水总量, m^3
 η_{1i} ——渠系水利用系数
 η_{2i} ——田间水利用系数

(2) 蓝水足迹约束

各灌域所有作物的蓝水足迹之和不超过灌溉水量, 即

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J S_{ij} Y_{ij} W_{\text{blue}ij} \leq \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J M_j S_{ij} \quad (16)$$

(3) 种植面积约束

作物的最优种植面积不超过总可用面积, 并且考虑到不同作物的生产安全, 每种作物的种植面积变化应在一定范围内, 即

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J S_{ij} \leq S_a \quad (17)$$

$$S_{ij\min} \leq S_{ij} \leq S_{ij\max} \quad (18)$$

式中 S_a ——原种植总面积, hm^2
 $S_{ij\min}$ ——不同灌域不同作物最小种植面积, hm^2
 $S_{ij\max}$ ——不同灌域不同作物最大种植面积, hm^2

(4) 灰水足迹约束

作物产生的灰水足迹不应超过优化前的当前足迹, 以避免优化结果加重对环境的不利影响, 即

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{M_{aij} S_{ij}}{C_m - C_{ai}} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{M_{bij} S_{ij}}{C_m - C_{bi}} \leq \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{M_{aij} S_{0ij}}{C_m - C_{ai}} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{M_{bij} S_{0ij}}{C_m - C_{bi}} \quad (19)$$

式中 S_{0ij} ——不同灌域不同作物原种植面积, hm^2

(5) 粮食安全约束

为了确保粮食生产的需求得到满足, 有必要限制各种作物的产量不低于社会的最低需求, 即

$$\sum_{i=1}^I S_{ij} Y_{ij} \geq D_j \quad (\forall j) \quad (20)$$

式中 D_j ——不同作物的最低保障需求量, kg

(6) 非负约束

$$S_{ij} \geq 0 \quad (\forall i, j) \quad (21)$$

1.4 基于模糊层次分析法和 TOPSIS 的评价方法

基于水足迹的河套灌区多目标种植结构评价体系由目标层(综合效益 A)、准则层(经济系统 B1、社会系统 B2、资源系统 B3、生态系统 B4)、指标层(C11、C12、C21、C22、C31、C32、C41、C42) 8 项指标组成。各评价指标计算方法及表征意义如表 1 所示。本研究主要评价 P1(多目标优化)、P2(仅考虑经济的单目标优化)、P3(现状实际情况) 3 种方案情况。利用评价方法对不同优化方案及实际情况进行对比研究, 可以发现各优化方案和实际情况之间的差异, 并更加详细反映优化提升程度。

层次分析法广泛应用于水资源优化配置系统中多目标权重的确定, 但这种传统的权重计算方法没有考虑实际情况中存在的模糊性, 而对于种植结构多目标优化决策问题, 存在很多不确定的因素^[29]。

因此,本文利用模糊层次分析法计算评价指标值的相对权重,计算结果更加实际可靠。TOPSIS 评价方法(又称为正理想解逼近法)是一种根据接近和远离最优、最劣解的距离来评价的一种决策方法,若评价对象最靠近最优解且远离最劣解,则为最好,反之为最差^[30]。耦合的模糊层次分析法和 TOPSIS 评价模型计算步骤如下。

(1) 分别计算 3 个方案 P1、P2、P3 的 8 项评价指标的结果,得出待评价指标值矩阵为 $F=[x_{ij}]_{t \times z}$ 。

(2) 按照效益型指标(越大越优)和成本型指标(越小越优)公式对 $F=[x_{ij}]_{t \times z}$ 进行归一化处理

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j(x_{ij})}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})} \quad (\text{效益型指标}) \quad (22)$$

$$y_{ij} = \frac{\max_j(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})} \quad (\text{成本型指标}) \quad (23)$$

得到 $F'=[y_{ij}]_{t \times z}$ 。

(3) 利用李刚军等^[29]提出的基于标尺转换的模糊层次分析法计算各指标权重,检验模糊互补性矩阵的一致性,得出相关权重矩阵 $W=[\omega_1 \quad \omega_2 \quad \cdots \quad \omega_n]^T$ 。

(4) 将归一化标准矩阵与模糊层次分析法得出的权重矩阵相乘,并确定各评价指标的初始正理想解 z_0 及初始负理想解 z_1 。计算式为

$$Z=(z_{ij})_{m \times n}=(\omega_n y_{ij})_{m \times n} \quad (24)$$

$$z_1=\left\{\max_i z_{ij} \mid z_{ij} \in Z^+, \min_i z_{ij} \mid z_{ij} \in Z^-\right\}=\left\{z_1^+, z_2^+, \cdots, z_z^+\right\} \quad (25)$$

$$z_0=\left\{\max_i z_{ij} \mid z_{ij} \in Z^+, \min_i z_{ij} \mid z_{ij} \in Z^-\right\}=\left\{z_1^-, z_2^-, \cdots, z_z^-\right\} \quad (26)$$

(5) 计算每个水资源配置方案到指标最优组合的欧氏距离 d_i^+ 和指标最差组合的欧氏距离 d_i^- , 计算式为

$$d_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^z\left(z_{ij}-z_1^+\right)^2} \quad (27)$$

$$d_i^-=\sqrt{\sum_{j=1}^z\left(z_{ij}-z_0^-\right)^2} \quad (28)$$

(6) 计算各方案的相对贴近度 ϕ_i , 计算式为

$$\phi_i=d_i^-/\left(d_i^++d_i^-\right) \quad (29)$$

根据相对贴近度 ϕ_i 对水资源配置方案进行排序, ϕ_i 越大则对应方案的综合评价越优。

表 1 评价指标的计算方法及表征意义

Tab.1 Calculation method and representational meaning of indexes

目标层	准则层	指标层	计算方法	指标表征	指标类型
农业水资源 综合效益 A	经济系统 B1	单方水净经济效益 C11	净收益与水量的比值	灌溉用水效益	效益型
		成本 C12	水费与种植成本之和	灌溉节水效益	成本型
	社会系统 B2	Gini 系数 C21	式(13)	水资源分配的公平性	成本型
		灌区农业水分生产力 C22	作物产量与水量的比值	相对水量作物产量	效益型
	资源系统 B3	蓝水利用率 C31	式(14)	水资源利用效率	成本型
		万元 GDP 水足迹 C32	水足迹与万元 GDP 的比值	经济层面水资源利用效率	成本型
	生态系统 B4	作物生产灰水足迹 C41	式(15)	单位粮食生产的负面效应	成本型
		灰水足迹 C42	式(8)	生态负面效应	成本型

