doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.034

基于农业可持续发展的锦西灌区灌溉水资源配置研究

许耀文[1]　王一涵[1]　梁冬玲[1]　付　强[1]　周　延[1]　陈晓华[2]
(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 哈尔滨理工大学管理学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探索不确定环境下通过灌溉水资源优化配置方法促进灌区农业的可持续发展,选取黑龙江省锦西灌区为研究区域,以随机规划、多目标规划等方法为基础展开研究。结果表明:优化后不同供水情景下,灌区灌溉总耗水量节约 1.3 ~ 3.9 亿 m^3,灌溉水资源生产力提高 0.85 ~ 1.01 kg/m^3,可促进农业经济效益增长 0.18 ~ 6.90 亿元,且优化后各配水方案中生态配水量控制在 0.4 亿 m^3 以上,降低农业污染物排放量 1.28 ~ 3.13 万 t,灌区农业生产环境显著改善。优化后,不同情景、不同模糊隶属度函数所对应的各灌溉水资源配置方案的经济效益、生态效益、社会效益均存在明显差异,不确定性要素对灌区农业可持续发展影响显著。以农业经济效益、水资源利用均衡性指数、农业水分生产力、农业污染物排放强度、GWP 排放量以及农业水资源利用比率为主要指标,对优化后各配水方案的综合可持续性进行分析,确定各供水情景下的最优配水方案,最优方案的可持续性指数均高于 0.4。最优配水方案可在稳定灌区粮食产量的基础上,有效提高水资源利用效率,改善灌区生态环境,保障灌区农业的可持续发展。

关键词: 水资源优化; 可持续农业; 农业水资源; 不确定性; 随机规划
中图分类号: S274　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)10-0299-11　　**OSID**:

Irrigation Water Resources Allocation in Jinxi Irrigation District Based on Agricultural Sustainability

XU Yaowen[1]　WANG Yihan[1]　LIANG Dongling[1]　FU Qiang[1]　ZHOU Yan[1]　CHEN Xiaohua[2]
(1. *School of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*
2. *School of Management*, *Harbin University of Science and Technology*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: In order to explore the method of promoting the agriculture sustainability in irrigation area under uncertainties through the optimization of irrigation water resources allocation, the methods of stochastic programming and multi-objective programming were used to carry out studies in Jinxi Irrigation Area in Heilongjiang Province and the following results were obtained: based on the optimization, the total irrigation water consumption was saved by 1.3×10^8 m^3 to 3.9×10^8 m^3 and the irrigation water productivity was increased by 0.85 kg/m^3 to 1.01 kg/m^3. At the same time, the agricultural economic benefitswas increased by 1.8×10^7 yuan to 6.9×10^8 yuan. The ecological water allocation was more than 4×10^7 m^3 and the reduction value of agricultural pollutant was 1.28×10^4 ton to 3.13×10^4 ton, therefore, the degree of agricultural sustainability in irrigation areas was improved effectively. Otherwise, the benefits of economic, ecological and social among the optimized irrigation water resources allocation policies had obvious differences which was caused by the influence of uncertain factors on the agriculture sustainability. The comprehensive agriculture sustainability of the optimal water allocation policies was analyzed from the aspects of economics benefits, water resources allocation equity, agricultural water resources productivity, agricultural pollutant intensity, GWP and agricultural water resources utilization ratio. Based on the above analysis, the optimal water allocation scheme under each scenario can be determined. Moreover, the sustainability degrees of optimal scheme were all more than 0.4, which meant that the optimized water resource allocation scheme can effectively enhance agriculture sustainability by

收稿日期: 2020-06-14　修回日期: 2020-07-27
基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2020E005)、黑龙江省博士后面上资助经费项目(LBH-Z17031)、国家自然科学基金杰出青年基金项目(51825901)和教育部人文社科面上项目(18YJAZH147)
作者简介: 许耀文(1983—),男,讲师,博士后,主要从事农业水土资源高效利用研究,E-mail: xuyaowen@neau.edu.cn
通信作者: 付强(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源系统分析研究,E-mail: fuqiang0629@126.com

stabilizing grain yield, improving the efficiency of irrigation and protecting ecological environment in the irrigation areas.

Key words: water resources allocation optimization; agriculture sustainability; agriculture water resources; uncertainty; stochastic programming

0 引言

《全国农业可持续发展规划(2015—2030)》指出,生态环境恶化已成为制约我国农业可持续发展的重要因素,提高农业用水效率、保障农业用水安全及改善农业生态环境是保障农业可持续发展的重要手段[1]。农业系统的可持续效益是生态效益、社会效益及经济效益的综合体现[2]。众多学者对农业可持续发展的相关问题展开了研究[3-9],付强团队[10-16]针对寒地大型灌区农业水资源管理和农业可持续发展等问题进行了深入研究,指出农业水资源管理是影响农业可持续发展的关键要素,科学、合理地优化农业水资源配置结构是改善灌区生态环境、促进灌区农业-生态-经济-社会协调发展的有效途径。

农业水资源优化配置系统是开放性的复杂系统,其系统运行受到众多不确定性因素的影响,如自然环境要素和社会经济要素[17]。因此,将不确定要素量化并引入灌区水资源高效配置的相关研究中,可以有效地提高水资源规划的科学性,降低灌区水资源管理的风险。

黑龙江省锦西灌区是我国重要粮食生产基地,多年来为保障我国粮食安全做出了重要贡献。在灌区大规模农业生产过程中,由于水资源配置结构不合理、水资源利用效率低下所导致的灌区环境污染、林草地面积萎缩等生态问题严重制约了灌区农业、社会经济的发展。同时,由于降雨量、地表径流量等因素的干扰,灌区水资源供给量存在明显的不确定性。在不确定性环境下优化灌区农业水资源配置结构、提高灌区农业可持续发展程度已成为当地亟待解决的问题,相关研究对提高锦西灌区生态建设水平、保障灌区农业可持续发展具有重要的现实意义。

本研究运用不确定性随机规划等方法,以黑龙江省锦西灌区为研究区,从推进灌区农业可持续发展的角度,研究不确定环境下灌区灌溉水资源的高效配置,旨在为大型灌区灌溉水资源管理和灌区农业可持续发展的相关研究做有益补充,以确保农业用水安全,推动灌区农业-经济-社会-生态协调发展。

1 研究区域概况

研究区域位于黑龙江省锦西灌区(东经 131°25′~133°26′,北纬 46°45′~47°45′),按灌溉区域划分包括松花江、锦山、花马、头林 4 个分区,其水田面积约为 34 666 hm^2,旱田面积约为 66 400 hm^2。灌区平均年降水量约为 542 mm,蒸发量约为 720 mm,蒸发显著高于降水,该地区水资源严重匮乏。

锦西灌区面临的主要问题如下:

