

文章编号: 0559-9350(2023)08-0967-11

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

崔思梦¹, 吴梦洋¹, 王小军², 操信春^{1,3}

(1. 河海大学 农业科学与工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

3. 江苏省农业水土资源高效利用与固碳减排工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要:灌溉系统是农业生产与用水的关键载体, 其水-能源-粮食关联关系的协调性对区域可持续发展有重要影响。相较于传统的灌溉水高效分配研究, 水足迹理论明晰了农业生产水资源消耗总量及其利用类型。针对提水灌溉系统水资源、能源供需配置不紧密及其生态影响考虑不全面的问题, 联合水足迹理论与水-能源-粮食关联关系, 统筹社会、资源、生态和经济多维系统, 构建了考虑水资源调配、农业生产用水及粮食生产转移全过程的提水灌溉区种植结构多目标优化评价模型。将该模型应用于涟水灌溉区, 通过调整粮食作物(水稻、小麦、玉米和大豆)的种植结构, 运用 Topsis 方法对比评价了现状和优化配置情况的相对贴近度。优化结果表明: 在保障粮食安全的基本前提下, 应增大玉米的播种面积, 减少大豆的播种面积; 相较于现状, 优化后的年均粮食单方水经济净效益提升 4.0%, 作物碳足迹在农作物种植基线改变时呈现下降态势, 且 2018 年优化后的碳足迹降低 79.5 kg。优化方案的相对贴近度均大于现状, 对促进提水灌溉系统资源高效利用和农业可持续性具有可靠的支撑作用。

关键词:水-能源-粮食; 作物水足迹; 多目标优化; 提水灌溉系统; Topsis 评价法

中图分类号: S274

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20230022

1 研究背景

中国灌溉农田占总耕地面积的一半以上, 消耗了大量灌溉用水的同时贡献了全国粮食产量的四分之一^[1]。灌溉区粮食生产高效用水对保障国家粮食安全和缓解区域水短缺均具有重要的作用^[2]。灌区水管理还涉及区域生态、环境和社会功能的实现^[3], 如绿洲生态维护、面源污染防控、农业农村发展等。因此, 灌区农业和水资源调控被视为社会发展的重要内容, 也一直受到学界的关注^[4]。

以水资源高效利用为核心、优化模型构建与解析为基础的种植结构调整是改进灌区农业管理的重要手段之一^[5]。当前, 针对特定对象的现实条件, 学者在涉及灌区种植结构调整的原理、目标、模型和策略上开展了大量创新性研究和探索^[6]。传统模型在农业用水及其效率量化中大多以灌溉水为对象, 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^[7]。水足迹概念的提出及其在农业用水评价和管理中的应用促进了该领域的发展。农作物水足迹为作物生育过程中所有水资源消耗和潜在污染量, 包含蓝、绿和灰水足迹三个部分^[8]。蓝水即从地表或地下取用的灌溉水, 绿水是未产生径流被作物以蒸发蒸腾形式消耗的降水, 灰水足迹则为将一定的污染负荷吸收同化所需要的水量^[9]。水足迹被视为衡量

收稿日期: 2023-01-11; 网络首发日期: 2023-07-31

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20230731.0913.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979074, 41961124006); 江苏省自然科学基金项目(BK20221504); 中央高校基本科研业务费项目(B230201009)

作者简介: 崔思梦(1998-), 博士生, 主要从事农业水土资源规划与利用研究。E-mail: cuisimeng@hhu.edu.cn

通信作者: 操信春(1986-), 教授, 博士生导师, 主要从事农业水碳中和研究。E-mail: caoxinchun@hhu.edu.cn

粮食生产与水资源耗用关系最为全面的指标,已被广泛用于农业用水及其效率评估^[10]。不仅如此,已有学者开展了基于水足迹工具的灌区农业种植结构优化探索^[11]。然而,囿于田间视角的水足迹中蓝绿水耗用量核算并不能反映出灌区输配水效率及其影响,表现出系统局限性。在灌溉农业系统中,粮食生产过程依赖于水、土地和能源等各种环境资源的投入;与此同时,水资源的获取和分配过程消耗能源,能源的生产也离不开水,几乎所有粮食生产和供应阶段都消耗大量的水和能源^[12]。

近年来,水-能源-粮食关联关系在资源管理和区域发展研究领域备受关注^[13]。衡量水-能源-粮食关联关系的评价指标虽因研究视角和目的的不同而存在差异,但其系统性思维为农业生产单元资源高效管理提供了新的方向^[14]。基于水-能源-粮食关联关系的农业系统优化研究已见诸报道:Li等^[15]对典型灌区的水-能源-粮食系统开展了优化;Zuo等^[16]进行河南省农业管理优化并建议大力发展小麦、薯类和水果生产;Zheng等^[17]面向作物种植和生物质利用协同管理对河北省开展了种植结构调整研究。农业种植结构优化是水-能源-粮食协同管理的落脚点之一^[18]。因而,当前相关研究大多着眼于灌溉水的高效分配与利用,未从水足迹视角统筹考虑作物生产对绿水资源和水环境的影响^[18-19]。

联合作物水足迹与水-能源-粮食关联关系两者优势的研究思路将会为区域作物种植结构优化的科学研究和管理实践扩展有价值的视角。本文面向提水灌溉系统水资源输配、耗用过程和粮食产出全过程,构建基于水足迹与水-能源-粮食关联关系的种植结构多目标优化模型。对典型南方末级提水灌区开展粮食种植结构优化和结果评价研究,以期为相关研究领域和区域的资源高效利用和农业可持续性提供方法参考。

2 方法与数据

2.1 种植结构多目标优化研究框架 末级提水灌溉系统种植结构优化研究框架如图1所示。图中水-能源-粮食关联关系由作物水足迹、作物碳足迹、用电量和产量等要素构成。本文将基于此开展种植结构多目标优化模型的构建与求解,并利用耦合熵权法和Topsis评价法对优化方案和结果进行评价。

