

基于水—能—粮纽带关系的河南省农作物种植结构优化研究

张亮¹, 尚进¹, 王宏涛²

(1. 华北水利水电大学 水资源学院, 河南 郑州 450046; 2. 黄河水利职业技术大学 水利工程学院, 河南 开封 475004)

摘要:【目的】在生态优先绿色发展的前提下,统筹优化资源配置与农作物种植结构,协同推进粮食稳产,实现生态效益与经济效益最大化。【方法】选取河南省为研究区域,融合水足迹理论与能源核算模型确定农作物资源消耗特征,通过多目标规划模型优化种植结构实现区域经济、生态效益协同提升。【结果】(1) 3种作物对水资源、能源的要求各不相同,花生要求最高,小麦次之,玉米最低。3种作物呈现出显著差异化的资源消耗特征以及水资源利用效率 W_E 。(2) 在种植面积方面,优化后,玉米和花生的种植面积增加,分别增加了 $4.65 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 和 $7.04 \times 10^5 \text{ hm}^2$,小麦的种植面积有所减少,下降了 $1.17 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。(3) 在效益方面,优化后,经济效益增加了 2.77×10^9 元,并增加了 $8.72 \times 10^5 \text{ t}$ 的粮食产量。与此同时,对资源与环境的压力显著减轻:农业水足迹和能源消耗分别降低了 $4.22 \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $1.00 \times 10^7 \text{ GJ}$,化肥投入削减了 $2.86 \times 10^5 \text{ t}$ 。【结论】在多种约束条件下,优化后的结果降低了区域资源负荷的同时,实现农业生产的经济、生态效益的双重提升,推动区域农业的可持续性发展。本研究构建了统筹经济、生态效益的水—能—粮多目标优化模型,研究成果可为河南省乃至其他粮食主产区的农业可持续发展提供科学的决策支持。

关键词:水—能—粮;水足迹理论;能耗核算模型;多目标规划模型;种植结构

中图分类号:F323.1

文献标识码:A

水、能源与粮食安全是人类社会可持续发展的三大核心要素,其协同制约关系称为水—能源—粮食纽带关系(WEF Nexus)^[1]。水—能源—粮食之间相辅相成,粮食生产依赖水资源,而水资源开发同样需要能源与粮食支撑。全球人口的持续增长,是用水需求不断增加的主要原因。与此同时,气候变化改变了全球降水的时空分布,导致水旱灾害频发,而高强度的人类活动所引发的生态退化与环境污染,进一步加剧了全球水资源供需矛盾。相关研究表明^[2],未来50年人均水资源占有量预计将下降20%~40%,而未来20年水资源需求量将增长30%~50%。这一严峻态势直接威胁水、粮食与生态安全,成为可持续发展的核心制约。破解水、能资源优化配置与粮食产量协同提升难题,已成为保障国家粮食安全的核心命题。

水—能源—粮食(WEF)纽带关系为系统应对资源短缺与粮食生产的矛盾提供了重要理论框架^[3]。国际上,学者多在全球或国家等宏观尺度下运用该框架构建优化模型,旨在实现资源生产力最大化与环境影响最小化的平衡,同时保障粮食安全^[4-5]。与此不同,国内研究更聚焦于中微观区域,侧重于解决农业系统内部的资源优化配置问题。其中,种植结构调整被视为一个关键的切入点和调控手段。初期研究多以水资源总量等直接物理量作为核心约束条件进行结构优化^[6]。随后,研究方法逐步向多目标优化模型发展,将经济效益、社会效益与生态效益等多元目标纳入统一框架进行权衡^[7]。近年来,为实现对资源环境影响的精准度量,水足迹、碳足迹等“足迹”理论被引入该领域。例如,侯庆丰等^[8]基于生产水足迹实现了水资源的

收稿日期/Received:2025-07-10

修回日期/Revised:2025-12-22

基金项目:华北水利水电大学新时代治水科学研究院“揭榜挂帅”项目(24JB-03-02);河南省研究生教育改革与质量提升工程项目(YJS2025AL06);河南省重点研发专项(261111321600)。

第一作者:张亮(1978—),男,教授,硕士生导师,博士,从事农业水土工程和水文水资源方面的研究。E-mail: zhangliang@ncwu.edu.cn。

高效利用；王楚凡等^[9]进一步融合水、碳双重足迹,为农业节水与减排协同增效提供了新的视角。已有研究表明,优化种植结构能有效提升资源利用效率,缓解粮食生产面临的区域性资源制约。然而,当前学术探讨多侧重于水资源单一视角,对于能源消耗与粮食产量的内在联系,以及“水—能源—粮食”系统协同对保障粮食安全的综合影响,缺乏足够重视。

作为中国农业生产的核心区域,河南省在维护国家粮食安全方面发挥了举足轻重的作用,如何协调土地生态环境与农业经济效益之间的关系对于促进区域的可持续发展至关重要。然而河南省在推进农业现代化进程中,面临着资源约束趋紧与农村生态环境治理任务艰巨的双重挑战。在经济社会快速发展的

背景下,如何调整农业种植结构,提升河南省农业水、能资源的利用效率,对于保障国家粮食安全与促进区域可持续发展至关重要。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究框架与机理解析

本研究构建了一个集“水足迹核算、能源消耗评估与多目标规划”于一体的综合研究框架。其独特性在于,整合并量化了种植结构调整对水资源、能源两种关键资源的联动影响。模型的目标并非追求经济或生态的单方面最优,而是在保障区域发展底线的前提下,探寻经济-生态效益协同提升的最优平衡解。研究成果可为资源约束型农业区的可持续转型提供更具综合性和现实指导意义的决策路径。研究框架如图 1 所示。

