

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.201021

王璐, 杜雄, 王荣, 杨艳敏, 胡玉昆, 侯振军. 基于 NSGA- II 算法的白洋淀上游种植结构优化[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(8): 1370–1383

WANG L, DU X, WANG R, YANG Y M, HU Y K, HOU Z J. Optimization of the planting structure in the upstream region of Baiyangdian Lake based on the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA- II)[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(8): 1370–1383

基于 NSGA- II 算法的白洋淀上游种植结构优化*

王璐^{1,2}, 杜雄^{1**}, 王荣³, 杨艳敏^{2**}, 胡玉昆², 侯振军⁴

(1. 河北农业大学农学院 保定 071000; 2. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022; 3. 河北雄安新区公共服务局 雄安 071700; 4. 保定市望都灌溉试验站 望都 072450)

摘要: 合理的种植结构是实现区域水资源及土地资源优化配置的基础。针对白洋淀上游水资源紧缺、种植结构不合理等问题, 结合当前主要作物种植结构现状, 本研究以作物种植面积为优化变量, 以水资源、土地资源、社会需求等为约束条件, 以经济效益、生态效益最大及总灌溉耗水量最小为目标, 构建基于非支配排序遗传算法(NSGA- II)的作物种植结构多目标调整模型, 并提出了针对白洋淀上游平原区、山区等不同水资源限制和农业机械化程度情景下的种植结构调整优化方案。研究表明, 在平原区现状机械化水平下, 在不限制用水的情景下, 可以通过调减一年两作的种植面积, 增加蔬菜和绿豆-鲜食玉米等的种植面积, 达到提高经济效益 12.6%的目的, 而生态效益和节水效益都有所降低。在限水情景下, 小麦-玉米调减比例增加, 调增绿豆-鲜食玉米、春季甘薯、蔬菜和果蔬的面积, 实现经济效益和节水效益的提高; 而要达到节水 20%的目标, 所有作物的种植面积都要缩减, 高耗水种植制度小麦-玉米种植面积缩减比例达 21.5%, 同时经济效益和生态效益都下降。在未来提高机械化水平的情景下, 调整优化后的经济效益相比现状机械化水平提高或下降减少。在山区所有情景下, 小麦-玉米种植面积随着对水分限制水平(不限水—小于现状水资源—节水 20%)的增加调减比例增加, 同时增加果树的种植面积。在山区可以通过种植结构的调整达到既节水 20%, 同时经济效益提高的目标, 这是平原区所不能达到的。总之, 无论是平原区还是山区, 均是在不限水情景下优化后的经济效益、生态效益相对较高, 而节水越多, 优化后的经济效益、生态效益增幅越小、降幅越大。并且在平原区如果在节水要求不高情景下应适当增加蔬菜面积, 减少粮食种植面积; 在节水要求高的情景下应削减所有作物包括水果、蔬菜的种植面积, 在山区应该适当削减粮食种植面积, 扩大果树的种植面积。该研究不仅可为研究区未来作物种植结构调整提供决策依据, 也为在类似地区种植结构调整和水资源优化管理提供了新的情景参考。

关键词: NSGA- II 算法; 种植结构; 经济效益; 生态效益; 水资源优化

中图分类号: S5-3

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Optimization of the planting structure in the upstream region of Baiyangdian Lake based on the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA- II)*

* 国家水体污染控制与治理专项(2018ZX07110001)、科技部国际合作项目(2018YFE0110100)、国家自然科学基金项目(31871518)和国家重点研发计划项目(2017YFD0300908)资助

** 通信作者: 杜雄, 主要从事作物生长系统调控工程方面的研究, E-mail: duxiong2002@163.com; 杨艳敏, 主要从事农业耗水评估方面的研究, E-mail: ymyang@sjziam.ac.cn

王璐, 主要从事农业耗水方面的研究。E-mail: 1742646162@qq.com

收稿日期: 2020-12-30 接受日期: 2021-03-19

* This study was supported by the National Water Pollution Control and Treatment Special Project of China (2018ZX07110001), the International Cooperation Program of Ministry of Science and Technology of China (2018YFE0110100), the National Natural Science Foundation of China (31871518) and the National Key Research and Development Program of China (2017YFD0300908).

** Corresponding authors: DU Xiong, E-mail: duxiong2002@163.com; YANG Yanmin, E-mail: ymyang@sjziam.ac.cn

Received Dec. 30, 2020; accepted Mar. 19, 2021

WANG Lu^{1,2}, DU Xiong^{1**}, WANG Rong³, YANG Yanmin^{2**}, HU Yukun², HOU Zhenjun⁴

(1. College of Agronomy, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China; 2. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Water-Saving Agriculture, Shijiazhuang 050022, China; 3. Public Service Bureau of Hebei Xiong'an New Area Management Committee, Xiong'an 071700, China; 4. Wangdu Experimental Station of Irrigation, Wangdu 072450, China)

Abstract: Reasonable planting structures are the basis of the optimal allocation of regional water and land resources. The upstream region of Baiyangdian Lake suffers from the perils of water shortage and an unreasonable planting structure. On the base of the current status of the main crop planting structure, this study considered the crop planting area as optimization variable, the water resources, land resources, and social needs as the constraints, while seeking to maximize the economic and ecological benefits and to minimize the irrigation water consumption based on the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-) of the crop planting structure adjustment model. This study also proposed the planting structure optimization schemes under different scenarios of various water restrictions and agricultural mechanization levels in the mountain area and plain area of the upstream of Baiyangdian Lake. The results showed that, at the current status of mechanization level, the area of the rotations of two crops in a year scaled down, while vegetables and mung beans-fresh maize areas increased, the economic benefits should increase 12.6%, and ecological and water-saving benefits decreased under the no-restricted irrigation water; while wheat-maize, mung beans-fresh maize, spring sweet potato, vegetables and fruits areas increased under restricted irrigation water inducing increased economic and water-saving benefits. In the 20% water-saving scenario, almost all crop areas would be scaled down, including vegetables, area of wheat-maize decreased 21.5%, and economic and ecological benefits decreased. In the scenario without water limitation, the optimized economic benefit increased the most, the ecological benefit decrease the least, water consumption increased, and the grain yield decreased the least. However, in the scenario of 20% water saving, the economic and ecological benefits and grain yield decreased. Under current and future mechanization levels, the fruit tree area increased under different water restriction scenarios. With no-water limitation, the economic and ecological benefits maximally improved after optimization, and water use and grain yield maximally decrease. Under the 20% water-saving scenario, the economic benefit increased the least, the ecological benefit decreased, and grain yield decreased the most. These results indicate that the current and future mechanization scenarios are not limited by water in the plain or mountainous areas, and the optimized economic and ecological benefits are relatively high. Moreover, in the plain areas with low water-saving requirements, the vegetable planting area should be increased, and the grain planting area should be reduced. In areas with high water-saving requirements, the planting area of all crops, including fruits and vegetables, should be reduced. In the mountainous areas, the grain planting area should be reduced, and the fruit tree planting area should be expanded. This study provides a decision basis for future regional planting structure adjustment. Past adjustments in the planting structure, with more adjustments according to different crop types, tended to ignore adjustments in the different cropping systems or to consider the fixed number of years or different climate scenarios. This paper proposed different scenarios of mechanization and water limitations and highlighted the optimization results under different scenarios for similar areas after adjustment in the planting structure.

Keywords: Non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-); Planting structure; Economic benefits; Ecological benefits; Optimization of water resources

种植结构调整是实现区域水资源节约和高效利用的关键途径之一^[1-2]。华北平原粮食生产主要依靠开采地下水, 导致区域地下水严重超采^[3], 农业生产难以可持续发展。近年来, 国内外学者采用不同的方法对华北地区的种植结构优化进行了大量的研究^[4-5], 以水分利用效率高的作物替代水分利用效率低的作物、减少高耗水作物的种植面积成为主流的调整方向^[6-8]。但单一目标的种植结构优化, 无法满足人们对社会、经济、生态效益的多元化追求, 为实现提高粮食产量、节约用水、保障经济收入和保护生态环境的多重目的, 急需开展多目标的优化研究, 实现社会—经济—生态利益的最大化。

传统的多目标种植结构优化模型采用的主要方法包括目标权重法、灰色分析法、妥协约束、熵权系数、模糊优选理论和有序度熵模型等^[9-14]。这些方法对于种植结构调整具有一定的指导意义, 但在系数和目标函数指标权重的确定上存在较强的主观性, 导致结果客观性较差^[15]。近年来新兴的智能算法, 如遗传算法、粒子群算法、神经网络等, 是一类概率型的全局最优搜索算法^[16]。其中, 遗传算法 [Genetic Algorithm (GA)] 是基于生物模拟而演变成的多目标随机优化算法, 该算法起源于 20 世纪中期, 通过种群间群体与个体、个体与个体、群体与群体的信息互相交换, 去粗取精, 去伪存真, 每一次进