(1)灌溉水资源配置结构不合理,地下水超采。锦西灌区地下水可开采量为 1.39×10^8 m^3/a,随着灌区农业规模的扩大,农业需水量不断增加,而灌溉大量利用地下水,导致全区地下水超采 58%,并引发地下水环境恶化。

(2)灌区生态问题突出。主要表现在以下两方面:①随着灌区农业的快速发展,农业用水比例不断增加,截止至现状年农业灌溉用水总量已占全区耗水总量的 90% 以上,导致灌区内生态用水严重短缺。②随着灌区农业规模的扩大,农药、化肥的使用量不断增加,灌区农业排水中污染物(氮、磷、氨氮、CODcr 等)年排放总量已突破 4.4 万 t,导致灌区水体污染和水体富养化现象加剧,极大地破坏了灌区的可持续发展程度。

(3)农业水资源利用效率低。灌区内农业用水占灌区总耗水量的 90% 以上,经测算锦西灌区农业灌溉水资源生产力却仅为 0.9 kg/m^3,农业水资源利用效率偏低,同时,随着市政、工业等部门用水需求的增加,部门间的水资源竞争程度不断加剧,提升农业水资源利用效率,缓解水资源短缺成为灌区亟待解决的问题。

(4)不确定性要素对水资源配置的干扰。灌区农业水资源规划配置过程受到大量的不确定性要素的干扰,如降雨、径流变化等,同时,灌区的农业经济效益、社会效益以及环境效益之间的相互作用关系也存在着模糊不确定性[18]。研究不确定性环境下灌区农业水资源规划配置的方法,是灌区面临的难点之一。

2 模型构建

以灌区农业-社会-经济-生态环境复合系统为基础,构建灌区农业水资源不确定规划模型,对灌区面临的主要问题展开研究。

2.1 灌溉水资源优化配置目标

(1)水分生产力目标函数

灌区农业水分生产力即单位灌溉水资源下的农

业产量，提高灌区的农业水分生产力是保障水资源可持续利用和缓解水资源短缺的有效手段[19]。农业水分生产力函数为

$$\max f_{\mathrm{IWUE}} = \frac{\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{3} Y_{ij}A_{ij}}{\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{3}(Q_{ij}^{sur} + Q_{ij}^{gro})} \tag{1}$$

式中　f_{IWUE}——灌区水分生产力，kg/m^3

i——锦西灌区内的分区域，i 为 1、2、3、4 时，分别表示松花江、锦江、花马、头林

j——农作物种类，j 为 1、2、3 时，分别表示水稻、玉米、大豆

Y_{ij}——单位耕地面积下的农业产量，kg/hm^2

Q_{ij}^{sur}——区域 i 农作物 j 的地表配水量（决策变量），万 m^3

Q_{ij}^{gro}——区域 i 农作物 j 的地下配水量（决策变量），万 m^3

A_{ij}——种植面积，hm^2

（2）粮食安全目标函数

锦西灌区是我国重要的粮食产区，保障灌区粮食供给安全对维护社会稳定和可持续发展具有重要意义，即粮食安全目标函数是在追求最大限度地减少农业灌溉用水量对农业产量的影响。粮食安全目标函数为

$$\min f_{\mathrm{yield}} = \sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{3}[Q_{ij}^{WD} - (Q_{ij}^{sur} + Q_{ij}^{gro})] \tag{2}$$

式中　Q_{ij}^{WD}——区域 i 农作物 j 的目标配水量，万 m^3

f_{yield}——农作物灌溉缺水总量，万 m^3

（3）农业排污控制目标函数

有效控制农业污染物排放量是改善灌区生态环境和促进灌区可持续发展的有力举措。农业排污控制目标函数为

$$\min f_p = \sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{3}[\varepsilon_{\mathrm{CODcr}}(Q_{ij}^{sur} + Q_{ij}^{gro}) + \varepsilon_{\mathrm{NH_3\text{-}N}}(Q_{ij}^{sur} + Q_{ij}^{gro}) + \varepsilon_{\mathrm{TN}}(Q_{ij}^{sur} + Q_{ij}^{gro}) + \varepsilon_{\mathrm{TP}}(Q_{ij}^{sur} + Q_{ij}^{gro})] \tag{3}$$

式中　$\varepsilon_{\mathrm{CODcr}}$——农业排水中污染物 CODcr 质量浓度，kg/万 m^3

$\varepsilon_{\mathrm{NH_3\text{-}N}}$——农业排水中氨氮质量浓度，kg/万 m^3

$\varepsilon_{\mathrm{TN}}$——农业排水中总氮质量浓度，kg/万 m^3

$\varepsilon_{\mathrm{TP}}$——农业排水中总磷质量浓度，kg/万 m^3

f_p——灌区主要污染物总排放强度，kg

（4）生态配水目标函数

生态配水量是衡量生态子系统健康程度和灌区可持续发展程度的重要标志之一，其函数为

$$\min f_E = \sum_{i=1}^{4}\sum_{k=1}^{2}(Q_{ik}^{ED} - Q_{ik}^{EW}) \tag{4}$$

式中　f_E——生态配水总量，万 m^3

k——研究区域内生态植被种类，k = 1 表示林地，k = 2 表示草地

Q_{ik}^{ED}——区域 i 生态植被 k 的目标配水量，万 m^3

Q_{ik}^{EW}——区域 i 生态植被 k 的实际配水量（决策变量），万 m^3

2.2　灌溉水资源优化约束

（1）地表水约束

地表水配水总量应低于地表水可供给量，同时，灌区地表水供给量受自然降雨、径流等不确定性要素影响，本文引入机会约束规划方法，反映灌溉水资源系统的不确定性。计算式为

$$\mathrm{P_r}\left\{\frac{\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{3} Q_{ij}^{sur}}{s} \leqslant Q_T^{sur}\right\} \leqslant 1 - P_d \tag{5}$$

式中　s——地表水灌溉利用系数，取 0.55

Q_T^{sur}——地表水可利用总量，万 m^3

P_d——违规风险概率

$\mathrm{P_r}\{\cdot\}$——概率分布函数

（2）地下水约束

与地表水约束类似，地下水配置总量应低于地下水可利用量，锦西灌区地下水被用于生态配水和农业灌溉。计算式为

$$\mathrm{P_r}\left\{\frac{\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{3} Q_{ij}^{gro}}{g} + \sum_{i=1}^{4}\sum_{k=1}^{2} Q_{ik}^{EW} \leqslant Q_T^{gro}\right\} \leqslant 1 - P_d \tag{6}$$

式中　g——地下水灌溉利用系数，取 0.85

Q_T^{gro}——地下水可利用总量，万 m^3

（3）农作物配水约束

农作物配水总量不应低于作物最小需水量，同时不应高于目标配水量（灌溉定额）。计算式为

$$Q_{ij\min}^{WD} \leqslant Q_{ij}^{sur} + Q_{ij}^{gro} \leqslant Q_{ij}^{WD} \quad (\forall i,j) \tag{7}$$

