

基于水足迹理论和多目标模糊规划的粮食作物种植结构优化和农业用水管理研究——以汉江流域为例

涂家婷, 周敏* (华中科技大学公共管理学院, 湖北武汉 430074)

摘要 采用系统分析的方法, 将水足迹理论、模糊机会约束规划(FCCP)和多目标规划模型(MOPM)整合到一个多目标模糊规划框架中, 用于优化作物种植结构和农业用水管理, 并分析其在不同可信度的有效性。该优化框架被应用于汉江流域, 结果表明(在 $\gamma=0.55$), 在汉江流域内, 中部和东南部地区宜种植更多水稻, 大部分地区宜减少小麦和玉米的种植面积; 汉江流域内作物种植的经济效益将增加39%。中部和南部地区的绿色和蓝色水足迹将增加, 西北部地区的灰色水足迹将减少; 汉江流域内水生产力将提高12%, 灰水足迹将减少11%; 在不同的可信度水平下, 优化的作物种植结构都可以有效地实现经济、水生产力和污染控制目标, 帮助汉江流域实现更好的农业水资源管理, 促进农业生产的可持续发展。

关键词 水足迹理论; 模糊机会约束规划; 多目标规划模型; 作物种植结构优化; 农业用水管理

中图分类号 S274 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)11-0187-07

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.11.048

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Optimization of Crop Planting Structure and Agricultural Water Management Based on Water Footprint Theory and Multi-objective Fuzzy Programming —Taking Hanjiang River Basin as an Example

TU Jia-ting, ZHOU Min (College of Public Administration, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074)

Abstract Using a systematic analysis method, the water footprint theory, fuzzy chance-constrained programming (FCCP) and multi-objective programming model (MOPM) are integrated into a multi-objective fuzzy programming framework for optimizing crop planting structure and agricultural water management, and analyzing their effectiveness at different levels of confidence. The optimization framework was applied to Hanjiang River Basin, and the results showed that (at $\gamma = 0.55$), in the Hanjiang River Basin, more rice would need to be planted in the central and southeastern regions, and less wheat and maize would need to be planted in most regions. The economic benefits of crop cultivation in Hanjiang River Basin would increase by 39%. The green and blue water footprints would increase in the central and southern regions, and the gray water footprint would decrease in the northwestern region. Water productivity would increase by 12% and the grey water pollution would decrease by 11%. At different credibility levels, optimized crop planting structures were effective in achieving economic, water productivity and pollution control objectives, helping Hanjiang River Basin to achieve better agricultural water management and promote sustainable agricultural production.

Key words Water footprint theory; Fuzzy chance-constrained programming; Multi-objective programming model; Crop planting pattern optimization; Agricultural water management

农业用水是全世界水资源消耗的主要原因, 占全球淡水总量的70%左右^[1]。水资源短缺是近期全球粮食生产的主要问题之一, 已被证明限制了粮食作物生产^[2]和地区的可持续发展^[3-4]。水资源的合理利用和粮食安全是我国社会可持续发展的最基本支撑^[5]。然而, 人类活动消耗和污染了大量的农业用水, 这显然阻碍了农业的可持续发展和国家粮食安全^[6]。因此, 改善农业用水管理迫在眉睫。其中一个有效方法是优化作物种植结构, 这有助于农业节水和更合理地利用农业用水。

近年来, 许多研究采用各种数学模型来优化不同流域的作物种植结构和水资源管理^[6-8], 这些研究往往侧重于物理水(地表水和地下水)的概念, 很少将水足迹(WF)理论与优化模型相结合。水足迹(又称为虚拟水)的概念最早由Hoekstra^[9]提出, 为实现水资源的可持续利用提供了新角度。在农业系统中, 虚拟水是指生产农产品(包括农作物和牲畜产品)所消耗的水, 分别由绿水、蓝水和灰水组成。水足迹作为一个有效工具, 可用于缓解水资源短缺和提高用水效率^[10-11], 为政府和相关机构制定水资源管理战略提供参

考^[12], 对于提高全球的节水意识、应对水资源危机具有重要作用^[13]。近年来, 作物种植结构模型主要集中在多目标优化模型^[14-16], 如陈守煜等^[14]提出了作物种植结构优化的多目标模糊优化模型。后来, 有学者将水足迹理论与多目标规划模型(MOPM)相结合, 以优化作物种植结构和水资源分配, 如Su等^[10]将虚拟作物含水量细分为蓝水和绿水, 并建立了农业水资源MOPM, 以实现石羊河流域水资源的合理配置。尽管国内外学者在利用水足迹理论优化作物种植结构和水资源管理方面取得了一些进展, 但由于计算方法和地区的差异, 仍有一些尚未解决的限制。首先, 一些研究中的MOPM通常通过非主导排序遗传算法II(NSGA-II)生成帕累托前沿^[17]来求解。但是, 客观权重和方案的选择受到决策者主观偏好的影响^[18], 很可能导致系统优化结果与实际情况不一致。因此, 有必要考虑咨询对区域情况相当熟悉的专家, 采用德尔菲法^[19]来确定区域未来最可能的发展方案, 确定各个目标权重, 将多个目标权重转换为单一目标的加权和来解决^[10]。其次, 以往的MOPM多为确定性模型, 无法处理实际情况下与优化系统相关的不确定性, 如确定蓝、灰水足迹的预期减少率。为了解决这些问题, 可引入模糊机会约束规划(FCCP)。它可以通过引入可信度的概念来描述优化系统中的模糊性^[20], 并有效反映参数的概率分布^[21]。近年来, FCCP被用来帮助分析农业系统的不确定