化都尽可能保留种群中的优秀个体,淘汰掉不理想的个体,并且在优秀个体之间进行染色体交叉,有些个体还可能出现变异,种群的每一次进化,都会产生一个最优个体,种群所有世代的最优个体,可能就是函数 $f(x)$ 最大值对应的定义域中的点。遗传算法的优点是应用广泛、鲁棒性(Robustness)较强;缺点是算法较复杂、计算量大、参数较难设置、易过早收敛^[17]。因此,一些学者对以前普通的遗传算法进行改进,后来提出了快速精英非支配排序遗传算法(NSGA-)^[18],降低了算法的复杂程度,提高了算法的运算速度和优化结果的精度,对解决很多实际上的多目标优化问题具有非常重要的意义。很多学者基于此利用该算法对一些地区的种植结构进行优化,比如胡洪静等^[19]利用 NSGA- 算法得到了不同灌溉水价水平下对应的种植结构和灌水量调整方案,罗建美^[20]基于 NSGA- 算法对京津冀平原农业种植结构进行优化。但是前人对种植制度优化的过程中,优化对象多是不同作物的种植面积,很少对不同轮作制度的种植面积进行优化,比如一年 1 作春玉米和一年两作冬小麦-夏玉米的夏玉米一起考虑玉米的种植面积,很少单独考虑,上述研究达不到对熟制和轮作制度优化的目的。

白洋淀流域位于华北地区中部,水资源问题极其突出^[21],农业作为用水大户,是造成白洋淀流域水资源减少的重要因素^[22],农业难以可持续发展,为兼顾该地区的水资源以及经济、生态效益,本研究以灌溉用水较少、经济、生态效益较大为优化目标,利用 NSGA- 算法对白洋淀上游山区及平原区农业种植结构进行调整,该研究既考虑了不同作物类型,又考虑不同熟制和轮作制度,针对不同水资源限制水平和机械化水平设立多种情景模式,旨在为当地农业用水和种植业结构优化提供决策支撑,同时也为类似地区的政府决策提供参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

白洋淀上游位于华北地区中部(113°39'~116°18'E, 38°05'~40°09'N)。地形地貌相对复杂,地势自西北向东南倾斜,呈西部山区、东部平原态势。区域属温带大陆性季风型半湿润半干旱气候,年均温从山地到平原为 7.3~12.7℃,多年平均降水 528 mm,主要集中在 6—8 月份,非雨季作物生长特别是春季作物主要依靠地下水灌溉。

白洋淀上游平原区作物种植以一年两熟的冬小麦(*Triticum aestivum*)-夏玉米(*Zea mays*)轮作为主,

蔬菜(包括设施蔬菜)、水果为辅。白洋淀上游山区主要为林业用地,耕地面积占比较少,由于气候偏凉,主要种植一年 1 熟的玉米和果树[苹果(*Malum pumila*)、梨(*Pyrus* spp.)、桃(*Prunus persica*)、葡萄(*Vitis vinifera*)和枣(*Zizyphus jujuba*)等]。此外,白洋淀上游还少量种植大豆(*Glycine max*)、花生(*Arachis hypogaea*)、棉花(*Gossypium* spp.)、红薯(*Ipomoea batatas*)、谷类等作物,这些作物主要在雨季生长,灌溉需水较少。

1.2 数据来源

本研究数据主要包括人口数据和作物播种面积、产量、成本、价格、灌溉水量等数据,研究区人口数据以及作物播种面积源于《保定统计年鉴》《石家庄统计年鉴》《大同统计年鉴》,灌溉水量源于《河北省农业用水定额》,产量、成本、价格等数据源于问卷调查。

1.3 种植结构调整优化模型构建

种植结构调整优化首先进行数学建模。第一步确定调整优化的决策变量,本模型以不同种植制度基础年(2016 年)播种面积作为决策变量,共设置 14 个决策变量;然后确定调整优化的目标函数,选取经济效益、生态效益最大以及灌溉用水量最小作为目标函数;最后设立所需约束条件,主要是耕地面积约束、水资源约束以及粮食、蔬菜、水果需求约束。本区域水资源和农业劳动力是种植结构调整的重要限制因素,而机械化水平可看作是影响农田作业即劳动力的替代指标,因此针对平原和山区分别设置了 3 个水资源限制水平和两个机械化水平,利用 NSGA- 算法对模型进行求解,研究分析 6 种不同情景下作物种植结构优化前后经济效益、生态效益、节水效果变化以及作物种植面积的变化。

1.3.1 种植结构调整优化决策变量

根据白洋淀上游平原区和山区适宜的作物熟制、作物种类和种植制度,以不同种植制度年播种面积作为决策变量,共设置 14 个变量: X_1 、 X_2 、 $\dots$ 、 X_{14} (hm²), 分别代表一年两熟制的小麦-玉米(X_1)、小麦-谷子(X_2)、小麦-大豆(X_3)、小麦-夏甘薯(X_4)、小麦-绿豆(X_5)、绿豆-鲜食玉米(X_6)、一年 1 熟制的玉米一作(X_7)、棉花一作(X_8)、春甘薯一作(X_9)、谷子一作(X_{10})、花生一作(X_{11})、高粱一作(X_{12})、果树(X_{13})、蔬菜(X_{14}), 此外蔬菜没有区分熟制和种类,只考虑年内总播种面积。

1.3.2 种植结构调整优化目标函数

以经济效益、生态效益、灌溉用水量为目标构建以下种植结构调整优化函数:

1) 经济效益函数:

$$f_1 = \sum_{i=1}^n (v_i \times x_i) \quad (1)$$

式中: f_1 代表农作物总净产值(元); v_i 代表第 i 种植制度($X_1 \sim X_{14}$)下单位面积的净产值(元·hm⁻²); x_i 代表第 i 种植制度的播种面积(hm²); n 代表本研究所涉及的 14 种植制度($n=14$)。

2) 作物生态效益函数:

$$f_2 = \sum_{i=1}^n (e_i \times x_i) \quad (2)$$

式中: f_2 代表总生态效益(元); e_i 代表第 i 种植制度下单位面积农田的生态效益(元·hm⁻²), 其估算以农田生态系统服务功能的正效应扣除其负环境成本获得。农田生态系统服务功能的正效应包括农产品生产功能、社会保障功能、土壤保持功能、土壤固碳功能、光合作用释氧功能、净化大气功能、维持营养物质循环功能; 负的环境成本包括地下水资源消耗成本、温室气体排放成本、地膜污染成本、农药污染成本、化肥流失成本。具体各种种植制度的生态效益估算参考王雷明^[23]和陈兆波^[24]的相关研究成果。

3) 灌溉用水量函数:

$$f_3 = k \times \sum_{i=1}^n (m_i \times x_i) \quad (3)$$

式中: f_3 代表总灌溉水量(m³); m_i 代表第 i 种植制度下单位面积农田灌溉水量(m³·hm⁻²), 其数值根据《河北省用水定额》^[25]中相应作物的灌溉定额相加获得; k 代表有效灌溉比例, 即有效灌溉面积与耕地面积的比值, 根据统计年鉴数据, 该区域平原区和山区取值分别为 0.9 和 0.6。

1.3.3 约束条件

本研究根据研究区内耕地面积、水资源量以及居民日常生活对农产品的需求设置了 7 个约束条件, 分别为:

1) 耕地面积约束

种植结构调整优化后各种种植制度的总面积不高于现状下白洋淀上游平原区/山区总耕地面积, 即:

$$\sum_{i=1}^n x_i \leq A \quad (4)$$

式中: A 代表研究区现状下总耕地面积(hm²)。

2) 水资源约束

在区域种植业发展中, 首要的目标是农业可持续发展, 在地下水资源超采严重的背景下, 水资源是重要的约束条件。一是通过建立与当地农业水资源相匹配的种植结构; 二是增加低耗水作物, 降低高耗水作物种植面积, 白洋淀上游平原区/山区种植结构优化后农业灌溉总用水量不能超过该区域现状

种植结构下灌溉用水总量。

$$f_3 \leq Q \quad (5)$$

式中: Q (m³) 代表不同的用水调控情景, 包括: 现状灌溉用水量和比现状节水 20% 两个目标。

3) 各种作物种植面积非负约束条件:

$$x_i \geq 0, i=1, 2, 3, \dots, 14 \quad (6)$$

式中: x 为第 i 种植制度种植面积(hm²)。

4) 粮食需求约束

一般认为, 一个国家或者地区的粮食自给率在 100% 以上, 就是完全自给; 在 95%~100%, 属于基本自给; 在 90%~95%, 是可以接受的粮食安全水平; 一旦小于 90%, 粮食供求的风险就会增大^[26]。根据《保定统计年鉴》^[27], 2016 年白洋淀上游平原区人口数为 812.96 万人, 山区为 392.95 万人。由于平原区土地肥沃, 耕地面积较多, 灌溉条件好, 因此认为该区域粮食可以实现完全自给, 粮食自给率取 100%。而白洋淀上游山区, 耕地面积较少, 灌溉条件有限, 林业用地面积占比较大, 因此认为人均可以占有的粮食量少于平原区, 认为该区域粮食处于可以接受的粮食安全水平, 粮食供给率取 90%。由于玉米、小麦是白洋淀上游的主要粮食作物, 因此粮食需求约束仅仅考虑玉米、小麦, 根据《基于合理膳食结构的人均食物需求量估算》^[28]确定地区主要粮食(含饲料用粮)人均年需求量: 小麦 103 kg, 玉米 180 kg。

$$y_i \times x_i \geq P \times \gamma \times \beta \quad (7)$$

式中: y_i 是第 i 种植制度单位面积产量(kg·hm⁻²), x_i 是优化后的种植面积(hm²), γ 是人均粮食年需求量(kg·a⁻¹), P 是研究区总人口数, β 是粮食供给率。