2.2 种植结构多目标优化模型 优化模型基于水足迹理论和水-能源-粮食关联关系,权衡经济和生态效益,目标函数为单方水经济净效益最大与作物碳足迹最小。约束条件包括蓝水资源压力约束、电能资源压力约束、粮食安全压力约束、播种面积约束和非负约束。

2.2.1 目标函数

(1) 单方水经济净效益最大。根据不同作物单位面积的成本、收入和作物水足迹来计算单方水经济净效益(此处用 F_1 表示第一个目标函数,元/ m^3),以表征灌区经济效益:

$$F_1 = \sum_{i=1}^4 [(R_i - C_i) \times A_i] / \sum_{i=1}^4 CWF_i \quad (1)$$

式中:下标 i 为作物编号,1,2,3,4分别对应水稻、小麦、玉米和大豆; R_i 和 C_i 分别为作物单位面积收入和成本,元/ hm^2 ; A_i 为作物播种面积, hm^2 ; CWF_i 为作物水足迹, m^3 。

(2) 灌溉取水过程碳足迹最小。通过水泵取水的灌溉会产生电能消耗,根据生命周期理论电能生

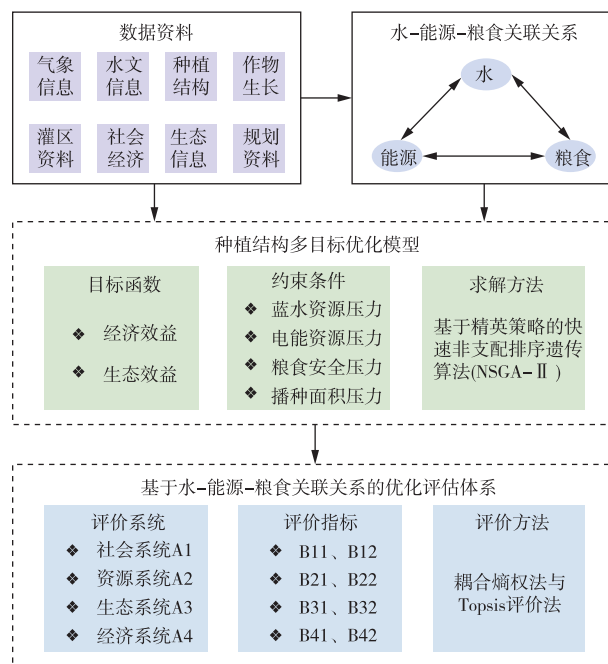


图1 提水灌溉系统种植结构多目标优化研究框架

产过程会导致碳排放。因此,以灌溉取水中耗电产生的碳排放,即这一部分作物碳足迹(此处用 F_2 表示第二个目标函数,单位为 t),来表征灌区生态效益:

$$F_2 = \sum_{i=1}^4 (960 \times AEC_i \times A_i) \quad (2)$$

$$AEC_i = \left(\sum_{j=1}^{15} EEC_{ij} \right) / \left(\sum_{j=1}^{15} A_{ij} \right) \quad (3)$$

式中:960 为排放因子^[20]; AEC_i 为单位面积用电量, kWh/hm²; 下标 j 为年份编号, $j=1, 2, 3, \dots, 15$ 分别对应 2005—2019 年; EEC_{ij} 为 i 作物在 j 年份的用电量, kWh。

2.2.2 约束条件

(1) 蓝水资源压力约束。作物蓝水足迹不得超过农田灌溉用水量, 即

$$\sum_{i=1}^4 (AWF_{blue,i} \times A_i) \leq \max AWR \quad (4)$$

$$AWF_{blue,i} = \left(\sum_{j=1}^{15} CWF_{blue,ij} \right) / \left(\sum_{j=1}^{15} A_{ij} \right) \quad (5)$$

$$CWF_{blue,ij} = A_{ij} \times \max(0, ET_{e,ij} - P_{e,ij}) \quad (6)$$

式中: AWR 为灌溉用水量, $\max AWR$ 为 AWR 的多年最大值, m³; $AWF_{blue,i}$ 为 i 作物的单位面积蓝水足迹, m³/hm²; $CWF_{blue,ij}$ 为 i 作物在 j 年份的蓝水足迹量, m³; $P_{e,ij}$ 和 $ET_{e,ij}$ 分别为 i 作物与 j 年份的有效降雨量和作物蒸发量, mm。

(2) 电能资源压力约束。各作物灌溉消耗的用电量之和不得超过最大用电量, 即

$$\sum_{i=1}^4 (AEC_i \times A_i) \leq \max EEC \quad (7)$$

式中: EEC 为灌溉用电量, $\max EEC$ 为 EEC 的多年最大值, kWh; AEC_i 为作物单位面积用电量, kWh/hm²。

(3) 粮食安全约束。为确保粮食生产安全, 各作物产量之和不得低于社会最低需求。

$$\sum_{i=1}^4 (y_i \times A_i) \geq \max GDV \quad (8)$$

式中 GDV 为粮食需求量, $\max GDV$ 为 GDV 的多年最大值, kg。

(4) 播种面积约束。在同一时段内, 各种作物播种面积之和不得超过耕地面积。

$$A_1 + A_3 + A_4 \leq \max TA \quad (9)$$

$$A_2 + A_4 \leq \max TA \quad (10)$$

式中 TA 为耕地面积, $\max TA$ 为其多年最大值, hm²。

(5) 非负约束。

$$A_i \geq 0 \quad (11)$$

2.2.3 模型求解及评价 采用基于精英策略的快速非支配排序遗传算法 NSGA-II 求解种植结构多目标优化问题。Srinivas 等^[21]于 1994 年首次提出非支配排序遗传算法(NSGA), Deb 等^[22]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。非支配排序遗传算法求解步骤包括: 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^[22]。

