

引用格式: 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.] DOI: 10.18402/resci.2022.11.12

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

聂媛, 李晓云, 江文曲, 刘念洁

(华中农业大学经济管理学院, 武汉 430070)

摘要: 水资源短缺与水-土-粮系统不协调是制约中国粮食生产可持续发展的重要因素, 种植结构优化作为农业结构型节水的重要举措, 对保障中国水资源安全与粮食安全具有重要意义。本文聚焦中国北方10省, 揭示水足迹视角下水资源压力与三大粮食作物种植结构的关系, 探讨不同目标权重情景下三大粮食作物种植结构的优化趋势, 并通过构建多目标种植结构优化模型, 得出不同节水情景下北方10省三大粮食作物种植结构优化方案。研究表明: ①中国北方10省中粮食种植规模较大的地区水资源压力指数普遍偏高, 水资源约束呈趋紧态势; ②当使用熵权法对经济收益、蓝水(灌溉水)消耗和绿水(雨水)利用目标客观赋权时, 北方10省将增加高收益高耗水的水稻种植。随着蓝水消耗最小化目标的权重逐渐加大, 水稻种植面积和蓝水耗水量会逐步减少; ③在15%节水情景中, 山东、山西、内蒙古、陕西、甘肃、青海应调增玉米种植面积而减少水稻和小麦的种植面积, 宁夏和新疆应调增小麦种植面积而调减水稻和玉米的种植面积, 河南应调增水稻和玉米的种植面积而减少小麦的种植面积; ④在节水5%、10%和15%情景中, 优化的种植结构能够使北方10省三大粮食作物生产的蓝水足迹总量较2019年分别减少38亿 m^3 、51亿 m^3 和64亿 m^3 , 平均单位蓝水足迹的现金收益提升4%、3%和2%。本文结果对保障中国粮食安全, 实现农业可持续发展具有重要的政策启示。

关键词: 水足迹; 粮食生产; 水资源压力; 种植结构优化; 多目标规划

DOI: 10.18402/resci.2022.11.12

1 引言

作为农业生产的基础性资源之一, 水资源被视为粮食生产的关键性因素。中国水资源虽总量丰富, 2020年中国水资源总量为31600亿 m^3 , 但空间分布不均, 主要体现为南方地少水多, 而北方地区作为中国粮食主要生产基地仅拥有全国19%的水资源总量^[1]。受水资源禀赋条件所限, 北方地区粮食高产的背后是高负担的水资源承载力。水资源与粮食生产的错配格局与逐渐北移的粮食生产重心进一步加剧了北方水资源压力^[2], 虽然南水北调工程的实施可以在一定程度上弥补北方水资源空

缺, 但仅仅依赖“开源补缺”无法从根本上扭转中国水-土-粮失衡态势, 坚持“开源”与“节水”并重才是实现中国农业可持续发展的长久之计。

农业生产活动对自然资源禀赋的利用是区域农业种植结构形成的基础, 粮食生产的空间结构不仅包含区域粮食产出, 其也包含背后蕴藏的水土资源利用。北方地区作为粮食生产的中坚力量, 其未来的农业节水不仅需要依靠高效节水技术的作用, 还应从农业种植结构调整的角度探索结构型节水的空间。明晰北方水资源的现实压力, 根据区域作物需水特征与水资源禀赋条件优化粮食生产布局,

收稿日期: 2022-02-16; 修订日期: 2022-09-09

基金项目: 教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目(20JZD015); 国家自然科学基金项目(71673102); 华中农业大学自主科技创新基金项目(2662021JC003)。

作者简介: 聂媛, 女, 江西南昌人, 硕士研究生, 研究方向为农业资源与环境经济。E-mail: Nieyuan@webmail.hzau.edu.cn

通讯作者: 李晓云, 女, 福建邵武人, 教授, 研究方向为农业资源与环境、粮食与营养安全。E-mail: lixiaoyun@mail.hzau.edu.cn

对中国粮食生产可持续发展和水资源高效利用具有重要的指导意义。

为了明晰区域水资源稀缺程度,不少学者构建了水资源压力指标。Falkenmark^[3]最早使用人均水资源量来表征水资源压力。随着学者关注视角的不同,水资源压力指标的设立也各有差异。部分学者从供需角度出发,通过对比年淡水资源可获取量与年取水来衡量水资源压力^[4]。除单一指标法外,不少学者从经济、生态、社会等多个维度构建多指标水资源压力指数^[5-7]。然而现有文献多从宏观视角探讨农业用水对水资源的影响,不能反映作物生产对水资源的利用情况。作物生产水足迹能够清晰反映不同作物对各类水资源的利用特征,其根据来源的不同可分为蓝水足迹与绿水足迹,作物蓝水足迹是指作物生长过程中消耗的灌溉水资源量,作物绿水足迹是指作物生长过程中消耗的降雨量,量化作物生产水足迹对明确作物生产所形成的区域水资源压力有重要意义。