5) 蔬菜、水果需求约束

人均年蔬菜、水果最低需求量根据石玉林等^[29]研究成果, 设定华北地区居民生活对蔬菜的年人均需求量为 130 kg·a⁻¹, 对水果的年人均需求量为 55 kg·a⁻¹。

$$y_{sc} \times x_{sc} \geq P \times \gamma_{sc} \quad (8)$$

$$y_{sg} \times x_{sg} \geq P \times \gamma_{sg} \quad (9)$$

式中: y_{sc} 代表蔬菜的单位面积产量(kg·hm⁻²); y_{sg} 代表水果的单位面积产量(kg·hm⁻²); x_{sc} 和 x_{sg} 分别是蔬菜和水果的优化面积(hm²); γ_{sc} 和 γ_{sg} 分别代表该区域人均蔬菜、水果的年需求量(kg·a⁻¹)。

1.4 情景设置

水资源和农业劳动力是种植结构调整的重要限制因素, 而机械化水平可看作是影响农田作业即劳动力的替代指标。本研究针对平原和山区分别设置

了 3 个水资源限制水平和两个机械化水平, 研究分析 6 种不同情景下作物种植结构优化前后经济效益、生态效益以及节水效果变化。

平原与山区的水资源限制 3 个情景分别为: 1) 不限制灌溉用水量(Q); 2) 种植结构优化后的用水量(Q)不超过现状灌溉用水量; 3) 种植结构优化后的用水量(Q)不超过现状情况下灌溉用水量的 80%, 达到节水 20% 的目的。机械化水平设置为现状机械化水平和未来机械化水平。现状情况下小麦和玉米的机械化水平设置为 100%, 其他作物的机械化水平按照下列公式计算:

$$U_T = U_1 \times P_1 + U_2 \times P_2 \quad (10)$$

式中: U_T 代表该区域总的机械化水平, 根据《关于加快推进农业机械化和农机装备产业转型升级的若干意见》^[30], 河北省农作物耕种收综合机械化水平约 83%, 丘陵山区耕种收综合机械化水平约 65%, 根据统计年鉴, 山区和平原耕地面积分别占总耕地面积的比例为 41% 和 59%。在平原区 U_1 为小麦-玉米、玉米一作的机械化水平, 在山区 U_1 为小麦-玉米的机械化水平; U_2 为除蔬菜、水果以外其他作物的机械化水平, P_1 、 P_2 分别为小麦、玉米和其他作物占总的播种面积的比例。根据平原区机械化水平 95%, 山区 65%, 平原区小麦-玉米、玉米面积占平原区总耕地面积的 72%, 山区小麦-玉米面积占山区总耕地面积的 35%, 计算出平原区现状其他作物的机械化率为 82%, 山区现状其他作物的机械化水平为 46%。水果和蔬菜由于种类繁多, 新鲜采食增

加了收获的困难(收获用工大概占到总用工量的 1/2~2/3), 根据《2018 年全国农作物耕种收综合机械化率超过 67%》^[31], 平原区和山区水果、蔬菜的现状机械化程度取 30%。

未来机械化水平, 平原区所有作物设置为 100%, 山区除玉米、小麦以外的其他作物按照在现有的水平上提高 14%, 即 60% 来计算。平原和山区蔬菜、水果的机械化程度按照 33% 来计算。

1.5 模型参数选择

1.5.1 种植成本

模型中输入的不同种植制度的投入和产出成本项由入户调查问卷得出, 项目组于 2019 年对处于白洋淀上游的河北省望都县(平原区)和阜平县(山区)进行入户调查, 调查样本采用分层抽样和随机抽样相结合, 首先在县一级选取若干样本村, 然后在同一村内随机选取若干样本户进行调查, 调查采用访谈式, 依据事先印好的试卷, 与农民进行交谈, 对试卷上的问题逐一提问, 并通过走访和电话调查进行数据补充, 共计调查 10 个乡镇的 20 个村。

不同作物生产采用机械作业和非机械(耕、种、收)作业的投入成本如表 1、表 2 所示。

此处灌溉费用仅仅为水费, 不包括人工费; 劳力投入费为除整地、播种、收获外浇水、施肥、打药、除草、整枝等产生的人工费用。由于小麦-玉米目前基本完全实现机械化, 非机械种植成本不再包含小麦-玉米成本。

表 1 白洋淀上游各种种植制度单位面积机械种植成本

Table 1 Mechanical planting cost per unit area of various cropping system in the upper stream of Baiyangdian Lake $\text{¥}\cdot\text{hm}^{-2}$

种植制度 Cropping system	灌溉 Irrigation	种子 Seeds	耕地 Cultivated land	播种 Sowing	收获 Harvest	肥料 Fertilizer	农药 Pesticide	农膜 Mulching films	劳力 Labor	总成本 Total cost
小麦-玉米 Wheat-maize	1875	1800	1800	675	2100	3900	630	60	1200	14 040
小麦-谷子 Wheat-millet	1875	1140	1800	750	1800	3975	480	0	1080	12 900
小麦-大豆 Wheat-soybean	1875	1470	1800	600	1800	3405	630	0	1320	12 900
小麦-夏甘薯 Wheat-summer sweet potato	2100	6300	2775	3900	3300	4950	630	0	2130	26 085
小麦-绿豆 Wheat-mung bean	1875	1575	1800	600	1800	3585	630	60	1470	13 395
绿豆-鲜食玉米 Mung beans-fresh maize	1575	2775	900	675	2100	3210	600	120	2050	14 005
玉米一作 Maize	375	750	900	375	1200	1800	300	60	390	6150
棉花一作 Cotton	1200	540	900	375	1200	2550	1080	615	3180	11 640
春甘薯一作 Spring sweet potato	1800	15 750	1875	3600	2400	3000	1250	900	3740	34 315
谷子一作 Millet	375	90	900	450	900	975	150	0	270	4110
花生一作 Peanut	375	2370	900	375	900	2250	615	120	750	8655
高粱一作 Sorghum	375	600	900	375	900	900	225	0	1095	5370

表 2 白洋淀上游各种种植制度单位面积非机械类种植成本

Table 2 Non-mechanical planting cost per unit area of various cropping system in the upper stream of Baiyangdian Lake
¥·hm⁻²

种植制度 Cropping system	灌溉 Irrigation	种子 Seed	耕地 Cultivated land	播种 Sowing	收获 Harvest	肥料 Fertilizer	农药 Pesticide	农膜 Mulching films	劳力 Labor	总成本 Total cost
小麦-谷子 Wheat-millet	1875	1140	3600	1200	3150	3975	480	0	1080	16 500
小麦-大豆 Wheat-soybean	1875	1470	3600	900	3150	3405	630	0	1320	16 350
小麦-夏甘薯 Wheat-summer sweet potato	2100	6300	6300	3900	5700	4950	630	0	2130	32 010
小麦-绿豆 Wheat-mung bean	1875	1575	3600	900	3150	3585	630	60	1470	16 845
绿豆-鲜食玉米 Mung beans-fresh maize	1575	2775	2700	1375	5950	3210	600	120	2050	20 355
玉米一作 Maize	375	750	2700	750	2700	1800	300	60	390	9825
棉花一作 Cotton	1200	540	2700	750	3000	2550	1080	615	3180	15 615
春甘薯一作 Spring sweet potato	1800	15 750	5400	3600	4800	3000	1250	900	3740	40 240
谷子一作 Millet	375	90	2700	900	2250	975	150	0	270	7710
花生一作 Peanut	375	2370	2700	750	2700	2250	615	120	750	12 630
高粱一作 Sorghum	375	600	2700	900	2250	900	225	0	1095	9045

蔬菜、果树以典型种类为主, 根据各种类的面积比例加权计算每公顷蔬菜和果树的总产值及成本, 其数据来自入户调查。蔬菜选择黄瓜(*Cucumis sativus*)、西红柿(*Solanum lycopersicum*)、豆角(*Vigna unguiculata*)、辣椒(*Capsicum annuum*)作为典型设施蔬菜, 选择白菜(*Brassica rapa*)、萝卜(*Raphanus sativus*)、南瓜(*Cucurbita moschata*)、大葱(*Allium fistulosum*)作为大田蔬菜代表。果树选择梨、葡萄、苹果、桃为代表。果树为多年生木本植物, 盛果期在种植若干年后, 加之通货膨胀等经济因素, 种苗成本较难量化, 因此不纳入果树成本; 另外, 保温膜、棚架等设施由于材质不同使用年限有差异, 没将建设温棚的劳动力成本和设施投入纳入整体投入产出分析。

