

# 基于水足迹的云南省热带地区种植结构优化

华春莉,邓雯,唐怡,吴霞

(云南省水利水电勘测设计研究院,云南昆明 650021)

**摘要:**针对热带地区种植结构的多样性,在用水总量控制和农业“两区”建设约束条件下,以云南省热带地区西双版纳州景洪市、勐海县、勐腊县三县(市)的水稻、玉米、水果、甘蔗4种典型作物种植结构为基础,基于水足迹理论构建经济效益和生态效益最优的多目标优化模型。使用NSGA-II遗传算法对模型进行求解,提出单方水经济净效益最优和产生灰水足迹最少的生态效益最优2组方案,并通过耦合熵权法和TOPSIS评价法得到三县(市)农业种植结构优化方案。优化方案显示,西双版纳州降低玉米种植面积,增加水果种植面积18.8%~57.4%,对减少灰水足迹和提高单方水经济净效益均起到积极作用;勐海县和勐腊县增加水稻种植面积13.6%~67.7%,单方水经济净效益未降低;在农业生产条件提高的基础上,可在景洪市和勐腊县适当增加甘蔗播种面积;种植结构优化后的方案可使单方水经济净效益提高13.0%~62.0%,灰水足迹减少1.9%~28.0%。

**关键词:**种植结构;多目标优化;作物水足迹;TOPSIS评价法;热带地区;云南省

**中图分类号:**S274

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7647(2025)03-0099-06

**Optimization of planting structure based on water footprint in tropical regions of Yunnan Province//HUA Chunli, DENG Wen, TANG Yi, WU Xia(Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650021, China)**

**Abstract:** In response to the diversity of planting structures in tropical regions and under the constraints of total water use control and the construction of agricultural “two zones”, a multi-objective optimization model was developed based on the water footprint theory to maximize both economic and ecological benefits. This model focused on the planting structures of four typical crops (rice, corn, fruit, and sugarcane) in three counties (or cities) in Xishuangbanna Prefecture, Jinghong City, Menghai County, and Mengla County, in the tropical region of Yunnan Province. The NSGA-II genetic algorithm was used to solve the model, resulting in two sets of optimized schemes: one that maximizes the net economic benefit per unit of water and the other that minimizes the grey water footprint for optimal ecological benefit. Using the coupled entropy weight method and TOPSIS evaluation method, optimal agricultural planting structures were determined for the three counties (or cities). The optimization results show that reducing the corn planting area and increasing the fruit planting area by 18.8% to 57.4% in Xishuangbanna Prefecture can significantly reduce the grey water footprint and improve the net economic benefit per unit of water. In Menghai and Mengla counties, increasing the rice planting area by 13.6% to 67.7% did not reduce the net economic benefit per unit of water. Sugarcane can have its planting area appropriately expanded in Jinghong City and Mengla County, based on improved agricultural production conditions. After optimizing the planting structure, the net economic benefit per unit of water can increase by 13.0% to 62.0%, and the grey water footprint can decrease by 1.9% to 28.0%.

**Key words:** planting structure; multi-objective optimization; water footprint of crops; TOPSIS evaluation method; tropical areas; Yunnan Province

我国热带地区土地资源仅占全国国土面积的5%左右,其中,位于内陆低纬度地区且免受台风侵袭的云南省西双版纳州及其周边边境热带地区土地更是稀有资源。西双版纳州生产的热带特色农产品

与国内农产品市场具有极强的互补性,充足的水资源是农业发展的优势。西双版纳州是“滇南粮仓”,也是糖料蔗的战略保供基地、热带水果等特色农产品的全国错峰供应基地。区域内农业生产节约集约