作者简介 涂家婷(1999—), 女, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 研究方向: 土地利用优化配置、能源系统优化。*通信作者, 副教授, 硕士生导师, 从事土地利用优化配置、城市土地利用研究。

收稿日期 2021-09-14

性,如在灌溉期的水资源需求^[6]、污染负荷能力^[22]和水足迹损失^[18]。然而,很少有研究从水足迹角度,将 MOPM 和 FCCP 结合起来优化作物种植结构和农业用水管理。因此,该研究以汉江流域为典型案例,将 FCCP 和 MOPM 整合到基于水足迹理论的优化框架中,提出多目标模糊规划模型(MOFPM),用于寻找最佳作物种植结构,持续优化农业用水管理,实现农业生产系统的经济目标、水生产力目标和污染控制目标,以期为指导农业用水管理和调整作物种植结构提供建议。

1 资料与方法

1.1 研究区域概况 汉江是长江的最大支流,它流经陕西、

河南和湖北 3 省,全长约 1 577 km。汉江流域(106°12'~114°35'E,30°06'~34°23'N)位于我国中部地区,地势西高东低,被江汉平原和山脉包围,流域面积为 15.9×10⁴ km²。具有明显的亚热带季风气候特征,气候温和湿润,流域内降水丰富,年平均降水量在 800~1 000 mm。同时,汉江流域是我国南水北调工程的水源地,承担着陕西、河南和湖北三省的灌溉、航运和供水的多重责任。汉江流域的支流分布广泛,湖泊众多,是长江流域的主要粮食产区,主要粮食作物为水稻、小麦和玉米,也是研究地区生态用水需求的典型地区。基于此,该研究以汉江流域所辖的 17 个地区为研究区域(图 1),以水稻、小麦和玉米 3 种粮食作物为研究对象。

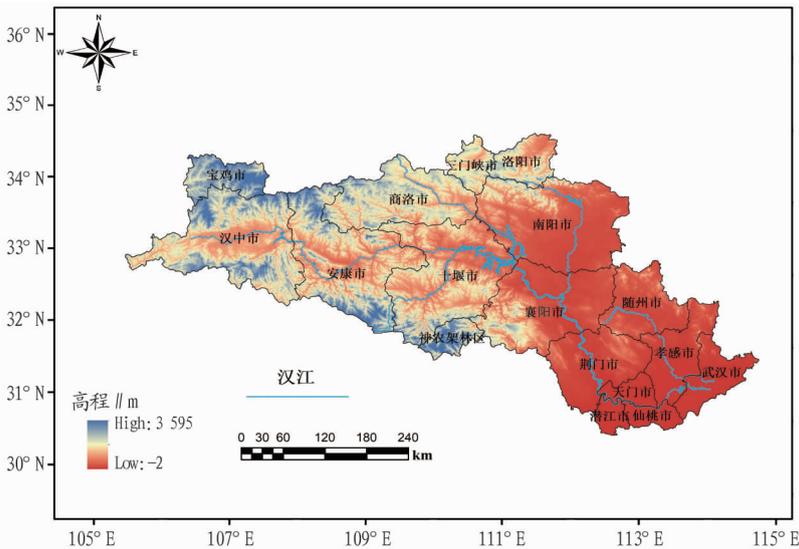


图 1 汉江流域地理位置及 17 个地区

Fig. 1 The geographical location and 17 districts of the Hanjiang River Basin

1.2 数据来源处理 该研究所需的数据主要包括基础数据、气象数据、作物相关数据。数据来源如表 1 所示。

表 1 研究所需数据及其来源

Table 1 Data required for this study and its sources

数据类型 Data type	数据名称 Data name	数据来源 Data source
基础数据 Basic data	常住人口、可耕种面积、农作物单位产量	湖北省统计局(http://tjj.hubei.gov.cn/)、河南省统计局(http://www.ha.stats.gov.cn/)、陕西省统计局(http://tjj.shaanxi.gov.cn/)提供的 2019 年数据
气象数据 Meteorological data	日降雨量、日温度数据	国家海洋和大气管理局(https://www.noaa.gov/),包括日降雨量、日最高温度、日最低温度、日平均温度
作物相关数据 Crop-related data	作物生育期、作物系数 单位价格、成本 单位施氮量	联合国粮农组织标准(http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e0b.htm) 《中国农村统计年鉴》(http://www.stats.gov.cn/) 国家统计局(http://www.stats.gov.cn/)

1.3 研究方法

1.3.1 优化框架构建。为了优化水资源管理和作物种植结构,首先,应明确界定和计算作物水足迹的组成部分,以方便建立和计算优化模型及约束条件;其次,将多目标规划模型(MOPM)和模糊机会约束规划(FCCP)纳入基于水足迹理论的优化框架中;最后,找到合适的方法来求解模型。该方法的框架如图 2 所示。