根据统计年鉴数据, 研究区现状大田蔬菜白菜、萝卜、南瓜、大葱的种植面积分别为 26 908 hm²、4319 hm²、508 hm²和 6528 hm², 设施蔬菜黄瓜、西红柿、豆角、辣椒的种植面积分别为 10 351 hm²、11 701 hm²、9562 hm²和 4404 hm², 设施蔬菜和大田蔬菜的面积比例约各占 50%^[32]。根据表 3 数据, 完全非机械化条件下, 大田蔬菜根据几个典型种类面积比例加权计算的总成本为 25 087 元·hm⁻², 设施蔬菜加权计算后的成本为 39 672 元·hm⁻²; 大田和设施蔬菜的单位面积加权计算的总成本为 32 380 元·hm⁻²。完全机械化条件下, 大田蔬菜的单位面积成本加权后为 21 014 元·hm⁻², 设施蔬菜单位面积成本加权后为 33 533 元·hm⁻², 蔬菜的单位面积成本加权后为

27 274 元·hm⁻²。

大田蔬菜白菜、萝卜、南瓜和大葱的产量分别为 55 040 kg·hm⁻²、40 000 kg·hm⁻²、36 500 kg·hm⁻²和 36 200 kg·hm⁻², 单价分别是 0.7 元·kg⁻¹、0.5 元·kg⁻¹、0.6 元·kg⁻¹和 1.2 元·kg⁻¹, 单位面积总产值分别为 38 528 元·hm⁻²、20 000 元·hm⁻²、21 900 元·hm⁻²和 43 440 元·hm⁻²。根据这几个典型种类的面积比例进行加权计算后得出大田蔬菜的单位面积总产值是 37 054 元·hm⁻²; 设施蔬菜黄瓜、西红柿、豆角和辣椒的产量分别为 60 000 kg·hm⁻²、65 000 kg·hm⁻²、45 000 kg·hm⁻²和 22 500 kg·hm⁻², 单价分别为 3.0 元·kg⁻¹、3.5 元·kg⁻¹、2.2 元·kg⁻¹和 3.5 元·kg⁻¹, 单位面积总产值分别为 180 000 元·hm⁻²、227 500 元·hm⁻²、99 000 元·hm⁻²和 78 750 元·hm⁻², 根据几个典型种类的面积比例加权计算后得出设施蔬菜的总产值是 161 547 元·hm⁻²。鉴于该区域大田蔬菜和设施蔬菜的占比各为 50%, 该区域蔬菜单位面积总产值为 99 300 元·hm⁻²。

综上所述, 在完全非机械化条件下, 蔬菜的单位面积净产值是 66 920 元·hm⁻²; 在完全机械化条件下, 蔬菜的单位面积净产值是 72 026 元·hm⁻²。

根据统计年鉴数据, 该区域现状苹果、梨、葡萄和桃的种植面积分别为 10 800 hm²、5620 hm²、5831 hm²和 19 840 hm²。根据表 4 数据, 完全非机械化条件下, 根据几种典型果树面积比例进行加权后得到的种植成本为 33 593 元·hm⁻²; 完全机械化条件下, 果树的种植成本为 32 080 元·hm⁻²。

表 3 白洋淀上游蔬菜的完全非机械化以及完全机械化种植成本

Table 3 Cost of fully mechanized and completely non-mechanized planting of vegetables in the upper stream of Baiyangdian Lake $\text{¥}\cdot\text{hm}^{-2}$

项目 Item	蔬菜类别 Vegetables category	蔬菜名称 Vegetable name	种子 Seeds	灌溉 Irrigation	耕地 Cultivated land	播种 Sowing	收获 Harvest	肥料 Fertilizer	农药 Pesticide	劳力 Labor	总成本 Total cost
完全非机械化 种植成本 Completely non-mechanized planting cost	大田蔬菜 Outdoor vegetables	白菜 Cabbage	1450	2750	2250	2200	7500	4000	1362	3300	24 812
		萝卜 Radish	1350	2850	2250	2015	9200	3800	1254	3100	25 819
		南瓜 Pumpkin	1050	2890	2250	2350	8000	4150	1450	3300	25 440
		大葱 Onion	1500	2630	2250	2550	7670	4550	1560	3000	25 710
	设施蔬菜 Facilities vegetables	黄瓜 Cucumber	2650	3750	3125	3750	12 500	7420	3600	4658	41 453
		西红柿 Tomatoes	2600	3055	3125	3250	12 300	7500	3000	4575	39 405
		豆角 Beans	2825	3175	3125	3500	10 920	7650	3250	4820	39 265
		辣椒 Chili	2750	3505	3125	3620	10 620	7200	3060	3200	37 080
完全机械化 种植成本 Fully mecha- nized planting cost	大田蔬菜 Outdoor vegetables	白菜 Cabbage	1450	2750	1500	1467	5000	4000	1362	3300	20 829
		萝卜 Radish	1350	2850	1500	1343	6133	3800	1254	3100	21 331
		南瓜 Pumpkin	1050	2890	1500	1567	5333	4150	1450	3300	21 240
		大葱 Onion	1500	2630	1500	1700	5113	4550	1560	3000	21 553
	设施蔬菜 Facilities vegetables	黄瓜 Cucumber	2650	3750	2083	2500	8333	7420	3600	4658	34 994
		西红柿 Tomatoes	2600	3055	2083	2167	8200	7500	3000	4575	33 180
		豆角 Beans	2825	3175	2083	2333	7280	7650	3250	4820	33 416
		辣椒 Chili	2750	3505	2083	2413	7080	7200	3060	3200	31 291

表 4 白洋淀上游各果树的完全机械化以及完全非机械化种植成本

Table 4 Cost of fully mechanized and completely non-mechanized planting of fruit trees in the upper stream of Baiyangdian Lake $\text{¥}\cdot\text{hm}^{-2}$

项目 Item	水果 Fruit	灌溉加入工 Irrigation and labor	施肥加入工 Fertilization and labor	农药加入工 Pesticide and labor	剪枝 Pruning	疏果 Fruit thinning	套袋加袋子 Bagging and bags	收获 Harvest	反光膜 Reflec- tive film	总成本 Total cost
完全非机械化种植成本 Completely non-mechanized planting cost	苹果 Apple	1200	5400	6350	1500	6000	8000	5400	2250	36 100
	梨 Pear	1170	5175	5160	1450	5600	8025	4500		31 080
	葡萄 Grapes	1300	7500	6500	1700	6500	9000	4800		37 300
	桃 Peach	1350	5700	6600	1300	5400	7500	4000		31 850
完全机械化种植成本 Fully mechanized planting cost	苹果 Apple	1200	5400	6350	1500	6000	8000	3600	2250	34 300
	梨 Pear	1170	5175	5160	1450	5600	8025	3000		29 580
	葡萄 Grapes	1300	7500	6500	1700	6500	9000	3200		35 700
	桃 Peach	1350	5700	6600	1300	5400	7500	2667		30 517

苹果、梨、葡萄和桃的单位面积产量分别为 $25\ 675\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $33\ 356\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $20\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $26\ 592\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，单价分别为 $5\ \text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $3\ \text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $6\ \text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $4\ \text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，单位面积总产值分别为 $128\ 375\ \text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $100\ 068\ \text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $120\ 000\ \text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $106\ 368\ \text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，对这几类果树按面积种植比例加权后计算得到果树总产值为 $113\ 062\ \text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。因此在完全非机械化和完全机械化条件下，果树的单位面积净产值分别为 $79\ 470\ \text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $80\ 982\ \text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

由于山区蔬菜较少，平原区果树较少，且蔬菜、果树种类繁多计算复杂，这里认为平原区、山区蔬菜、果树的单位面积净产值相同。

1.5.2 平原区、山区不同作物单位面积产值与单位面积产量

作物单位面积产值由单位面积产量与收购价格

决定，收购价格由调查问卷获得，平原和山区作物产量由统计年鉴数据结合大田试验所得，结果如表 5 所示。

1.5.3 不同机械化情景下平原区、山区各作物净产值取值

现状机械化情景下，平原区小麦-玉米、玉米的机械化率 100%，其他作物机械化率 82%，蔬菜、水果机械化水平 30%；未来机械化情景下，平原区小麦-玉米、玉米机械化水平不变，其他作物机械化率 100%，水果、蔬菜机械化水平 33%(表 6)。

现状机械化情景下，山区小麦-玉米的机械化率 100%，其他作物机械化率 46%，蔬菜、水果机械化率 30%；未来机械化情景下，山区小麦-玉米的机械化水平不变，其他作物机械化率 60%，蔬菜、水果的机械化率 33%(表 6)。

表 5 白洋淀上游平原区、山区不同种植制度的作物单位面积产量与产值

Table 5 Output value per unit area and yield per unit area of crops of different cropping systems in plain and mountainous areas in the upper stream of Baiyangdian Lake