2 实例应用

2.1 研究区域概况

河套灌区位于内蒙古自治区西部巴彦淖尔市(40°19′~41°18′N, 109°26′~112°06′E)^[3](图2), 是我国3个特大型灌区之一。灌区包含5个灌域, 自东向西分别是乌拉特灌域(WLT)、义长灌域(YC)、永济灌域(YJ)、解放闸灌域(JFZ)和乌兰布和灌域(WLBH), 不仅是我国重要的商品粮基地, 也是重要的产油基地^[31]。灌区主要种植小麦(XM)、玉米(YM)、葵花(KH)、瓜类(GL)、番茄(FQ)等作物, 种植面积比例达灌区总作物种植面积的85%^[31]。

河套灌区年均蒸发量为2 032~3 179 mm, 而年

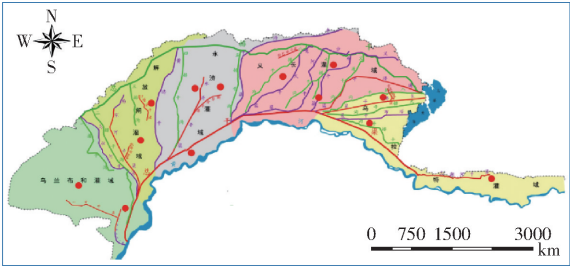


图2 河套灌区示意图

Fig.2 Location of Hetao Irrigation District

均降雨量仅为136.7 mm, 全年降雨量少而蒸发量大, 农业生产依靠引黄灌溉, 是典型的无灌溉即无农业的地区^[32]。根据国家对黄河分水的总体规划, 河套灌区的引黄指标由 $5.18 \times 10^9 \text{ m}^3$ 减少至 $4.00 \times 10^9 \text{ m}^3$, 灌溉用水指标的减少, 其他部门用水需求量增加, 会严重影响灌区的粮食生产, 导致水资源供需

矛盾突出,农业水资源短缺问题严重^[33-34]。与此同时,近年来为了提高粮食产量,化肥农药等过度使用,导致河套灌区农业非点源污染问题日趋严重^[4]。因此,需要对种植结构进行优化调整,促进水资源的有效利用,缓解水资源短缺问题,减少生态环境污染。

2.2 数据收集与整理

所需要的作物种植面积及单位面积产量取自《巴彦淖尔市统计年鉴》;作物单价数据来自于农业信息网;作物的灌溉定额采用《内蒙古自治区行业用水定额标准》中的相关数值;社会最低粮食保障需求量结合巴彦淖尔市实际情况确定。水足迹相关数据采用 1.2 节中相关公式计算得到,蓝、绿水足迹的基础数据来自于文献[15],而灰水足迹的相关数据来自于文献[35]。由于五大灌域(乌兰布和、解放闸、永济、义长和乌拉特)与巴彦淖尔市的 5 个旗县(磴口、杭后、临河、五原和乌拉特前旗)位置大致对应,文献[15,35]基础数据可以用于模型的计算。并且根据曹连海等^[4]研究结果及河套灌区现状情况设符合水质标准的氮素质量浓度为 1.7 g/L。所有数据资料均基于 2016 年,整理分析相关数据如表 2~6 所示。

表 2 作物现状种植面积

Tab.2 Current crop planting area					hm ²
灌域	小麦	玉米	葵花	瓜类	番茄
WLBH	1 753	25 207	27 640	2 193	767
JFZ	21 067	33 993	19 913	1 720	3 113
YJ	16 527	50 247	50 567	1 780	3 647
YC	18 133	28 300	80 193	6 200	820
WLT	5 013	59 840	61 653	3 547	880

表 3 作物单位面积产量

Tab.3 Crop yield per unit area					kg/hm ²
灌域	小麦	玉米	葵花	瓜类	番茄
WLBH	5 425	10 851	2 168	23 809	69 220
JFZ	6 098	11 317	3 738	48 194	90 117
YJ	6 228	12 831	3 565	39 023	82 019
YC	5 363	11 257	3 214	38 200	81 426
WLT	4 786	11 112	2 246	32 315	84 797

表 4 其他作物相关参数

Tab.4 Parameters of crops				
作物	作物单价/ (元·kg ⁻¹)	种植成本/ (元·hm ⁻²)	灌溉定额/ (m ³ ·hm ⁻²)	社会最低 需求量/kg
小麦	3.3	10 558.2	5 300	2.946×10 ⁸
玉米	2.4	9 224.3	4 400	2.525×10 ⁸
葵花	6.5	3 955.1	3 100	2.255×10 ⁸
瓜类	4.8	54 840.0	2 000	1.295×10 ⁸
番茄	3.6	19 408.8	2 800	2.116×10 ⁸