基于水-能源-粮食关联关系的提水灌溉系统种植结构优化模型评价体系如表 1 所示。利用耦合熵权法的 Topsis 评价方法, 结合粮食生产过程对社会、资源、生态和经济多维度系统造成的影响选取评价指标, 进行优化方案综合评价。研究中评价三个方案(现状 P1, 优化方案 P12、P14)在 2006、2009、2012、2015 和 2018 年的情况, 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、最劣解的距离来评价优化结果的优劣^[23]。耦合熵权法的 Topsis 评价模型计算步骤如下。

步骤 1: 计算 5 个年份三种方案的 8 项评价指标, 得出待评价指标矩阵为 $M = [x_{mn}]$ 。

步骤 2: 按照效益型和成本型指标公式对 $M=[x_{mn}]$ 进行归一化处理, 得到 $M'=[x'_{mn}]$ 。

$$y_{mn} = \frac{x_{mn} - \min_n(x_{mn})}{\max_n(x_{mn}) - \min_n(x_{mn})} \quad (\text{效益型指标}) \quad (12)$$

$$y_{mn} = \frac{\max_n(x_{mn}) - x_{mn}}{\max_n(x_{mn}) - \min_n(x_{mn})} \quad (\text{成本型指标}) \quad (13)$$

步骤 3: 借助熵权法^[23] 计算各指标权重, 得出相关权重矩阵 $W=\{w_1, w_2, \dots, w_m\}^T$ 。

步骤 4: 将归一化标准矩阵与熵权法得出的权重矩阵相乘, 并运行 Matlab 算法求出各方案的欧式距离 d_{mn}^+ 和最差组合的欧式距离 d_{mn}^- , 以及相对贴近度 c_{mn} , 相对贴近度越大, 则对应方案的综合评价越优。

2.3 水-能源-粮食关联关系评价指标 作物水足迹 CWF 包括蓝水 CWF_{blue} 、绿水 CWF_{green} 和灰水 CWF_{grey} 足迹三个部分:

$$CWF = CWF_{\text{blue}} + CWF_{\text{green}} + CWF_{\text{grey}} \quad (14)$$

$$CWF_{\text{blue}} = A \times \max(0, ET_e - P_e) \quad (15)$$

$$CWF_{\text{green}} = A \times P_e \quad (16)$$

式中: ET_e 和 P_e 分别为作物蒸发量和有效降水量, mm; ET_e 和 P_e 利用 Cropwat 模型结合作物需水量法计算; CWF_{grey} 根据《水足迹评价手册》^[8] 中的测算方法得到:

$$WF_{\text{grey}} = \frac{\alpha \times AR}{(c_{\text{max}} - c_{\text{nat}})} \times \frac{1}{Y} \quad (17)$$

$$CWF_{\text{grey}} = WF_{\text{grey}} \times OP \quad (18)$$

式中: WF_{grey} 为作物单位产量的灰水足迹, m^3/t ; α 为使用的化学物质进入淡水的比例, 即淋溶、径流损失率^[24], 氮取 0.1; AR 为田间氮肥施用量, kg/hm^2 ; c_{max} 和 c_{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, mg/L ; Y 为作物单产, t/hm^2 ; OP 为作物产量, kg 。

作物生产水足迹 WEP (m^3/kg) 为单位粮食产量水足迹

$$WEP = CWF/OP \quad (19)$$

作物消费水足迹 WFC :

$$WFC = GDV \times WEP \quad (20)$$

$$GDV = RPC \times P \quad (21)$$

$$RPC = NGO/NP \quad (22)$$

式中: WFC 为当地居民消耗的粮食所产生的水足迹, m^3 ; GDV 和 NGO 分别为研究区粮食需求量和全国粮食产量, kg ; RPC 为人均粮食占有量, $\text{kg}/\text{人}$; P 和 NP 分别为研究区和全国的人口。

用电量 EEC (kWh) 为提水灌溉系统中所有泵站灌溉时所消耗的电能:

$$EEC = \sum (PO_k \times t_k) \quad (23)$$

$$t = IWW/(\beta \times Q) \quad (24)$$

$$IWW = CWF_{\text{blue}}/IE \quad (25)$$

式中: PO 为水泵电动机功率, kW ; k 为水泵编号; t_k 为水泵 k 的进水时间, 由需水量和水泵参数决定, h ; IWW 为泵站总抽水量, m^3 ; β 为水泵效率, 无量纲; Q 为水泵流量, m^3/s ; IE 为灌溉效率, 无量纲。

虚拟水输出 VWE 是指粮食输出量所承载的水足迹^[25]:

$$GEV = OP - GDV \quad (26)$$

$$VWE = WEP \times GEV \quad (27)$$

式中: GEV 为粮食输出量, kg ; VWE 为虚拟水输出, m^3 。

作物水分生产率 CWP (kg/m^3) 为消耗单位水足迹所生产的作物产量

$$CWP = OP/CWF \quad (28)$$

电能生产率 EEP (kg/kJ) 为消耗单位用电量所生产的作物产量

$$EEP = OP/EEC \quad (29)$$

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 A1	作物水分生产率 B11	式(28)	相对水足迹作物产量	效益型
	虚拟水输出 B12	式(27)	粮食生产安全保障	效益型
资源系统 A2	蓝水利用率 B21	蓝水足迹与作物水足迹的比值	水资源利用效率	成本型
	电能生产率 B22	式(29)	相对电量作物产量	效益型
生态系统 A3	作物碳足迹 B31	式(2)	灌溉系统生态效益	成本型
	灰水足迹 B32	式(18)	生态负面效益	成本型
经济系统 A4	单方水经济净效益 B41	式(1)	灌溉用水效益比	效益型
	经济净效益 B42	作物种植净收益	灌溉系统经济效益	效益型