**基金项目:**云南省重点研发计划项目(202203AA080010)

**作者简介:**华春莉(1987—),女,高级工程师,硕士,主要从事水资源规划研究。E-mail:545986609@qq.com

**通信作者:**邓雯(1987—),女,高级工程师,硕士,主要从事农业水土工程研究。E-mail:dengwenwhu@163.com

用水对强化水资源刚性约束、践行大食物观、保障粮食安全与糖料蔗等重要农产品供给和全面推进乡村振兴战略具有重要意义。农业灌溉用水涉及区域经济发展、生态保护和社会功能的实现<sup>[1]</sup>,如何在现有水资源管理制度下布局农业产业发展,实现经济效益和生态保护双赢是长期以来学界研究的重点。

现阶段相关研究大多着眼于灌溉水的高效分配与利用。例如:武雪萍等<sup>[2]</sup>以提高水资源利用率、利用效率和节水增效为核心,提出了区域节水种植结构模式;李亚平等<sup>[3-5]</sup>综合考虑区域社会、经济、环境协调发展,提出了作物种植结构优化调整的多目标优化模型,将经济、社会、生态效益转化为综合效益系数,以此系数为权重来优化种植布局。目前我国仍执行传统农业实体蓝水资源管理模式,难以有效兼顾来自天然降水的绿水和农业生产对水环境的负面影响<sup>[6]</sup>。水足迹概念的提出<sup>[7-10]</sup>使农业水管理分析与决策方式发生了重大变革。郭萍等<sup>[11]</sup>基于水足迹对河套灌区作物种植结构进行了优化,提高了水资源利用效率。聂媛等<sup>[12]</sup>基于水足迹应用熵权法对我国北方三大粮食作物种植结构进行了优化,优化后蓝水总量明显减少。崔思梦等<sup>[13]</sup>考虑作物碳足迹、灰水足迹和虚拟水输出对灌溉系统的影响,提出了提水灌溉系统种植结构优化方案。上述研究大多基于水资源短缺地区,研究对象为粮食作物,对于南方热带地区的研究较少。南方热带地区存在雨养条件,绿水对农业生产的贡献不可忽视<sup>[14]</sup>。

本文基于水足迹理论,以云南省热带地区西双版纳州景洪市、勐海县、勐腊县三县(市)的水稻、玉米、水果、甘蔗4种典型作物种植面积为优化设计变量,以经济净效益与农业用水量为优化目标,使用NSGA-II遗传算法求解,并通过耦合熵权法和

TOPSIS评价法得到农业种植结构优化方案,以期为云南省热带地区水资源合理配置提供理论依据。

## 1 研究区域与数据来源

西双版纳州地处北回归线以南、无量山以西的低纬度区域,坝区盆地及河谷两岸为热带季雨林型气候,高山地区为亚热带季风气候,总体属南亚热带湿润季风气候区。常年温暖,光照条件较好,年平均气温18~22℃,年均日照时数1 800~2 200 h,11月至翌年4月为旱季,降水量仅占全年的14.3%~17.7%,5—10月为雨季,降水量占全年的82.3%~85.7%。

选取水稻、玉米、水果和甘蔗4种作物为研究对象,选取2022年为分析年份。逐日气象资料来自西双版纳州景洪市、勐腊县、勐海县地面气象站,包括降水量、平均最高温度、平均最低温度、平均温度、日照时间、平均风速相对湿度等数据。三县(市)的作物产量、播种面积、灌溉效率来自农业统计年报。农业用水量来自西双版纳州水资源公报。

## 2 研究方法

### 2.1 种植结构多目标优化研究框架

云南热带地区种植结构优化研究框架如图1所示。评价系统由作物水足迹、水压力系数和经济净效益等要素构成。本文利用NSGA-II遗传算法得到种植结构的优化方案,通过耦合熵权法和TOPSIS评价法对优化方案进行评价。