表 5 灰水足迹相关数据

Tab.5 Data collection about grey water footprint						
	灌域	小麦	玉米	葵花	番茄	瓜类
夏灌时氮素淋失量 $M_{aij}/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	WLBH	25.3	3.9	2.8	5.1	4.7
	JFZ	22.7	4.6	3.3	5.0	4.0
	YJ	23.4	4.4	3.2	5.0	4.2
	YC	23.7	5.3	3.1	5.3	4.3
	WLT	24.7	3.8	2.9	5.3	3.8
秋浇时氮素淋失量 $M_{bij}/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	WLBH	253	39	28	51	47
	JFZ	227	46	33	50	40
	YJ	234	44	32	50	42
	YC	237	53	31	53	43
	WLT	247	38	29	53	38
夏灌前氮素的初始 质量浓度 $C_{ai}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$		0.010	0.010	0.010	0.005	0.005
秋浇前氮素的初始 质量浓度 $C_{bi}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$		0.005	0.005	0.005	0.003	0.003

表 6 蓝、绿水足迹相关数据

Tab.6 Data collection about blue and green water footprint						
	footprint					m ³ /kg
水足迹	灌域	小麦	玉米	葵花	番茄	瓜类
蓝水足迹 W_{blue}	WLBH	0.780	0.469	1.089	0.187	0.075
	JFZ	0.623	0.413	0.626	0.084	0.053
	YJ	0.626	0.318	0.702	0.110	0.060
	YC	0.697	0.391	0.611	0.100	0.055
	WLT	0.820	0.429	0.916	0.127	0.069
绿水足迹 W_{green}	WLBH	0.097	0.061	0.339	0.028	0.010
	JFZ	0.115	0.071	0.180	0.017	0.009
	YJ	0.105	0.069	0.202	0.022	0.011
	YC	0.122	0.078	0.279	0.023	0.011
	WLT	0.150	0.096	0.505	0.034	0.013

3 结果分析与讨论

3.1 模型优化结果

3.1.1 优化前后各作物的种植面积

优化前后河套灌区 5 种作物种植面积如图 3 所示,小麦、玉米种植面积减少 17.9%、20.8%;经济作物葵花、瓜类和番茄的种植面积分别增加 14.1%、40.9%和 132.6%。河套灌区 5 个灌域的种植结构调整如图 4(图中内圈为优化前,外圈为优化后)所示。优化后,解放闸灌域、义长灌域和乌拉特灌域的各作物总种植面积增加;其他 2 个灌域有一定程度的减少,其中乌兰布和灌域的总种植面积变化最大,减少 48.8%。对于乌兰布和灌域,番茄的种植面积有所增加,而其他 4 种作物的种植面积有一定程度的减少;而对于解放闸灌域、义长灌域和乌拉特灌域,需增加种植经济作物葵花、瓜类和番茄,减少种植粮食作物;对于义长灌域,除小麦外其他作物的种植面积均增加。

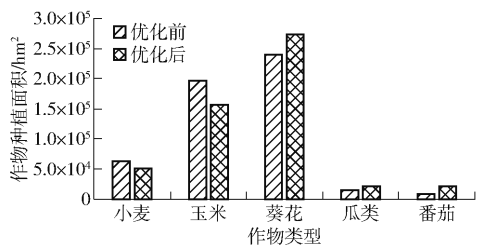


图 3 优化前后河套灌区作物种植面积对比
Fig. 3 Comparison of crop planting area in Hetao Irrigation District before and after optimization

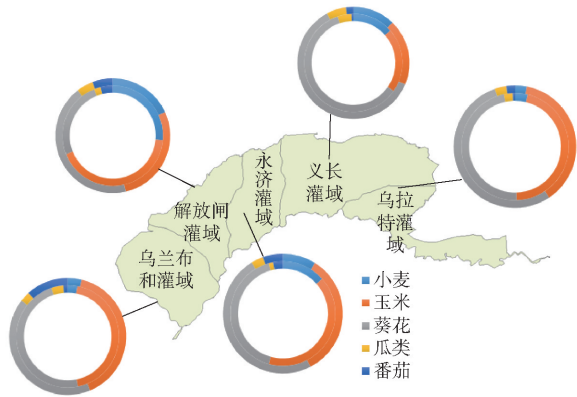


图 4 优化前后各灌域作物种植面积对比
Fig. 4 Comparison of crop planting area in each district before and after optimization

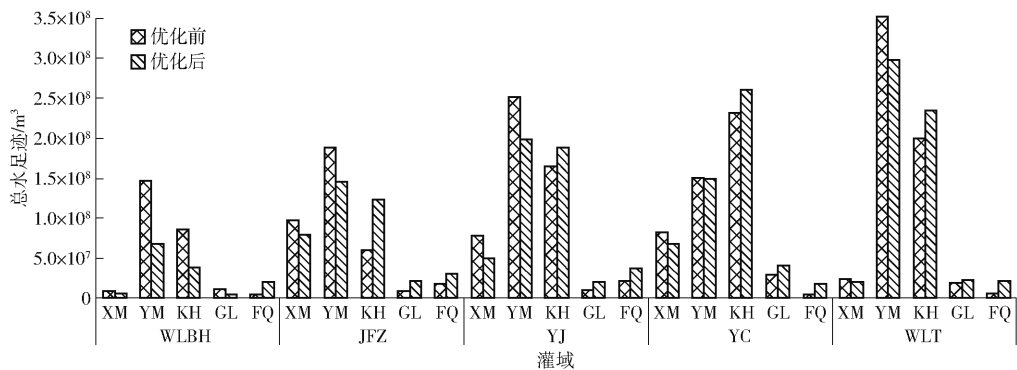


图 5 各灌域各作物的总水足迹优化前后对比
Fig. 5 Comparison of total water footprint of different crops in each district before and after optimization