式中　$Q_{ij\min}^{WD}$——区域 i 农作物 j 的最小需水量，万 m^3

（4）生态配水约束

生态植被的配水量不应低于生态最小需水量，同时不应高于生态植被的目标配水量。计算式为

$$Q_{ik\min}^{ED} \leqslant Q_{ik}^{EW} \leqslant Q_{ik}^{ED} \quad (\forall i,k) \tag{8}$$

式中　$Q_{ik\min}^{ED}$——区域 i 生态植被 k 的最小需水量，万 m^3

（5）非负约束

灌溉水量应为非负，即

$$\begin{cases} Q_{ij}^{sur} \geqslant 0 \\ Q_{ij}^{gro} \geqslant 0 \quad (\forall i,j,k) \\ Q_{ik}^{EW} \geqslant 0 \end{cases} \tag{9}$$

2.3 数据来源及模型求解

研究数据主要以佳木斯水文站 1956 年至今的长系列年径流量数据和灌区地下水位长观井的监测数据为基础,通过引入机会约束规划方法拟定 3 种违规风险概率(P_d = 0.1、0.15、0.2),每种违规风险概率下拟定 3 种供水水平(分别为高、中、低流量),其出现的概率依次为 0.25、0.5、0.25,共计 9 种供水情景。模型中相关参量数据见表 1 ~ 4。

表 1 灌溉水定额和单位面积产量

Tab.1 Parameters of I_{ij}^{Q} and Y_{ij}

地区	灌溉水定额 I_{ij}^{Q}/(m³·hm⁻²)			单位面积产量 Y_{ij}/(kg·hm⁻²)		
	水稻(j=1)	玉米(j=2)	大豆(j=3)	水稻(j=1)	玉米(j=2)	大豆(j=3)
松花江(i=1)	4 830	1 050	1 005	7 309.06	6 210.814	1 942.356
锦山(i=2)	4 855	1 300	1 250	7 309.06	6 210.814	1 942.356
花马(i=3)	4 840	1 150	1 135	7 309.06	6 210.814	1 942.356
头林(i=4)	4 950	1 440	1 400	7 309.06	6 210.814	1 942.356

表 2 农作物灌溉目标配水量和最小需水量

Tab.2 Parameters Q_{ij}^{WD} and $Q_{ij\min}^{WD}$ 万 m³

地区	农作物灌溉目标配水量 Q_{ij}^{WD}			农作物最小需水量 $Q_{ij\min}^{WD}$		
	水稻(j=1)	玉米(j=2)	大豆(j=3)	水稻(j=1)	玉米(j=2)	大豆(j=3)
松花江(i=1)	2 884	56.5	508.5	1 009.40	16.95	152.55
锦山(i=2)	6 929	205.2	1 846.8	2 425.15	61.56	554.04
花马(i=3)	18 899	511.7	4 605.3	6 614.65	153.51	1 381.59
头林(i=4)	12 882	364.0	3 276.0	4 508.70	109.20	982.80

表 3 植被灌溉目标配水量和最小需水量

Tab.3 Parameters Q_{ik}^{ED} and $Q_{ik\min}^{ED}$ 万 m³

地区	植被灌溉目标配水量 Q_{ik}^{ED}		植被最小需水量 $Q_{ik\min}^{ED}$	
	林地(k=1)	草地(k=2)	林地(k=1)	草地(k=2)
松花江(i=1)	2 414.3	0	724.3	0
锦山(i=2)	1 155.9	0	346.8	0
花马(i=3)	6 286.7	0	1 886.0	0
头林(i=4)	3 892.7	0	1 167.8	0

表 4 地表水和地下水可利用总量

Tab.4 Parameters Q_T^{sur} and Q_T^{gro} 万 m³

P_d	地表水可利用总量 Q_T^{sur}			地下水可利用总量 Q_T^{gro}		
	高流量	中流量	低流量	高流量	中流量	低流量
0.10	55 578.60	36 346.64	21 384.528	23 190.741 0	15 166.008 4	13 243.996 68
0.15	58 225.20	38 111.04	23 290.080	24 295.062 0	15 902.222 4	14 424.154 80
0.20	59 283.84	39 875.44	24 983.904	24 736.790 4	16 638.436 4	15 473.184 24

采用模糊规划(Fuzzy mathematical programming)反映目标系统中存在的模糊不确定性,模糊隶属度函数并不唯一,其中曲线、非线性和指数隶属度函数是 3 种典型的模糊隶属度函数[20-21]。本研究分别基于上述 3 种模糊隶属度函数对模型进行求解。

3 结果与分析

3.1 水资源优化配置结果

基于非线性、曲线、指数 3 种模糊隶属度函数的锦西灌区水资源优化配置方案如图 1 所示。

由图 1 可知,优化后锦西灌区农作物配水量与灌区内可供水量呈正比变化,且各优化方案的灌溉总耗水量均在 5 亿 m³以下,较优化前灌溉总耗水量节约 1.3 ~ 3.9 亿 m³,有效改善了灌溉耗水量过高的问题。优化前灌溉用水主要利用地下水,导致灌区地下水超采严重,由图 1 可知,优化后各种供水情景下,地下水灌溉占总灌溉用水量比例均控制在 36% 以内,有效缓解了灌区地下水超采的现状。在不同供水情景下的灌区水资源优化配置方案中,生态配水量均控制在 0.4 亿 m³以上,且生态配水总量与灌区可用水总量呈正相关变化,有效缓解了生态

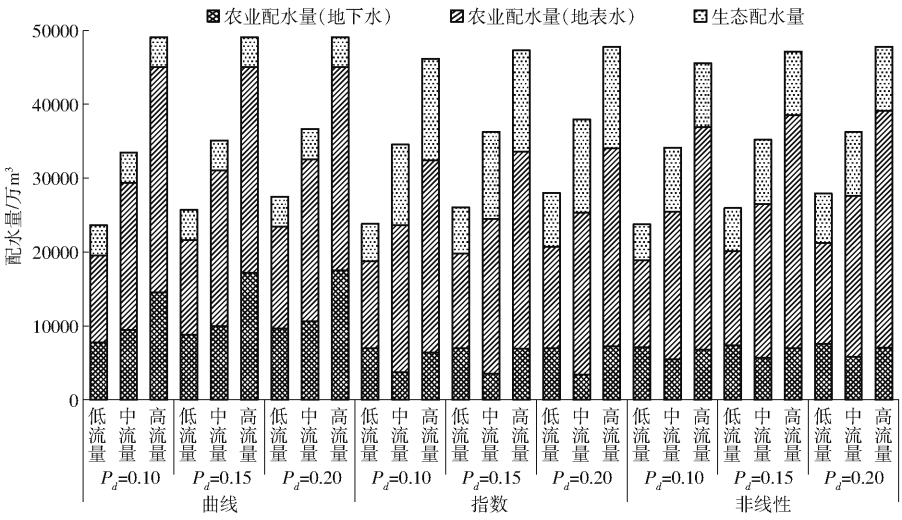

图 1　灌溉水资源优化配置方案

Fig. 1　Irrigation water allocation scheme

配水无法得到保障的现状。

优化后的灌区水资源配置方案有效地解决了灌区面临的多个主要问题,但就现阶段的优化结果而言,在各假设情景下,均存在 3 种水资源优化配置方案,如何确定每种情景下的最优方案,需对配水方案的综合可持续性进行分析。