### 2.2 种植结构多目标优化模型

优化模型基于水足迹理论,目标函数为经济效益最大与生态效益最大。约束条件包括农业用水总量约束、粮食生产功能区和糖料蔗生产保护区播种面积约束、非负约束。

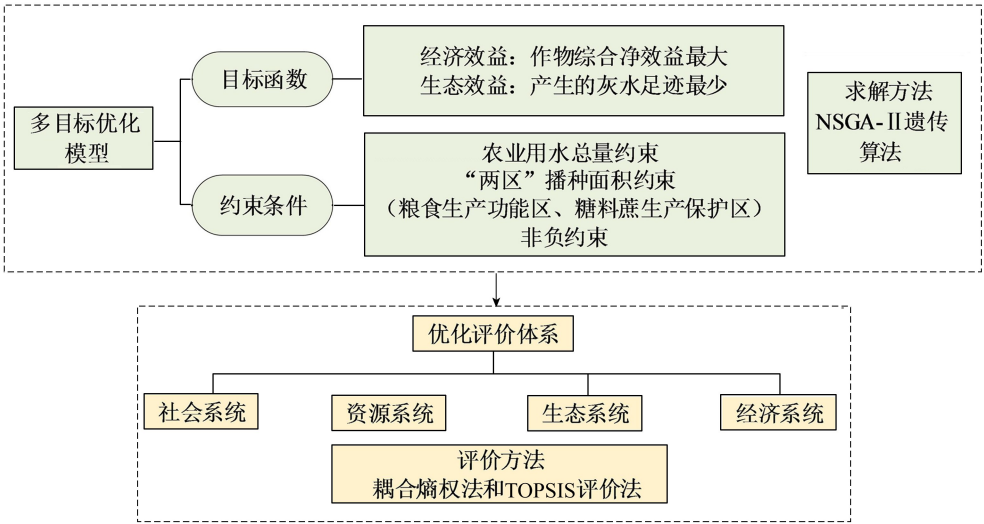


图1 云南热带地区种植结构优化研究框架

2.2.2.1 目标函数

a. 经济效益。经济效益最大体现在作物的净产值与花费的土地、生产、人工等成本的比值最大,经济净效益用不同作物的单位面积产值扣除种植成本来计算,计算公式为

$$\max f_1(x) = \max \sum_{i=1}^4 (D_i - B_i) C_i S_i \tag{1}$$

式中: $f_1(x)$ 为作物产生的净效益; $i$ 为作物类别, $i$ 为1、2、3、4分别表示水稻、玉米、水果(柑橘、柚子等)、甘蔗; $D_i$ 为作物*i*单位面积产量的产值; $B_i$ 为作物*i*单位面积种植成本; $C_i$ 为作物*i*的产量; $S_i$ 为作物*i*的种植面积。

b. 生态效益。生态效益最大体现在产生最少的灰水足迹,以解决水资源短缺问题为目标,其计算公式为

$$\min f_2(x) = \min \sum_{i=1}^4 F_{\text{grey},i} \tag{2}$$

式中: $f_2(x)$ 为灰水足迹; $F_{\text{grey},i}$ 为作物*i*的灰水足迹。

2.2.2.2 约束条件

a. 农业用水总量约束:

$$\sum_{i=1}^4 A_i S_i \leq Q \tag{3}$$

式中: $A_i$ 为作物*i*的灌溉定额; $Q$ 为地区“三条红线”计划农业供水量。

b. 作物播种面积约束:

$$S_{\min} \leq S_i \leq S_{\max} \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^4 S_i \leq S \tag{5}$$

式中: $S_{\min}$ 、 $S_{\max}$ 分别作物*i*面积的下限和上限; $S$ 为区域的总灌溉面积。水稻、玉米须满足区域粮食生产功能区面积要求,甘蔗须满足区域糖料蔗生产保护区面积要求,水果种植面积须满足地类、地形要求。

c. 非负约束:

$$\sum_{i=1}^4 S_i \geq 0 \tag{6}$$

2.2.3 模型求解

采用NSGA-II遗传算法求解种植结构多目标优

化问题。Srinivas 等<sup>[15]</sup>于1994年首次提出非支配排序遗传算法(NSGA),Deb等<sup>[16]</sup>在其基础上,引入精英策略及拥挤度计算规则,形成了改进的非支配排序遗传算法,即NSGA-II,其求解步骤包括:种群初始化,非支配排序,拥挤距离的计算,选择、交叉与变异,重组并选择等。