节水型种植结构优化是指基于一定的技术经济条件,以作物适水种植为核心,优化作物生产布局,合理配置当地资源,以实现经济、社会和生态的综合效益最优。早期学者多以经济效益最大化为单目标,基于水资源总量约束建立作物种植结构优化模型^[8]。随着经济发展过程中水资源短缺、环境污染、生态系统退化等问题凸显,种植结构的优化方向逐渐以经济效益最大化为单目标转向实现经济、生态、社会三者综合效益最优的多目标模式。黄丽丽等^[9]基于水土资源条件构建了以化肥施用量最小、农业总产值和生态相对价值最大为目标的种植结构优化模型。曹雪等^[10]以经济效益和生态效益最优为目标,构建了水资源约束下干旱区种植结构优化模型。在以往多目标模型中关于节水效益目标的设立,学者多以农业灌溉用水量最小为目标,忽视了不同作物生育期对水资源的利用水平各有差异^[11,12],随着水足迹理论不断发展,现有学者将该理论引入多目标种植结构优化研究中,结合不同作物蓝、绿水足迹的区域特征讨论种植结构优化方案^[13-15]。

本文基于水足迹视角,在揭示中国北方10省三大粮食作物种植对当地广义农业水资源造成的压力大小后,以经济收益最优、蓝水消耗最小、绿水利用最大为目标,构建不同节水情景下种植结构优化

模型,探讨目标权重对北方10省三大粮食作物种植趋势的影响,并分别提出节水5%、10%和15%情景下北方10省三大粮食作物的种植结构优化方案。本文的研究结论具有区域针对性,可用于判断不同目标权重下北方10省三大粮食作物种植结构的调整趋势,引导北方地区粮食作物生产合理布局,缓解北方地区水资源紧缺现状,并为保障中国水资源与粮食安全的政策出台提供决策参考。

2 研究区域与数据来源

本文选取北方10省为研究对象,具体包括宁夏、河北、河南、山东、山西、内蒙古、陕西、甘肃、新疆、青海。当前中国水资源与粮食生产的错配问题严重,“南水北调”与“北粮南运”的矛盾现象并存,为了改善北方粮食生产布局与水资源配置的矛盾格局,本文选取北方10省(“南水北调”工程服务的北方主要省份)为研究对象,考虑到天津市和北京市的粮食生产规模较小,种植结构调整空间有限,且东北三省不在“南水北调”工程服务的省份之内,故不纳入本文的研究区域中。

本文以2019年为基期,构建北方10省三大粮食作物(水稻、玉米、小麦)种植结构优化模型。使用CROPWAT软件完成作物蓝、绿水的蒸发蒸腾量和有效降雨量的测算,核算过程中所使用的气候数据来自中国气象数据网,数据包括最高气温、最低气温、平均相对湿度、平均风速、日照时速、降水量,各省气候数据以各省省会城市气象站点的气候数据为代表。作物系数数据源于《北方地区主要作物用水灌溉定额》^[16],作物播种日期参考文献^[17],作物参数(根区范围、作物高度、作物缺水敏感系数)及土壤参数来自联合国粮农组织(FAO)全球数据库。各省(常规)水资源总量、农业用水总量、总用水量、年降水总量、种植业用水比重数据来自各省水资源公报。各省耕地面积及土地面积来自各省统计年鉴。作物现金收益数据来自《全国农产品成本收益资料汇编》。作物播种面积、单产及总产量数据来自《中国农业统计资料》。

3 研究方法

3.1 作物生产水足迹

由于灰水不是作物生育期内直接消耗的水资

2022年11月

源且受人为因素影响较大,并且本文种植结构优化的侧重点是降低北方蓝水资源消耗,增加绿水资源利用,故本文考虑作物生产蓝水足迹和绿水足迹,暂不考虑灰水足迹。本文采用美国农业部土壤保持局(USDA-SCS)推荐的CROPWAT模型,通过输入各省的气候数据、作物数据与土壤数据,使用作物需水法来模拟作物蓝、绿水的蒸散发,从而计算得出不同作物分省的蓝水足迹与绿水足迹,计算公式如下:

$$WFP = W_g + W_b = 10 \frac{ET_g}{Y} + 10 \frac{ET_b}{Y} \quad (1)$$

$$ET_g = \min(ET_e, P_e) \quad (2)$$

$$ET_b = \max(ET_e - P_e, 0) \quad (3)$$

$$ET_e = K_c \times ET_0 \quad (4)$$

$$P_e = \begin{cases} P \times \frac{(125 - 0.6 \times P)}{125}, & P \leq 250/3 \\ \frac{125}{3} + 0.1 \times P, & P \geq 250/3 \end{cases} \quad (5)$$

式中: WFP (m^3/kg) 为作物单位质量水足迹, W_g (m^3/kg)、 W_b (m^3/kg) 分别为作物单位质量绿水足迹与作物单位质量蓝水足迹; 常量因子10是将水的深度换算为单位陆地面积水量的转换系数; Y (kg/hm^2) 为作物单位面积产量; ET_g (mm) 为作物绿水蒸散发量, 取作物蒸散发总量 ET_e (mm) 和作物生育期内有效降雨量 P_e (mm) 的最小值(式2); ET_b (mm) 为作物蓝水蒸散发量, 如果作物蒸散发总量 ET_e 大于有效降雨量 P_e , 则作物蓝水蒸散发量 ET_b 取二者差值, 否则为0(式3); K_c 为作物系数; ET_0 (mm) 为作物潜在蒸散发量, 采用联合国粮农组织(FAO)推荐的Penman-Monteith方法计算得出; P_e 表示有效降雨量, 使用美国农业部土壤保护局(USDA SCS)的方法计算得出(式5); P (mm) 为作物生育期旬降雨量。