3.2　优化方案综合可持续性分析

主要从灌区水资源优化配置的农业经济效益、社会效益和生态环境效益 3 方面对方案的综合可持续性进行分析。

3.2.1　农业经济效益分析

锦西灌区水资源优化配置方案的灌溉经济效益 f_1 计算式为

$$f_1 = \sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{3} P_{ij}Y_{ij}(Q_{ij}^{sur}+Q_{ij}^{gro}) - \left(\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{3} C_i^{sur}\frac{Q_{ij}^{sur}}{s} + \sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{3} C_i^{gro}\frac{Q_{ij}^{gro}}{g}\right) - \sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{3}\frac{C_{ij}(Q_{ij}^{sur}+Q_{ij}^{gro})}{I_{ij}^{Q}} \tag{10}$$

式中　P_{ij}——区域 i 农作物 j 的售价,元/kg

C_i^{sur}——区域 i 地表水调水成本,元/万 m^3

C_i^{gro}——区域 i 地下水调水成本,元/万 m^3

C_{ij}——区域 i 农作物 j 的种植成本,元/hm^2

锦西灌区相关指标如表 5 所示。

表 5　经济参数

Tab. 5　Values of economic parameters

种植成本/(元·hm^{-2})			销售价格/(元·kg^{-1})			地表水灌溉费	地下水灌溉费
水稻(j=1)	玉米(j=2)	大豆(j=3)	水稻(j=1)	玉米(j=2)	大豆(j=3)	用/(元·hm^{-2})	用/(元·hm^{-2})
8 400	7 200	3 000	3.16	2.25	5.40	350	650

优化后获得的不同情景下的锦西灌区水资源优化配置方案的经济效益如图 2 所示。由图可知,现状年为平水年(中流量水平),其农业经济收益与优化后得到的枯水年(低流量水平)农业收益相当,而优化后平水年(中流量水平)和丰水年(高流量水平)所对应的农业收益增量均在 1.5 亿元以上。总体而言,优化后配水方案所对应的农业经济效益为 6.1 ~ 13.2 亿元,促进农业经济效益平均增长 0.18 ~ 6.90 亿元,其中,水稻种植所占的经济效益比例最高,而大豆种植的经济效益增幅最为显著。此外,由图 2 可知,农业经济效益与灌溉可用水量水平呈正相关变化,且在低流量水平情况下,各优化方案的经济效益差别并不显著,但在中、高流量水平方案中,基于曲线模糊隶属度函数的水资源优化配置方案的经济效益更优。

3.2.2　社会效益分析

灌区水资源优化配置的社会效益强调保持灌区水资源配置均衡、维护农业高效持续生产状态的水资源配置效益,主要从灌区农业水资源的水分生产力和水资源配置的均衡性两方面进行分析。

灌区农业水资源的水分生产力(f_2)可通过式(1)计算($f_2 = f_{IWUE}$),灌溉水优化配置后的灌区粮食总产量、农业灌溉水分生产力和现状年上述两项指标如图 3 所示。现状年为平水年(中流量水平),由图可知,优化后灌区的灌溉水分生产力为 1.5 ~ 1.7 kg/m^3,促进灌溉水资源生产力提高 0.85 ~ 1.01 kg/m^3,有效改善了灌溉水资源利用效率、保证

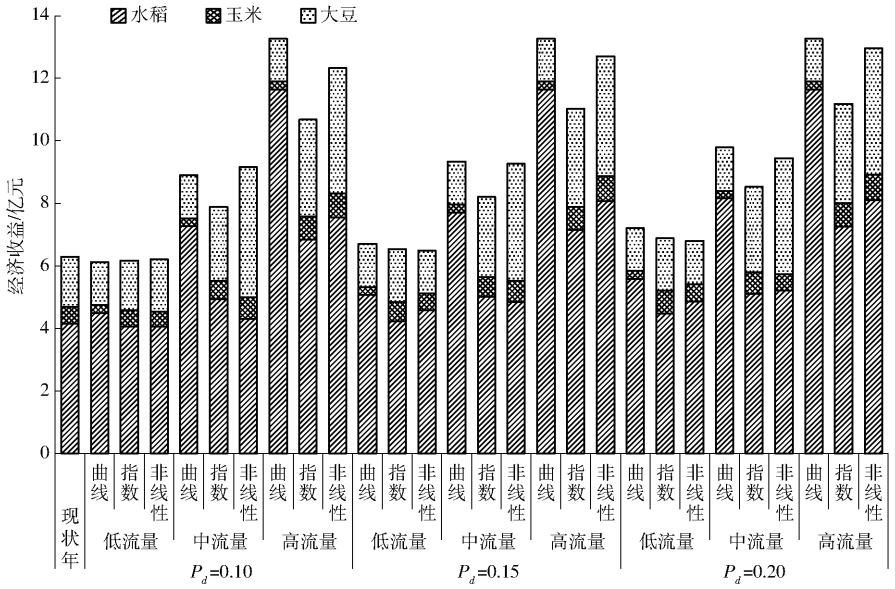

图 2 水资源配置经济效益

Fig. 2 Economic benefits of water allocation

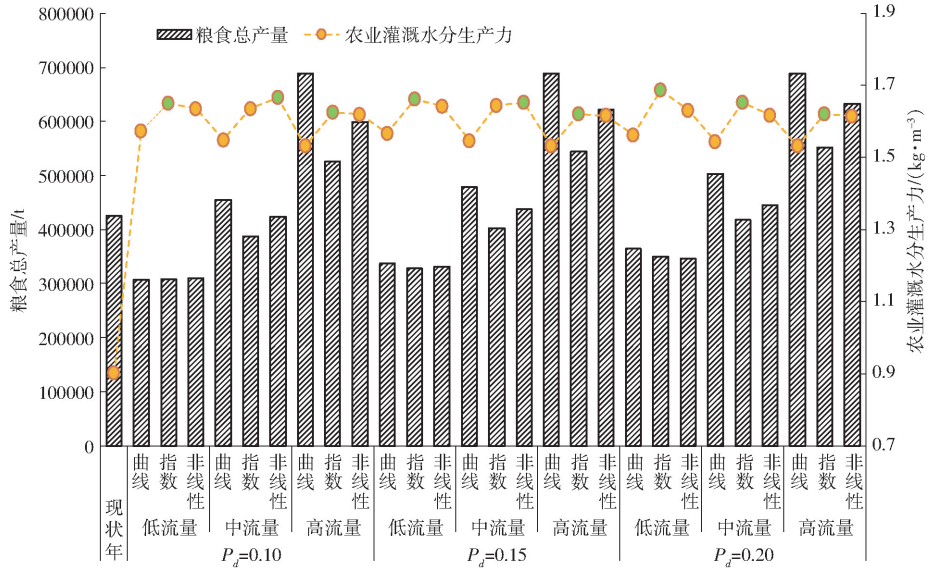

图 3 灌溉水分生产力

Fig. 3 Irrigation water productivity

了灌区农业高效生产状态。同时,图中绿色标记点代表各供水情景下的最优水分生产力,分析可知,各情景下,最优水分生产力均未与最高粮食总产量方案相对应,表明各情景下的次优或最低粮食总产量方案对应的农业水分生产力优于最高粮食总产量方案,且高流量情景下的最优水分生产力显著低于中、低流量水平下的最优水分生产力。由上述分析可知,随着供水量的增加,粮食总产量会显著提升,但灌区农业水资源高效生产状态并不与供水量呈正相关。