2.3 优化评价体系

2.3.1 评价指标

作物水足迹*F*包括蓝水足迹*F<sub>blue</sub>*、绿水足迹*F<sub>green</sub>*和灰水足迹*F<sub>grey</sub>*三部分:

$$F = F_{\text{blue}} + F_{\text{green}} + F_{\text{grey}} \tag{7}$$

$$F_{\text{blue}} = S \max(0, ET_c - P_e) \tag{8}$$

$$F_{\text{green}} = P_e S \tag{9}$$

$$F_{\text{grey}} = \alpha A_R S / (c_{\max} - c_{\text{nat}}) \tag{10}$$

式中: $ET_c$ 为作物蒸发量,采用彭曼公式计算; $P_e$ 为有效降水量,采用美国农业部土壤保持局推荐的方法<sup>[17]</sup>计算; $\alpha$ 为使用的化学物质进入淡水的比例,即淋溶、径流损失率<sup>[18]</sup>,氮取0.1; $A_R$ 为田间氮肥施用量; $c_{\max}$ 、 $c_{\text{nat}}$ 分别为受纳水体中该营养物质的最大可接受浓度和自然浓度。

$F_{\text{grey}}$ 根据文献[7]中的测算方法得到。

虚拟水输出*V<sub>we</sub>*是指作物输出量所承载的水足迹<sup>[19]</sup>,计算公式为

$$V_{\text{we}} = F(C_y - R_{\text{pc}}P)/C_y \tag{11}$$

式中: $C_y$ 为作物产量; $R_{\text{pc}}$ 为人均作物占有量; $P$ 为各县(市)的人口数量。人均占有量由全国人均需求量确定,全国人均需求量为产量与进口量的和。区域人均占有量高于全国平均则认为该作物满足本区域消费后仍有盈余,盈余部分向其他区域调运,即为输出。作物虚拟水输出为作物贸易量与作物水足迹的乘积<sup>[20]</sup>。

2.3.2 方案评价

种植结构多目标优化模型评价指标如表1所示。利用耦合熵权法和TOPSIS评价法,结合农业生产过程与社会、资源、生态和经济各系统之间的联系,选取具有代表性的指标,进行优化方案综合评价。选取3个评价方案(现状方案F0,优化方案F1

表1 评价指标的计算方法及含义

| 评价系统 | 评价指标     | 计算方法            | 含义          | 指标类型 |
|------|----------|-----------------|-------------|------|
| 社会系统 | 水足迹强度    | 作物水足迹除以灌溉面积     | 资源利用效率      | 负向指标 |
|      | 虚拟水输出    | 式(11)           | 生产安全保障      | 正向指标 |
| 资源系统 | 作物水足迹    | 式(7)            | 水资源消耗和潜在污染量 | 负向指标 |
|      | 水压力系数    | 作物水足迹除以区域水资源量   | 水资源利用率      | 负向指标 |
| 生态系统 | 灰水足迹     | 式(10)           | 生态负面效益      | 负向指标 |
| 经济系统 | 产量       | 单位面积产量乘以各作物种植面积 | 灌溉系统收入      | 正向指标 |
|      | 经济净效益    | 式(1)            | 灌溉系统经济效益    | 正向指标 |
|      | 单方水经济净效益 | 经济净效益除以作物水足迹    | 灌溉用水效益比     | 正向指标 |