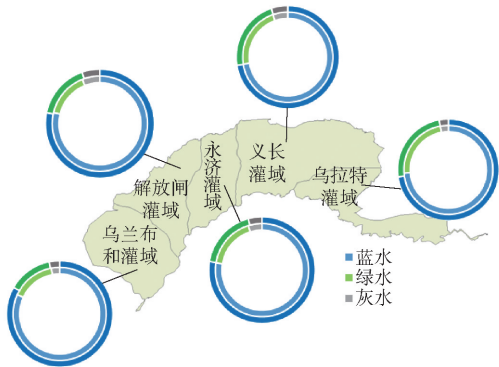


图 6 优化前后各灌域 3 种水足迹的贡献占比
Fig. 6 Comparison of proportion of three kinds of water footprint in each district before and after optimization

3.1.2 优化前后作物的水足迹

各灌域各作物的总水足迹(蓝水、绿水、灰水水足迹之和)优化前后的结果如图 5 所示,河套灌区的东部地区(永济灌域、义长灌域和乌拉特灌域)作物总水足迹较大,而其他地区(乌兰布和灌域和解放闸灌域)较小。优化后乌兰布和灌域、解放闸灌域和乌拉特灌域的总水足迹减少,而永济灌域和义长灌域的总水足迹增加。总体而言,河套灌区水足迹减少 $9.0 \times 10^7 \text{ m}^3$,即水资源利用效率有一定程度的提升。各类作物水足迹变化规律与种植结构变化情况基本一致,小麦、玉米的水足迹减小 18.1%、21.0%;而葵花、瓜类和番茄产生的水足迹分别增加 14.0%、40.4% 和 134.8%。

各灌域 3 种水足迹的分布比例如图 6(图中内圈为优化前,外圈为优化后。由于灰水足迹与蓝绿水足迹相比较小,为了使优化前后变化效果在图中更加明显,灰水足迹扩大了 5 倍)所示。由图 6 可知,蓝水在 3 种水足迹中占比例最大,绿水次之,而灰水最小,这与河套灌区的农业水资源主要来自于引黄水量的实际情况相符合。乌兰布和灌域和永济灌域的蓝水、绿水和灰水足迹均有一定程度的减小;

水、绿水足迹增加,而灰水足迹减少;乌拉特灌域,蓝水、灰水足迹减少,而绿水足迹增加。其中,乌兰布和灌域的蓝水足迹和灰水足迹减小程度最明显,分别减少 46.4% 和 44.7%;义长灌域的绿水足迹增幅最明显,增长 11.3%。这是因为西部地区(乌兰布和灌域)自然条件更恶劣,社会经济水平更低,种植结构分布不合理,优化后 3 种水足迹都在一定程度上减少,水资源利用效率有一定程度的提高。研究表明,优化后除义长灌域外,各灌域粮食生产过程中产生的灰水足迹减小,即给环境带来的负面效果均减少。图 7 为河套灌区 5 种作物产生的蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹优化情况,5 种作物产生的蓝水、绿水、灰水足迹变化规律相同,且与种植面积

对于义长灌域,3 种水足迹增加;解放闸灌域的蓝

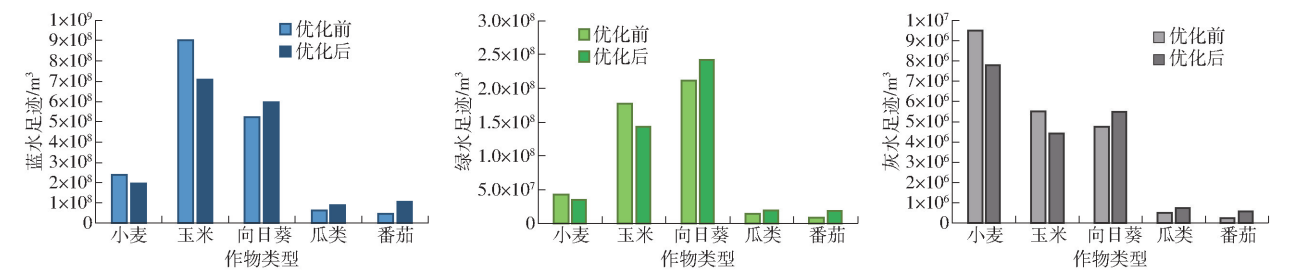


图 7 河套灌区各作物 3 种水足迹优化前后对比

Fig. 7 Comparison of three kinds of water footprint of different crops in Hetao Irrigation District before and after optimization

变化情况一致,小麦、玉米两种作物产生的 3 类水足迹均减少,而经济作物瓜类和番茄产生的 3 种水足迹均有所增加。

3.1.3 优化前后各地区水量分配及净经济效益

优化前后的总经济效益和总灌水量如图 8 所示,河套灌区所有作物产生的净经济效益增加 4.20×10^9 元,灌水量减少 $8.87 \times 10^7 \text{ m}^3$,即用较少的灌水量得到更大经济效益,提高了灌区的水资源利用效

率。种植小麦产生的净经济效益小,而所需的灌溉用水量较大;种植瓜类和番茄等经济作物产生的净经济效益较大,而消耗的灌水量很少。因此,在保障基本粮食安全需求的条件下,增加经济作物的种植面积有利于提高农业产值,使有限的水资源得到更合理的使用。各作物净经济效益和灌水量变化与种植结构的变化情况一致(图 9),各灌域小麦和玉米产生的净经济效益和灌水量减少,而番茄增加。