水资源在农业灌区系统中分配的均衡程度是影响灌区社会可持续发展的重要指标,其量化方法可根据 Gini 系数进行测算,灌区水资源配置均衡性指数[22]计算式为

$$f_3 = \frac{\sum_{l=1}^{4}\sum_{k=1}^{4}\left|\frac{\sum_{j=1}^{3}(Q_{ij}^{sur}+Q_{ij}^{gro})}{\sum_{j=1}^{3}A_{lj}}-\frac{\sum_{j=1}^{3}(Q_{ij}^{sur}+Q_{ij}^{gro})}{\sum_{j=1}^{3}A_{kj}}\right|}{8\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{3}\frac{Q_{ij}^{sur}+Q_{ij}^{gro}}{A_{ij}}} \tag{11}$$

式中 A_{lj}、A_{kj}——区域 l、k 第 j 个作物的种植面积,l、$k \in i$,hm^2

Gini 系数范围为[0,1],国际惯例把 0.2 以下视为绝对均衡,0.2 ~ 0.3 视为均衡,0.3 ~ 0.4 视为相对合理;0.4 ~ 0.5 视为差距较大,当 Gini 系数达到 0.5 以上时,则表示分配悬殊。

优化获得的不同情景下的锦西灌区水资源优化配置方案的均衡性指数如图 4 所示，整体而言，不同情景下的锦西灌区水资源优化配置方案的均衡性指数的最终结果整体位于 0.2 ~ 0.4 之间，说明灌区水资源优化配置的均衡性良好，这将成为灌区可持续发展的重要保障。

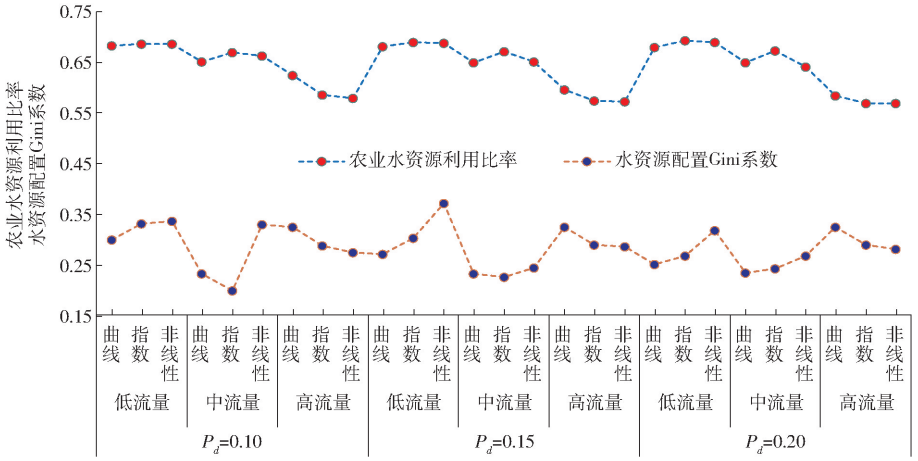

图 4　Gini 系数及农业水资源利用比率

Fig. 4　Values of Gini and AWUR

3.2.3　生态环境效益分析

灌区的生态环境效益主要从区域农业水资源利用比率、农业排水中污染物排放强度以及农业生产过程温室气体排放量 3 方面进行综合分析。

(1)区域农业水资源利用比率

区域农业水资源利用比率(Agricultural water utilization ratio，AWUR)是指区域农业水资源使用量和可利用量之比，可以反映区域农业水资源综合使用状况、开发程度和可持续程度，其计算公式为

$$f_4 = \frac{\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{3} Q_{ij}^{sur} + \sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{3} Q_{ij}^{gro} + \sum_{i=1}^{4}\sum_{k=1}^{2} Q_{ik}^{EW}}{Q_T^{sur} + Q_T^{gro}} \tag{12}$$

优化前后，各方案所对应的区域农业水资源利用比率如图 4 所示，现状期比率为 0.75，优化后，区域农业水资源利用比率为 0.56 ~ 0.69，且随供水水平的增加而下降，表明水资源可持续利用程度显著提升。由图 4 可知，在低、中流量水平时，基于曲线隶属度函数的水资源配置方案更优，而在高流量水平时，基于非线性隶属度函数的优化方案更优。

(2)农业排水中污染物排放强度

农业排水中污染物排放强度(f_5)是衡量生态灌区健康程度的重要衡量指标，可通过式(3)计算($f_5 = f_p$)，其结果如图 5 所示。对灌区农业排水中的主要污染物氮、磷、氨氮和 CODcr 的排放强度进行统计。由图可知，优化后各情景下的灌区水资源配置方案所对应的污染物年排放量均低于 3.2 万 t，较与现状年排放量(4.46 万 t)相比，降低值为 1.28 ~ 3.13 万 t。污染物排放量由高到低依次为氮、磷、CODcr、氨氮，且污染物排放强度与供水量呈正相关，在各情景下，基于指数模糊隶属度函数的水资源配置方案对农业排水污染物排放量控制的更为有效。

(3)农业生产过程温室气体排放量

农业生产过程温室气体排放量是衡量生态灌区健康程度的重要衡量指标，其计算公式为[14]

$$f_6 = \frac{44}{12}\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{3} A_{ij}\sum_{n=1}^{4} R_n\delta_n + \frac{16}{12}\times 21\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{3} A_{ij}\alpha_i + \frac{44}{28}\times 310\left(\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{3} A_{ij}\beta_j + \sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{K} A_{ij}X_kN_k\right) \tag{13}$$