和 F2) 在云南省热带地区西双版纳州景洪市、勐海县和勐腊县的情况,并分析比较优化结果与现状之间的差异。

熵权法可用于多指标权重的确定,而 TOPSIS 评价方法根据接近和远离最优解、最劣解的距离来评价优化结果的优劣<sup>[21]</sup>。耦合熵权法和 TOPSIS 评价法的计算步骤如下:①计算三县(市)3 种方案的 8 项评价指标,得出待评价指标矩阵  $M$ ;②按照正向和负向指标公式对  $M$  进行归一化处理,得到  $M'$ ;③采用熵权法计算各指标权重,得出相关权重矩阵;④将归一化标准矩阵与熵权法得出的权重矩阵相乘,计算出各方案的欧氏距离、最差组合的欧氏距离以及相对贴近度,相对贴近度越大,则对应方案的综合评价越优。

3 结果与分析

3.1 优化方案评价比选

本文通过 NSGA-II 求解 4 种作物播种面积,采用耦合熵权法和 TOPSIS 评价法对比方案间相对贴近度,比选出 3 种用于分析,其中 F0 为现状方案, F1、F2 为优化方案,分别为单方水经济净效益最优方案、灰水足迹最小方案。3 种方案的评价指标见表 2。由表 2 可知,三县(市)的作物种植发展方向有所不同。景洪市 F1、F2 方案产量分别增加 36.7%、9.8%,单方水经济净效益提高 62.0%、29.1%。F1 方案的经济净效益提高 47.8%,F2 方案的经济净效益降低 3.4%,这主要是因为经济净效益与作物价格有关,F2 方案通过减少灌溉面积实现农业耗水量的降低,经济净效益会受到一定损失。两个方案的灰水足迹均较现状低,说明两方案均能实现经济与生态价值的双赢。

勐海县 F1、F2 方案产量较现状降低 35.6%、60.6%,F1 方案经济净效益提高 8.2%,F2 方案降低 39.7%,灰水足迹减少 28.0%、48.7%,同时单方水经济净效益提高 41.9%、10.6%,说明勐海县在满足粮食生产功能区面积要求后,需减少高耗水、经济

价值低的作物的种植面积,以实现绿色高效发展。

勐腊县 F1、F2 方案产量和经济净效益变化趋势不同,F1 方案产量较 F0 方案增加 13.1%,经济净效益提高 16.3%,单方水经济净效益提高 13.0%, F2 方案产量较 F0 方案降低 8.3%,经济净效益降低 18.3%,单方水经济净效益提高 1.8%,说明勐腊县通过增加播种面积和优化种植结构均可以提高经济效益,增加播种面积的效果更显著。

3 种方案在三县(市)的相对贴近度如图 2 所示。单一的评价指标缺乏系统性,从图 2 和表 2 的成果可知,建立社会、资源、生态、经济 4 方面的评价指标体系,能更全面地反映灌溉农业的发展方向。相对贴近度越大,说明方案越好。三县(市)优化后的方案相对贴近度均比现状大,说明多目标优化后的方案有一定优势,即在用水总量和种植面积受限的条件下,通过调整优化作物种植结构,探索经济与生态效益的平衡点,在提高水资源利用效率、减少农业面源污染及缓解资源短缺等方面具有重要意义。三县(市)均为 F1 方案的相对贴近度最大。

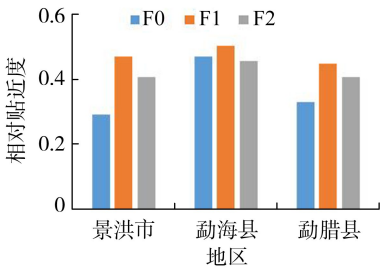


图 2 不同方案的相对贴近度

3.2 作物播种面积优化结果

三县(市)种植结构优化前后播种面积如图 3 所示。三县(市)种植结构调整方案与粮食生产功能区、糖料蔗生产保护区面积要求、光热资源条件以及用水总量要求有关。

景洪市的优化方案为减少水稻和玉米种植面积,适当增加甘蔗种植面积,发展热带特色水果产业。水果采用高效节水方式灌溉,可实现节水减排效果,经济、生态效益显著。当优化方案为水稻播种