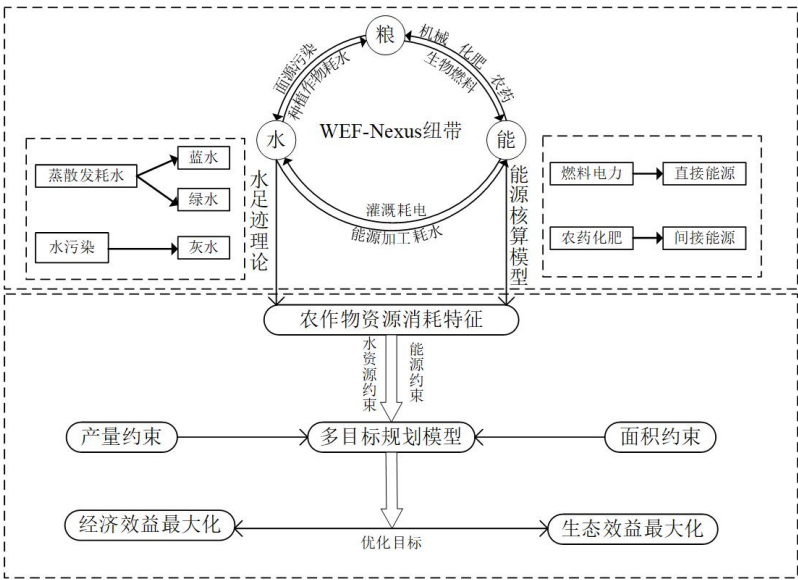


图 1 研究框架图

Fig. 1 Research Framework Diagram

水—能源—粮食纽带关系的本质是水、能源、粮食 3 个子系统间的相互依赖与制约关系。在农业生产中,这种关系具体体现为:粮食生产是核心活动,直接消耗水资源和能源,并且作物生长过程中过量施用的化肥农药还会形成面源污染,对水体质量构成威胁。此外,绿色发展、气候变化、消费模式、科技进步等多种外部因素共同作用,影响着水能资源的配置方式以及粮食的生产需求。不同作物对水资源、能源的消耗强度各不相同,因此,优化种植结构,可以调节农业对水资源、能源的需求,缓解农业生产对区域的资源压力,从而实现区域的可持续发展。具体实施分为两步:

一、进行水足迹、能源核算。为优化种植结构,需要将农作物对水资源、能源的需求量化,本研究

采用水足迹理论和能源核算模型作为量化工具。通过计算分析,得到各作物对资源的消耗特征。

二、进行种植结构优化。首先,以经济效益和生态效益最大化为优化目标,建立多目标优化模型。其次,将水资源消耗总量、能源消耗总量和粮食最低产量等“水—能—粮”核心要素,设定为模型的刚性约束条件,明确各要素之间的相互制约边界;最后进行模型求解,在满足水、能、粮食安全底线的前提下,寻找一个能够实现经济与生态目标最佳平衡的种植结构方案。

1.2 农作物生产水足迹的计算

W_E 定义为水资源利用效率^[10]计算公式为:

$$W_E = \frac{W_b + W_g}{W_b + W_g + W_y + L_1} \quad (1)$$

式中: W_E 为水资源有效利用效率,无量纲; W_b 为农作物蓝水足迹, m^3 ; W_g 为农作物绿水足迹, m^3 ; W_y 为农作物灰水足迹, m^3 ; L_I 为灌溉损失量, m^3 。

$$W_b = A \times R_I \quad (2)$$

$$W_g = A \times \min(E_{tc}, P_e) \quad (3)$$

式中: A 为作物播种面积, hm^2 ; R_I 为作物灌溉需水量, mm ; E_{tc} 是单位面积作物需水量, mm ; P_e 为有效降水量, mm ; R_I 和 E_{tc} 计算如下:

$$R_I = \begin{cases} E_{tc} - P_e, & E_{tc} > P_e \\ 0, & E_{tc} \leq P_e \end{cases} \quad (4)$$

$$E_{tc} = K_c \times E_{t0} \quad (5)$$

式中: K_c 为作物系数,无量纲; E_{t0} 是参考作物蒸散量, mm , 通过 Penman—Monteith(P—M) 公式计算; 其中 p_e 的计算为^[11]:

$$P_e = \begin{cases} \frac{P(4.17 - 0.2P)}{4.17}, & P \leq 8mm \\ 4.17 + 0.1P, & P > 8mm \end{cases} \quad (6)$$

式中: P 为日降水量, mm 。

水足迹评估手册推荐的经验公式用于 W_y 计算:

$$W_y = \frac{\alpha \times A_R}{c_{\max} - c_{\min}} \quad (7)$$

式中, α 为污染物淋失率,无量纲; A_R 为每公顷农田施肥量, kg , 选取主要污染物氮肥为关键性指标进

行计算^[12], 氮的流失率为 10%^[13]; $c_{\max}$ 为标准水质环境下污染物最大浓度, mg/L , 为 10.00 mg/L ^[14]; $c_{\min}$ 是天然水中的浓度, mg/L , 假设为 0 mg/L ^[15]。

L_I 由 W_b 和灌溉设施的状况共同决定:

$$L_I = \frac{W_b \times (1 - E)}{E} \quad (8)$$

式中: E 为灌溉效率,无量纲。

1.3 农作物生产能耗测算方法

农作物的能源消耗量(E_i)可由各项投入(I_i)与其对应的能源转换系数(N_i)的乘积确定。计算公式为:

$$E_i = I_i \times N_i \quad (9)$$

在农作物种植过程中,投入的能源可分为直接能源和间接能源^[16]。直接能源包括燃料、电力,间接能源为化肥、农药。燃料为田间机械作业提供动力,电力^[17]用于农业灌溉;化肥包括氮肥、磷肥、钾肥、复合肥,其计算公式如下:

$$E_f = H_f / J_f \times K_f = (f_1 + f_2 \times b) / J_f \times K_f \quad (10)$$

$$E_e = H_e / J_e \times K_e = (e_1 - e_2) / J_e \times K_e \quad (11)$$

$$E_p = H_p / J_p \times K_p = A_p / J_p \times K_p \quad (12)$$

$$E_{fr} = Q_{fr} \times K_{fr} \quad (13)$$

式(9)至(14)中所用到的主要变量及其含义见表 1。

$$E_G = (E_f + E_e + E_p + E_{fr}) \times A \quad (14)$$

表 1 能源消耗计算相关变量说明

Tab.1 Description of relevant variables for energy consumption calculation		
符号	含义	单位
E_f, E_e, E_p, E_{fr}	燃料、电力、农药、化肥的单位面积能耗	kJ/hm^2
H_f, H_e, H_p	燃料、电力、农药的费用	元
J_f, J_e, J_p	燃料、电力、农药的单位价格	元
f_1, f_2, e_1, e_2, A_p	燃料费、机械作业费、排灌费、水费、农药费	元
K_f, K_e, K_p, K_{fr}	燃料、电力、农药、化肥的能源转换系数	—
Q_{fr}	单位面积化肥用量	kg/hm^2
b	燃料费在机械作业费中的比重	%
E_G	农作物的能源消耗总量	GJ
A	农作物的种植面积	hm^2