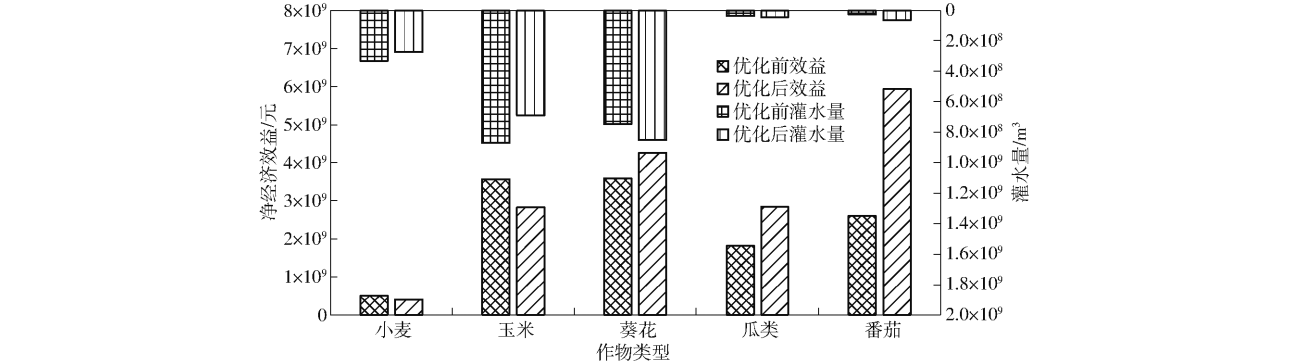


图 8 河套灌区各作物的净经济效益及灌水量优化前后对比

Fig. 8 Comparison of net economic benefit and irrigation water of different crops in Hetao Irrigation District before and after optimization

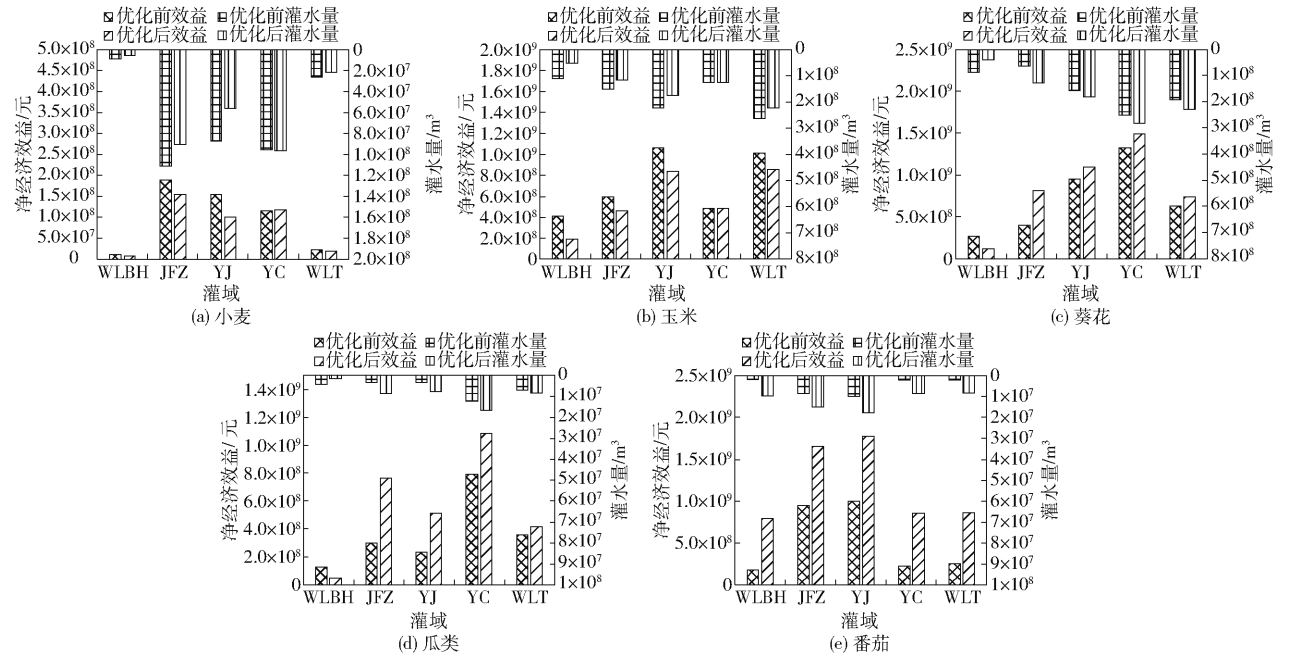


图 9 各灌域各作物的净经济效益及灌水量优化前后对比

Fig. 9 Comparison of net economic benefit and irrigation water among different crops in each district before and after optimization

对葵花和瓜类而言,除乌兰布和灌域外,其他灌域的净经济效益和灌水量增加。

3.2 模型评价结果

为了评价种植结构优化调整对经济、社会、资源和生态等多方面产生的影响,采用 1.4 节所示步骤分别计算 P1、P2、P3 3 种方案的 8 项评价指标,结果

如表 7 所示。

对 3 种方案的各项指标按照效益型指标公式及成本型指标公式进行归一化处理,结果如表 8 所示。利用模糊层次分析法计算得到各评价指标权重为 $\omega = \{0.15, 0.11, 0.13, 0.11, 0.13, 0.11, 0.14, 0.10\}$ (表 9),且加权归一化矩阵结果如表 10 所示。

表 7 各方案的评价指标值

Tab. 7 Evaluation index values for each project								
方案	C11/(元·m ⁻³)	C12/亿元	C21	C22/(kg·m ⁻³)	C31/%	C32/(m ³ ·万元 ⁻¹)	C41/(m ³ ·kg ⁻¹)	C42/m ³
P1	8.501	4.909	0.062	2.904	78.768	289.905	3.424 × 10 ⁻³	1.901 × 10 ⁷
P2	8.368	5.332	0.072	3.092	80.406	310.831	3.174 × 10 ⁻³	1.956 × 10 ⁷
P3	6.026	4.700	0.144	2.343	80.500	299.787	4.381 × 10 ⁻³	2.055 × 10 ⁷

表 8 归一化处理后的评价指标值

Tab. 8 Evaluation index values after normalization								
方案	C11	C12	C21	C22	C31	C32	C41	C42
P1	1	0.669	1	0.749	1	1	0.793	1
P2	0.946	0	0.878	1	0	0	1	0.643
P3	0	1	0	0	0.472	0.528	0	0