表 2 不同方案评价指标值

| 地区  | 方案 | 水足迹强度/<br>(m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> ) | 虚拟水输出/<br>万 m <sup>3</sup> | 作物水足迹/<br>万 m <sup>3</sup> | 水压力<br>系数/% | 灰水足迹/<br>亿 m <sup>3</sup> | 产量/万 kg | 经济净效<br>益/亿元 | 单方水经济<br>净效益/(元/m <sup>3</sup> ) |
|-----|----|----------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------|---------------------------|---------|--------------|----------------------------------|
| 景洪市 | F0 | 1532.4                                       | 47146                      | 78458                      | 25          | 0.90                      | 71504   | 40.11        | 5.11                             |
|     | F1 | 1507.9                                       | 50672                      | 71576                      | 23          | 0.84                      | 97714   | 59.29        | 8.28                             |
|     | F2 | 1453.9                                       | 37380                      | 58736                      | 19          | 0.71                      | 78486   | 38.76        | 6.60                             |
| 勐海县 | F0 | 1528.9                                       | 95471                      | 106202                     | 38          | 1.23                      | 153351  | 21.79        | 2.05                             |
|     | F1 | 1619.2                                       | 68248                      | 80959                      | 29          | 0.88                      | 98694   | 23.58        | 2.91                             |
|     | F2 | 1623.7                                       | 43045                      | 57913                      | 21          | 0.63                      | 60357   | 13.15        | 2.27                             |
| 勐腊县 | F0 | 1483.6                                       | 25137                      | 41233                      | 10          | 0.49                      | 34735   | 20.19        | 4.90                             |
|     | F1 | 1556.2                                       | 27792                      | 42433                      | 10          | 0.48                      | 39300   | 23.49        | 5.53                             |
|     | F2 | 1544.3                                       | 18982                      | 33049                      | 8           | 0.38                      | 31857   | 16.51        | 4.99                             |

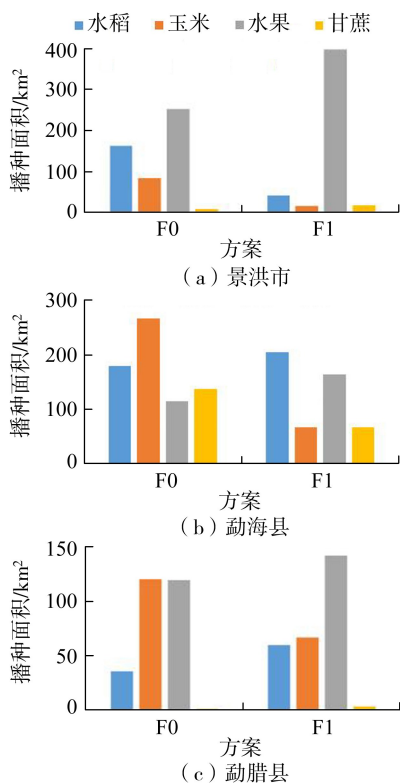


图3 三县(市)种植结构优化前后播种面积

面积减少 74.4%,玉米播种面积减少 81.3%,甘蔗播种面积增加 92.9%,水果种植面积增加 57.4%时,可以满足粮食生产功能区和糖料蔗生产保护区要求,优化后的方案较现状 4 种作物种植面积之和减少 7.3%,单方水经济净效益提高 62.0%,灰水足迹减少 7.3%,找到了经济效益和生态效益的平衡点。

勐海县的优化方案受粮食生产功能区和糖料蔗生产保护区面积要求限制,区内水稻种植面积小幅增加 13.6%,玉米、甘蔗种植面积均有所调减,其中玉米种植基数较大,现状为 265 km<sup>2</sup>,压缩 74.9%;甘蔗种植面积较现状减少 51.2%,水果为区域内经济价值最高的作物,种植面积增加 43.5%。从优化后的方案可以看出,勐海县作为“滇南粮仓”,水稻种植面积有限制,而水稻作为高耗水作物,在现有的用水量控制下,一定程度限制了当地其他作物的灌溉条件,协调经济效益和生态效益的重点是改善区域农业生产条件,农业提质增效,发展高附加值作物。