区域 i 的作物生产水足迹总量 WFi (m^3) 由该区域三大粮食作物的水足迹加总得到, 式中 i 表示区域, j 表示作物:

$$WFi = \sum_i \sum_j (W_{bij} + W_{gij}) \times Y_{ij} \quad (6)$$

3.2 水资源压力指数

为了反映区域广义农业水资源量对粮食生产

的满足程度, 基于水足迹视角, 将水资源压力指数 η 定义为区域三大粮食作物生产水足迹总量 WF (m^3) 与区域农业广义水资源量 WA (m^3) 的比值^[18](式7)。

$$\eta = \frac{WF}{WA} \quad (7)$$

$$WA = WA_b + WA_g \quad (8)$$

$$WA_b = WR \times \frac{AU}{TU} \quad (9)$$

$$WA_g = 10 \times CA \times P_e \quad (10)$$

式中: 区域农业广义水资源量 WA 是指区域能为作物生产提供的水资源量, 由区域农业蓝水资源总量 WA_b (m^3) 与农业绿水资源总量 WA_g (m^3) 构成; 区域农业蓝水资源总量 WA_b 由式(9)计算, 式中 WR (m^3) 指区域(常规)水资源总量, AU (m^3) 指区域农业用水总量, TU (m^3) 指区域总用水量; 农业绿水资源总量 WA_g (m^3) 由耕地面积上的有效降雨量衡量, 式(10)中常量因子10是将水的深度换算为单位陆地面积水量的转换系数, CA (hm^2) 表示耕地面积。

3.3 单位蓝水足迹经济收益

本文将区域单位蓝水足迹的经济收益 WFE_i (元/ m^3) 定义为区域 i 三大粮食作物的总现金收益 R_i (元) 与作物生产蓝水足迹总量 WFi (m^3) 的比值, 计算方法如下:

$$WFE_i = \frac{R_i}{WFi} \quad (11)$$

3.4 种植结构优化模型

3.4.1 目标函数

(1) 经济收益最大化

农户作为粮食生产的行为决策主体, 具有逐利性特征, 种粮成本与收益是调控农户生产行为的重要因素。由于现金收益对农户种粮决策的影响显著^[19], 本文将现金收益作为衡量农户种粮经济收益的指标, 以期实现北方10省整体经济收益最大化, 目标函数设置如下:

$$f_1 = \text{Max} \sum_i \sum_j R_{ij} \times S_{ij} \quad (12)$$

式中: f_1 为经济收益最大化目标函数, 即北方10省种植三大粮食作物的总收益的最大值; R_{ij} (元/ hm^2) 表示区域 i 作物 j 的现金收益; 区域 i 作物 j 的播种面积 S_{ij} (hm^2) 为决策变量。

(2) 蓝水消耗最小化

由于北方地区蓝水资源短缺,为减少作物生产对蓝水资源的消耗,本文设立蓝水消耗最小化目标,以期减少北方10省蓝水消耗的的总体水平,目标函数设置如下:

$$f_2 = \text{Min} \sum_i \sum_j W_{bij} \times Y_{ij} \times S_{ij} \quad (13)$$

式中: f_2 为蓝水消耗最小化目标函数,即北方10省种植三大粮食作物的总蓝水消耗量的最小值。由于作物需水受气候变化影响较大,为排除个别年份极端天气的影响,本文使用2005—2019年作物平均单位质量蓝水足迹来表征 W_{bij} 。

(3) 绿水利用最大化

由于绿水和蓝水在农业生产中可以相互替代,与蓝水资源相比,绿水资源的机会成本较小,因此为充分利用绿水资源,减少蓝水资源消耗,本文设立绿水利用最大化目标函数 f_3 ,即北方10省种植三大粮食作物的总绿水消耗量的最大值,目标函数设置如下:

$$f_3 = \text{Max} \sum_i \sum_j W_{gij} \times Y_{ij} \times S_{ij} \quad (14)$$

为了减小降雨不确定性对作物绿水足迹的影响,本文使用2005—2019年作物的平均绿水足迹表征 W_{gij} 。

线性加权法是目前应用最广泛的多目标优化算法,其基本思想是通过给不同目标分配相应权重后加权求和,从而将多目标函数转化为单目标函数进行求解^[20]。为了消除数量级与量纲差异带来的影响,本文先采用极值法对数据进行标准化处理,再运用多目标线性加权方法将多目标函数转化为单目标函数求解,计算公式如下:

$$\text{Max} F = \lambda_1 \frac{f_1 - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} - \lambda_2 \frac{f_2 - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} + \lambda_3 \frac{f_3 - f_3^{\min}}{f_3^{\max} - f_3^{\min}} \quad (15)$$