2.4 研究区域与数据来源 涟水灌溉区地处江苏北部、淮河下游、淮安东北部，东经 118°59′—119°46′，北纬 33°39′—34°07′，由淮涟、涟东、涟西三个灌溉片区组成。作物播种面积约 12.5 万 hm²。全年总日照为 2418 h，多年平均气温在 14℃左右，年均降水量 1014.6 mm。选取水稻、小麦、玉米和大豆四种粮食作物为研究对象，在 2005—2019 时段中选取 2006、2009、2012、2015 和 2018 年为分析年份。涟水灌溉区在绿水无法满足作物生长需水要求时，需消耗电能提取蓝水进行灌溉，从电能来源过程考虑碳排放；同时，满足灌溉区内部粮食需求后，粮食可作为虚拟水载体向外贡献水资源。

日照时数、降水、温度、相对湿度和风速等气象资料来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>) 中气象站点数据。灌区的年作物产量、播种面积、灌溉效率均来自于灌区管理部门的统计数据；作物生育期资料主要来自农业观测台站观测资料，作物生育期在不同年份采用同一值，分别为水稻(4 月 16 日—9 月 10 日)、小麦(10 月 26 日—次年 6 月 3 日)、玉米(6 月 5 日—9 月 10 日)和大豆(3 月 20 日—6 月 12 日)；由全国、淮安市和涟水县统计年鉴数据整理得到研究区 2005—2019 年的人口、耕地及粮食生产状况。其中，各作物单位面积的成本和收入参考全国种植业产品的成本与收益数据，农业用水量取自于淮安市水资源公报，最大用电量由水泵运行计算而来，粮食需求量由全国人口、涟水灌溉区人口以及全国粮食产量计算获得。

3 结果与分析

3.1 优化方案评价比选 根据 NSGA-Ⅱ的 Pareto 解集中的 4 种作物播种面积，初步筛选出 15 种方案，借助 Topsis 评价法对比方案间相对贴近度，比选出其中 3 种用于分析，如图 2 所示。图中 P1 方案为现状情况，P12、P14 为优化方案。在此基础上，计算出 3 种方案水-能源-粮食关联关系评价指标，列于表 2。优化作物播种面积的同时也会对作物水足迹及水-能源-粮食关联关系产生影响。如 2018 年 P12 方案的作物播种面积分别比 P1 增加 1.2%、减少 18.2%、增加 54.0%和减少 7.2%；粮食的作物水足迹、用电量和产量分别比 P1 减少 5.6%，-3.9%和 4.6%；单方水经济净效益和作物碳足迹分别比 P1 减少 11.5%和 3.9%。而 P14 方案作物播种面积分别比 P1 增加 1.3%、减少 5.7%、增加 54.6%和减少 5.1%；粮食的作物水足迹、用电量和产量分别比 P1 增加 0，0.4%和 0.5%；单方水经济净效益和作物碳足迹分别比 P1 减少 5.8%和增加 0.4%。需要指出的是，受粮食收益下降影响，2018 年各方案的经济净效益为负。说明水-能源-粮食关联视角下，提高粮食收益仍是农业系统优化与可持续发展的重要前提。

仅着眼优化模型计算结果不一定直接得出最佳方案，对解集进行评价比选是有必要的。从水-能源-粮食关联关系评价指标上看，所选优化方案 P12、P14 整体优于现状(P1)。除作物水分生产率、蓝水利用率和电能生产率外，其余指标在不同方案中的变化较为明显。P12 和 P14 中的虚拟水输出在 2006、2009 和 2012 年中均高于 P1，而在 2015 和 2018 年低于 P1，表明在资源有限的条件下，研究区应优先考虑本地的粮食需求，而后向外输出粮食以缓解外部地区的资源短缺问题，从而为奠定社会基

础做贡献。值得注意的是，仅 P12 中的作物碳足迹、灰水足迹、作物水足迹、用电量和产量在 2015 和 2018 年出现降低，说明在优化后期生态效益与经济效益出现了强烈的竞争关系，也表明种植结构优化改善提水灌溉系统生态环境的潜力逐步显现出来。优化方案(P12、P14)中的单方水经济净效益、经济净效益均优于现状(P1)。单方水经济净效益作为目标函数之一，优化方案实现了该效益的提升，说明调整种植结构规避了不必要的经济损失，同时也验证了优化模型解集的合理性。