勐腊县现状 4 种作物的种植面积合计 278 km<sup>2</sup>,其他区域被生态红线包围,一味增加种植面积可以提高经济效益,但生态效益将受到损害。勐腊县种植结构优化方案为减少玉米种植面积 44.7%,增加水稻种植面积 67.7%,增加水果种植面积 18.8%,甘蔗现状仅 1 km<sup>2</sup>,增加幅度为 117.6%。勐腊县适当在现状基础上增加热带地区特色水果种植面积 23 km<sup>2</sup>,保证水稻种植面积 0.006 km<sup>2</sup>,优化后的方

案,可使灰水足迹减少 1.9%,单方水经济净效益提高 13.0%,区内丰富的光热水资源得到有效利用,实现农业绿色高效发展。

## 4 结 论

a. 针对热带地区的资源优势,调整种植结构时综合考虑经济效益和生态效益,提出的单方水经济净效益最优和农业灌溉用水量最少的生态效益最优两组方案的相对贴近度均大于现状,可为西双版纳州农业发展规划前期进行产业布局研究提供参考。

b. 种植结构优化方案可使单方水经济净效益提高 3.0%~62.0%,灰水足迹减少 1.9%~28.0%。其中,玉米种植面积减少 44.7%~81.3%,对减少灰水足迹和提高单方水经济净效益均起到积极作用;对于水稻,在粮食生产功能区播种面积约束条件下,减少景洪市种植面积,经济效益提升显著,勐海县和勐腊县在保障粮食安全的要求下,增加种植面积 13.6%~67.7%,单方水经济净效益未降低,同时有利于节水减排;发展火龙果、香蕉、柚子等特色水果产业是西双版纳州推进高原热带地区生态特色农业现代化发展的重要抓手,三县(市)增加水果种植面积 18.8%~57.4%,经济效益显著提高;甘蔗作为热带地区的传统产业,在提高农业生产条件的基础上,可在景洪市和勐腊县适当增加播种面积。