1.4 基于水—能—粮纽带关系的农作物种植结构优化模型

1.4.1 模型目标函数

农业是河南省的支柱产业,对保障全国粮食安全具有重大意义,以经济效益最大化和生态效益最大化为目标建立多目标优化模型。经济效益最大化目标函数为:

$$\max F_1(x) = \sum_{i=1}^3 G_i x_i - \sum_{i=1}^3 C_i x_{i0} \quad (15)$$

生态效益最大化目标以化肥施用量最小衡量^[18],具体目标函数为:

$$\min F_2(x) = \sum_{i=1}^3 E_i x_{i0} \quad (16)$$

式中: $F_1(x)$ 为总经济效益,万元; $F_2(x)$ 为总化肥施用量,t; G_i 为第*i*种作物单位面积收益,元/hm²; C_i 为第*i*种作物单位面积成本,元/hm²; E_i 为第*i*种作物单位面积化肥用量,kg/hm²; x_{i0} 为第*i*种作物规划期种植面积,hm²。

1.4.2 约束条件

1)种植面积约束。土地是经济社会发展的基础性资源,其配置涉及多重目标间的权衡,既要保障粮食安全,也要促进经济社会的快速发展。因此,必须合理界定用地规模,推动农业种植由“保数量”向“提质量”的现代化发展道路迈进。基于此,种植面积约束设置为规划期的种植面积不高于基准期的。表达式为:

$$\sum_{i=1}^3 x_i \leq X_0 \quad (17)$$

式中, X_0 为各市基准期种植面积之和,hm²;

2)水资源、能源约束。河南省面临着水资源短缺和能源供应紧张的现实挑战,这构成了区域农业可持续发展的主要瓶颈。为了推动农业生产方式向绿色、低碳转型,减轻对生态环境的压力,必须

对水、能资源的总量消耗进行有效控制。基于此,规划期内的水资源消耗量与能源使用量必须实现总体控制,且其数值不高于基准期对应的指标值:

$$\sum_{i=1}^3 W_{ci} x_i \leq W_c^0 \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^3 E_i x_i \leq E^0 \quad (19)$$

式中: W_{ci} 为第*i*种作物规划期的水足迹,m³; W_c^0 为作物基准期的水足迹,m³; E_i 为第*i*种作物规划期能源消耗量,GJ; E^0 为作物基准期能源消耗量,GJ; Y 为各地基准期产量之和,t。

3)产量约束。鉴于河南省在国家粮食安全战略中的关键地位,保障粮食稳定生产是区域农业发展的首要任务和底线要求。任何种植结构的调整和优化都不能以牺牲粮食总产量为代价,必须牢牢守住粮食安全这条生命线。基于此,各市在规划期内的粮食生产须守住产量底线,确保*Y*产量不得低于基准期水平。表达式为:

$$\sum_{i=1}^3 Y_i x_i \geq Y \quad (20)$$

式中: Y_i 为第*i*种作物规划期的单位面积产量,t/hm²。

4)非负约束。所有作物的规划种植面积均为非负数:

$$x_i \geq 0, i = 1, 2, 3. \quad (21)$$

1.5 数据来源

本采用2015—2023年数据,对河南省种植比例较高的主要农作物——小麦、玉米、花生的水足迹以及能源消耗进行量化分析,并结合河南省实际提出种植结构的优化建议。数据来源见表2。

表2 数据来源说明

Tab.2 Explanation of data sources

数据来源	数据说明
国家气象科学数据中心	湿度、温度、风速、日照时数
联合国粮农组织(FAO)	84种作物系数表
《河南省统计年鉴》(2015—2023年)	作物种植面积、作物产量
《农业技术经济手册》	柴油、电力、化肥、农药
《中国物价年鉴》(2015—2023年)	柴油、电力、农药
《全国农产品成本收益资料汇编》 (2015—2023年)	燃料动力费、机械作业费、排灌费、水费、农药费
河南省水资源公报	灌溉效率、河南省各地水资源总量
《中国城市统计年鉴》(2015—2023年)	全社会用电量、煤气天然气供应量和液化石油气供应量

2 结果与分析

2.1 河南省主要作物水足迹分析

2015—2023 年河南省 3 种作物的水资源利用效率 W_E 如图 2 所示。分析图 2 可知：①花生的年均水资源利用效率 W_E 为 0.722 高于小麦和玉米的 0.573 和 0.608。②与小麦相对平稳的趋势不同,玉米和花生的水资源利用效率表现出显著的年际波动特征,二者的效率曲线呈现出高度的同步性,其阶段性峰值均出现在 2017 年和 2020 年,这两个峰值年份与有效降雨量较高的年份相吻合,清晰地揭示了降水对这两种作物用水效率的主导作用。③玉米、花生的 W_E 随年份均呈现上升趋势,“十三五”规划中提出了构建节水型社会并逐步提高农业的水资源利用效率。随着种植技术和种植条件的进一步发展和改善、节水灌溉技术的完善和节水灌溉面积的增加,作物灌溉损失量将会逐步减小, W_E 将逐渐上升并且趋于稳定。