表 9 各评价指标权重

Tab. 9 Weighted value of evaluation index									
方案	C11	C12	C21	C22	C31	C32	C41	C42	ω
C11	1.00	4.83	2.86	4.83	2.86	4.83	1.69	8.16	0.15
C22	0.21	1.00	0.59	1.00	0.59	1.00	0.35	1.69	0.11
C21	0.35	1.69	1.00	1.69	1.00	1.69	0.59	2.86	0.13
C22	0.21	1.00	0.59	1.00	0.59	1.00	0.35	1.69	0.11
C31	0.35	1.69	1.00	1.69	1.00	2.86	0.59	2.86	0.13
C32	0.21	1.00	0.59	1.00	0.59	1.00	0.35	1.69	0.11
C41	0.59	2.86	1.69	2.86	1.69	2.86	1.00	4.83	0.14
C42	0.12	0.59	0.35	0.59	0.35	0.59	0.21	1.00	0.10

表 10 加权归一化处理后的各评价指标值

Tab. 10 Weighted and normalized value of each evaluation index								
方案	C11	C12	C21	C22	C31	C32	C41	C42
P1	0.154	0.077	0.129	0.086	0.130	0.115	0.131	0.102
P2	0.145	0	0.113	0.115	0	0	0.142	0.065
P3	0.019	0.115	0	0	0.061	0.061	0	0

利用 TOPSIS 方法计算得到 3 种方案的各归一化欧氏距离 (d^- 、 d^+) 如表 11 所示,计算得到 3 种方案的综合贴近度 ϕ 分别为 0.854、0.558 和 0.322。综合贴近度越大表明方案越好,因而,3 种方案由大到小依次为 P1、P2、P3。多目标优化与单目标优化

和现状情况相比,均有一定程度的提升。

由上述各项评价指标结果可知,除配水公平性 (Gini 系数)略差外,多目标优化方案 P1 的各项结果均优于现状情况 P3,即采用多目标模型对种植结构进行优化调整后,经济、社会、资源和生态目标均有一定的改进。即保证一定社会公平性条件下,优化后获得较少用水量下更大的种植效益,提高水资源的利用效率,减少不必要的水资源浪费,并减少粮食生产带来的灰水足迹,减轻农业非点源污染。多目标优化方案 P1 与净经济效益的单目标优化方案 P2 相比,农业水分生产力 C22 和粮食生产灰水足迹 C41 外,其他评价指标均优于单目标优化方案 P2。

表 11 不同方案的相对贴近度及其排序

Tab. 11 Relatively comprehensive closeness degree and rank of different projects			
参数	P1	P2	P3
d^-	0.326	0.267	0.143
d^+	0.056	0.212	0.302
ϕ	0.854	0.558	0.322
排序	1	2	3

以净经济效益最大为目标的优化模型,在追求最大的净经济效益过程中,虽然可以较好地满足社会公平性,但与此同时,需要消耗更多的灌溉水量,相应地水资源利用效率也较低。综上所述,构建的多目标模型进行种植结构优化,可兼顾经济、社会、资源和生态效益,对河套灌区农业水资源短缺和非点源污染严重的现状有较好的改善作用,对粮食生产具有积极的指导意义。

3.3 讨论

相关研究表明,进行种植结构规划是提高水资源利用效率(减少灌区作物生产水足迹)和减少面源污染的有效措施,主要措施体现为种植耗水少、经济效益高的作物^[1]。这是因为总体而言粮食作物生产水足迹高于经济作物的生产水足迹,高耗水型的作物(小麦和玉米)生产过程中消耗的水资源量更大,并且灌溉导致的氮素淋失强度较大^[15]。河套灌区是我国重要的商品粮基地,肩负着重要的粮食生产任务,因此,还需要满足粮食生产的基础需求,保障灌区粮食作物的种植面积^[33]。本文的研究结果与上述结论一致,优化后小麦和玉米的种植面积减少,而葵花、瓜类和番茄的种植面积均有所增加。优化前后小麦和番茄的种植面积变化较大,对优化结果影响较大。种植结构调整的同时会给经济、社会、资源和生态带来相应的影响。5 种作物产生的蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹均有一定程度的变化,且 3 种水足迹的变化规律基本相同。小麦、玉米和葵花的 3 种水足迹均减小;瓜类和番茄的 3 种水足迹均增加。此外,河套灌区的所有作物产生的净经济效益增加,而所用灌水量减少,较大程度提高了灌区的水资源利用效率。

相关研究结果表明水足迹理论有助于明确农业生产过程消耗的水资源类型、效率和数量,对管理者制定相关决策具有重要的参考价值^[34-35]。并且,利用构建的优化模型进行种植结构规划对河套灌区农业发展是有利的^[36]。除了上述调整种植结构的节

水措施外,还可以通过加强灌区设施建设,提高河套灌区输水渠道的衬砌率和渠系水利用系数,提高灌溉水资源的利用效率^[37-38]。此外,本研究可减少灌溉所导致的氮素淋湿,还能从源头上控制氮肥施用量和提高氮肥利用率来减少灰水足迹,改善生态环境污染^[4]。本研究结果验证了模型的可行性,可为河套灌区及类似区域的管理者进行种植结构规划,选择合适的优化方案提供新的研究视角和更加全面合理的建议。但是本研究对实际中的不确定性因素考虑较少,未来还需要引入不确定性方法对模型进一步完善。

4 结论

(1)针对种植系统的多功能性,本文进行种植结构调整时将经济效益、社会公平性、水资源效率和生态安全等方面产生的影响考虑在内,从水足迹研究视角,构建了基于水足迹的种植结构多目标优化模型以及耦合模糊层次分析法和 TOPSIS 法的多目标决策评价模型,并采用构建的模型对河套灌区进行种植结构规划调整,为当地管理者制定农业生产方案提供参考。