1.3.2 作物水足迹计算。种植作物的水足迹(WF)可以根据 Hoekstra 等^[23]提出的方法分为绿水、蓝水和灰水足迹,具

体计算公式如下^[24]:

$$WF = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{grey} \quad (1)$$

$$WF_{green} = \frac{10 \times ET_{green}}{Y} \quad (2)$$

$$WF_{blue} = \frac{10 \times ET_{blue}}{Y} \quad (3)$$

$$WF_{grey} = \frac{\theta \times N}{Y(C_{max} - C_n)} \quad (4)$$

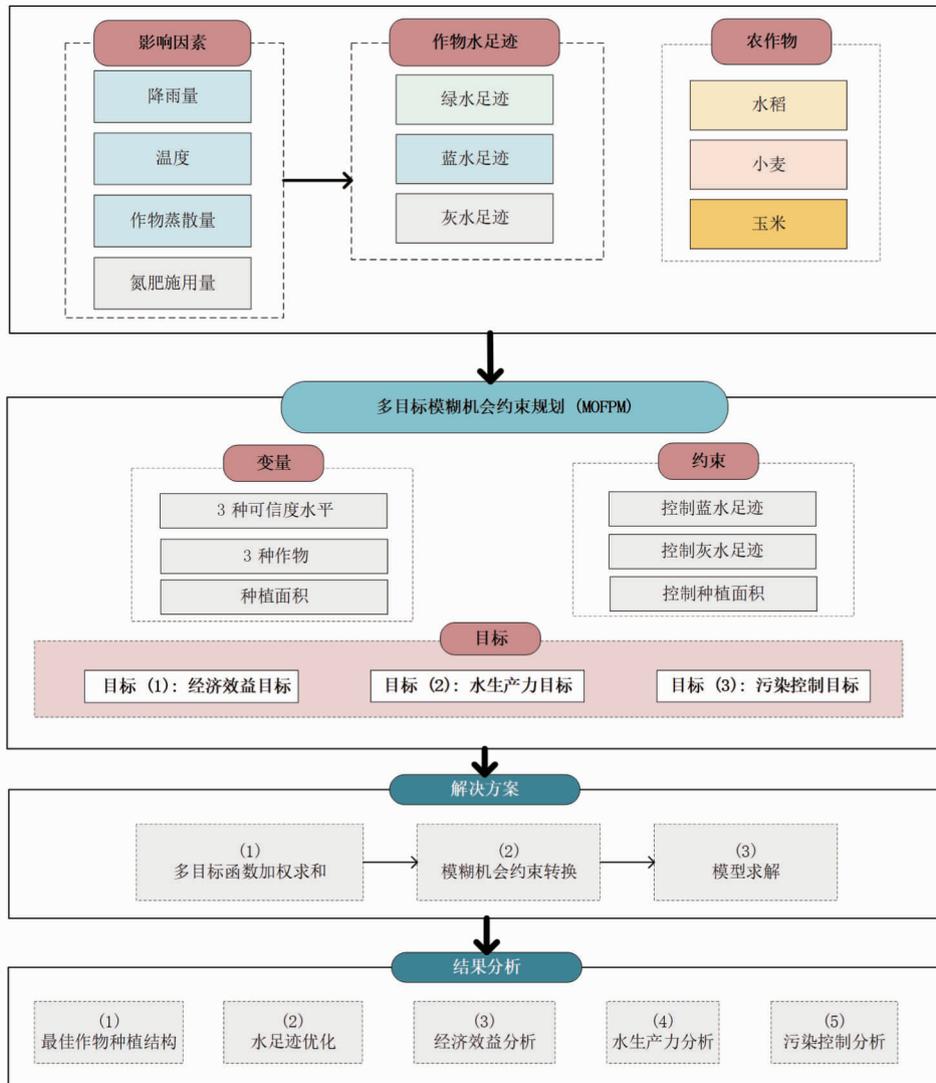


图 2 优化框架

Fig. 2 Optimization framework

式中, WF_{green} 为绿色水足迹, 定义为土壤中储存的雨水中蒸发的水量 (m^3/kg); WF_{blue} 为蓝色水足迹, 定义为从可用地表水和地下水中蒸发的水量 (m^3/kg)^[25-26]; WF_{grey} 为灰色水足迹, 表示作物生长阶段与化肥使用相关的污染水量 (m^3/kg)^[27]; 10 用于将 mm 转化为 m^3/hm^2 ; ET_{green} 和 ET_{blue} 分别为作物生长期期间绿水和蓝水蒸散量的累积值 (mm); Y 为单位作物产量 (kg/hm^2); θ 为氮肥的淋溶率 (氮肥污染量进入水体量中占总施用量比例); N 为单位氮肥施用量 (kg/hm^2), 可设为 $0.1 kg/hm^2$ ^[28]; C_{max} 为氮的最大可接受浓度 (mg/L), 可设为 $10 mg/L$ ^[29]; C_n 为氮的自然浓度 (mg/L), 可设为 0 ^[23]。

作物的绿水蒸散量 ET_{green} 和蓝水蒸散量 ET_{blue} 计算公式如下^[10,30]:

$$ET_{green} = \min(ET_c, P_e) \quad (5)$$

$$ET_{blue} = \max(0, ET_c - P_e) \quad (6)$$

式中, P_e 和 ET_c 是作物生长期间的有效降水和实际作物蒸散量 (mm); P_e 可以根据美国农业部土壤保护局 (USDA-SCS)

的方法估算^[31], ET_c 可以通过确定作物系数^[32] 和参考作物蒸散量^[32-33] 来计算。

1.3.3 作物种植结构优化模型。 农业系统优化的目标和约束条件是多样的, 其中目标包括经济目标、水生产力目标和污染控制目标。具体被表述为:

(1) 农业灌溉水的经济效益最大化。计算公式如下:

$$\max f_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [x_{ij} y_{ij} (P_j - C_j)] \quad (7)$$

式中, f_1 是种植作物的总净收益 (元); x_{ij} (即决策变量) 是作物在地区的种植面积 (hm^2); i 是地区, $i=1, 2, \dots, m$, m 是流域内总的地区数; j 是作物类型, $j=1, 2, \dots, n$, n 是作物类型总数; y_{ij} 是 j 作物在 i 区域的产量 (kg/hm^2); P_j 和 C_j 分别是 j 作物的单位价格和成本 (元/kg)。