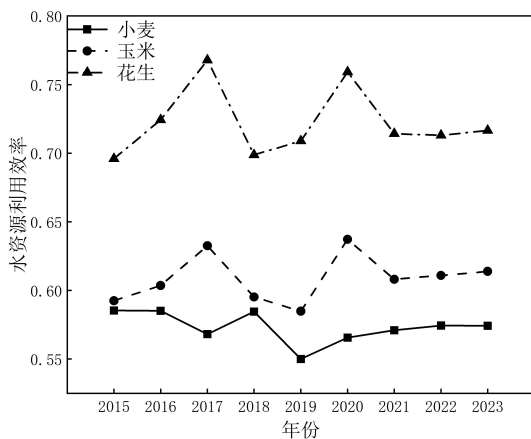


图2 2015—2023 年河南省主要农作物水资源利用效率

Fig.2 Water use efficiency of major crops in Henan, 2015—2023

单产水足迹可以衡量单位产量农作物的耗水情况,其数值为作物总水足迹与总产量之比。经计算,河南省花生单产水足迹均值为 $899.86 \text{ m}^3/\text{t}$,属于高耗水农作物;小麦单产水足迹均值为 $870.75 \text{ m}^3/\text{t}$,属于中等耗水农作物;玉米的单产水足迹均值为 $678.18 \text{ m}^3/\text{t}$,属于低耗水农作物。2015—2023 年间河南省主要农作物单产水足迹的年际变化如图 3 所示。由图 3 可知,从动态趋势来看,2015—2023 年 3 种作物单产水足迹总体呈逐年下降态势,标志着河南省农业水资源利用效率正在稳步提升。这一积

极变化的根本原因在于作物单产水平的持续提高。得益于良种推广、节水灌溉及科学化田间管理等现代化农业措施的综合应用,作物产量得到有效提升,从而显著摊薄了单位产量的耗水强度。

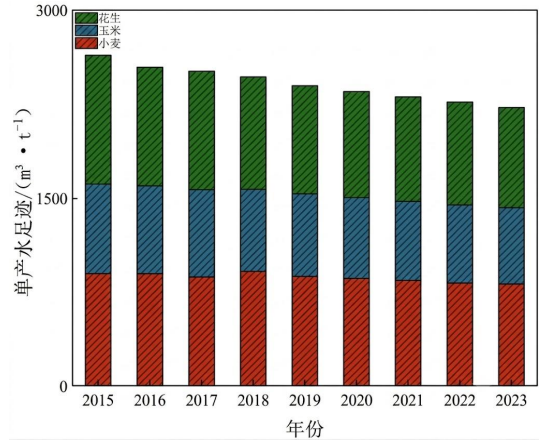


图3 2015—2023 河南省主要农作物单产水足迹的年际变化

Fig.3 Interannual Variations of Water Footprint per Unit Yield of Major Crops in Henan Province, 2015—2023

图 4 为了 2015—2023 年河南省主要作物的水足迹结构。由图 4 可知：①小麦的水足迹构成以蓝水为主,其占比高达 47.99%,显著高于绿水占比(27.05%)与灰水(24.96%)。这一结构特征反映了河南省小麦生产对灌溉的高度依赖。作为冬小麦主产区,其生育期(10 月至次年 6 月)与当地降水集中的夏季存在时空错配,导致农业灌溉成为弥补水分亏缺的主要手段,对区域水资源带来了严峻压力。②与小麦不同,玉米的水足迹以绿水为主导(50.38%),蓝水占比较低(17.17%),表明其生长对天然降水的利用效率较高。其生育期(6 月—10 月)与当地雨季高度吻合,这是绿水占优的主要原因。然而,玉米的灰水足迹占比(32.44%)亦不容忽视,这主要由于玉米的化肥利用效率相对偏低^[19],在单位面积上,为达到预期产量,需要投入比其他作物更多的化肥。过量的化肥施用直接推高了玉米的灰水足迹,并加剧了区域性面源污染的风险。③花生的水足迹结构特征与玉米的类似,同样以绿水为主,占比达到 57.96%。这同样得益于其生长季与雨季的同步性,使其能有效利用降水资源。综上所述,根据水足迹的构成特征,

可将河南省的小麦界定为蓝水型作物,花生为绿水型作物,玉米为绿水-灰水型作物。

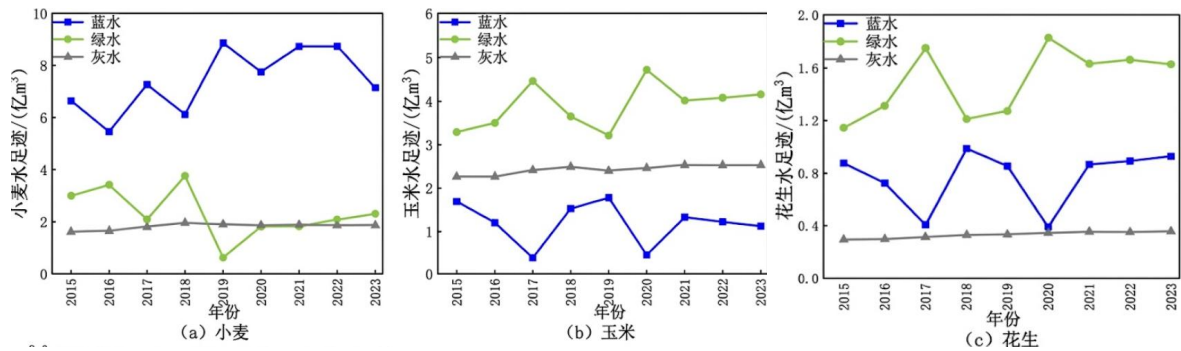


图4 2015—2023 年河南省主要农作物水足迹结构

Fig.4 Main crops' water footprint structure in Henan, 2015—2023

2.2 河南省主要农作物能耗分析

图 5 呈现了 3 种农作物单产能耗值的年际变化。由图 5 可知小麦、玉米、花生的单产能耗值存在明显差别：花生单产能耗值在 3 种作物中最高,年均为 4.31 GJ/t,属于高耗能农作物;玉米年均单产能耗值最低,为 2.47 GJ/t,属于低耗能农作物;小麦年均单产能耗值为 3.86 GJ/t,属于中等耗能农作物。花生的单产能耗最高,主要因为其收获环节(如机械挖掘与摘果)需要投入大量能源,加之单位面积产量相对较低,导致总能耗被分摊到更少的产出上。玉米的单产能耗最低,一方面因其生育期与雨季同步,对高耗能的灌溉电力需求较小;另一方面,其较高的单产水平有效分摊了单位产出所承载的综合能耗。