式中　R_n——碳源，包括化肥($n=1$)、农药($n=2$)、农膜($n=3$)、柴油以及灌溉用电($n=4$)，kg/hm^2

δ_n——第 n 种碳源碳排放系数，kg/kg

α_i——单位面积 CH_4 排放量，kg/hm^2

β_j——作物本底排放 N_2O 系数，kg/hm^2

N_k——肥料用量，kg/hm^2

X_k——第 k 种肥料 N_2O 排放系数，kg/kg

如图 5 所示，温室气体排放量与供水量呈正相关，其中，虽然大豆种植面积显著低于水稻种植面积，但其温室气体排放量却高于水稻，温室气体排放量由高到低依次为大豆、水稻、玉米。同时，在不同流量水平下，不同隶属度函数所得到的灌溉方案其产生的温室气体量也存在显著差异，低流量水平时，基于非线性隶属度函数的

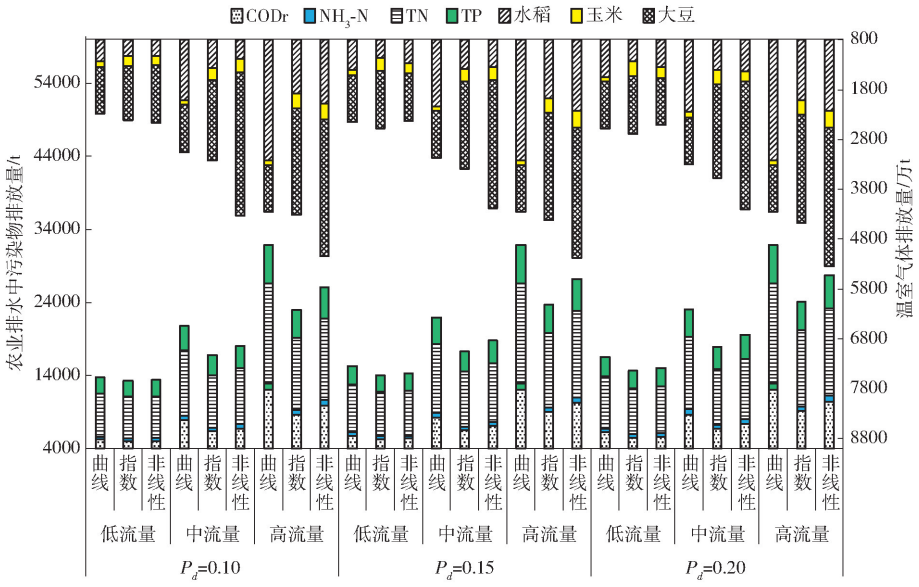

图 5 污染物及 GWP 排放量

Fig. 5 Pollutants and GWP

灌溉方案较优,但在中流量、高流量水平下,基于曲线隶属度函数对应的灌溉方案温室气体排放量控制较好。

3.2.4 灌区水资源配置方案可持续性分析

灌区水资源配置方案的可持续性是一个耦合经济、社会、环境等要素的综合性指标[23-24]。采用可持续指数法,从经济、社会、环境 3 方面对各配水方案所对应的灌区农业可持续发展程度进行综合性分析,并选取不同流量情景下的最优方案。灌区综合可持续性指数 f_S 计算式为

$$f_S = \sqrt[6]{\prod_{m=1}^{6} f'_m} \tag{14}$$

其中

$$f'_m = \begin{cases} \dfrac{f_m - f_m^{\min}}{f_m^{\max} - f_m^{\min}} & \text{(极大最优指标)} \\ 1 - \dfrac{f_m - f_m^{\min}}{f_m^{\max} - f_m^{\min}} & \text{(极小最优指标)} \end{cases} \tag{15}$$

式中 f'_m——f_m 的无量纲值

$f_m^{\max}$——指标上限值

$f_m^{\min}$——指标下限值

$f_S > 0.6$ 表示灌区综合可持续性良好;$0.4 < f_S \leqslant 0.6$ 表示灌区综合可持续性较好;$0.3 < f_S \leqslant 0.4$ 表示灌区综合可持续性中等;$0.1 < f_S \leqslant 0.3$ 表示灌区综合可持续性较低;$f_S \leqslant 0.1$ 表示灌区综合可持续性较差[25]。

计算可得不同流量情景下各个配水方案所对应的锦西灌区农业可持续性指数,如图 6 所示。由图可知,同一流量情景下基于不同隶属度关系的灌区水资源优化配置方案的综合可持续性存在显著差异,图中绿色标记点表示某一具体流量情景下灌区水资源优化配置方案综合可持续性指数的最优值,即为该情景下的灌区水资源优化配置最优方案。由此,可得不同供水情景下,锦西灌区农业水资源配置最优方案如图 7 所示。同时,灌溉水资源优化配置最优方案的可持续指数均高于 0.4,表明优化后灌溉农业可持续性良好。