## 参考文献:

- [1] DING Wencheng, HE Ping, ZHANG Jiajia, et al. Optimizing rates and sources of nutrient input to mitigate nitrogen, phosphorus, and carbon losses from rice paddies [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 256: 12603.
- [2] 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 Xueping, WU Huijun, ZHUANG Yan, 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. (in Chinese))
- [3] 李亚平, 董增川, 马婉丽. 平原丘陵地区水土资源联合优化配置 [J]. 排灌机械, 2007, 25(5): 33-35. (LI Yaping, DONG Zengchuan, MA Wanli. Regional optimum allocation model of water and land resources in plateau and hill [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2007, 25(5): 33-35. (in Chinese))
- [4] MA Jianqin, CHEN Shouyu, 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.
- [ 5 ] 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 Mingjie, LUO Qiyu. 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. (in Chinese))
- [ 6 ] XU Jiataun, CAI Huanjie, SADDIQUE Q, et al. Evaluation and optimization of border irrigation in different irrigation seasons based on temporal variation of infiltration and roughness[J]. Agricultural Water Management, 2019, 214: 64-77.
- [ 7 ] HOEKSTARA A, CHAPAGAIN A, ALDAYAM M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard[M]. London: Earthscan, 2011.
- [ 8 ] 许锴, 陈东景. 基于水足迹的水资源利用与经济高质量发展脱钩关系研究[J]. 水利经济, 2024, 42(5): 20-27. (XU Nuo, CHEN Dongjing. Research on decoupling relationship between water resource utilization and high-quality economic development based on water footprint[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(5): 20-27. (in Chinese))
- [ 9 ] 阳君, 肖作林, 徐伟峰. 基于 LMDI 模型的四川盆地作物水足迹时空演变及驱动因素分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 160-169. (YANG Jun, XIAO Zuolin, XU Weifeng. Analysis of spatiotemporal evolution and driving factors of crop water footprint in the Sichuan Basin based on LMDI model[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 160-169. (in Chinese))
- [ 10 ] 韩宇平, 马伏彬, 贾冬冬, 等. 基于 BP-DEMATEL 的山西省冬小麦水足迹影响因素识别[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 9-15. (HAN Yuping, MA Fuli, JIA Dongdong, et al. Identification of influencing factors on water footprint of winter wheat in Shanxi Province based on BP-DEMATEL[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 9-15. (in Chinese))
- [ 11 ] 郭萍, 赵敏, 张妍, 等. 基于水足迹的河套灌区多目标种植结构优化调整与评价[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 346-357. (GUO Ping, ZHAO Min, ZHANG Yan, et al. Optimization and evaluation of multi-objective planting structure in Hetao Irrigation District based on water footprint[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 346-35. (in Chinese))
- [ 12 ] 聂媛, 李晓云, 江文曲, 等. 基于水足迹视角的中国北方 10 省三大粮食作物种植结构优化[J]. 资源科学, 2022, 44(11): 2315-2329. (NIE yuan, LI Xiaoyun, JIANG Wenqu, et al. Planting structure optimization of three main grain crops in 10 northern China provinces based on water footprint method[J]. Resources Science, 2022, 44(11): 2315-2329. (in Chinese))
- [ 13 ] 崔思梦, 吴梦洋, 王小军, 等. 基于水足迹与水-能源-粮食关联关系的提水灌溉系统种植结构优化[J]. 水利学报, 2023, 54(8): 967-977. (CUI Simeng, WU Mengyang, WANG Xiaojun, et al. Optimization of planting structure in pumping irrigation system based on water footprint and water-energy-grain nexus[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(8): 967-977. (in Chinese))
- [ 14 ] 高洁, 吴普特, 谢朋轩, 等. 灌区蓝绿水资源与作物生产水足迹多时空分布量化分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 105-112. (GAO Jie, WU Pute, XIE Pengxuan, et al. Distributed quantification of blue and green water resources and water footprint of crop production in an irrigation district at multiple temporal scales[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(5): 105-112. (in Chinese))
- [ 15 ] SRINIVAS N, DEB K. Multi-objective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(3): 221-248.
- [ 16 ] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [ 17 ] SMITH M. CROPWAT: a computer program for irrigation planning and management[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992: 20-21.
- [ 18 ] 付永虎, 刘黎明, 起晓星, 等. 基于灰水足迹的洞庭湖区粮食生产环境效应评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 152-160. (FU Yonghu, LIU Liming, QI Xiaoxing, et al. Environmental effects evaluation for grain production based on grey water footprint in Dongting Lake area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(10): 152-160. (in Chinese))
- [ 19 ] 吴普特, 卓拉, 刘艺琳, 等. 区域主要作物生产实体水-虚拟水耦合流动过程解析与评价[J]. 科学通报, 2019, 64(18): 1953-1966. (WU Pute, ZHOU La, LIU Yilin, et al. Assessment of regional crop-related physical-virtual water coupling flows[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(18): 1953-1966. (in Chinese))
- [ 20 ] 佟佳骏, 孙世坤, 马佳乐, 等. 区域粮食虚拟水流动经济社会影响效应分析[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 345-356. (TONG Jiajun, SUN Shikun, MA Jiale, et al. Analysis of socio-economic driving effect of regional grain virtual water flow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 345-356. (in Chinese))
- [ 21 ] DOS SANTOS B M, GODOY L P, CAMPOS L M S. Performance evaluation of green suppliers using entropy-TOPSIS-F[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207: 498-509.

(收稿日期: 2024-06-20 编辑: 俞云利)