(2)在一定粮食作物保障的前提下,减少小麦(17.9%)和玉米(20.8%)种植面积,增加葵花(14.1%)、瓜类(40.9%)和番茄(132.6%)种植面积,经济、社会、资源和生态效益均有一定的改进。在保证一定社会公平性条件下,优化后能以较少的水量获得较多的净经济效益,提高水资源的利用效率,减少不必要的水资源浪费,并在一定程度上减少粮食生产带来的灰水足迹,减轻农业非点源污染。

(3)利用评价模型计算得到多目标优化、单目标优化和实际情况 3 种方案的综合贴近度 ϕ 分别为 0.854、0.558 和 0.322,表明构建的多目标种植结构优化模型优于单目标种植结构优化模型和现状情景。

参 考 文 献

[1] 孙世坤. 近 50 年来河套灌区作物生产水足迹时空演变过程研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2013.
SUN Shikun. Research on the spatial-temporal variation of water footprint of crop production in nearly 50 years in Hetao Irrigation District[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)

[2] 周维博,李佩成. 我国农田灌溉的水环境问题[J]. 水科学进展,2001,12(3):413-417.
ZHOU Weibo, LI Peicheng. Water environment problem of irrigation in China[J]. Advances in Water Science, 2001, 12(3): 413-417. (in Chinese)

[3] 方延旭,杨培岭,宋素兰. 灌区生态系统健康二级模糊综合评价模型及其应用[J]. 农业工程学报,2011,27(11):199-205.
FANG Yanxu, YANG Peilin, SONG Sulan. Secondary fuzzy comprehensive evaluation model for ecosystem health of irrigation district and its application[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 199-205. (in Chinese)

[4] 曹连海,吴普特,赵西宁,等. 内蒙古河套灌区粮食生产灰水足迹评价[J]. 农业工程学报,2014,30(1):63-72.
CAO Lianhai, WU Pute, ZHAO Xining, et al. Evaluation of grey water footprint of grain production in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(1): 63-72. (in Chinese)

[5] 高明杰. 区域节水型种植结构优化研究[D]. 北京:中国农业科学院,2005.

- GAO Mingjie. Study on the optimization of regional planting structure for water-saving[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2005. (in Chinese)
- [6] 马建琴, 陈守煜, 邱林. 作物种植结构与水量优化分配的多目标模糊模型与方法[J]. 农业科学与技术, 2004, 5(1): 5–10.
- MA Jianqin, CHEN Shouyi, QIU Lin. A multi-objective fuzzy optimization model for cropping structure and water resources and its method[J]. Agricultural Science and Technology, 2004, 5(1): 5–10. (in Chinese)
- [7] 谭倩, 侯天宇, 张田媛, 等. 基于鲁棒规划方法的农业水资源多目标优化配置模型[J]. 水利学报, 2020, 51(1): 56–68.
- TAN Qian, HOU Tianyu, ZHANG Tianyuan, et al. A multi-objective robust programming model for agricultural water management with uncertain weights[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(1): 56–68. (in Chinese)
- [8] HUANG L L, HUANG Z F. Application of inexact two-phase fuzzy multi-objective programming method to crop area planning[J]. Resource Science, 2016, 38(11): 2157–2167.
- [9] 付国睿, 黄子淇, 景海钊, 等. 基于生产水足迹的粮食作物种植结构优化研究——以辽宁省铁岭市为例[J]. 资源开发与市场, 2019, 35(11): 1362–1374.
- FU Guorui, HUANG Ziqi, JING Haizhao, et al. Research on optimization of crop planting structure based on water footprint—a case study of Tieling City in Liaoning Province[J]. Resource Development & Market, 2019, 35(11): 1362–1374. (in Chinese)
- [10] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international trade of livestock and products[C]//Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, 2003: 49–76.
- [11] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern[J]. Water Resources Management, 2007, 21(1): 35–48.
- [12] BS ISO 14046: 2014. Environmental management-water footprint-principles, requirements and guidelines[R]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2014.
- [13] ARJEN Y, HOEKSTRA A Y, MEKONMEN M M. The water footprint of humanity[J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2012, 3(9): 3232–3237.
- [14] DAI C, QIN X S, LU W T. A fuzzy fractional programming model for optimizing water footprint of crop planting and trading in the Hai River Basin, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278: 123196.
- [15] 刘爽. 基于水足迹的农业水资源高效利用模型研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2019.
- LIU Shuang. Research on the model of agricultural water resources efficient utilization based on water footprint[D]. Beijing: China Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [16] ZHANG Y, ZHANG F, ZHU H, et al. An optimization-evaluation agricultural water planning approach based on interval linear fractional bi-level programming and IAHP-TOPSIS[J]. Water, 2019, 11(5): 1094.
- [17] 陈兆波. 基于水资源高效利用的塔里木河流域农业种植结构优化研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- CHEN Zhaobo. Study on the agriculture planting structure optimization based on the high efficient utilization of water resources in Tarim Watershed[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008. (in Chinese)
- [18] 卢兴旺, 杨慧珊, 卢津津. 多目标 TOPSIS 法在水资源配置方案综合评价中的实践[J]. 水利科技与经济, 2012, 18(1): 70–72.
- LU Xingwang, YANG Huishan, LU Jinjin. Practice of multi-objective TOPSIS method in comprehensive evaluation of water resource allocation scheme[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2012, 18(1): 70–72. (in Chinese)
- [19] 肖辞源. 工程模糊系统[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [20] 姬东朝, 宋笔锋, 喻天翔. 模糊层析分析法及其在设计方案优选中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(11): 1692–1694, 1755.
- Ji Dongchao, SONG Bifeng, YU Tianxiang. FAHP and its application in the selection of design scheme[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(11): 1692–1694, 1755. (in Chinese)
- [21] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard[M]. London and Washington, DC: Earthscan, 2011.
- [22] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade[J]. J. Org. Chem., 2002, 11(7): 835–855.
- [23] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements[M]. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998.
- [24] MONTEITH J L. Evaporation and environment[J]. Symp. Soc. Exp. Biol., 1965, 19: 205–234.
- [25] SUN S, WU P, WANG Y. The impacts of interannual climate variability and agricultural inputs on water footprint of crop production in an irrigation district of China[J]. Science of the Total Environment, 2013, 15(3): 498–507.
- [26] KARNER K, MITTER H, SCHMID E. The economic value of stochastic climate information for agricultural adaptation in a semi-arid region in Austria[J]. J. Environ. Manage., 2019, 249(1): 109434.
- [27] HU Z, CHEN Y, YAO L, et al. Optimal allocation of regional water resources: from a perspective of equity-efficiency tradeoff[J]. Resour. Conserv. Recycl., 2016, 109(2): 102–113.
- [28] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, 等. 水足迹评价手册[M]. 刘俊国, 曾昭, 韩乾斌, 等, 译. 北京: 科学出版社, 2012.
- [29] 李刚军, 李娟, 李怀恩, 等. 基于标度转换的模糊层次分析法在宁夏灌区水权分配中的应用[J]. 自然资源学报, 2007, 22(6): 872–879.
- LI Gangjun, LI Juan, LI Huaen, et al. Application of scale transformation based on fuzzy analytic hierarchy process to water right allocation in Ningxia Irrigated Area[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(6): 872–879. (in Chinese)
- [30] 徐建新, 樊华, 胡笑涛. 熵权与改进 TOPSIS 结合模型在地下水资源承载力评价中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2012(2): 30–33, 37.
- XU Jianxin, FAN Hua, HU Xiaotao. The model combined entropy weight with improved TOPSIS and its application in