(2) 绿水和蓝水的水生产力最大化。水生产力目标是最大化绿水和蓝水的水生产力 (kg/m^3), 其定义为流域内作物总产量除以作物生产实际消耗的蓝水和绿水的蒸散量之和^[34], 公式如下:

$$\max f_2 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} y_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} y_{ij} (WF_{green, ij} + WF_{blue, ij})} \quad (8)$$

(3) 灰水足迹最小化。污染控制的目标是尽量减少灰水足迹。灰水足迹最小化计算公式如下:

$$\min f_3 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} y_{ij} WF_{grey,ij} \quad (9)$$

式中, $WF_{green,ij}$ 、 $WF_{blue,ij}$ 、 $WF_{grey,ij}$ 分别是 j 作物在 i 区域绿色、蓝色和灰色水足迹 (m^3/kg)。

(4) 水足迹成分约束。该研究中为减少水足迹所做的改进是限制地下水(即蓝水)和含氮肥料的使用。该研究设计了 2 个模糊数 $\tilde{\alpha}_{blue}$ 和 $\tilde{\alpha}_{grey}$ 来表示蓝水足迹和灰水足迹的预期减少率。另外,由于汉江流域降水相对充足,绿水足迹的控制可以相对宽松。计算公式如下:

$$Cr \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} y_{ij} WF_{blue,ij}}{TW'_{blue}} \geq \tilde{\alpha}_{blue} \right\} \geq \gamma \quad (10)$$

$$Cr \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} y_{ij} WF_{grey,ij}}{TW'_{grey}} \geq \tilde{\alpha}_{grey} \right\} \geq \gamma \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} y_{ij} WF_{green,ij} \geq TW'_{green} \quad (12)$$

式中, TW'_{green} 、 TW'_{blue} 和 TW'_{grey} 分别为所有地区优化前种植作物的总绿色、蓝水和灰水足迹 (m^3); Cr 和 γ 分别指模糊事件发生的可信度^[20]和预设的阈值。

(5) 种植面积约束。此外,还需要考虑与决策变量直接相关的约束条件:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq A_i \quad (13)$$

$$x_{min,ij} \leq x_{ij} \leq x_{max,ij} \quad (14)$$

式中, A_i 为有效种植面积; $x_{min,ij}$ 表示 j 作物在 i 地区的最小耕种面积 (hm^2), $x_{max,ij}$ 表示 j 作物在 i 地区的最大耕种面积 (hm^2)。

1.3.4 多目标模糊规划求解方法。

(1) 多目标函数转化为单一目标。通过引入一个辅助函数将多目标决策问题通过加权求和转化为一个单一的目标函数,具体公式如下:

$$\max f = \sum_{i=1}^k \mu_i f_i(x) \quad (15)$$

$$\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = 1 \quad (16)$$

式中, μ_1 、 μ_2 、 μ_3 分别是经济目标、水生产力目标和污染控制目标的权重,通过德尔菲法^[19]确定。

(2) 模糊机会约束转换。在该研究中,定义的 2 个模糊参数 $\tilde{\alpha}_{blue}$ 和 $\tilde{\alpha}_{grey}$ 分别由集合 $(\underline{\alpha}_{blue}, \alpha_{blue}, \bar{\alpha}_{blue})$ 、 $(\underline{\alpha}_{grey}, \alpha_{grey}, \bar{\alpha}_{grey})$ 描述的三角形模糊集合,其中 $\underline{\alpha}_{blue} < \alpha_{blue} < \bar{\alpha}_{blue}$, $\underline{\alpha}_{grey} <$

$\alpha_{grey} < \bar{\alpha}_{grey}$ 。基于 FCCP 的算法^[18,35],模糊机会约束可以转换为:

$$\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} y_{ij} WF_{blue,ij}}{TW'_{blue}} \leq (1 - \alpha_{blue}) + (1 - 2\gamma)(\bar{\alpha}_{blue} - \alpha_{blue}) \quad (17)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} y_{ij} WF_{grey,ij}}{TW'_{grey}} \leq (1 - \alpha_{grey}) + (1 - 2\gamma)(\bar{\alpha}_{grey} - \alpha_{grey}) \quad (18)$$

表 2 为预设的三角模糊集的模糊参数的参考值。

表 2 模糊参数设置

Table 2 Fuzzy parameters setting

模糊参数 Fuzzy parameter	描述 Description	三角集 Triangular set
$\tilde{\alpha}_{blue}$	蓝水足迹预期减少率	(0, 2.5%, 5.0%)
$\tilde{\alpha}_{grey}$	灰水足迹预期减少率	(5%, 10%, 15%)

(3) 模型求解。最后,单目标优化模型可以用 LINGO 18.0 来求解。LINGO 易于输入、求解和分析数学规划问题,可以直接输入单一加权目标函数和相关约束条件求解全局和局部最优解。

2 结果与分析

2.1 作物种植结构优化 该研究选择了 3 个可信度水平 γ (0.55、0.75、0.95) 来进行优化计算。在咨询农村土地规划、农学和生态学领域专家的基础上,确定多目标优化方案为平衡协调经济效益、农业用水效率和污染控制,多目标的权重分别为 0.33、0.33、0.33。