从年际变化来看,小麦与花生的单产能耗保持相对稳定,波动范围分别为 3.75~3.96 GJ/t 和 4.39~4.54 GJ/t。2015—2023 年期间,玉米的单产能耗值呈现波动态势。影响玉米单产能耗值波动的,主要因素在于其作为多功能经济作物的角色——它不仅是人类食品,也是动物饲料和工业原料,广阔的市场需求吸引了大量不同类型的生产者。不同农户在机械化程度、灌溉技术、田间管理精细度等方面存在较大差异,直接导致能源投入与产出效率参差不一,部分粗放式管理或技术落后的生产方式拉高了单位产量的平均能耗。因此,每年生产者结构的变化共同导致了玉米单产能耗的整体波动。

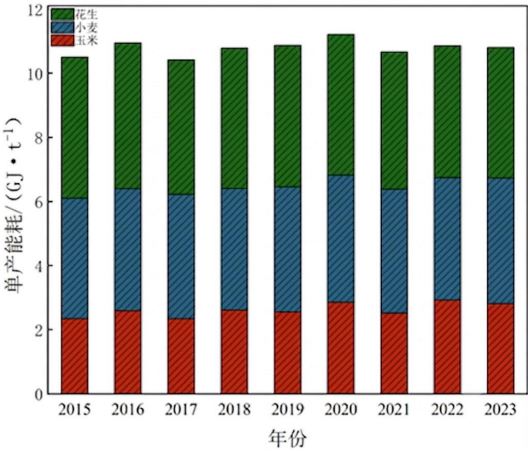


图5 2015—2023 年河南省主要农作物单产能耗值年际变化

Fig.5 Interannual shifts in energy consumption per unit yield of key crops in Henan, 2015—2023

图 6 展示了 2015—2023 河南省年主要农作物总能耗的核算结果与年际变化。由图 6 可知,总能耗的波动范围为 $1.91\times10^8\sim2.25\times10^8$ GJ, 平均能耗值为 2.12×10^8 GJ。从总体趋势来看,总能耗呈现出稳步上升态势。这归因于农业生产技术的持续进步,特别是农业机械化水平的显著提升。在耕作、灌溉及收获等关键环节,机械动力大规模替代了传统劳动力,带动化石燃料与电力等直接能源投入持续增长。从作物层面来看,玉米和小麦的能耗波动较为明显,原因在于其价格常年波动,进而影响了农户的种植积极性,当价格上升时,其种植面积增加;当价格下降时,种植面积相应减少。而种植面积的变化,直接影响总能耗水平。

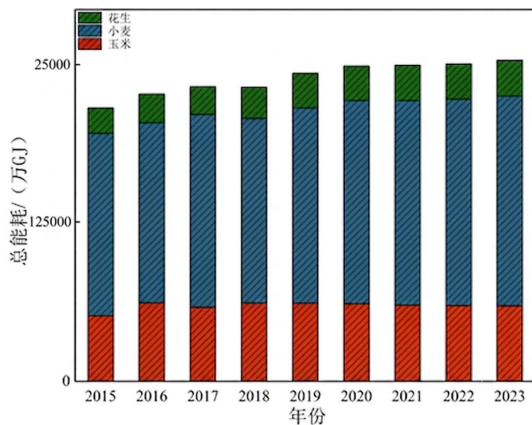


图 6 2015—2023 河南省年主要作物总能耗值

Fig. 6 The total energy consumption value of major crops in Henan, 2015—2023

2.3 河南省主要农作物种植结构优化

基于 1.4 节构建的水—能—粮多目标种植结构优化模型进行寻优求解, 计算 2030 年河南省主要农作物种植结构的最优规划方案, 结果见表 3。由表 3 可知, 总体上玉米和花生的种植面积呈增加趋势, 分别增加了 $4.65 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 和 $7.04 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 小麦的种植面积下降了 $1.17 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。在河南省的种植结构调整中, 不同作物的水资源利用类型是关键因素: 在水资源紧张区域, 应相对减少蓝水型作物的种植面积; 在雨量充沛区域, 应相对增加绿水型作物的种植。

具体来看, 表 3 的结果清晰地表明, 小麦种植面积在河南省所有地市均呈现下降趋势。小麦虽然是粮食安全保障作物, 但其生产过程对灌溉水与能源的依赖度较高, 而单位面积的经济产出却低于资源消耗更少的花生。因此, 在确

保粮食总产量安全的前提下, 适度压缩小麦种植面积, 为玉米和花生等资源匹配度更优或经济效益更高的作物腾出发展空间, 是实现经济与生态效益协同提升的必要举措。相比小麦, 各地市玉米种植面积多数呈现上升趋势。玉米具有低耗水、低耗能特性, 其单位产量的水足迹和能源消耗均处于较低水平, 增加玉米的种植面积, 有助于降低农业生产系统的整体水、能资源消耗总量, 从而减轻区域的资源压力。种植面积增幅最大的为驻马店, 增加了 $9.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。该市是河南省内降雨量丰富的地区, 而玉米作为绿水消耗型作物, 在此区域的种植比例却显著低于其他地区的, 增加其种植面积可以更好地利用自然降水。但是, 在郑州与三门峡, 玉米种植比例分别下降了 $1.49 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 和 $1.38 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。分析其原因, 基期这两个城市的玉米种植比例较高, 尽管玉米对水资源和能源的需求相对较低, 但其收益却不如花生。因此, 通过减少玉米的种植面积而增大花生的种植面积, 有利于增加总体经济效益。

就 3 种作物而言, 花生水资源利用效率 W_E 最高, 能够更好地适应气候变化和水资源波动。规划中, 各地市花生种植面积普遍呈现上升趋势, 其中商丘、周口两市的增幅最为显著, 分别达到了 $6.87 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 和 $9.34 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。推测这一现象的原因, 在于这两个地市作为河南省的农业核心区, 其耕地规模在省内位居前列, 而基期花生种植比例较小, 在应用优化模型进行调整时, 其面积增加的绝对值也因庞大的基数而远超其他地市。与此同时, 豫东地区相对均衡的水、能资源禀赋, 为扩大花生这种高经济效益作物的种植提供了必要的承载能力。

表 3 河南省 2030 年主要农作物种植结构规划结果 10^3 km^2

Tab.3 The results of the 2030 major crop planting structure planning in Henan Province