种植制度 Cropping system	价格 Price (¥·kg ⁻¹)	平原区 Plain area		山区 Mountainous area	
		产量 Yield (×10 ³ kg·hm ⁻²)	产值 Output value (×10 ³ ¥·hm ⁻²)	产量 Yield (×10 ³ kg·hm ⁻²)	产值 Output value (×10 ³ ¥·hm ⁻²)
小麦-玉米 Wheat-maize	2.2~1.8	6.5~7.6	27.9	5.8~5.9	23.4
小麦-谷子 Wheat-millet	2.2~4.0	6.5~3.9	29.7	5.8~3.4	26.5
小麦-大豆 Wheat-soybean	2.2~4.5	6.5~2.3	24.8	5.8~2.1	22.3
小麦-夏甘薯 Wheat-summer sweet potato	2.2~2.0	6.5~15.2	44.8	5.8~11.1	35.0
小麦-绿豆 Wheat-mung bean	2.2~7.4	6.5~1.4	24.8	5.8~1.1	21.1
绿豆-鲜食玉米 Mung beans-fresh maize	7.4~2.2	1.4~13.7	40.6	1.1~10.6	31.6
玉米一作 Maize	1.8	7.6	13.7	5.9	10.6
棉花一作 Cotton	7.6	3.2	24.2	2.3	17.6
春甘薯一作 Spring sweet potato	2	31.0	61.9	22.6	45.1
谷子一作 Millet	4	3.9	15.4	3.4	13.7
花生一作 Peanut	5.5	4.9	26.8	4.2	23.1
高粱一作 Sorghum	2.6	6.0	15.6	6.0	15.5
蔬菜 Vegetables	/	/	99.3	/	99.3
果树 Fruit	/	/	113.1	/	113.1

表 6 白洋淀上游不同情景下平原区、山区各作物单位面积净产值取值

Table 6 Value of net output value per unit area of crops of different cropping systems in plain and mountain areas under different scenarios in the upper stream of Baiyangdian Lake ×10³ ¥·hm⁻²

种植制度 Cropping system	平原区 Plain area		山区 Mountainous area	
	现状机械化情景 Current mechanization scenario	未来机械化情景 Future mechanization scenario	现状机械化情景 Current mechanization scenario	未来机械化情景 Future mechanization scenario
小麦-玉米 Wheat-maize	13.9	13.9	9.4	9.4
小麦-谷子 Wheat-millet	16.2	16.8	11.7	12.2
小麦-大豆 Wheat-soybean	11.3	11.9	7.5	8.0
小麦-夏甘薯 Wheat-summer sweet potato	17.6	18.7	5.8	6.6
小麦-绿豆 Wheat-mung bean	10.8	11.4	5.8	6.3
绿豆-鲜食玉米 Mung beans-fresh maize	25.4	26.5	14.1	15.0
玉米一作 Maize	6.8	7.5	2.5	3.0
棉花一作 Cotton	11.9	12.6	3.8	4.4
春甘薯一作 Spring sweet	26.6	27.6	7.6	8.4
谷子一作 Millet	10.7	11.3	7.6	8.1
花生一作 Peanut	17.4	18.2	12.3	12.8
高粱一作 Sorghum	9.6	10.2	8.2	8.7
蔬菜 Vegetables	68.5	68.6	68.5	68.6
果树 Fruit	79.9	80.0	80.0	80.0

1.6 模型求解

首先根据种植结构调整需求构建多目标的数学优化模型, 然后采用非支配排序遗传算法(NSGA-II)对优化模型求解。计算流程图如图 1。首先对随机产生的规模为 N 的初始种群 P_0 进行遗传操作, 非支配排序后通过遗传算法的选择、交叉、变异 3 个基本操作得到第一代子代种群 Q_0 ; 然后将父代种群与子代种群合并后, 进行快速非劣排序和拥挤距离排

序, 同时对每个非支配层中的个体进行拥挤度计算, 根据非支配关系以及个体的拥挤度选取合适的个体组成新的父代种群 P_t , 最后, 通过遗传算法的基本操作产生新的子代种群 Q_t ; 依此类推, 直到满足程序结束的条件。该算法相较于以前的算法, 降低了计算的复杂程度, 大大提升了计算的速度, 在处理多目标优化问题上具有更好的性能。

NSGA-II 的实现过程利用 MATLABR 2016a 通

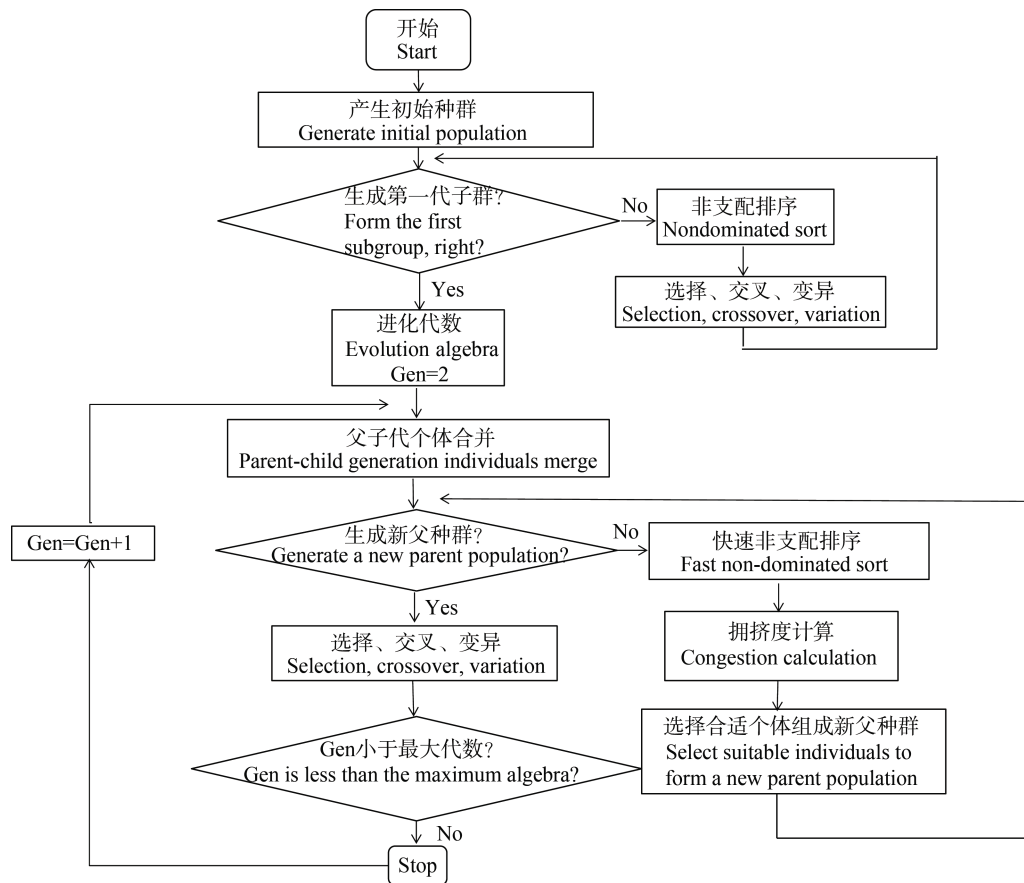


图 1 NSGA-II 主要流程图

Fig. 1 NSGA- main flow chart

过GUI方式调用自带的Gamultiobj函数来计算。经过各种参数的反复校正以及测算,最后确定该算法中的各个参数的取值分别为:

最优种群个数系数(ParetoFtaction)=0.3; 种群规模(Populationsize)=100; 迭代次数(Generation)=300; 最大迭代次数限制(StallGenLimit)=300; 精度(TolFun)= 10^{-6} 。

由于遗传算法随机产生初始种群且根据适应度选择再生个体,所以模型优化结果为有多个优化方案的Pareto非劣解集,但是各非劣解集差别不大,最终从非劣解集中挑选出相对较好的优化结果。

2 结果与分析

2.1 平原区不同情景下种植结构调整结果

白洋淀上游平原区当前主要农作物的种植面积 514 595 hm², 以小麦-玉米、蔬菜、花生、果树和玉米一作为主, 5 种作物的总种植面积占农作物总种植面积的 96.59%。其中, 小麦-玉米、玉米一作的种植面积占总种植面积的 53.69%, 蔬菜和水果的种植面积占总种植面积的 26.03%, 花生一作的种植面积

占总种植面积的 16.86%。

在不同机械化水平和农业灌溉用水限制情景下, 平原区作物种植结构优化结果如表 7 所示。在现状机械化水平, 当对灌溉用水不做限制(CS₁)情景下, 除绿豆-鲜食玉米的种植面积增加外, 其余种植制度的面积均减少; 蔬菜面积增加 32.1%, 果树面积减少 4.5%; 当对灌溉用水限制为不超过当前灌溉用水(CS₂)情景下, 优化后的种植结构除绿豆-鲜食玉米、春薯外, 其他种植制度的种植面积都有所减少, 而蔬菜和果树的种植面积增加 17.6%和 15.6%; 在节水 20% (CS₃)情景下, 所有种植制度包括蔬菜、水果的种植面积都有所调减, 其中蔬菜面积减少 18.0%, 果树面积减少 17.6%。在 3 个情景中, 对灌溉用水不做限制(CS₁)情景下, 小麦-玉米的种植面积调减比例最低, 仅 5.8%; 在节水 20% (CS₃)情景下, 小麦-玉米的种植面积调减比例最高, 达 21.5%。