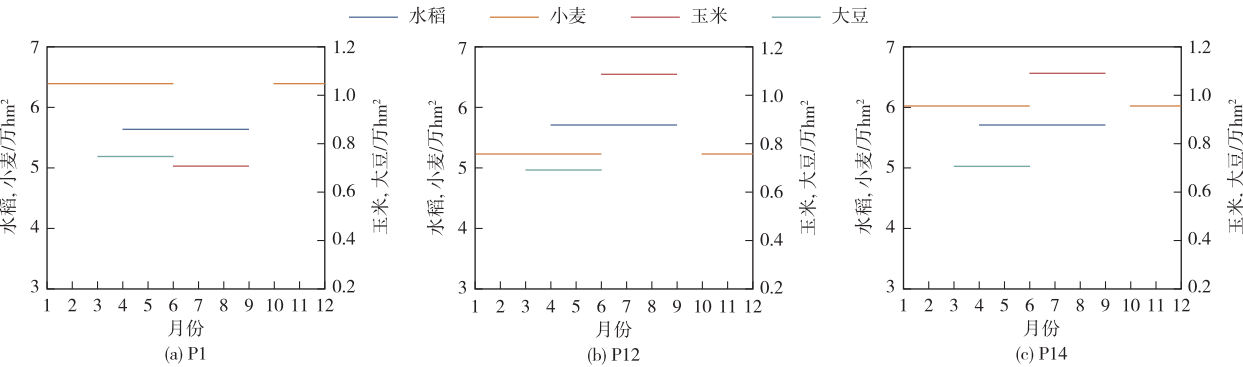


图 2 不同优化方案下的作物生育期播种面积

表 2 不同方案水-能源-粮食关联关系评价指标值

年份	2006			2009			2012			2015			2018		
指标	P1	P12	P14	P1	P12	P14	P1	P12	P14	P1	P12	P14	P1	P12	P14
作物水分生产率/(kg/m³)	0.63	0.63	0.63	0.7	0.71	0.7	0.67	0.67	0.67	0.73	0.73	0.73	0.72	0.73	0.73
虚拟水输出/(10 ⁶ m³)	466	626	698	581	613	684	555	566	638	447	438	505	512	450	516
蓝水利用率	0.35	0.35	0.35	0.39	0.4	0.39	0.47	0.47	0.46	0.35	0.34	0.35	0.27	0.27	0.27
电能生产率/(10 ⁶ kg/(kWh))	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.22	0.23	0.22	0.32	0.33	0.33	0.42	0.42	0.42
作物碳足迹/t	2.38	2.7	2.86	2.91	3.03	3.19	3.75	3.78	3.98	2.59	2.53	2.7	2.06	1.98	2.06
灰水足迹/(10 ⁶ m³)	293	339	361	300	304	324	312	312	333	309	305	325	280	264	281
单方水经济净效益/(万元/10 ⁶ m³)	15.07	15.22	14.84	18.29	18.94	18.54	21.39	23.41	22.41	19.92	20.3	19.93	-12.42	-11	-11.7
经济净效益/万元	16590	19230	19866	22034	23358	24229	27918	30750	31113	24074	24174	25203	-15513	-12957	-14620
作物水足迹/(10 ⁶ m³)	1101	1263	1339	1205	1233	1307	1305	1314	1388	1209	1191	1265	1249	1178	1249
用电量/(kWh)	2479	2818	2975	3036	3156	3319	3907	3932	4145	2699	2633	2808	2141	2058	2151
产量/(10 ⁶ kg)	699	799	842	847	872	921	876	885	932	877	874	920	905	864	909

三种方案在所观察年份的相对贴近度如图 3 所示。相对贴近度值越大意味着方案越好。P14 在 2006、2009、2012 和 2015 年的相对贴近度均为最大，分别达到了 0.623、0.621、0.642 和 0.681。而 2018 年，相对贴近度最大的方案 P12，其值为 0.606。结合表 2 和图 3 可知，单一的评价指标缺乏系统性，整合多评价指标更能全面地体现灌溉农业单元的多维系统特征。此外，优化方案 P12、P14 与现状情况 P1 相比，相对贴近度表现出明显改善。因此，多目标优化方案的综合结果均优于现状情况，即种植结构优化调整后，在水土资源有限的条件下，权衡经济与生态效益，在提高资源的利用率、减少水资源和能源浪费以及缓解资源短缺方面均有积极作用。

3.2 优化前后作物播种面积对比 典型年份 4 种作物优化前与后的播种面积如图 4 所示。优化后水稻和玉米的播种面积均明显高于优化前，年均分别增加了 8.3%和 29.6%；小麦面积在 2015 和 2018 年分

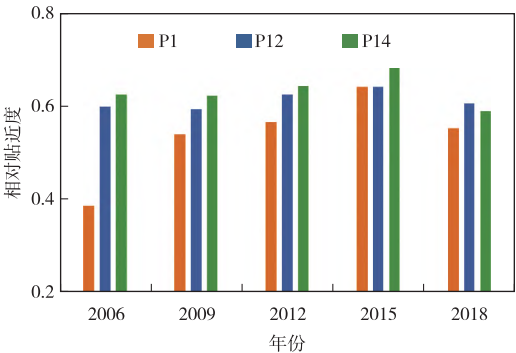


图 3 不同方案的相对贴近度

别比优化前减少 0.7% 和 18.2%；大豆仅在 2018 年减少 7.2%，其余年份有明显增加。表明在本研究的多目标优化模型中，水稻和玉米的综合效益较高，因此在未来的规划中，应当增加水稻和玉米的播种面积。图 4 还显示，优化前的小麦播种面积呈持续增长趋势，除 2006 年外，均高于水稻的播种面积；玉米和大豆的播种面积远远低于水稻和小麦的播种面积，这与稻米和小麦是主要的口粮作物有关。不同于水稻和玉米，小麦在 2015 和 2018 年优化后的播种面积低于优化前，这与 2015 年后小麦收益突降而成本持续增加有关，说明小麦的综合效益不稳定且风险高。此外，优化后的大豆播种面积仅在 2018 年比优化前约低 7.2%，这与当年大豆的成本和收益间的差异增大有关。