地市	基期(2020 年)			规划期(2030 年)					
	小麦	玉米	花生	小麦	变化量	玉米	变化量	花生	变化量
郑州	140.49	131.35	26.24	88.09	-52.40	116.46	-14.89	93.51	67.27
开封	303.21	186.05	107.36	251.78	-51.43	222.60	36.55	122.24	14.88
洛阳	234.44	185.37	26.82	175.11	-59.33	195.56	10.19	75.98	49.16
平顶山	220.36	195.74	31.54	177.18	-43.18	205.95	10.21	64.58	33.04
安阳	289.44	250.15	47.60	226.26	-63.18	270.40	20.25	90.54	42.94
鹤壁	89.70	77.54	13.80	71.14	-18.56	83.39	5.85	26.51	12.71
新乡	384.22	302.20	76.96	314.66	-69.56	341.66	39.46	107.06	30.1
焦作	149.17	123.40	24.53	120.99	-28.18	133.80	10.4	42.38	17.85
濮阳	229.40	151.71	21.63	183.67	-45.73	168.75	17.04	50.32	28.69

许昌	230.14	144.24	12.37	176.55	-53.59	161.69	17.45	48.50	36.13
漯河	146.35	83.90	13.44	102.82	-43.53	91.83	7.93	49.04	35.6
三门峡	75.36	58.84	4.41	48.60	-26.76	45.08	-13.76	44.93	40.52
南阳	725.99	454.61	314.25	595.04	-130.95	524.79	70.18	375.01	60.76
商丘	602.41	426.99	73.55	487.08	-115.33	473.66	46.67	142.21	68.66
信阳	310.94	20.42	68.75	249.22	-61.72	76.46	56.04	74.42	5.67
周口	733.79	529.05	80.38	591.30	-142.49	578.17	49.12	173.75	93.37
驻马店	787.15	434.45	317.64	629.40	-157.75	531.11	96.66	378.72	61.08
济源	21.24	20.37	0.55	16.24	-5.00	19.80	-0.57	6.13	5.58
汇总	5 673.79	3 776.38	1 261.84	4 505.13	-1 168.7	4 241.16	464.78	1 965.83	704.01

注：表中数值前的“-”表示减少。

河南省主要作物规划期与基期效益对比见表4。种植结构优化后,规划期的经济效益增加了 2.77×10^9 元,并且粮食产量提高了 8.72×10^5 t。与此同时,资源与环境的压力也显著减轻:农业水足迹和能源消耗分别降低了

$4.22 \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $1.00 \times 10^7 \text{ GJ}$,化肥投入削减了 $2.86 \times 10^5 \text{ t}$ 。这一系列数据表明,该优化路径有效平衡了发展与保护的需求,是推动区域农业可持续转型的可行策略。

表4 河南省主要作物规划期与基期效益对比

Tab.4 Comparison of benefits between the planning period and the base period of major crops in Henan Province

时期	经济效益 /(亿元)	生态效益 /(万 t)	粮食产量 /(万 t)	水足迹/ (亿 m^3)	能源消耗 /(亿 GJ)
基期(2020)	11.26	418.18	6 668.83	513.02	2.21
规划期 (2030)	38.96	389.56	6 756.07	470.81	2.11

3.讨论

本研究的核心优化机制在于,利用不同作物在资源消耗(水、能)与产出效益(经济、粮食)上的差异,通过多目标规划模型重构农作物种植格局,以实现系统层面的整体最优。模型在确保粮食总产量不降低的刚性约束下,优先削减了资源投入产出比较低的小麦种植面积,将释放出的宝贵水土资源重新配置给经济效益更高(花生)或资源消耗更低(玉米)的作物,最终实现了“以更少的资源投入,获得更高的综合效益”这一帕累托改进。

将此机制与河南省资源禀赋的空间异质性(图7)相结合,可以更深刻地理解优化方案的合理性。从水资源维度看,省内水资源呈现显著的“南丰北缺”格局,信阳、南阳等豫南地区水资源相对充裕,而豫北、豫中地区水资源严重短缺。然而,基期的种植结构并未完全遵循这一自然禀赋,高耗水的冬小麦在水资源匮乏区仍保持着大规模种植,形成了“逆资源梯度”的农业生产模式。从能源维度看,将能

源消耗量统一折算为标准煤后发现,能源消耗也呈现出高度集聚特征,主要集中在郑州、洛阳等中心城市及其周边工业地带。这些区域不仅是全省的经济与能源负荷中心,其周边的农业生产(尤其是冬小麦)同样因依赖机井灌溉而成为电力消耗大户,致使农业用能与工业、城市用能争夺资源的紧张局面。

因此,基期种植结构实际上存在水、能两个维度上的资源错配。本研究的优化方案正是通过“减”与“增”的双向调控,推动了农业生产布局从“逆资源梯度”向“顺资源梯度”的战略性转变。这种资源再配置,不仅是对“以水定地”原则的响应,更是对“水—能”双重约束的协同适应,最终提升了农业系统与区域资源环境的匹配度,有力地推动了农业的可持续发展。

本研究通过多目标优化模型对河南省种植结构布局进行了系统探讨,但在广度与深度上仍存在可拓展的空间,这也是未来研究需要

努力的方向。首先,在空间尺度上,本研究以地级市为分析单元,这在宏观层面具有一定合理性,但在一定程度上忽略了区域内部资源禀赋与社会经济差异。未来的研究应将分析尺度下沉至县域甚至灌区单元,结合高分辨率的遥感数据与水文模型,更精准地刻画水土资源的空间异质性,从而提升优化方案的可落地性与现实指导性。

其次,在生态效益的衡量上,本研究采用“化肥施用量最小化”作为生态效益的代理指标,这对于控制农业面源污染、降低灰水足迹具有重要意义,但未能涵盖生态效益的全部

范畴。未来的研究可进一步丰富生态维度的优化目标,例如将农业系统净碳汇最大化、土壤健康指数提升或生物多样性保护等关键指标纳入模型,进行更为全面的综合寻优。

最后,在模型设定上,本研究更多地考虑了可量化的资源和产量限制,而对市场波动、政策影响以及农民的实际选择等因素的考虑不足。因此,未来可尝试将多目标规划模型与能够反映农户行为的社会经济模型相结合,模拟不同市场信号与补贴政策下的种植决策过程,从而增强优化方案的可行性与政策参考价值。