表 3 显示了现有作物种植结构和在 3 个不同可信度水平下 17 个地区的 3 种优化作物种植结构。现有最大的小麦、玉米种植面积位于南阳;最小的小麦、玉米种植面积则分布在神农架。经过优化 ($\gamma = 0.55$),小麦和玉米的最大种植区域将保持不变,水稻的最大种植区域将从孝感变为南阳。这意味着种植水稻的最佳地点可能是南阳。此外,不同可信度水平将导致最佳作物种植结构之间的一些差异。例如,在较低的可信度水平 $\gamma = 0.55$ 时,襄阳市水稻和小麦的最优种植面积分别为 494.06×10^3 和 $180.96 \times 10^3 \text{ hm}^2$;当可信度水平变为 0.75 时,最优种植面积将分别为 439.80×10^3 和 $235.22 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 。

表 3 现有种植结构和不同可信度 γ 水平下的最佳作物种植结构

Table 3 The existing and optimal crop planting pattern under different credibility levels

$\times 10^3 \text{ hm}^2$

省份 Province	城市 City	现有 Existing			$\gamma = 0.55$			$\gamma = 0.75$			$\gamma = 0.95$		
		水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Corn	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Corn	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Corn	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Corn
湖北 Hubei	十堰	26.99	56.76	74.74	92.74	28.38	37.37	92.74	28.38	37.37	92.74	28.38	37.37
	襄阳	200.47	361.92	225.26	494.06	180.96	112.63	439.80	235.22	112.63	299.50	375.52	112.63
	荆门	192.47	120.80	38.62	272.18	60.40	19.31	272.18	60.40	19.31	272.18	60.40	19.31
	孝感	366.35	104.60	9.92	369.01	52.30	4.96	183.18	84.55	4.96	183.18	52.30	4.96
	武汉	83.77	7.91	15.51	95.48	3.95	7.76	95.48	3.95	7.76	95.48	3.95	7.76
	随州	130.12	70.87	13.07	172.09	35.44	6.54	172.09	35.44	6.54	172.09	35.44	6.54
	仙桃	58.93	26.34	11.71	77.95	13.17	5.85	77.95	13.17	5.85	77.95	13.17	5.85

接下表

续表 1

省份 Province	城市 City	现有 Existing			$\gamma = 0.55$			$\gamma = 0.75$			$\gamma = 0.95$		
		水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Corn	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Corn	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Corn	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Corn
	潜江	59.06	36.65	2.42	78.59	18.32	1.21	78.59	18.32	1.21	78.59	18.32	1.21
	天门	58.57	47.82	4.73	84.84	23.91	2.36	84.84	23.91	2.36	84.84	23.91	2.36
	神农架	0.06	0.27	2.22	1.30	0.14	1.11	0.03	1.41	1.11	0.03	1.41	1.11
陕西 Shaanxi	汉中	69.59	38.99	65.85	34.79	19.49	32.93	34.79	19.49	32.93	34.79	19.49	32.93
	安康	28.92	47.05	80.28	14.46	23.53	40.14	14.46	23.53	40.14	14.46	23.53	40.14
	商洛	0.31	43.22	61.89	0.15	21.61	30.95	0.15	21.61	30.95	0.15	21.61	30.95
河南 Henan	宝鸡	0.05	59.20	39.08	0.02	29.60	19.54	49.19	29.60	19.54	13.65	29.60	19.54
	三门峡	0.60	28.37	20.83	25.20	14.18	10.42	25.20	14.18	10.42	25.20	14.18	10.42
	南阳	33.98	657.55	386.06	555.79	328.78	193.03	555.79	328.78	193.03	659.71	224.85	193.03
	洛阳	0.60	89.81	66.18	78.59	44.91	33.09	78.59	44.91	33.09	78.59	44.91	33.09

结合图 1,从整个流域的角度来看,为了优化现有的作物种植结构(在可信度为 0.55 的水平下),需要在流域中部和东南部地区种植更多的水稻,而在西部地区则需要减少水稻种植面积;总体而言,建议增加水稻的种植面积。几乎所有地区都需要减少小麦和玉米的种植面积。这主要是因为种植水稻的单位效益(0.74 元/kg)高于种植小麦(0.47 元/kg)和玉米(0.07 元/kg),增加水稻的种植面积可以获得更好的经济效益。

从不同可信度条件下优化前后流域内的作物总种植面积(图 3)可以看出,在不同可信度条件下,种植结构调整思路相似,即都建议减少小麦和玉米的总种植面积,增加水稻的总种植面积,这与表 3 的结果一致。同时发现,当可信度水平从 0.55 逐渐提高到 0.95 时,水稻的种植面积将减少,而小麦的种植面积将增加,玉米的种植面积将保持不变;这是由于种植结构的改变与模糊约束的可信度水平相对应,也意味着模糊约束可以在不同程度上得到满足。

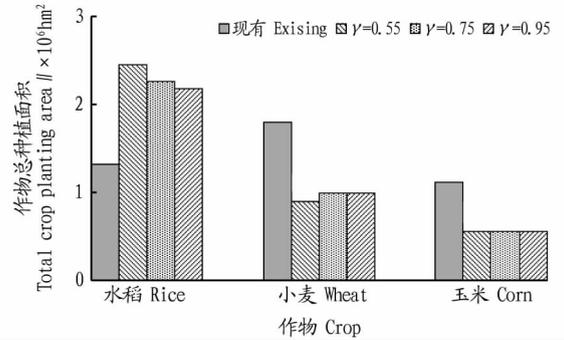


图 3 流域内现有作物种植总面积与不同可信度 γ 水平下作物种植总面积

Fig. 3 The total area of existing and optimal crop planting pattern under different credibility levels