在未来机械化水平下, 在对灌溉用水不做限制的情景(FS₁)下, 除绿豆-鲜食玉米面积调增以外, 其余作物的面积均减少; 蔬菜和水果的种植面积分别调增 32.6%和 1.1%; 当对灌溉用水限制为不超过当

表 7 白洋淀上游平原区不同情景下种植结构优化调整后不同种植制度的面积变化

Table 7 Changes in planting areas of different cropping systems after planting structure adjustment under different scenarios of mechanization level and irrigation in the plain area of the upstream of Baiyangdian Lake

种植制度 Cropping system	面积现状 Area status (hm ²)	面积变化率 Change rate of area (%)					
		CS1	CS2	CS3	FS1	FS2	FS3
小麦-玉米 Wheat-maize	266 117.0	-5.8	-15.9	-21.5	-6.0	-16.1	-22.0
小麦-谷子 Wheat-millet	886.5	-15.9	-14.3	-8.0	-13.3	-16.1	-6.5
小麦-大豆 Wheat-soybean	4923.0	-19.4	-18.2	-17.6	-17.7	-15.8	-15.7
小麦-夏甘薯 Wheat-summer sweet potato	644.8	-18.0	-13.1	-7.2	-13.4	-8.9	-2.9
小麦-绿豆 Wheat-mung bean	459.9	-17.1	-12.1	-8.7	-14.9	-10.3	-6.9
绿豆-鲜食玉米 Mung beans-fresh maize	51.1	1.1	2.2	-3.9	6.2	7.1	2.1
玉米一作 Maize	10 182.0	-19.1	-18.5	-15.6	-19.0	-18.3	-15.4
棉花一作 Cotton	4633.0	-17.4	-11.5	-13.7	-14.9	-9.6	-11.9
春薯一作 Spring sweet	5803.2	-19.2	3.3	-16.2	-14.5	8.5	-11.3
谷子一作 Millet	98.5	-7.8	-11.3	-10.2	-5.4	-9.4	-8.5
花生一作 Peanut	86 791.0	-17.8	-13.9	-14.9	-15.3	-12.7	-12.9
高粱一作 Sorghum	27.0	-19.0	-17.2	-15.1	-17.1	-15.9	-13.8
蔬菜 Vegetables	113 838.0	32.1	17.6	-18.0	32.6	17.7	-17.5
果树 Fruit	20 140.0	-4.5	15.6	-17.6	1.1	20.0	-12.4

CS₁、CS₂和CS₃分别代表现状机械化水平下农田灌溉用水不受限制、不超过现状以及不超过现状的80%; FS₁、FS₂和FS₃代表未来机械化水平下农田灌溉用水不受限制、不超过现状以及不超过现状的80%。C和F represent the current and future levels of mechanization; S₁, S₂, and S₃ represent scenarios of no-restricted irrigation water, no-exceeding the current situation and no-exceeding 80% of the current situation of irrigation water, respectively.

前灌溉用水(FS₂)情景下,除绿豆-鲜食玉米、春薯面积调增以外,其余作物面积均调减,蔬菜面积调增17.7%,果树面积调增20.0%;在节水20%(FS₃)情景下,除绿豆-鲜食玉米面积调增外,其余作物种植面积均减少,蔬菜面积减少17.5%,果树面积减少12.4%。在3个情景中,对灌溉用水不做限制(FS₁)情景下,小麦-玉米的种植面积调减比例最低,仅6.0%;在节水20%(FS₃)情景下,小麦-玉米的种植面积调减比例最高,达22.0%。

从表8可以看出,现状机械化水平下种植结构优化后,不限水情景(CS₁)的经济效益增加12.6%,生态效益降低1.0%,用水量增加3.0%,粮食产量减少6.8%;

限水情景(CS₂)的济效益增加5.3%,生态效益降低8.1%,用水量减少6.3%,粮食产量减少15.0%;节水约20%情景(CS₃)的经济效益降低18.4%,生态效益降低19.7%,用水量减少19.8%,粮食产量减少20.9%。

未来机械化水平下,种植结构优化后不限水情景(FS₁)的经济效益增加14.9%,生态效益减少0.4%,用水量增加3.4%,粮食产量减少6.7%;限水情景(FS₂)优化后的经济效益增加6.6%,生态效益减少7.7%,用水量减少5.9%,粮食产量减少14.9%;节水约20%(FS₃)情景优化后的经济效益减少16.9%,生态效益减少19.4%,用水量减少19.6%,粮食产量减少21.1%。

表 8 白洋淀上游平原区不同情景下种植结构优化调整的效益分析

Table 8 Benefits of planting structure adjustment under different scenarios of mechanization level and irrigation in the plain area of the upstream of Baiyangdian Lake

种植制度 Cropping system	现状 Status quo	变化率 Change rate (%)					
		CS1	CS2	CS3	FS1	FS2	FS3
经济 Economic benefit	149.8×10 ⁸ ¥	12.6	5.3	-18.4	14.9	6.6	-16.9
生态 Ecological benefit	11.4×10 ⁸ ¥	-1.0	-8.1	-19.7	-0.4	-7.7	-19.4
用水 Water consumption	15.9×10 ⁸ m ³	3.0	-6.3	-19.8	3.4	-5.9	-19.6
产量 Crop yield	40.7×10 ⁸ kg	-6.8	-15.0	-20.9	-6.7	-14.9	-21.1

CS₁、CS₂和CS₃分别代表现状机械化水平下农田灌溉用水不受限制、不超过现状以及不超过现状的80%; FS₁、FS₂和FS₃代表未来机械化水平下农田灌溉用水不受限制、不超过现状以及不超过现状的80%。表中产量仅为粮食作物产量,不包括经济作物以及蔬菜、果树产量。C和F represent the current and future levels of mechanization; S₁, S₂, and S₃ represent scenarios of no-restricted irrigation water, no-exceeding the current situation and no-exceeding 80% of the current situation of irrigation water, respectively. The crop yield is the output of food crops, excluding those of cash crops, vegetables and fruit trees.

2.2 山区不同情景下种植结构调整结果

白洋淀上游山区当前主要农作物的种植面积为 357 587 hm², 种植制度以果树、玉米一作、小麦-玉米轮作、蔬菜和花生一作为主。5 种植制度的总种植面积占农作物总种植面积的 90%左右。其中, 小麦-玉米轮作、玉米一作的种植面积占总种植面积的 40.93%, 蔬菜和水果的种植面积占总种植面积的 43.51%, 而春甘薯一作、谷子一作、花生一作的种植面积占总种植面积的 12.85%。

在不同机械化水平和农业灌溉用水限制情景下, 山区作物种植结构优化结果如表 9 所示。现状机械化水平下, 当对灌溉用水不做限制(CS₁)情景下, 除绿豆-鲜食玉米的面积调增外, 其余作物的面积均减少, 蔬菜面积削减 0.4%, 果树面积增加 18.5%; 当对灌溉用水限制为不超过当前灌溉用水(CS₂)情景下, 除绿豆-鲜食玉米的面积调增外, 其余作物的面积均减少, 蔬菜面积增加 9.7%, 果树面积增加 14.7%;

在节水约 20% (CS₃)情景下, 除绿豆-鲜食玉米的面积调增外, 其余作物的面积均减少, 蔬菜面积增加 1.5%, 果树面积增加 13.2%。在 3 个情景中, 对灌溉用水不做限制(CS₁)情景下, 小麦-玉米的种植面积调减比例最低, 仅 6.3%; 在节水 20% (CS₃)情景下, 小麦-玉米的种植面积调减比例最高, 达 65.9%。

在未来机械化水平下, 在对灌溉用水不做限制的情景(FS₁)下, 所有作物的种植面积均减少, 蔬菜面积增加 14.1%, 果树面积增加 16.1%; 当对灌溉用水限制为不超过当前灌溉用水(FS₂)情景下, 所有作物的面积均减少, 蔬菜面积增加 6.0%, 果树面积增加 13.9%; 在节水约 20% (FS₃)情景下, 除绿豆-鲜食玉米的面积略有增加, 其余所有作物的面积均减少, 蔬菜面积减少 17.0%, 果树面积增加 17.1%。在 3 个情景中, 对灌溉用水不做限制(FS₁)情景下, 小麦-玉米的种植面积调减比例最低, 仅 6.7%; 在节水 20.0% (FS₃)情景下, 小麦-玉米的种植面积调减比例最高, 达 61.5%。

表 9 白洋淀上游山区种植结构优化调整后不同种植制度的面积变化

Table 9 Changes in planting areas of different cropping systems after planting structure adjustment under different scenarios of mechanization level and irrigation in the mountainous area of the upstream of Baiyangdian Lake