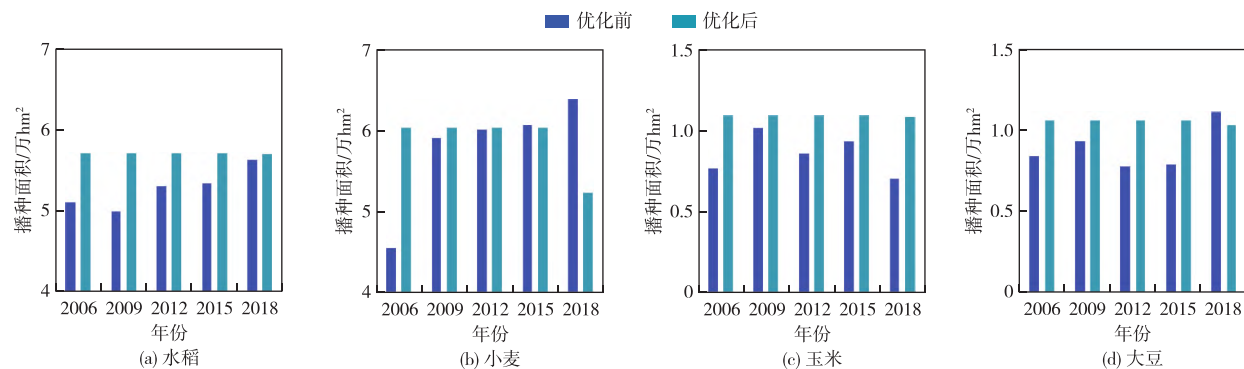


图 4 典型年份研究区粮食作物优化前后播种面积

3.3 优化前后的作物水足迹、用电量和产量变化

典型年份优化前后研究区粮食的作物水足迹、用电量和产量的变化如图 5 所示。2018 年优化后三个指标较于前期均有所降低，且均低于优化前，这与粮食作物播种面积受到压缩的现实趋势相关。粮食面积收缩会导致作物生长过程中碳排放减少，从生态效益的角度来看有助于“碳达峰”目标的实现。图 5 显示，优化前，作物水足迹和用电量均在 2012 年达到峰值，而产量最大值出现在 2018 年；优化后，作物水足迹和用电量仍在 2012 年达到峰值，同时也实现了粮食产出量最高。除 2018 年外，优化后的作物水足迹比优化前增大 4.0% 以上，用电量、产量的情况与作物水足迹相似，增幅均在 2006 年最高，这与当时经济和技术的发展状况有关。而在 2018 年，优化后的三个指标分别比优化前降低了 5.6%、3.9% 和 4.6%，这决定于经济迅速发展与资源、生态约束之间的关系，也说明优化种植结构有利于缓解经济发展与资源、生态环境之间的矛盾。

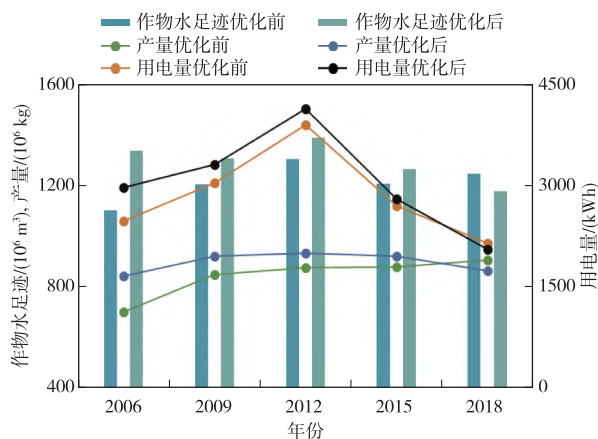


图 5 优化前后粮食作物水足迹、用电量和产量

3.4 优化前后的单方水经济净效益和作物碳足迹分析 优化前后各作物的单方水经济净效益列于表 3。综合 4 种作物来看，粮食单方水经济净效益年均增加约 0.5 万元/(10⁶ m³)。表 3 显示，优化前后单方水经济净效益在作物间存在差异，玉米与大豆较高而小麦与水稻相对较低。同时，4 种作物单方水经济净效益在优化前后的变化均不够明显。在 2006、2009 和 2012 年 4 种作物的单方水经济净效益均为正值，表现为盈利状态；2015 年大豆在优化前后均出现亏损；2018 年，仅有玉米处于盈利状态，其他 3 种作物优化前后均出现负值，其中大豆亏损最多，这主要取决于作物种植成本与收益的不匹配关系。从整体视角，仅在 2006 年，研究区粮食优化后的单方水经济净效益低于优化前，其余年份则相反，这与经济效益、作物耗水之间的变化态势不一致，说明作物复合种植结构的抗风险性增强而有利于水资源压力的缓解。在优化前后，玉米均保持盈利状态，说明玉米的抗风险能力高于其他 3 种作物，因此在保障水稻和小麦的播种面积的前提下，可适当增加玉米的播种面积。

表 3 优化前后作物单方水经济净效益

(单位: 万元/(10⁶m³))

年份	水稻		小麦		玉米		大豆		粮食	
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
2006	17.2	17.1	8.5	8.5	37.6	37.4	22.8	22.7	15.1	14.8
2009	19.5	19.6	11.7	11.7	50.8	50.9	39.2	39.2	18.3	18.5
2012	29.0	29.0	3.9	3.9	71.1	71.0	45.1	45.1	21.4	22.4
2015	25.2	25.2	14.7	14.7	24.3	24.3	-9.5	-9.5	19.9	19.9
2018	-1.3	-1.3	-24.6	-24.7	2.7	2.8	-54.6	-54.7	-12.4	-11.0

不同于只考虑灌溉水分配和经济效益的传统种植结构优化模型^[26], 本研究权衡了经济、资源和环境之间的冲突。研究区优化前后各作物碳足迹及其占总量比例分别如表 4 和图 6 所示。结果显示, 优化前后水稻和小麦的作物碳足迹占比均远大于玉米和大豆, 这与水稻和小麦的播种面积占比大以及单位面积作物碳足迹高有关。值得注意的是, 水稻和小麦作物碳足迹占比在优化前后均呈现对称关系, 从粮食生产过程中的二氧化碳直接与间接排放角度看, 水稻和小麦表现为竞争关系。表 4 显示出作物碳足迹随种植结构的调整呈现整体增加趋势; 在作物种植基线改变的情况下(2018 年), 优化后的小麦和大豆的播种面积减少, 作物碳足迹也相应减少; 小麦和大豆播种面积减少所带来的生态正面影响更为明显, 说明合理调整作物种植结构, 调节灌溉需求, 减少灌溉用电量, 有助于降低农业碳足迹, 从而服务“双碳”目标的达成。