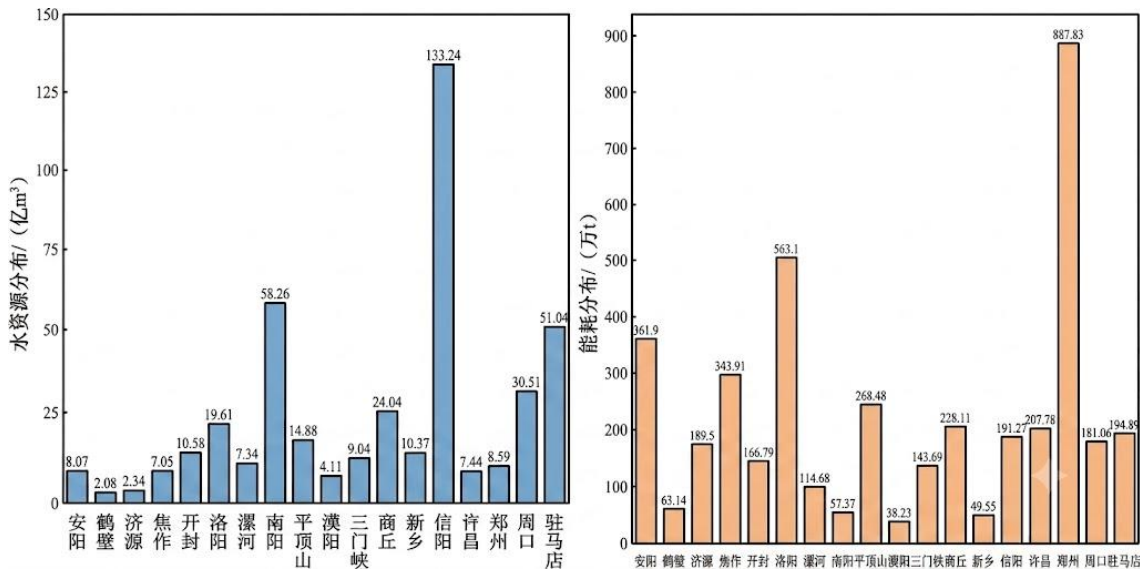


图7 河南省各地市基期水资源、能耗分布

Fig.7 Distribution of water resources and energy consumption in various cities of Henan during the base period

4.结论与建议

4.1 结论

1)河南省这3种农作物资源消耗特征呈现出明显差异,小麦属于中等耗水耗能作物,玉米属于低等耗水耗能作物,花生属于高等耗水耗能作物。小麦、玉米、花生的水资源利用类型依次为蓝水消耗型作物、绿水—灰水消耗型作物、绿水消耗型作物。

2)3种作物的水资源利用效率 W_E 从高到低依次为花生、玉米、小麦,并且随着种植技术的发展与种植条件的改善,三种作物的 W_E 均有上升且趋于稳定的趋势。

3)在调整后的种植结构中,总体上玉米和花生的种植面积均有所增加,分别增加了 $4.65 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 和 $7.04 \times 10^5 \text{ hm}^2$,小麦的种植面积下降了 $1.17 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。在效益方面,经济效益增加

了 2.77×10^9 元,农业水足迹和能源消耗分别降低了 $4.22 \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $1.00 \times 10^7 \text{ GJ}$,化肥投入削减了 $2.86 \times 10^5 \text{ t}$,同时粮食产量提高了 $8.72 \times 10^5 \text{ t}$ 。

4.2 建议

1)针对豫北、豫中、豫西等水资源匮乏、能源消耗高的区域,应推广智能灌溉,水肥一体化技术,升级农田水利设施,提升水资源利用效率^[20],以缓解粮食产能制约;同时优化化肥结构、减少高耗能化肥的过量施用,并推广农业可再生能源应用,实现减排固碳与农业增效的双重目标。

2)针对豫东、豫南等水资源充裕、能源消耗低的区域,在水资源利用方面,可利用降雨充沛的优势发展玉米、花生等“绿水”作物,同时警惕农业面源污染,通过技术培训推广科学施肥灌溉以降低“灰水足迹”;在能源利用方面,

推广保护性耕作、免耕播种等技术,减少农机作业与燃料消耗,同时通过合理轮套种提升土地效率,减少病虫害及农药化肥的使用。

3)构建以生态优先为导向的财政激励体系,完善农户技能培育机制并强化政策传导效能,推动农户种植向节水节能型、环境友好型、高经济效益型作物转型,通过全周期风险缓释措施保障种植结构调整平稳过渡。