种植制度 Cropping system	面积现状 Area status (hm ²)	面积变化率 Change rate of area (%)					
		CS1	CS2	CS3	FS1	FS2	FS3
小麦-玉米 Wheat-maize	72 304.0	-6.3	-11.8	-65.9	-6.7	-11.7	-61.5
小麦-谷子 Wheat-millet	1439.5	-18.4	-17.7	-14.1	-12.2	-16.8	-15.9
小麦-大豆 Wheat-soybean	6141.0	-16.7	-18.4	-17.9	-17.7	-17.4	-17.8
小麦-夏甘薯 Wheat-summer sweet potato	1338.4	-16.6	-14.8	-18.5	-9.1	-13.0	-14.9
小麦-绿豆 Wheat-mung bean	461.7	-16.9	-11.6	-15.4	-11.7	-11.8	-15.4
绿豆-鲜食玉米 Mung beans-fresh maize	51.3	0.6	1.7	3.5	-2.1	-10.2	1.1
玉米一作 Maize	74 083.0	-11.0	-8.5	-18.2	-17.8	-19.4	-18.1
棉花一作 Cotton	1903.0	-18.0	-16.8	-17.5	-16.4	-13.1	-13.8
春薯一作 Spring sweet	12 045.6	-19.0	-18.1	-19.2	-18.2	-19.4	-18.2
谷子一作 Millet	12 955.5	-16.3	-18.3	-14.4	-19.0	-16.8	-19.2
花生一作 Peanut	20 964.0	-18.0	-18.8	-17.9	-17.0	-18.3	-18.2
高粱一作 Sorghum	1880.0	-13.9	-16.0	-18.0	-16.3	-17.1	-18.1
蔬菜 Vegetables	36 095.0	-0.4	9.7	1.5	14.1	6.0	-17.0
果树 Fruit	115 925.0	18.5	14.7	13.2	16.1	13.9	17.1

CS₁、CS₂ 和 CS₃ 分别代表现状机械化水平下农田灌溉用水不受限制、不超过现状以及不超过现状的 80%; FS₁、FS₂ 和 FS₃ 代表未来机械化水平下农田灌溉用水不受限制、不超过现状以及不超过现状的 80%。C 和 F represent the current and future levels of mechanization; S₁, S₂, and S₃ represent scenarios of no-restricted irrigation water, no-exceeding the current situation and no-exceeding 80% of the current situation of irrigation water, respectively.

从表 10 可知, 现状机械化水平下, 不限水情景(CS₁)下种植结构优化后的经济效益增加 11.8%, 生态效益提高 3.7%, 用水量增加 0.9%, 粮食产量减少 10.5%; 限水情景(CS₂)下经济效益增加 10.7%, 生态效益增加 1.7%, 用水量基本不变, 粮食产量减少 12.4%; 节水约 20% 的情景(CS₃)下, 经济效益提高 5.2%, 生态效益降低 13.6%, 用水量减少 20.0%, 粮食产量减少 42.0%。

未来机械化水平下, 不限水情景(FS₁)下种植结构优化后的经济效益增加 13.3%, 生态效益提高 3.0%, 用水量增加 1.7%, 粮食产量减少 12.1%; 限水情景(FS₂)下经济效益增加 9.6%, 生态效益增加 0.1%, 用水量减少 2.1%, 粮食产量减少 15.3%; 节水约 20% 的情景(FS₃)下, 经济效益提高 5.2%, 生态效益降低 12.4%, 用水量减少 20.0%, 粮食产量减少 39.7%。

表 10 白洋淀上游山区不同情景下种植结构优化调整的效益分析

Table 10 Benefits of planting structure adjustment under different scenarios of mechanization level and irrigation in the mountainous area of the upstream of Baiyangdian Lake

种植制度 Cropping system	现状 Status quo	变化率 Change rate (%)					
		CS1	CS2	CS3	FS1	FS2	FS3
经济 Economic benefit	131.4×10 ⁸ ¥	11.8	10.7	5.2	13.3	9.6	5.2
生态 Ecological benefit	8.0×10 ⁸ ¥	3.7	1.7	-13.6	3.0	0.1	-12.4
用水 Water consumption	5.8×10 ⁸ m ³	0.9	0.0	-20.0	1.7	-2.1	-20.0
产量 Crop yield	17.0×10 ⁸ kg	-10.5	-12.4	-42.0	-12.1	-15.3	-39.7

CS₁、CS₂ 和 CS₃ 分别代表现状机械化水平下农田灌溉用水不受限制、不超过现状以及不超过现状的 80%; FS₁、FS₂ 和 FS₃ 代表未来机械化水平下农田灌溉用水不受限制、不超过现状以及不超过现状的 80%。表中产量仅为粮食作物产量, 不包括经济作物以及蔬菜、果树产量。C and F represent the current and future levels of mechanization; S₁, S₂, and S₃ represent scenarios of no-restricted irrigation water, no-exceeding the current situation and no-exceeding 80% of the current situation of irrigation water, respectively. The crop yield is the output of food crops, excluding those of cash crops, vegetables and fruit trees.

3 结论

3.1 主要结论

本研究利用改进的遗传算法 NSGA-Ⅱ, 针对白洋淀上游流域不同类型区域平原区和山区, 根据不同的水资源状况和机械化水平设定了 6 种情景, 以经济效益、生态效益和节水效益为目标对种植制度进行了优化, 优化的结果为: 在平原区不限水的情景下可以通过增加蔬菜和绿豆-鲜食玉米等的种植面积, 来达到提高经济效益 12.6%的目的, 而生态效益和节水效益都有所降低。在限水情景下, 小麦-玉米调减比例增加, 调增绿豆-鲜食玉米、春薯、蔬菜和果蔬的面积, 实现经济效益和节水效益的提高; 而要达到节水 20%的目标, 所有作物的种植作物面积都要缩减, 高耗水种植制度小麦-玉米种植面积缩减比例达 21.5%, 同时经济效益和生态效益都下降。在未来提高机械化水平的情景下, 调整优化后的经济效益相比现状机械化水平提高或下降减少; 在山区所有情景下, 小麦-玉米种植面积随着对水分限制水平(不限水-小于现状水资源-节水 20%)的增加调减比例增加, 同时增加果树的种植面积。在山区可以通过种植结构的调整达到既节水 20%同时经济效益提高的目标, 这是平原区所不能达到的。

3.2 研究的主要创新点

以往的研究对于种植结构的优化多是仅仅针对不同作物类型进行调整, 而对熟制或者轮作制度考虑较少, 或者单纯考虑熟制, 本研究在优化过程中既考虑了熟制与轮作又考虑了作物类型, 提升了优化结果, 对决策支持更具有落地性。劳动力成本是未来影响农民决定种什么的关键因素, 而机械化水平又是影响劳动力的关键因素。前人的研究中情景设置多是基于不同发展年限或者不同气候情景, 本文提出了不同机械化发展水平与不同限水条件相结

合的情景设置, 并对不同情景下的优化结果进行讨论, 丰富了备选方案, 为该研究区域或者类似地区种植结构的调整政策提供支撑。

3.3 平原区与山区优化结果对比

近几十年来, 研究区冬小麦-夏玉米一年两熟的种植制度和高强度的农业生产方式消耗了大量的地下水, 且经济、生态效益一般。本文综合考虑区域水、粮、生态、经济及用地的可持续性, 未来种植结构优化的方向应该是粮食基本自给、果蔬适当盈余。这种较为平衡的种植格局更符合我国“不放松粮食生产, 积极发展多种经营”的方针, 为优化结果的实施赢得政策支持^[33]。山区粮食作物种植面积相对平原区较少, 节水潜力较小, 所有情景下果树的面积都有所调增, 因此山区未来种植结构调整方向应削减高耗水、低产出的粮食作物种植面积, 同时扩大果树等经济作物的种植面积。

平原区种植结构调整优化后, 在灌溉不超过现状用水量的限制下, 总体经济效益都有一定的提高。虽然优化后作物种植结构所带来的生态服务功能呈不同程度降低, 但若把节省下来的土地和用水直接用于生态修复, 所获得的生态效益价值更高^[33]。另外, 在节水 20%情景下, 平原区作物种植面积需要进行大幅度压减, 在实际农业生产中, 农作物种植结构和规模不可能在较短时间内达到最优状态, 但不可以盲目进行调整, 否则可能会对区域的粮食安全和社会稳定性造成不利影响^[34]。

3.4 研究的不足之处

种植结构的优化调整是一个复杂系统, 影响因素较多, 为突出重点, 本文对粮食单产、气象条件年际波动、人民膳食结构变化、政策和管理水平等因素未纳入研究范畴, 尤其农作物价格的波动性会影响到农户对作物种植类型和种植规模的选择, 在今

后的研究中, 需要加入更多的模型运行参数和约束条件, 进行更深一步的探讨。同时, 要实现节水目标的种植结构调整, 势必会造成经济效益下降, 如何实现水资源-生态-经济的协调可持续发展, 这也是在未来的研究中急需回答的科学问题。