目标权重的大小可以反映目标函数的重要程度,为了明晰蓝水目标权重对北方10省三大粮食作物种植趋势的影响,本文对经济收益、蓝水消耗和绿水利用目标赋予3种不同的权重矩阵,观察当蓝水目标权重不断加大时北方10省不同作物的优化方向是否会发生改变。为了增强权重设置的客观

性,先采用熵权法^[21]对经济收益、蓝水消耗和绿水利用目标进行客观赋权,并将其作为基准情景(记作情景1)进行对比,通过利用基期(2019年)北方10省的原始数据,测算得出情景1下经济收益目标的权重 λ_1 为0.4,蓝水消耗目标的权重 λ_2 为0.2,绿水利用目标的权重 λ_3 为0.4;在情景2中,为了增加蓝水重要性程度,促使北方10省进一步减少蓝水消耗,本文设置继续增加蓝水消耗的目标权重,此时经济收益目标被相对弱化,绿水利用目标仍维持情景1中的客观水平,情景2中经济收益、蓝水消耗和绿水利用目标权重分别设置为 $\lambda_1=0.3$, $\lambda_2=0.3$, $\lambda_3=0.4$;在情景3中,本文进一步加大蓝水消耗目标权重,此时经济收益、蓝水消耗和绿水利用目标权重分别设置为 $\lambda_1=0.2$, $\lambda_2=0.4$, $\lambda_3=0.4$ 。

3.4.2 约束条件

(1) 蓝水足迹约束

为了促使区域减少蓝水消耗,本文设置了蓝水消耗最小化目标。同时为了量化蓝水节约效果,本文进一步设置3个蓝水节约情景,即节水5%、10%和15%情景。在蓝水足迹约束条件中,各地区三大粮食作物的生产蓝水足迹总量需小于各节水情景中约束的蓝水资源量,具体公式如下,式中 WRB_i 表示3种节水情景中区域 i 的蓝水资源约束量,具体参数设置见表1。

表1 北方10省的蓝水资源利用情况及各节水情景中蓝水资源约束量 (10^8m^3)

Table 1 Utilization of blue water resources and water resource constraint under different water-saving scenarios in 10 northern China provinces (10^8m^3)

地区	可供农业 利用的蓝 水足迹	2019年蓝 水足迹消 耗量	WRB		
			节水5% 情景	节水10% 情景	节水15% 情景
宁夏	5.09	11.59	11.01	10.43	9.85
河北	32.04	58.32	55.40	52.49	49.57
河南	55.57	197.79	187.90	178.01	168.12
山东	51.89	142.04	134.94	127.84	120.74
山西	26.27	51.63	49.05	46.46	43.88
内蒙古	143.09	51.29	143.09	143.09	143.09
陕西	120.49	18.59	120.49	120.49	120.49
甘肃	115.65	19.53	115.65	115.65	115.65
新疆	257.64	12.92	257.64	257.64	257.64
青海	199.03	0.91	199.03	199.03	199.03

2022 年 11 月

$$\sum_j W_{bij} \times Y_{ij} \times S_{ij} \leq WRB_i \quad (16)$$

(2) 绿水足迹约束

为使北方 10 省充分利用绿水资源,本文设置了绿水利用最大化目标,但由于区域可利用的绿水资源存在上限,因此本文设置各省三大粮食作物的生产绿水足迹总量需小于当地可供农业利用的绿水资源总量 WRG_i ,以期各省能在绿水资源可利用范围之内充分利用绿水资源。

$$\sum_j W_{gij} \times Y_{ij} \times S_{ij} \leq WRG_i \quad (17)$$

(3) 种植面积约束

本文设定优化后三大粮食作物的种植面积之和不超过 2019 年的种植面积 SA_i (hm^2)。

$$\sum_j S_{ij} \leq SA_i \quad (18)$$

(4) 粮食产量约束

为了在粮食安全视域及节水目标下探讨北方 10 省三大粮食作物的调整空间,本文在坚持以水限产的前提下模拟各省粮食产量下限,最终设定优化后各省不同作物的粮食产量需大于等于近 20 年最低粮食产量 M_{ij} (kg)。

$$Y_{ij} \times S_{ij} \geq M_{ij} \quad (19)$$

(5) 非负约束

为使优化后的种植结构符合地区的种植条件与种植习惯,本文将优化后青海省水稻的种植面积设置为 0,其余省份各作物的种植面积需 ≥ 0 。

$$S_{10,1} = 0 \quad (20)$$

$$S_{ij} \geq 0 \quad (21)$$

3.4.3 参数估计与情景设置

约束条件中的可供农业利用的蓝水资源总量 WFB_i 与可供农业利用的绿水资源总量 WRG_i 按照以下思路估算。降雨是一种未分化的水资源,根据最终形成(蒸汽流或地下水、地表水)可划分为绿水资源与蓝水资源,可供农业利用的绿水资源总量可核算为区域降水总量减去水资源总量后存储于土壤中的降雨量,可供农业利用的蓝水资源总量可核算为满足生态环境需水后可供农业利用的水资源总量,可供农业利用的绿水资源总量与可供农业利用的蓝水资源总量的计算公式如下^[22]:

$$WRG_i = (P_i - W_i) \frac{CA_i}{TA_i} \quad (22)$$

$$WFB_i = \theta(W_i - E_i) \quad (23)$$

式中: P_i (m^3/a) 表示区域 i 的年降水总量; W_i (m^3/a) 为区域 i 的(常规)水资源总量; CA_i (m^2) 表示区域 i 的耕地面积; TA_i (m^2) 表示区域 i 的土地总面积; θ 表示区域 i 的种植业用水比重; E_i (m^3/a) 表示区域 i 的年生态环境需水量,刘昌明曾指出西北干旱区的生态需水量应为水资源总量的 50%,因此本文将区域 i 的年生态环境需水量设置为当地水资源总量的 50%。

为明晰当前各省种植结构对绿水资源与蓝水资源的利用情况,本文预先使用 2019 年的数据进行核算,结果如表 1 所示。目前北方 10 省的种植结构符合当地可供农业利用的绿水足迹标准,但是宁夏、河北、河南、山东、山西 5 省三大粮食作物生产所消耗的蓝水足迹总量均超出各省可供农业利用的蓝水资源总量,挤占了生态用水空间,其余省份可供农业利用的蓝水足迹总量均有盈余。

为了缓解区域农业灌溉用水与生态用水的矛盾,本文在满足最低粮食产量阈值基础上设置了节水 5%、10% 和 15% 情景,具体参数见表 1。在节水 5% 情景中,宁夏、河北、河南、山东、山西 5 个省份需实现节水 5% 的目标,即优化后作物生产的蓝水足迹总量需控制在原蓝水足迹消耗量的 95% 以内,其余 5 个省份的作物生产蓝水足迹总量仅需小于当地可供农业利用的蓝水足迹总量。在节水 10% 情景中,宁夏、河北、河南、山东、山西 5 个省份需实现节水 10% 的目标,其余 5 个省份的作物生产蓝水足迹总量需小于当地可供农业利用的蓝水足迹总量。在节水 15% 情景中,宁夏、河北、河南、山东、山西 5 个省份需实现节水 15% 的目标,其余 5 个省份的作物生产蓝水足迹总量需小于当地可供农业利用的蓝水足迹总量。本文仅基于蓝水资源设置变化情景,其他外界因素假定维持基期不变。

4 结果与分析

4.1 北方 10 省三大粮食作物的单位质量水足迹分析

从北方 10 省三大粮食作物生产的蓝水足迹分析(图 1a),2005—2019 年水稻平均生产蓝水足迹较

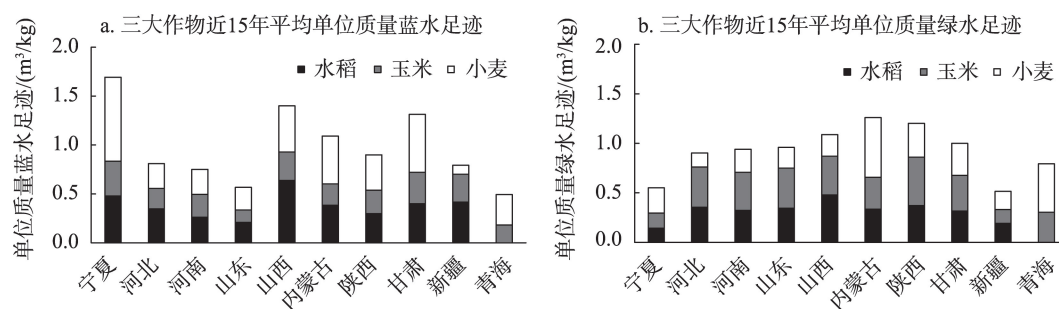


图1 2005—2019年北方10省三大粮食作物的单位质量蓝、绿水足迹

Figure 1 Blue and green water footprints of three major grain crops in 10 northern China provinces, 2005-2019

注:青海省不种水稻,由于其余9省仅种植中稻和一季晚稻,故水稻采用中稻和一季晚稻数据;由于内蒙古和青海仅种植春小麦,故该两省小麦采用春小麦数据,其余省份采用冬小麦数据。

高的地区主要分布在山西、宁夏和新疆,生育期内消耗的平均蓝水足迹均在 $0.4 \text{ m}^3/\text{kg}$ 以上。玉米是三大粮食作物中蓝水足迹消耗最小的作物,近15年北方10省玉米平均生产蓝水足迹为 $0.25 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。小麦平均生产蓝水足迹较高的地区主要分布在宁夏、甘肃和内蒙古,其中宁夏近15年小麦生育期内消耗的平均蓝水足迹达到了 $0.86 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。从北方10省三大粮食作物生产的绿水足迹分析(图1b),近15年水稻平均生产绿水足迹较高的地区主要分布在山西、陕西和河北,其中山西近15年水稻生育期内消耗的绿水足迹为 $0.48 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。玉米生育期内的耗水来源主要是绿水,近15年玉米平均生产绿水足迹较高的地区主要分布在陕西、河北和山东。