- groundwater resources carrying capacity evaluation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(2): 30 – 33,37. (in Chinese)
- [31] 任东阳. 灌区多尺度农业与生态水文过程模拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
REN Dongyang. Multi-scale modeling of the agro-eco-hydrological processes in irrigation district [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [32] 薛景元. 干旱地下水浅埋区基于水盐过程的多尺度农业水分生产力模型与模拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
XUE Jingyuan. Modeling agricultural water productivity at multi-scales based on water and salt processes in arid area with shallow groundwater[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [33] 刘静, 吴普特, 王玉宝, 等. 河套灌区粮食水足迹与虚拟水净输出时空演变[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(5): 435 – 440.
LIU Jing, WU Pute, WANG Yubao, et al. Temporal and spatial variation of grain production water footprint and net virtual water export in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(5): 435 – 440. (in Chinese)
- [34] 刘巍, 李雨晴, 付强, 等. 黑龙江省粮食水足迹时空分布规律与影响因素分析[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 214 – 222,335.
LIU Wei, LI Yuqing, FU Qiang, et al. Spatial and temporal distribution of crop water footprint and its influence factors analysis in Heilongjiang Province[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 214 – 222,335. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200824&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.024. (in Chinese)
- [35] SONG G, DAI C, TAN Q, et al. Agricultural water management model based on grey water footprints under uncertainty and its application[J]. Sustainability, 2019, 11(20): 5567.
- [36] 岳琼, 郭萍, 王友芝, 等. 基于区间两阶段模糊可信性约束模型的灌区水资源配置[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 228 – 235.
YUE Qiong, GUO Ping, WANG Youzhi, et al. Optimal water allocation of irrigation district based on interval-parameter two-stage stochastic fuzzy credibility constrained programming [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 228 – 235. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190426&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.026. (in Chinese)
- [37] 孙世坤, 刘文艳, 刘静, 等. 河套灌区春小麦生产水足迹影响因子敏感性及其贡献率分析[J]. 中国农业科学, 2016, 49(14): 2751 – 2762.
SUN Shikun, LIU Wenyan, LIU Jing, et al. Sensitivity and contribution rate analysis of the influencing factors of spring wheat water footprint in Hetao Irrigation District[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(14): 2751 – 2762. (in Chinese)
- [38] 吴梦洋, 操信春, 任杰. 灌排模式对稻田作物水足迹的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 256 – 262.
WU Mengyang, CAO Xinchun, REN Jie. Effects of irrigation and drainage modes on crop water footprint in rice production[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 256 – 262. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210129&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.029. (in Chinese)

(上接第 335 页)

- [27] 孙永健, 孙园园, 蒋明金, 等. 施肥水平对不同氮效率水稻氮素利用特征及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(24): 4745 – 4756.
SUN Yongjian, SUN Yuanyuan, JIANG Mingjin, et al. Effects of fertilizer levels on nitrogen utilization characteristics and yield in rice cultivars with different nitrogen use efficiencies[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(24): 4745 – 4756. (in Chinese)
- [28] 蔡甲冰, 常宏芳, 陈鹤, 等. 基于不同有效积温的玉米干物质累积量模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 263 – 271.
CAI Jiabing, CHANG Hongfang, CHEN He, et al. Simulation of maize dry matter accumulation in normalized Logistic model with different effective accumulated temperatures in field [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 263 – 271. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200529&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.029. (in Chinese)
- [29] 侯云鹏, 韩立国, 孔丽丽, 等. 不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 836 – 845.
HOU Yunpeng, HAN Liguang, KONG Lili, et al. Nutrient absorption, translocation in rice and soil nitrogen equilibrium under different nitrogen application doses[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(4): 836 – 845. (in Chinese)
- [30] AMPONG-NYARKO K, DATTA S. Effects of nitrogen application on growth, nitrogen use efficiency and rice-weed interaction [J]. Weed Research, 2010, 33(3): 269 – 276.
- [31] BELDER P, BOUMAN B A M, CABANGON R, et al. Effect of water saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia[J]. Agricultural Water Management, 2004, 65(3): 193 – 210.