2.2 水足迹优化 表 4 显示了优化前后绿色、蓝色、灰色水足迹($\gamma=0.55$)。不同地区的水足迹变化差异受每个地区的作物产量、蒸散量、降雨量和氮肥施用量的影响。

表 4 不同可信度 γ 水平优化前后的水足迹

Table 4 Water footprint before and after optimization with different credibility levels

×10⁷ m³

省份 Province	城市 City	现有 Existing			$\gamma=0.55$			
		绿水足迹 WF _{green}	蓝水足迹 WF _{blue}	灰水足迹 WF _{grey}	绿水足迹 WF _{green}	蓝水足迹 WF _{blue}	灰水足迹 WF _{grey}	
湖北 Hubei	十堰	28.27	33.51	69.60	31.99	36.63	69.60	
	襄阳	164.77	168.02	345.91	171.12	182.79	345.91	
	荆门	80.10	79.89	154.54	79.69	84.08	154.54	
	孝感	112.30	114.33	211.18	67.89	70.23	128.48	
	武汉	22.41	25.81	47.08	23.28	26.35	47.08	
	随州	50.03	49.17	94.01	49.13	51.43	94.01	
	仙桃	21.57	22.37	42.59	21.71	23.34	42.59	
	潜江	23.64	22.45	43.09	22.88	23.53	43.09	
陕西 Shaanxi	天门	26.82	24.99	48.80	25.93	26.43	48.80	
	神农架	0.28	0.53	1.12	0.43	0.59	1.12	
	汉中	47.69	14.80	124.28	23.85	7.40	62.14	
	安康	42.36	13.45	111.33	21.18	6.72	55.67	
	商洛	24.52	9.67	75.11	12.26	4.83	37.56	
	宝鸡	22.48	14.16	70.06	31.39	13.24	70.06	
	河南 Henan	三门峡	8.56	12.16	20.77	10.83	12.77	20.77
		南阳	226.84	233.04	449.54	301.88	214.58	449.54
洛阳		26.90	38.06	65.32	34.14	39.98	65.32	

结合图 1 和表 4 可知,绿色、蓝色和灰色水足迹多分布

在东南地区,最大值均分布在南阳。优化后,中部和南部地

区的绿水和蓝水有增加趋势,西部和东南部的绿水和蓝水有减少趋势,西北部的灰水明显减少。从总量变化来看,流域内绿水总量略有增加,蓝水和灰水明显减少。这意味着如果在汉江流域采用最佳的作物种植结构,水足迹的分布将得到调整,并实现更可持续的作物生产,因为将会利用更多雨水,消耗更少淡水,产生更少污水,并将获得更高的经济效益和水生产力。

2.3 系统目标优化 从优化前后系统目标的经济效益、水生产力、灰色水足迹的比较(图4)可以看出,在0.55、0.75、0.95的可信度下,作物种植的经济效益分别为 1.63×10^7 、 1.55×10^7 、 1.50×10^7 元,分别比现有经济效益提高39%、32%、28%;水生产力分别为1.45、1.44、1.43 kg/m³,分别比

现有水生产力提高12%、11%、10%;灰水足迹分别为 1.76×10^7 、 1.73×10^7 、 1.69×10^7 m³,分别比现有灰水足迹低11%、12%和14%。这表明优化后的种植结构可以有效提高水生产力,带来更好的生产效益,同时,可以有效控制农业生产中的污染,有利于农业的可持续生产和发展。需要注意的是,当可信度从0.55提高到0.95时,水生产力和灰水足迹都有下降,这是因为较高的可信度会导致对模糊约束更加严格,从而导致可行的决策减少;相反,较低的可信度意味着更多可容忍的约束,这将有助于实现更好的系统目标。这也反映了模型求解时在实现预期水生产力目标和违反模糊约束的风险之间的权衡。

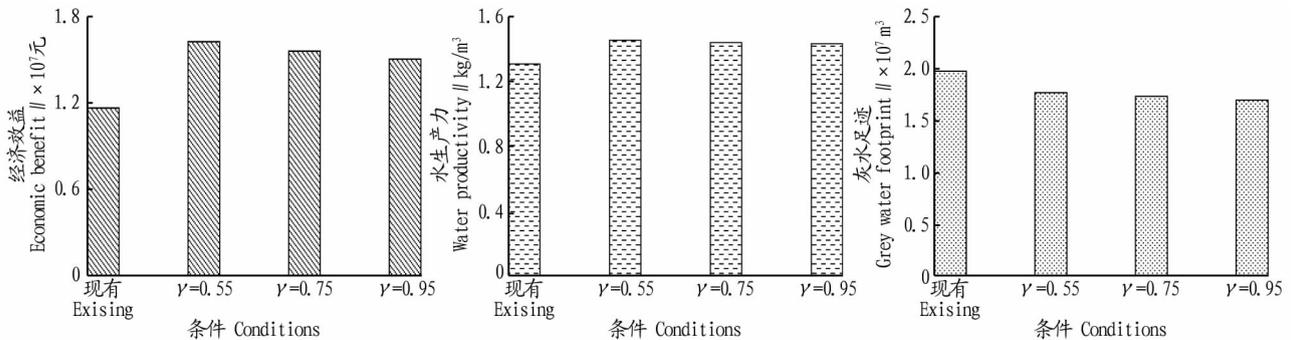


图4 现有和优化后系统目标的比较

Fig. 4 Comparison of existing and optimized system objectives

3 结论与讨论

该研究的主要贡献是通过整合水足迹理论、模糊机会约束规划(FCCP)和多目标规划模型(MOPM),建立了一个多目标模糊规划框架,用于优化农业用水管理和农作物种植结构。在该优化框架被应用于我国汉江流域,优化后得出以下结论:

(1)流域中部和东南部地区需要种植更多的水稻;几乎所有地区都需要减少小麦和玉米的种植面积。

(2)中部和南部地区的绿水和蓝水足迹有增加趋势,西部和东南部地区的绿水和蓝水有减少趋势,西北地区的灰水明显减少,而其他地区保持不变。这表明汉江流域的最佳作物种植结构将调整水足迹的分布,使得利用更多的雨水,产生更少的农业水污染,更好地实现清洁生产,促进农业生产的可持续发展。

(3)在不同的可信度下,都可以有效地实现经济、水生产力和污染控制目标。当可信度从0.55增加到0.95时,作物种植的经济效益分别为 1.63×10^7 、 1.55×10^7 、 1.50×10^7 元,分别比现有经济效益提高39%、32%、28%;水生产力分别为1.45、1.44、1.43 kg/m³,分别比现有水生产力提高12%、11%、10%;灰水足迹分别为 1.76×10^7 、 1.73×10^7 、 1.69×10^7 m³,分别比现有灰水足迹低11%、12%和14%。

综上所述,该研究的优化框架是寻找最佳作物种植结构和水资源可持续优化管理的有效方法,优化后流域内农业生产的经济效益和水生产力显著提高,农业水污染明显减少。

汉江流域是长江流域的主要产粮区,由于人口的快速增

长以及当地经济和城市化的快速发展,对水和粮食的需求不断扩大,水资源配置与农作物种植模式之间的矛盾大大增加。通过改变作物种植模式可以有效提高水的生产力和控制污染,帮助汉江流域实现更好的农业水资源管理,促进农业生产的可持续发展。实际在进行农作物种植结构调整时,系统优化的目标及目标权重都会受市场、决策者偏好、自然因素、政策等多重影响,在今后的研究中将深入探讨以上相关因素的影响及内在联系。

参考文献

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The Water-Energy-Food Nexus: A new approach in support of food security and sustainable agriculture[R]. Rome:FAO,2014.
- [2] WU J J,LIU M,LIU A,et al. The variation of the water deficit during the winter wheat growing season and its impact on crop yield in the North China Plain[J]. International journal of biometeorology,2014,58(9):1951-1960.
- [3] ZHAO X,LIU J G,LIU Q Y,et al. Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in China[J]. Proceedings of the national academy of sciences,2015,112(4):1031-1035.
- [4] LIU J G,YANG W. Water sustainability for China and beyond[J]. Science,2012,337(6095):649-650.
- [5] ZHANG X D,VESELINOV V V. Integrated modeling approach for optimal management of water,energy and food security nexus[J]. Advances in water resources,2017,101:1-10.
- [6] LU H W,DU P,CHEN Y Z,et al. A credibility-based chance-constrained optimization model for integrated agricultural and water resources management: A case study in South Central China[J]. Journal of hydrology,2016,537:408-418.
- [7] ZHANG D M,GUO P. Integrated agriculture water management optimization model for water saving potential analysis[J]. Agricultural water management,2016,170(S1):5-19.
- [8] ZHANG C L,ENGEL B A,GUO P,et al. An inexact robust two-stage