4.2 北方10省三大粮食作物种植结构与水资源压力分析

本文选取2001、2007、2013、2019年4个年份对北方10省的水资源压力与三大粮食作物的种植结构进行分析,其中三大粮食作物的种植结构由水稻、玉米、小麦的播种面积表征。利用自然断点法将计算所得的水资源压力指数划分为5个等级,即低、较低、中等、较高、高。

由图2a可知,2001年北方10省水资源压力指数排序为:山西>河南>宁夏>河北>山东>陕西>内蒙古>甘肃>新疆>青海,其中山西、河南和宁夏处于高水资源压力状态,山西的水资源压力指数为1.173,位居首位,虽然宁夏的粮食生产规模与其他地区相比较小,但是该地区可供作物生产利用的农业广义水资源量仅为39亿 m^3 ,远低于2001年

北方10省480亿 m^3 的平均水平。2007年北方10省水资源压力指数排序为:河南>宁夏>河北>山东>内蒙古>山西>陕西>甘肃>新疆>青海(图2b)。2007年除内蒙古的水资源压力略有上升外,其余地区的水资源压力相比2001年均有所缓解,其中山西和宁夏的水资源从高压状态转变为中等压力状态,河北也从较高水资源压力状态转向中等水资源压力状态,这主要源于同期农业广义水资源量的上升。宁夏、河南、山东、山西、陕西、甘肃、新疆的水资源压力得到暂时性缓解后于2013年又呈现不同程度的回升趋势,其中河南在粮食生产规模扩大和农业广义水资源量缩减的双重压力下,水资源压力从2007年的0.35上升至2013年的0.502,且2019年该省水资源约束进一步趋紧。2019年北方10省水资源压力指数排序为:河南>山东>山西>宁夏>河北>内蒙古>陕西>甘肃>新疆>青海(图2d)。2019年粮食播种面积位居前列的山东、河北、内蒙古、山西的水资源压力指数均呈上升态势,其中山东和山西处于较高水资源压力状态,仅次于河南。

纵观各省水资源压力状态,河北、河南、山东等粮食主产区处于中高水资源压力状态,并且水资源压力呈现先下降后上升的趋势。除山西和宁夏外,陕西、甘肃、新疆、青海等粮食产销平衡区则处于中低水资源压力状态。其中,河南基本处于高水资源压力状态,究其原因,一方面由于农业广义水资源短缺,另一方面由于该省三大粮食作物的种植规模较大,2019年河南农业广义水资源总量为560亿 m^3 ,

2022年11月

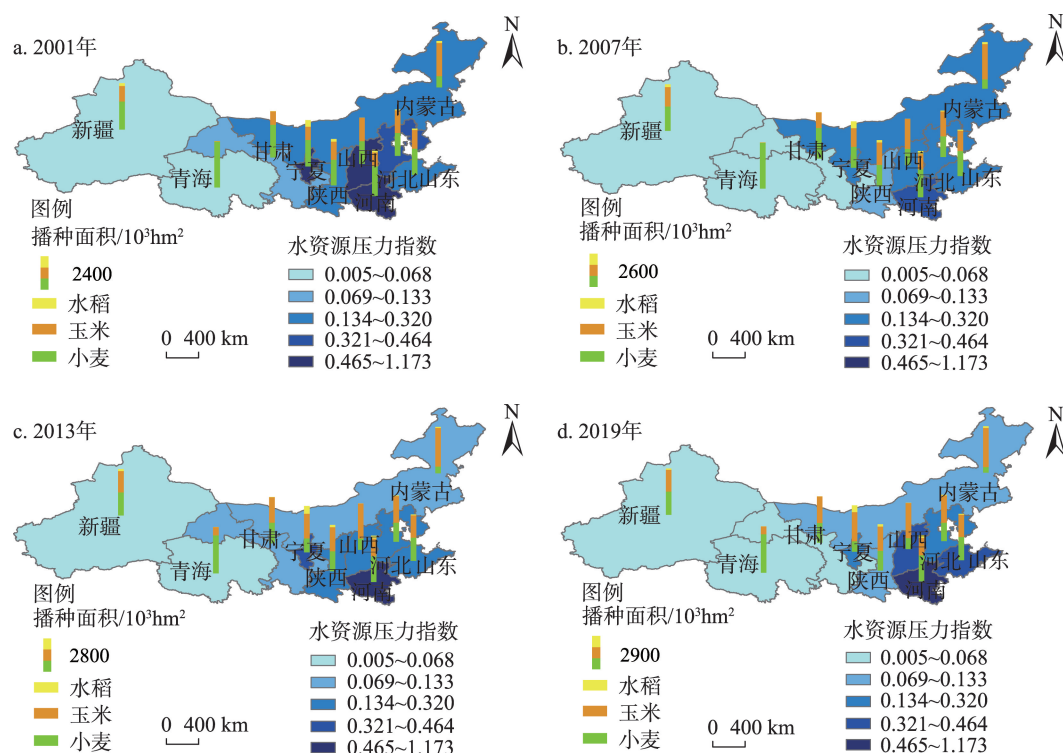


图2 2001、2007、2013和2019年北方10省三大粮食种植结构与水资源压力情况

Figure 2 Structure of three main grain crops and water stress in 10 northern China provinces in 2001, 2007, 2013 and 2019