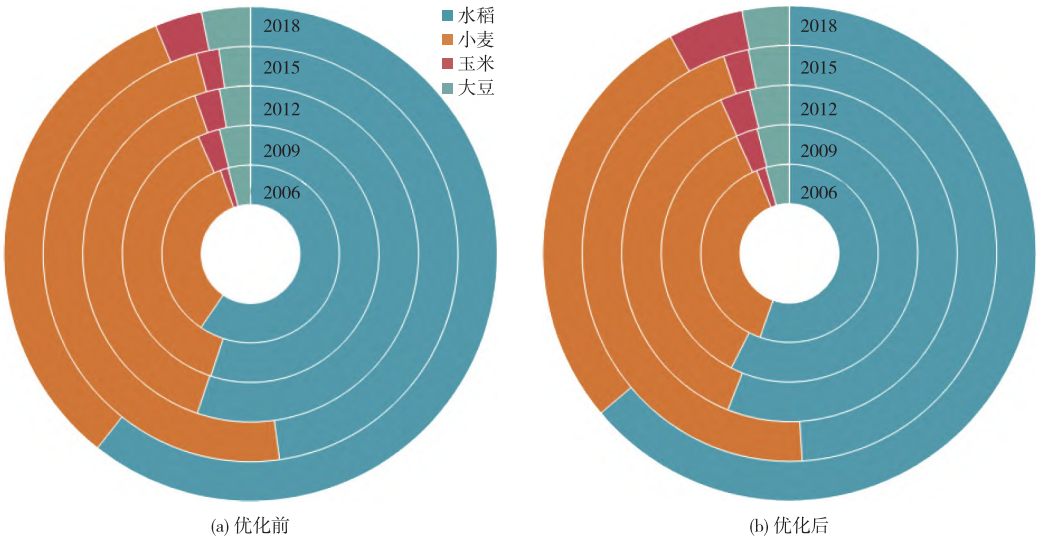


图 6 优化前后作物碳足迹构成

表 4 优化前后作物碳足迹

(单位: kg)

年份	水稻		小麦		玉米		大豆		粮食	
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
2006	1414.9	1581.9	832.3	1101.8	35.4	50.5	97.0	121.9	2379.6	2856.1
2009	1603.8	1831.9	1115.5	1137.6	80.7	86.8	114.2	129.6	2914.2	3185.9
2012	2068.6	2227.8	1479.1	1483.8	90.4	114.5	112.1	152.7	3750.3	3978.8
2015	1237.8	1321.8	1244.6	1235.4	45.2	52.9	63.9	85.8	2591.5	2695.7
2018	1246.9	1261.6	679.8	556.0	63.2	97.4	65.8	61.0	2055.6	1976.1

4 讨论

水足迹是量化农业水资源消耗的重要指标, 而传统的水资源效率评价多考虑蓝水利用; 然而在蓝

水短缺或雨养条件下,绿水对农业生产的贡献不可忽视^[27];灰水足迹则直观地反映了粮食生产导致的养分和农药流失对水环境的负面影响^[18]。因此,水足迹概念的提出和利用有助于农业水资源的管理与调配。同时,人口增长导致的粮食需求也随之增加,进而导致水资源与能源消耗的增多,而水-能源-粮食关联关系充分描述了水、能源和粮食之间的权衡特征。因此,耦合水足迹和水-能源-粮食关联关系的研究在农业领域吸引了学者的关注。

合理的种植结构和资源配置是农业可持续生产的基础。基于水足迹理论和水-能源-粮食关联关系的视角,本研究的种植结构多目标优化模型是基于经济和生态效益建立的。在兼顾作物生长与农产品生产的前提下,种植结构规划的目的是从总量控制和效率提升两个角度实现灌区水能资源的可持续利用,缓解资源压力。调整种植结构减少水能资源的消耗,同时也可能导致产量下降;水环境污染和碳排放也是在灌区管理中不容忽视的问题。因此,如何权衡生产投入端(水资源、能源)与产出端(产量、灰水足迹、碳足迹)的冲突,合理规划农业资源配置成为重要科学问题。合理规划种植结构可有效提高水资源利用效率,主要体现在倾向于种植耗水少、经济效益高的作物。水足迹理论明确农业生产过程消耗的水资源类型(蓝水、绿水)和量化水资源利用效率^[28],而综合水-能源-粮食关联关系的规划能够促进协同作用、权衡利益和风险筛选最佳方案^[29]。因此,在优化种植结构的基础上,合理规划资源配置,还可改变作物碳足迹排放比例,从而改善提水灌溉系统的生态环境。

在优化前期,作物产量呈现增长趋势,增加了资源消耗,这与技术落后、经济发展局限性有关,资源并未充分利用,而优化结果实现了资源的最大化利用。而在2018年,优化后的资源消耗出现了减少,说明优化前的作物种植基线发生了明显变化(图4),这与当地资源的有限及人口增长所引起的需求激增有关。相较于传统优化模型只关注作物生长环境,而不能协调复杂目标群之间冲突的研究^[25],本文构建的优化模型所涵盖的经济效益和生态效益是相互对立的,这也是本文的独特之处。此外,针对未来资源制约、气候变化、需求增加情景,如何权衡三者之间的关系是利益相关者需要解决的科学问题。

5 结论

基于水足迹理论和水-能源-粮食关联关系的种植结构多目标优化模型,统筹社会、资源、生态和经济多维系统评价指标,开展优化方案比选并分析了种植结构调整前后对资源消耗的影响。优化方案的相对贴适度均大于现状,说明基于水足迹理论与水-能源-粮食关联关系视角的种植结构优化模型适用于末级提水灌溉系统。在保障粮食基本需求的前提下,未来的规划中为减少经济损失,研究区可增加水稻和玉米的播种面积。2018年,优化后的水、电消耗量明显减少,粮食减产仍满足研究区需求,单方水经济净效益为负值但实现作物碳足迹减少79.5 kg,说明优化模型权衡了资源利用、经济效益和环境影响之间的关系,有利于农业可持续发展。