参考文献 References

- [1] 金涛. 中国粮食作物种植结构调整及其水土资源利用效应[J]. 自然资源学报, 2019, 34(1): 14–25
JIN T. The adjustment of China's grain cropping structure and its effect on the consumption of water and land resources[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(1): 14–25
- [2] 张展羽, 司涵, 冯宝平, 等. 缺水灌区农业水土资源优化配置模型[J]. 水利学报, 2014, 45(4): 403–409
ZHANG Z Y, SI H, FENG B P, et al. An optimal model for agriculture water and soil resources configuration in water shortage irrigation area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(4): 403–409
- [3] HU Y K, MOIWO J P, YANG Y H, et al. Agricultural water-saving and sustainable groundwater management in Shijiazhuang Irrigation District, North China Plain[J]. Journal of Hydrology, 2010, 393(3/4): 219–232
- [4] 高明杰, 罗其友. 水资源约束地区种植结构优化研究——以华北地区为例[J]. 自然资源学报, 2008, 23(2): 204–210
GAO M J, LUO Q Y. Study on cropping structure optimization in region short of water — A case study of North China[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(2): 204–210
- [5] REN D D, YANG Y H, HU Y K, et al. Evaluating the potentials of cropping adjustment for groundwater conservation and food production in the piedmont region of the North China Plain[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2021, 35(1): 117–128
- [6] XIAO D P, SHEN Y J, QI Y Q, et al. Impact of alternative cropping systems on groundwater use and grain yields in the North China Plain Region[J]. Agricultural Systems, 2017, 153: 109–117
- [7] ZHONG H L, SUN L X, FISCHER G, et al. Mission Impossible? Maintaining regional grain production level and recovering local groundwater table by cropping system adaptation across the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2017, 193: 1–12
- [8] GAO B, JU X T, MENG Q F, et al. The impact of alternative cropping systems on global warming potential, grain yield and groundwater use[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 203: 46–54
- [9] 牛凯. 中国农业结构调整的多目标线性规划模型研究[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(4): 840–846
NIU K. Studies of multi-objective linear programming model on Chinese agricultural structure adjustment[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2011, 23(4): 840–846
- [10] 武雪萍, 吴会军, 庄严, 等. 节水型种植结构优化灰色多目标规划模型和方法研究——以洛阳市为例[J]. 中国农业资源与区划, 2008, 29(6): 16–21
WU X P, WU H J, ZHUANG Y, et al. Planning model with grey multiple targets for optimization of water saving plantation structure and method STUDY — Taking Luoyang City as an example[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2008, 29(6): 16–21
- [11] 张礼华, 秦灏. 多目标妥协约束法在灌区种植结构优化中的应用[J]. 现代农业科技, 2010, (12): 222–223
ZHANG L H, QIN H. The application of multi-objective compromise constraint method in the optimization of planting structure in irrigated area[J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2010, (12): 222–223
- [12] 汤瑞凉, 郭存芝, 董晓娟. 灌溉水资源优化调配的熵权系数模型研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2000, 28(1): 20–23
TANG R L, GUO C Z, DONG X J. An optimization model with entropic coefficients for management in irrigation water resources[J]. Journal of Hohai University, 2000, 28(1): 20–23
- [13] 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
CHEN S Y, MA J Q, ZHANG Z W. A multi-objective fuzzy optimization model for planting structure and its method[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2003, 43(1): 12–15
- [14] 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
ZHOU H C, PENG H, ZHANG C, et al. Optimization and evaluation of multi-objective crop pattern based on irrigation water resources allocation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(9): 45–49
- [15] 李荣, 郭萍, 杨献献. 基于分式规划的种植结构多目标不确定性模型研究[J]. 节水灌溉, 2013, (9): 79–81
LI M, GUO P, YANG X X. Planting configuration multi-objective & uncertainty programming model based on fractional-programming[J]. Water Saving Irrigation, 2013, (9): 79–81
- [16] 高小永. 基于多目标蚁群算法的土地利用优化配置[D]. 武汉: 武汉大学, 2010
GAO X Y. Optimizing land use allocation based on multi-objective ant colony algorithm[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010
- [17] 邓莉. 模糊遗传算法及其在图像恢复中的应用[D]. 重庆: 西南大学, 2008
DENG L. Fuzzy genetic algorithm and its application on the image restoration[D]. Chongqing: Southwest University, 2008
- [18] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA- II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182–197
- [19] 胡洪静, 吴鑫淼, 齐成伟, 等. 节水压采区农业种植结构多目标优化研究——以衡水市为例[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(10): 95–99
HU H J, WU X M, QI C W, et al. Using multi-objective optimization to restructure agriculture with consideration of the constraints on groundwater extraction: taking Hengshui as an example[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(10): 95–99
- [20] 罗建美. 京津冀平原农业种植结构优化及其节水效应研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019
LUO J M. Study on the optimization of agricultural planting

- structure and its water-saving effect in Beijing-Tianjin-Hebei Plain[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019
- [21] 高彦春, 王晗, 龙笛. 白洋淀流域水文条件变化和面临的生态环境问题[J]. 资源科学, 2009, 31(9): 1506–1513
GAO Y C, WANG H, LONG D. Changes in hydrological conditions and the eco-environmental problems in Baiyang-dian watershed[J]. Resources Science, 2009, 31(9): 1506–1513
- [22] 白志杰, 任丹丹, 杨艳敏, 等. 雄安新区上游农业种植结构及需水时空演变[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1067–1077
BAI Z J, REN D D, YANG Y M, et al. Trend of agricultural plantation and irrigation requirements in the upper reaches of Xiongan New Area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(7): 1067–1077
- [23] 王雷明. 水资源约束条件下的农业种植结构优化研究——以河套灌区为例[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017
WANG L M. Optimization of agricultural planting structure under water resources constraints — study of Hetao irrigation district[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017
- [24] 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 Z B. 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
- [25] 河北省水利厅. 河北省用水定额[R]. 石家庄: 河北省水利厅, 2016
Department of Water Resources of Hebei Province. Water Quota of Hebei Province[R]. Shijiazhuang: Department of Water Resources of Hebei Province, 2016
- [26] 杨明智, 裴源生, 李旭东. 中国粮食自给率研究——粮食、谷物和口粮自给率分析[J]. 自然资源学报, 2019, 34(4): 881–889
YANG M Z, PEI Y S, LI X D. Study on grain self-sufficiency rate in China: an analysis of grain, cereal grain and edible grain[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(4): 881–889
- [27] 河北省统计局. 保定统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016
Statistics Bureau of Hebei Province. Baoding Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016
- [28] 王涛, 吕昌河. 基于合理膳食结构的人均食物需求量估算[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 273–277
WANG T, LYU C H. Estimation of food grain demand per capita based on rational dietary pattern[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5): 273–277
- [29] 石玉林, 卢良恕. 中国农业需水与节水高效农业建设[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001
SHI Y L, LU L S. China's Agricultural Water Demand and Water-saving and Efficient Agricultural Construction[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2001
- [30] 河北省政府办公厅. 河北省人民政府关于加快推进农业机械化 and 农机装备产业转型升级的实施意见[EB/OL]. 河北省人民政府网. [2019-09-19]. http://www.njhs.moa.gov.cn/gdxw/201909/t20190919_6328304.htm
General Office of Hebei Provincial Government. Hebei Province People's Government on accelerating agricultural mechanization and agricultural machinery and equipment industry transformation and upgrading of the implementation opinions[EB/OL]. [2019-09-19]. http://www.njhs.moa.gov.cn/gdxw/201909/t20190919_6328304.htm
- [31] 龙新. 2018 年全国农作物耕种收综合机械化率超过 67%[EB/OL]. 农民日报网. [2019-01-02]. <http://www.chinacoop.gov.cn/HTML/2019/01/03/147203.html>
LONG X. 2018 national farming comprehensive mechanization rate more than 67%[EB/OL]. Farmers Daily Website. [2019-01-02]. <http://www.chinacoop.gov.cn/HTML/2019/01/03/147203.html>
- [32] 长江蔬菜传媒. 全国设施蔬菜种植面积和分布情况[EB/OL]. 中投顾问产业研究中心网. [2020-01-16]. <https://new.qq.com/omn/20200116/20200116A03JAC00.html>
Yangtze River Vegetable Media. Planting area and distribution of vegetable facilities in China[EB/OL]. CIC Consultant Industry Research Center Network. [2020-01-16]. <https://new.qq.com/omn/20200116/20200116A03JAC00.html>
- [33] 张珊, 谭倩, 蔡宴朋, 等. 基于模糊优选和可信性的农业水资源多目标优化配置模型[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 79–85
ZHANG S, TAN Q, CAI Y P, et al. A multi-objective optimization model for agricultural water resources based on fuzzy optimal selection and credibility[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 79–85
- [34] 马林潇, 何英, 林丽, 等. “三条红线”约束下的种植结构多目标优化模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(9): 123–128
MA L X, HE Y, LIN L, et al. Multi-objective optimization of main crops cultivation in Manasi County using the genetic algorithm with the “Three Red Lines” in consideration[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(9): 123–128