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2022)4309号标准地图制作,底图边界无修改

低于北方10省平均水平的14%,而粮食作物播种面积却位居研究区域首位,水资源禀赋与粮食种植结构不匹配促成水资源高压状态的局面。相反,新疆和青海始终处于低水资源压力状态,这与其农业广义水资源总量丰富而粮食生产规模小密不可分。从水资源压力与粮食种植结构的变化态势来看,研究区域内粮食主产区的水资源约束进一步趋紧,粮食生产结构与水资源的矛盾日益凸显,亟需优化北方地区粮食作物种植结构以保障我国粮食与水资源安全。

4.3 优化结果与分析

4.3.1 不同权重情景下北方10省3种粮食作物种植的整体趋势分析

当采用熵权法对经济收益、蓝水消耗和绿水利用目标进行客观赋权时(情景1),受经济效益的牵引,北方10省会通过牺牲玉米和小麦的种植面积来增加高蓝水消耗的水稻的种植面积,以实现水资源刚性约束条件下经济收益最大化(图3)。图3a显示,在节水5%情景中,当基于客观数据对经济收

益、蓝水消耗和绿水利用目标进行客观赋权时(情景1),水稻的种植面积大幅上升,由2019年的121万 hm^2 上升至情景1的1292万 hm^2 ,玉米和小麦的种植面积呈减少趋势,其中玉米的种植面积由2019年的2003万 hm^2 下降至情景1的1185万 hm^2 ,小麦的种植面积由2019年的1610万 hm^2 下降至情景1的1071万 hm^2 ,种植结构的变化趋势主要源于水稻在3种作物中的平均现金收益最大,为11725元/ hm^2 。

当加大对蓝水资源的重视程度,权重逐渐向蓝水消耗最小化目标倾斜时(由情景1转向情景2和情景3),水稻的种植面积呈现减少态势,玉米的种植面积持续增加,小麦的种植面积先增加后保持不变。在节水5%、10%和15%情景中,随着权重情景的转换,北方10省三大粮食作物种植面积的增减方向一致,但水稻和玉米种植面积的增减幅度会受到节水比例的影响(图3)。在既定的权重情景下,随着节水比例的增加,水稻的种植面积呈减少趋势,玉米的种植面积呈上升趋势。

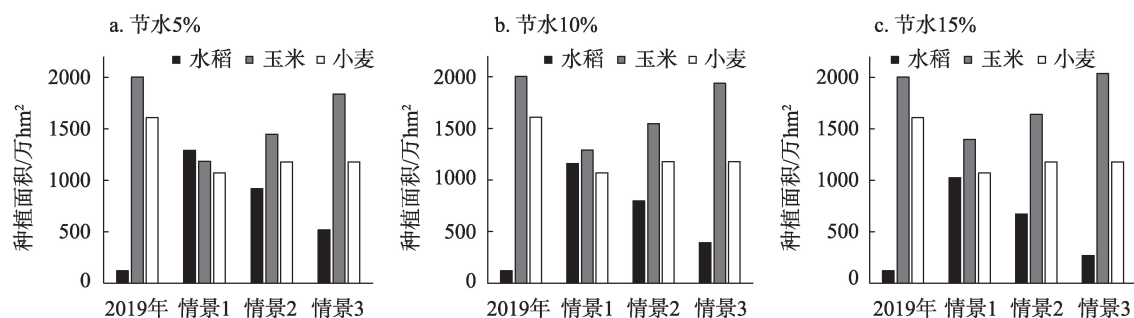


图3 不同权重情景下北方10省三大粮食作物的种植结构

Figure 3 Structure of three major grain crops in 10 northern China provinces under different weight scenarios

目标权重的倾向对种植结构的优化结果有重要影响,当采用熵权法对经济收益、蓝水消耗和绿水利用目标进行客观赋权时,北方10省会加大蓝水资源消耗,而蓝水资源的过度使用会进一步加重北方地下水超采、土壤退化等一系列生态环境问题。随着逐渐加大对蓝水资源的重视程度,目标权重向蓝水消耗最小化目标倾斜,北方10省的蓝水资源消耗会逐步减少(图4)。图4a显示,在节水5%情景中,当对经济收益、蓝水消耗和绿水利用目标进行客观赋权时(情景1),北方10省三大粮食作物消耗的总蓝水足迹与绿水足迹均有所增加,其中总蓝水足迹由2019年的565亿 m^3 上升至660亿 m^3 ,绿水足迹由704亿 m^3 上升至763亿 m^3 。当目标权重逐渐向蓝水消耗最小化目标倾斜时,北方10省三大粮食作物的生产蓝水足迹与绿水足迹总量呈减少趋势,并且随着节水比例的增加,蓝水足迹总量与绿水足迹总量的减少幅度会加大,情景3下北方10省种植结构优化的蓝水节约效果最明显。