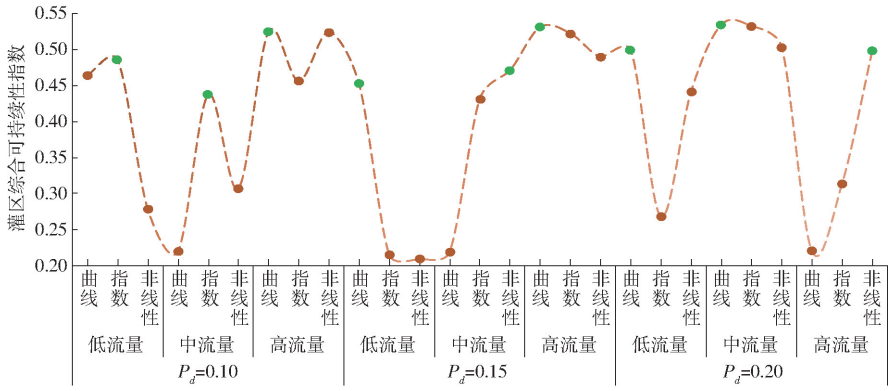

图 6 可持续性指数变化曲线

Fig. 6 Changing curve of sustainability indexes

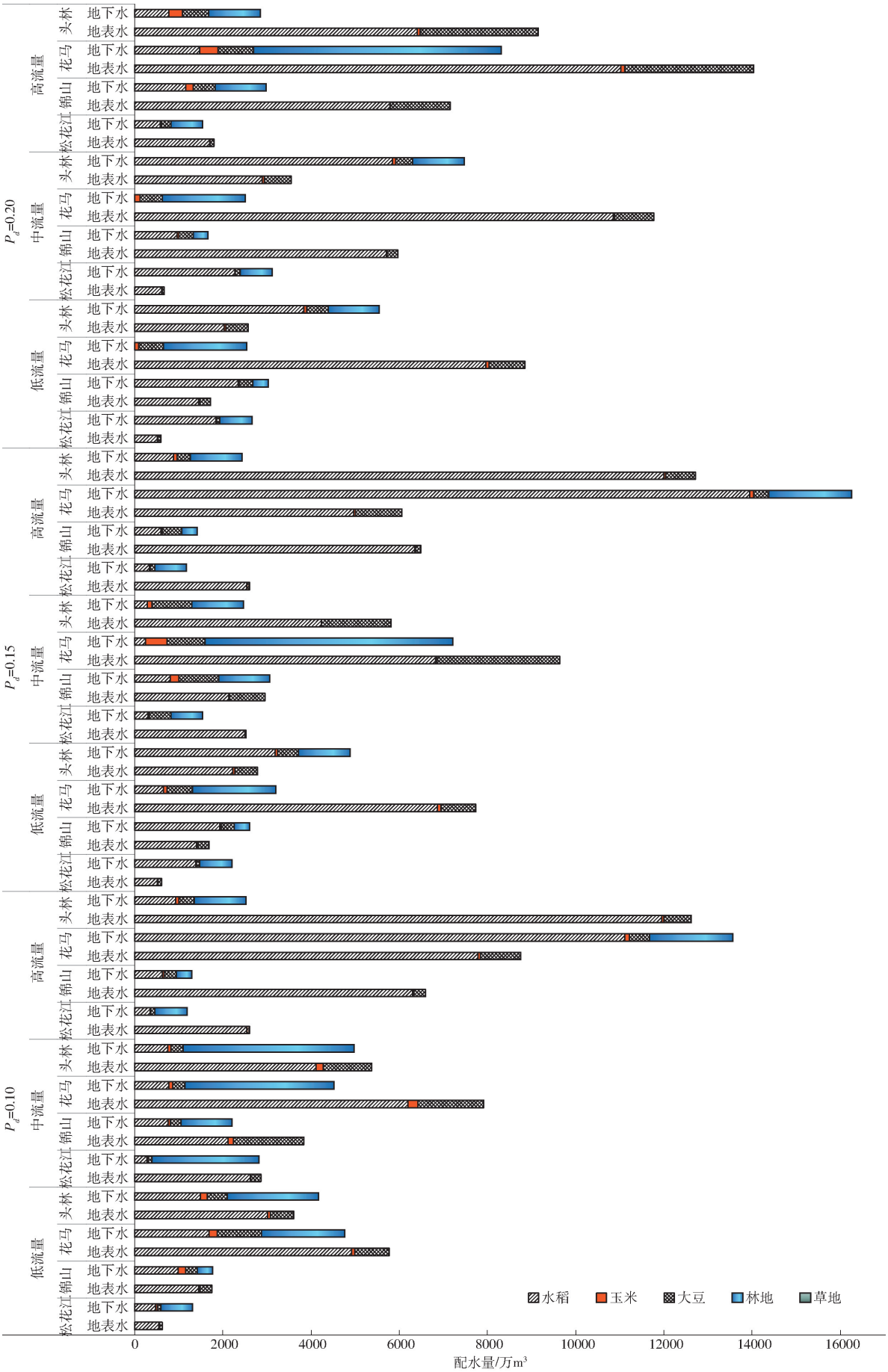

图 7　不同情景下的水资源优化配置方案

Fig. 7　Optimal water resources allocation policies of different scenarios

4 结论

(1)将不确定性要素通过 9 种供水情景和 3 种模糊隶属度函数关系引入灌区水资源优化配置分析中,结果表明,基于不同供水情景、不同模糊隶属度函数所得到的灌区水资源配置方案及农业可持续水平存在明显差异,表明不确定性要素对农业水资源高效配置和灌区农业可持续发展具有显著影响。

(2)通过对灌区灌溉水资源的优化配置可以有效提高灌区农业的经济效益。经优化,各配水方案所对应的农业经济效益为 6.1 ~ 13.2 亿元,促进农业经济效益增长 0.18 ~ 6.90 亿元,灌区的农业经济效益显著提高。

(3)通过对灌区灌溉水资源的优化配置可以有效改善灌区农业可持续发展程度。经优化,各配水方案所对应的农业水分生产力为 1.5 ~ 1.7 kg/m^3,提高了 0.85 ~ 1.01 kg/m^3,提高了灌溉水资源利用效率,保证了灌区粮食产量的稳定。同时,优化后灌区水资源优化配置方案的 Gini 系数整体位于 0.2 ~ 0.4,表明灌区水资源优化配置的均衡性良好,灌区水资源优化配置的社会效益和灌区农业的可持续发展程度显著提高。

(4)通过对灌区灌溉水资源的优化配置可以有效改善灌区农业的生产环境。优化后的锦西灌区灌溉总配水量、地表水配水量均与供水水平呈正相关变化,灌区灌溉总耗水量可节约 1.3 ~ 3.9 亿 m^3,且优化后,各情景下区域农业水资源利用比率为 0.56 ~ 0.69,显著低于现状期比率(0.75),农业污染物年排放总量降低了 1.28 ~ 3.13 万 t。

(5)灌区水资源配置的农业可持续效益是水资源配置的农业经济效益、社会效益以及生态环境效益的综合性体现,研究表明,在相同供水情景下,基于不同的模糊隶属度函数所得到的灌区水资源配置方案的可持续性存在显著差异,该差异性可作为各供水情景下最优配水方案评定的重要依据。在不同供水情景下,灌溉水资源优化配置最优方案的可持续性指数均高于 0.4,表明优化后的灌溉水资源配置方案可以有效保障灌区农业的可持续发展。

参 考 文 献

[1] 农业部,水利部. 全国农业可持续发展规划(2015—2030)[Z]. 2015.

[2] LI Mo, XU Yaowen, FU Qiang, et al. Efficient irrigation water allocation and its impact on agricultural sustainability and water scarcity under uncertainty[J]. Journal of Hydrology, 2020,586: 1 - 12.

[3] 王友芝,郭萍. 基于多目标规划模型的黑河中游绿洲用水结构优化配置[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(2): 299 - 307.
WANG Youzhi, GUO Ping. Water-consumption structure optimization in oasis of middle reaches of Heihe river basin based on multi-objective optimization model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 299 - 307. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2002033&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.033. (in Chinese)

[4] 康绍忠. 加快推进灌区现代化改造 补齐国家粮食安全短板[J]. 中国水利,2020(9):1 - 5.
KANG Shaozhong. Accelerating modernization of irrigation districts to make up shortfall of national food security[J]. China Water Resources, 2020(9): 1 - 5. (in Chinese)

[5] 康绍忠. 贯彻落实国家节水行动方案 推动农业适水发展与绿色高效节水[J]. 中国水利,2019(13):1 - 6.
KANG Shaozhong. National water conservation initiative for promoting water-adapted and green agriculture and highly-efficient water use[J]. China Water Resources, 2019(13):1 - 6. (in Chinese)

[6] 张凤太, 苏维词. 贵州省水资源-经济-生态环境-社会系统耦合协调演化特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(6): 44 - 49.
ZHANG Fengtai, SU Weici. The evolution characteristics of coupling and coordination of water resources - economy - environment - society system in Guizhou[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(6): 44 - 49. (in Chinese)

[7] XU Yaowen, FU Qiang, LI Mo, et al. Inventory theory-based stochastic optimization for reservoir water allocation[J]. Water Resources Management, 2019,33(11): 3873 - 3898.