参 考 文 献

- [1] Holger H.Understanding the nexus:background paper for the Bonn 2011 nexus conference :the water ,energy and food security nexus[R].Stockholm: Stockholm Environment Institute,2011.
- [2] Li M,FU Q,Singh P V,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(P1):1416-1434.
- [3] Zhang C,Chen X,Li Y,et al.Water-energy-food nexus:concepts ,questions and methodologies[J].Journal of Cleaner Production,2018,195:625-639.
- [4] Ogbolumanio A,Nwulun I.Multi-objective optimisation of constrained food-energy-water-nexus systems for sustainable resource allocation[J].Sustainable Energy Technologies and Assessments,2021,44.
- [5] Radmehr R ,Brorsen W B,SHAYANMEHR S.Adapting to climate change in arid agricultural systems:an optimization model for water-energy-food nexus sustainability[J].Agricultural Water Management,2024,303:109052-109052.
- [6] 彭致功,张宝忠,刘钰,等.基于灌溉制度优化和种植结构调整的用水总量控制[J].农业工程学报,2018,34(3):103-109.[Peng Z G,Zhang B Z,Liu Y,et al.Constraint of total water consumption amount based on optimized irrigation schedule and planting structure adjustment[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2018,34(3):103-109.]
- [7] 李彦彬,马嘉彤,李道西,等.改进粒子群算法在农业种植结构优化中的应用[J].灌溉排水学报,2022,41(1):62-71.[Li Y B,Ma J T,Li D X. An improved particle swarming optimization method to optimize cropping systems[J].Journal of Irrigation and Drainage,2022,41(1):62-71.]
- [8] 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 Y, Li X Y, Jiang W Q,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.]
- [9] 王楚凡,牛俊.西北地区主要粮食作物种植的水、碳足迹及布局优化 [J]. 中国农业科学,2024,57(6):1137-1152.[Wang C F,Niu J.Water and carbon footprint and layout optimization of major grain crops in the northwest China[J].Scientia Agricultura Sinica,2024,57(6):1137-1152.]
- [10] Cao X,Zeng W,Wu M,et al.Hybrid analytical framework for regional agricultural water resource utilization and efficiency evaluation[J].Agricultural Water Management,2020,231:106027-106027.
- [11] 何旭刚,买买提·沙吾提,夏梓洋,等.1960—2020 年新疆主要作物需水量时空特征分析[J].作物学报,2023,49(12):3352-3363.[He X G,Mamat S,Xia Z Y,et al.Spatio—temporal characteristics of water requirement of main crops in Xinjiang from 1960 to 2020 [J].Acta Agronomica Sinica,2023,49(12):3352-3363.]
- [12] 程鹏,彭海洋,侯丁榕,等.黄河流域农业灰水足迹强度空间格局及演进趋势 [J]. 干旱区地理,2025,48(7):1185-1197.[Cheng P,Peng H Y,Hou D R,et al.Spatial pattern and evolution trend of agricultural grey water footprint intensity in the Yellow River Basin[J].Arid Land Geography,2025,48(7):115-1197.]
- [13] 李红颖,秦丽杰,杨婷.吉林省水稻生产水足迹时空分异研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(2):32-39.[Li H Y,Qin L J,Yang T. Temporal Variability and Spatial Distribution of Water footprint for rice production in Jilin province[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2018,39(2):32-39.]
- [14] 周露明,谢兴华,朱珍德.水—能源—粮食纽带关系

- 耦合模拟模型及案例研究[J].中国农村水利水电, 2020(10): 1-6.[Zhou L M, Xie X H,Zhu Z D. Water—energy—food nexus coupling simulation model and case study[J].China Rural Water and Hydropower, 2020(10):1-6.]
- [15] Aldaya B M,Chapagain A K,Hoekstra A Y,et al.The Water Footprint Assessment Manual:Setting the Global Standard[M].Netherlands:Taylor and Francis,2012.
- [16] 仇蕾,钟雨纯,崔韵文.基于水—能—粮关联关系的粮食主产区农业种植结构优化研究—以吉林省为例[J].中国农业资源与区划,2022,43(10):51-62.[Qiu L,Zhong Y C,Cui Y W.Optimization of agricultural planting structure in main grain producing areas based on the perspectives of water—energy—food nexus—a case study of Jilin province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2022,43(10):51-62.]
- [17] 赵琳琪,陈源泉.基于能值分析京郊蔬菜不同生产经营方式的生态经济可持续性评价[J].中国农业大学学报,2020,25(5):198-208.[Zhao L Q,Chen Y Q.Sustainability evaluation of different production and management patterns of vegetables in Beijing suburbs based on emergy and economic analysis[J]. Journal of China Agricultural University,2020,25(5):18-208.]
- [18] 张鹏飞,肖梦琳,张兆瑞,等.基于水—能—粮关联关系的山西省农业种植结构优化调整[J].节水灌溉,2023,(1):55-63+70.[Zhang P F,Xiao M L,Zhang Z R,et al.Optimization and adjustment of agricultural planting structure in Shanxi province based on water—energy—food nexus[J]. Water Saving Irrigation,2023,(1):55-63+70.]
- [19] 李红莉,张卫峰,张福锁,等.中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J].植物营养与肥料学报,2010,16(5):1136—1143.[Li H L,Zhang W F,Zhang F S,et al.Chemical fertilizer use and efficiency change of main grain crops in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,2010,16(5):1136-1143.]
- [20] 夏帆,郭辉,姜欣言,等.基于水足迹理论的河南省沿黄城市水资源短缺评价[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(6):76-83.[Xia F,Guo H,Jiang X Y,et al.Evaluation of water scarcity in cities along yellow river in Henan province based on water footprint theory[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2025,46(6):76-83.]

An Optimization Study on the Cropping Structure of Henan Province Based on the Water-Energy-Food Nexus

ZHANG Liang¹, SHANG Jin¹, WANG Hongtao²

(1.North China University of Water Resources and Electric Power, School of Water Resources, Zhengzhou 450046, China;
2.Yellow River Conservancy Technical University, College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Kaifeng 475004, China)

Abstract: **【 Objective 】** Guided by the principles of ecological priority and green development, this approach integrates the optimization of resource allocation and cropping patterns. The goal is to concurrently ensure stable grain yields while achieving the maximization of ecological and economic gains. **【 Methods 】** Taking Henan Province as the study area, this paper integrates water footprint theory with an energy accounting framework to determine the water—energy consumption characteristics of crops. It develops an integrated multi—objective programming model, constrained by the Water—Energy—Food nexus, to optimize the planting structure and achieve a synergistic enhancement of regional economic and ecological goals. **【 Results 】** (1)The three crops exhibit significant differences in their resource consumption patterns and water use efficiency (W_E). (2) In the adjusted planting structure, the cultivation areas for corn and

peanuts increased by $4.65 \times 10^5 \text{ hm}^2$ and $7.04 \times 10^5 \text{ hm}^2$ respectively, while the area for wheat decreased by $1.17 \times 10^6 \text{ hm}^2$.⁽³⁾ In terms of benefits, the optimization led to an increase in economic benefits by 2.77×10^9 yuan and a rise in grain production by 8.72×10^5 tons. Simultaneously, the pressure on resources and the environment was significantly reduced: the agricultural water footprint and energy consumption decreased by $4.22 \times 10^9 \text{ m}^3$ and $1.00 \times 10^7 \text{ GJ}$ respectively, and fertilizer input was substantially cut by 2.86×10^5 tons. **【Conclusion】** Under multiple constraints, the optimized results reduced the regional resource load while achieving a dual improvement in both economic and ecological benefits of agricultural production, thus promoting sustainable regional agriculture.

Keywords: Water—Energy—Food Nexus; Water Footprint Concept; Energy Consumption Assessment Model; Multi—Objective Optimization Model; Cropping Structure