耦合水足迹理论与水-能源-粮食关联关系的种植结构多目标优化模型,兼顾经济和生态效益,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,为类似区域提供种植结构规划基础。科学合理地改善提水灌溉系统农业生产资源利用,也为粮食生产及农业可持续发展提供了有价值的、充满挑战性的研究视角。本研究尚未考虑农业生产过程中的不确定性及灌区内外部复杂资源交换情况,这也是未来研究中可进一步研究的科学问题。

参 考 文 献:

- [1] CAO X, WANG Y, WU P, et al. An evaluation of the water utilization and grain production of irrigated and rain-fed croplands in China[J]. Science of the Total Environment, 2015, 529: 10-20.
- [2] 操信春, 刘喆, 吴梦洋, 等. 水足迹分析中国耕地水资源短缺时空格局及驱动机制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 94-100.

- [3] DING W, HE P, ZHANG J, 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: 120603.
- [4] CUI S, WU M, HUANG X, et al. Unravelling resources use efficiency and its drivers for water transfer and grain production process in pumping irrigation system[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 818: 151810.
- [5] LUO J, ZHANG H, QI Y, et al. Balancing water and food by optimizing the planting structure in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 262: 107326.
- [6] ZHANG D, GUO P. Integrated agriculture water management optimization model for water saving potential analysis[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 170: 5-19.
- [7] XU J, CAI H, 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.
- [8] HOEKSTRA A, CHAPAGAIN A, ALDAYAM M, et al. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard[M]. London: Earthscan, 2011.
- [9] 操信春, 崔思梦, 吴梦洋, 等. 水足迹框架下稻田水资源利用效率综合评价[J]. *水利学报*, 2020, 51(10): 1189-1198.
- [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.
- [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.
- [12] CUI S, WU M, HUANG X, et al. Sustainability and assessment of factors driving the water-energy-food nexus in pumped irrigation systems[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 272: 107846.
- [13] 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.
- [14] LEE S H, CHOI J Y, HUR S O, et al. Food-centric interlinkages in agricultural food-energy-water nexus under climate change and irrigation management[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 163: 105099.
- [15] LI M, FU Q, 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: 209-224.
- [16] ZUO Q, WU Q, YU L, et al. Optimization of uncertain agricultural management considering the framework of water, energy and food[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 253: 106907.
- [17] ZHENG Z, JI L, XIE Y, et al. Synergic management of crop planting structure and biomass utilization pathways under a food-energy-water nexus perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 335: 130314.
- [18] 卓拉, 尚科辉, 杨西, 等. 基于能值分析的黄河流域粮食生产系统蓝绿水资源利用评价[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(1): 132-140.
- [19] 吴迪, 崔远来, 黄文波, 等. 基于改进 SWAT 模型的多水源灌区节水潜力尺度效应[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(12): 82-90.
- [20] IPCC. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory[R]. IPCC. 2019.
- [21] SRINIVAS N, DEB K. Multi-objective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms[J]. *Evolutionary Computation*, 1994, 2(3): 221-248.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] HE L Y, XU Z C, WANG S F, et al. Optimal crop planting pattern can be harmful to reach carbon neutrality: Evidence from food-energy-water-carbon nexus perspective [J]. *Applied Energy*, 2022, 308: 118364.

- [27] 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.
- [28] CAO X, SHU R, REN J, et al. Variation and driving mechanism analysis of water footprint efficiency in crop cultivation in China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 725: 138537.
- [29] ZHANG T, TAN Q, WANG S, et al. Assessment and management of composite risk in irrigated agriculture under water–food–energy nexus and uncertainty[J]. Agricultural Water Management, 2021, 262: 107322.

Optimization of planting structure in pumping irrigation system based on water footprint and water–energy–grain nexus

CUI Simeng¹, WU Mengyang¹, WANG Xiaojun², CAO Xinchun^{1,3}

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology–Water Resources and Hydraulic Engineering,
Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. Jiangsu Province Engineering Research Center for Agricultural Soil–Water Efficient Utilization,
Carbon Sequestration and Emission Reduction, Nanjing 210098, China)

Abstract: Irrigation system is the key carrier of agricultural production and water use, and the coordination of water–energy–grain nexus has an important impact on regional sustainable development. Compared with traditional studies on efficient allocation of irrigation water, water footprint theory clarifies the total water consumption and utilization types of agricultural production water resources. In response to the problem of water–energy resources supply and demand incompatible allocation and the ecological impact incomprehensive consideration in pumping irrigation system, a multi-objective optimization evaluation model of planting structure in pumping irrigation district was constructed by combining the water footprint theory and water–energy–grain nexus with integrating the multi-dimensional systems of social, resources, ecology, and economy, taking into account the full phases of water resource allocation, agricultural production water and grain production transfer. The model was applied to Lianshui Irrigation District to adjust the planting structure of grain crops (rice, wheat, maize, and soybeans), and then the Topsis method was adopted to compare and evaluate the relative closeness between the status quo and optimal configurations. The optimization results show that under the basic premise of ensuring food security, the sowing area of maize should be increased, and that of soybeans should be reduced. Compared with the status quo, the annual unilateral water economic net benefit of grain increased by 4.0% after the optimization, and crop carbon footprint showed a downward trend when crop planting baseline was changed with decreasing by 79.5 kg in 2018 after the optimization. The relative closeness of the optimization scheme was greater than the status quo, which plays a reliable supporting role in promoting efficient resources utilization and agricultural sustainability in pumping irrigation system.

Keywords: water–energy–grain nexus; crop water footprint; multi-objective optimization; pumping irrigation system; Topsis evaluation method

(责任编辑: 于福亮)