[8] JUWANA I, PERERA B J C, MUTTIL N. A water sustainability index for West Java. Part 1: developing the conceptual framework[J]. Water Science and Technology, 2010,62(7): 1629 - 1640.

[9] 李晨洋,于伟铭,陈正锐,等. 考虑生态的灌区水资源区间两阶段随机规划模型建立与应用[J]. 农业工程学报,2017,33(21):105 - 114.
LI Chenyang, YU Weiming, CHEN Zhengrui, et al. Two-stage interval parameters water resources model considering ecology and application in irrigation district[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 105 - 114. (in Chinese)

[10] 付强,刘巍,刘东,等. 黑龙江省灌溉水利用率分形特征与影响因素分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):147 - 153.
FU Qiang, LIU Wei, LIU Dong, et al. Fractal characteristics and influence factors analysis of irrigation water use efficiency in Heilongjiang Province[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery 2016,47(9):147 - 153. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160922&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.022. (in Chinese)

[11] 付强,刘巍,董淑华,等. 黑龙江省灌溉水利用效率影响因素分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2017,25(2):286 - 295.
FU Qiang, LIU Wei, DONG Shuhua, et al. Influence factors analysis of irrigation water use efficiency in Heilongjiang Province[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017,25(2):286 - 295. (in Chinese)

[12] 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(7): 928 - 945.

[13] LI Mo, LI Jiang, SINGH V P, et al. Efficient allocation of agricultural land and water resources for soil environment protection using a mixed optimization-simulation approach under uncertainty[J]. Geoderma, 2019, 353: 55 - 69.

[14] LI Mo, FU Qiang, SINGH V P, et al. Stochastic multi-objective modeling for optimization of water-food-energy nexus of irrigated agriculture[J]. Advances in Water Resources, 2019, 127(5): 209 - 224.
[15] FU Qiang, LIU Wei, CUI Song, et al. Geostatistical analysis of factors affecting irrigation water use efficiency on the Sanjiang Plain[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2017, 60(2):431 - 438.
[16] 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.
[17] LI Mo, FU Qiang, SINGH V P, et al. An optimal modelling approach for managing agricultural water-energy-food nexus under uncertainty[J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 1416 - 1434.
[18] ZHANG Fan, TAN Qian, ZHANG Chenglong, et al. A regional water optimal allocation model based on the Cobb-Douglas production function under multiple uncertainties[J]. Water, 2017, 9(12): 923.
[19] 熊佳,崔远来,谢先红. 灌溉水利用效率的空间分布特征及等值线图研究[J]. 灌溉排水学报,2008,27(6):1 - 5.
XIONG Jia, CUI Yuanlai, XIE Xianhong. Spatial distribution of irrigation water use efficiency and its isogram[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(6): 1 - 5. (in Chinese)
[20] MORANKA D V, RAJU K S, KUMAR D N. Integrated sustainable irrigation planning with multi-objective fuzzy optimization approach[J]. Water Resources Management, 2013, 27(11): 3981 - 4004.
[21] PARITOH S, RAJ M S. Optimization of cropping pattern in a canal command area using fuzzy programming approach[J]. Water Resources Management, 2015,29(12): 4481 - 4500.
[22] MALAKAR K, MISHRA T, PATWARDHAN A. Inequality in water supply in India: an assessment using the Gini and Theil indices. Environment[J]. Development and Sustainability, 2018, 20(2): 841 - 864.
[23] GHEEWALA S H, SILALERTRUKSA T, NILSALAB P, et al. Water stress index and its implication for agricultural land-use policy in Thailand[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2018, 15(4):833 - 846.
[24] MOSLEH Z, SALEHI M H, FASAKHODI A A, et al. Sustainable allocation of agricultural lands and water resources using suitability analysis and mathematical multi-objective programming[J]. Geoderma, 2017, 303: 52 - 59.
[25] PEDRO-MONZONÍS M, SOLERA A, FERRER J, et al. A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 482 - 493.

(上接第 426 页)

[16] LIU Jian, LI Juan, XU Chengying. Interaction of the cutting tools and the ceramic-reinforced metal matrix composites during micro-machining: a review[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2014,7(2): 55 - 70.
[17] ZHONG Lisheng, ZHNAG Xi, CHEN Shili,et al. Fe - W - C thermodynamics and in situ preparation of tungsten carbide-reinforced iron-based surface composites by solid-phase diffusion[J]. Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2016, 57:42 - 49.
[18] 廖宜涛,廖庆喜,舒彩霞,等. 基于 ANSYS/LS - DYNA 的芦竹切割-进给速度匹配研究[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):30 - 34.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, SHU Caixia,et al. Matching of cutting and feeding speed for reaping *Arundo donax* L. based on ANSYS/LS - DYNA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(Supp.):30 - 34. (in Chinese)
[19] 张韬. 基于计算机模拟轻便型果园生草刈割机的研制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
ZHANG Tao. Development of portable mower in orchard based on computer simulation[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[20] 高雪. 超重力燃烧合成自磨锐切刀梯度材料的制备工艺研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
GAO Xue. Study on preparation of gradient material for self-sharpening cutters based on combustion synthesis melt-casting under ultra-gravity field[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[21] XU Yu, YANG Zengchao, HAN Zhao, et al. Fabrication of Ni/WC composite with two distinct layers through centrifugal infiltration combined with a thermite reaction[J]. Ceramics International, 2014, 40(1):1037 - 1043.
[22] SONG Yuepeng, LI Qian, LI Jiangtao, et al. Fabrication of W - Cu alloy via combustion synthesis infiltration under an ultra-gravity field[J]. Metal and Materials International, 2014, 20(6):1145 - 1150.
[23] 刘庆庭, 区颖刚, 卿上乐, 等. 甘蔗茎秆切割力的计算[J]. 农业机械学报, 2006,37(9): 89 - 92.
LIU Qingting, OU Yinggang, QING Shangle,et al. Cutting force calculation of sugarcane stalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006,37(9): 89 - 92. (in Chinese)
[24] 乔子楣,刘敏国,杨惠敏. 高寒地区灌溉对建植当年紫花苜蓿产量、水分和光能利用率的影响[J]. 中国草地学报, 2020, 42(3): 86 - 93.
QIAO Zimei, LIU Minguo, YANG Huimin. Effects of irrigation on yields, water and light efficiencies of first year Alfalfa in the alpine region[J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(3): 86 - 93. (in Chinese)
[25] O'DOGHERTY M, GALE G E. Laboratory studies of the cutting of grass stems[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1986, 35(2):115 - 129.
[26] 宋月鹏, 王征, 高东升, 等. 铁氧化物/铝体系绝热温度数值计算与分析[J]. 硅酸盐学报, 2020,48(2): 253 - 257.
SONG Yuepeng, WANG Zheng, GAO Dongsheng, et al. Analysis on adiabatic temperature of ferric oxide aluminothermic system[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2020,48(2): 253 - 257. (in Chinese)