- mixed-integer linear programming approach for crop area planning under uncertainty[J]. *Journal of cleaner production*, 2018, 204: 489–500.
- [9] HOEKSTRA A Y. Virtual water trade; Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade[R]. Delft, the Netherlands; Value of Water Research Report Series, 2003.
- [10] SU X L, LI J F, SINGH V P. Optimal allocation of agricultural water resources based on virtual water subdivision in Shiyang River Basin[J]. *Water resources management*, 2014, 28(8): 2243–2257.
- [11] FARAMARZI M, YANG H, MOUSAVI J, et al. Analysis of intra-country virtual water trade strategy to alleviate water scarcity in Iran[J]. *Hydrology and earth system sciences*, 2010, 14(8): 1417–1433.
- [12] ERCIN A E, HOEKSTRA A Y. Water footprint scenarios for 2050: A global analysis[J]. *Environment international*, 2014, 64: 71–82.
- [13] 孙世坤, 王玉宝, 刘静, 等. 中国主要粮食作物的生产水足迹量化及评价[J]. *水利学报*, 2016, 47(9): 1115–1124.
- [14] 陈守煜, 马建琴, 张振伟. 作物种植结构多目标模糊优化模型与方法[J]. *大连理工大学学报*, 2003, 43(1): 12–15.
- [15] 张端梅, 梁秀娟, 李钦伟, 等. 灌区多目标种植结构优化模型研究[J]. *人民黄河*, 2013, 35(1): 91–93.
- [16] 周惠成, 彭慧, 张弛, 等. 基于水资源合理利用的多目标农作物种植结构调整与评价[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(9): 45–49.
- [17] SEDGHAMIZ A, NIKOO M R, HEIDARPOUR M, et al. Developing a non-cooperative optimization model for water and crop area allocation based on leader-follower game[J]. *Journal of hydrology*, 2018, 567: 51–59.
- [18] 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/OL]. *Journal of cleaner production*, 2021, 278 [2021-04-27]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123196>.
- [19] DALKEY N, HELMER O. An experimental application of the DELPHI method to the use of experts[J]. *Management science*, 1963, 9(3): 458–467.
- [20] HUANG X X. Credibility-based chance-constrained integer programming models for capital budgeting with fuzzy parameters[J]. *Information sciences*, 2006, 176(18): 2698–2712.
- [21] ZHU H, HUANG G H. SLFP: A stochastic linear fractional programming approach for sustainable waste management[J]. *Waste management*, 2011, 31(12): 2612–2619.
- [22] DAI C, QIN X S, TAN Q, et al. Optimizing best management practices for nutrient pollution control in a lake watershed under uncertainty[J]. *Ecological indicators*, 2018, 92: 288–300.
- [23] HOEKSTRA A, CHAPAGAIN A, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment manual: Setting the global standard[M]. London, UK: Earthscan, 2011.
- [24] MALI S S, SINGH D K, SARANGI A, et al. Crop water footprints with special focus on response formulation: The case of Gomti River Basin (India)[J]. *Environmental earth sciences*, 2017, 76(23): 1–13.
- [25] HANASAKI N, KANAE S, OKI T, et al. An integrated model for the assessment of global water resources Part 1: Model description and input meteorological forcing[J]. *Hydrology and earth system sciences*, 2008, 12(4): 1007–1025.
- [26] KONAR M, DALIN C, SUWEIS S, et al. Water for food: The global virtual water trade network[J]. *Water resources research*, 2011, 47(5): 1–17.
- [27] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat[J]. *Hydrology and earth system sciences*, 2010, 14(7): 1259–1276.
- [28] FRANKE N, HOEKSTRA A Y, BOYACIOGLU H. Grey water footprint accounting: Tier 1 supporting guidelines[M]. Delft, the Netherlands; Unesco-IHE Institute for Water Education, 2013.
- [29] MOJTABAVI S A, SHOKOOHI A, RAMEZANI ETEDALI H, et al. Using regional virtual water trade and water footprint accounting for optimizing crop patterns to mitigate water crises in dry regions[J]. *Irrigation and drainage*, 2018, 67(2): 295–305.
- [30] SUN S K, WU P T, WANG Y B, et al. The virtual water content of major grain crops and virtual water flows between regions in China[J]. *Journal of the science of food and agriculture*, 2013, 93(6): 1427–1437.
- [31] ZHANG Y, HUANG K, YU Y J, et al. Impact of climate change and drought regime on water footprint of crop production: The case of Lake Dianchi Basin, China[J]. *Natural hazards*, 2015, 79(1): 549–566.
- [32] ALLAN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper, 1998.
- [33] HARGREAVES G H, SAMANI Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature[J]. *Applied engineering in agriculture*, 1985, 1(2): 96–99.
- [34] HUANG F, LI B G. Assessing grain crop water productivity of China using a hydro-model-coupled-statistics approach[J]. *Agricultural water management*, 2010, 97(7): 1077–1092.
- [35] ZHANG Y M, HUANG G H. Optimal water resource planning under fixed budget by interval-parameter credibility constrained programming[J]. *Engineering optimization*, 2011, 43(8): 879–889.

(上接第 177 页)

- [8] PRASAD K, DAS A K, OZA M D, et al. Detection and quantification of some plant growth regulators in a seaweed-based foliar spray employing a mass spectrometric technique sans chromatographic separation[J]. *J Agric Food Chem*, 2010, 58(8): 4594–4601.
- [9] XUE J Y, WANG S L, YOU X W, et al. Multi-residue determination of plant growth regulators in apples and tomatoes by liquid chromatography/tandem mass spectrometry[J]. *Rapid Commun Mass Spectrom*, 2011, 25(21): 3289–3297.
- [10] OULKAR D P, BANERJEE K, KULKARNI S. Multiresidue analysis of plant growth regulators in grapes by triple quadrupole and quadrupole-time of flight-based liquid chromatography/mass spectrometry[J]. *J AOAC Int*, 2011, 94(6): 1715–1721.
- [11] TAN T, LI Z, MAO X J, et al. Deep eutectic solvent-based liquid-phase microextraction for detection of plant growth regulators in edible vegetable oils[J]. *Anal Methods*, 2016, 8(17): 3511–3516.
- [12] LI N, WU D, LI X T, et al. Effective enrichment and detection of plant growth regulators in fruits and vegetables using a novel magnetic covalent organic framework material as the adsorbents[J]. *Food Chem*, 2020, 306: 1–8.
- [13] 吴爱娟, 陈建波. 液相色谱法同时测定水溶性肥料中 4 种植物生长调节剂[J]. *农药科学与管理*, 2013, 34(11): 38–41.
- [14] 姚莎, 陈萌, 湛芳, 等. 肥料中胺鲜酯的气相色谱分析[J]. *云南化工*, 2015, 42(3): 43–45.
- [15] 李珍, 郑义, 段路路, 等. HPLC 法同时测定叶面肥中 4 种植物生长调节剂[J]. *化学试剂*, 2018, 40(3): 231–234.
- [16] 苏本玉, 刘爽, 朱海荣, 等. 气相色谱法测定肥料中 3 种植物生长调节剂含量[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(18): 191–193.
- [17] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 肥料中多种植物生长调节剂的定性筛选 液相色谱-质谱联用法: GB/T 40459—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [18] 姚恬恬, 刘翻, 金鑫, 等. QuEChERS-超高效液相色谱-串联四极杆飞行时间质谱法同时测定果蔬中 19 种植物生长调节剂残留[J]. *分析科学学报*, 2019, 35(5): 543–550.
- [19] 胡胜杰, 李优, 周莹, 等. QuEChERS 法结合液相色谱-串联质谱测定保健食品中 50 种非食用添加剂[J]. *色谱*, 2019, 37(7): 701–711.