4.3.2 权重情景3下北方10省种植结构优化结果分析

(1) 北方10省水稻种植结构调整分析

本文重点汇报权重情景3下北方10省水稻、玉米和小麦的种植结构优化方案。随着节水比例的增加,河南水稻种植面积的优化结果发生改变,在节水5%、10%和15%情景中,研究区域内河南的水稻种植面积需要调增,且调增幅度随着节水比例的增加而减少(表2)。在节水5%、10%和15%情景中,河南分别需上调水稻种植面积414.82万 hm^2 、291.47万 hm^2 、168.13万 hm^2 。虽然河南水稻的单位质量蓝水足迹略高于玉米和小麦,但是水稻生产的现金收益分别超出玉米和小麦的93%和41%,受经济效益的牵引该省需调增水稻种植面积,但考虑到该省水资源处于高压状态,2019年水资源压力指数为0.597,因此应积极通过科技进步实现农业节水,挖掘增产潜力。

应优先调减水稻种植面积的地区依次为内蒙古、山东、宁夏、河北、陕西、山西、新疆、甘肃、青海。内蒙古应调减水稻种植面积10.79万 hm^2 。近年中国水稻生产重心逐渐向水资源稀缺的北方转移,其中内蒙古的水稻种植面积由2015年的88万 hm^2 扩大至2020年的161万 hm^2 。内蒙古水资源分布不均,且耕地沙化现象严重,传统水稻种植将进

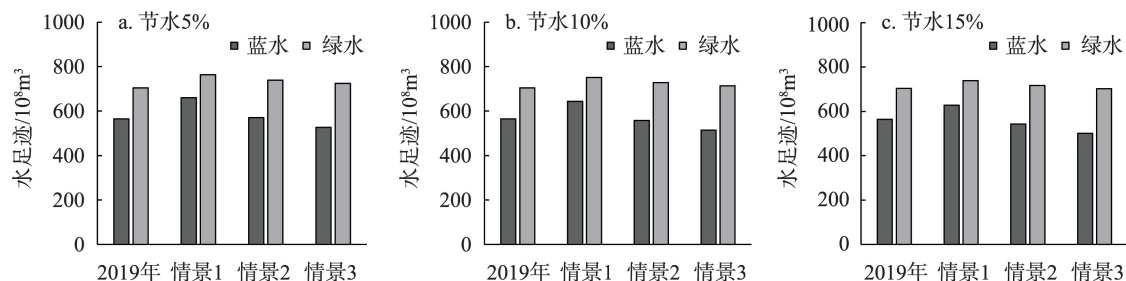


图4 不同权重情景下北方10省三大粮食作物的总蓝、绿水足迹

Figure 4 Total blue and green water footprints of three major grain crops in 10 northern China provinces under different weight scenarios

2022年11月

表2 不同节水情景下水稻种植面积的优化结果 (10⁴hm²)Table 2 Optimization results of rice area under different water-saving scenarios (10⁴hm²)

地区	2019年水稻播种面积	节水5%情景		节水10%情景		节水15%情景	
		优化后面积	增减面积	优化后面积	增减面积	优化后面积	增减面积
宁夏	6.80	4.57	-2.23	4.57	-2.23	4.57	-2.23
河北	7.80	6.59	-1.21	6.59	-1.21	6.59	-1.21
河南	61.70	476.52	414.82	353.17	291.47	229.82	168.13
山东	11.60	8.96	-2.64	8.96	-2.64	8.96	-2.64
山西	0.30	0.00	-0.30	0.00	-0.30	0.00	-0.30
内蒙古	16.10	5.31	-10.79	5.31	-10.79	5.31	-10.79
陕西	10.50	9.30	-1.20	9.30	-1.20	9.30	-1.20
甘肃	0.40	0.34	-0.06	0.34	-0.06	0.34	-0.06
新疆	5.70	5.62	-0.08	5.62	-0.08	5.62	-0.08
青海	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
合计	120.90	517.21	396.31	393.86	272.96	270.52	149.62

一步加剧当地生态环境压力,因此应调减内蒙古水稻种植面积,同时在水稻种植区积极推广水稻旱作与膜下滴灌栽培技术。山东、宁夏、河北、山西作为研究区域中水资源压力指数位居前列的省份,亟需调减水稻种植面积以实现结构型节水,其中山东和宁夏分别需调减水稻种植面积2.64万hm²、2.23万hm²。山西应调减水稻种植面积0.30万hm²,主要原因在于相比其他省份该地区近15年水稻生育期内消耗的平均蓝水足迹最高,为0.64 m³/kg,并且2019年该省处于较高水资源压力状态,因此为缓解当地水资源压力,山西应调减水稻种植面积。陕西水稻种植面积较2019年应调减11%。陕西省南北气候

差异较大,其中陕南属于北亚热带气候,独特的气候条件与农业资源决定了陕南的水稻主产地位,应减少陕西省非优势区域的水稻生产,合理利用陕南地区的耕地资源,发挥当地农业优势,促进农民增粮增收。

(2) 北方10省玉米种植结构调整分析

权重情景3下北方10省玉米种植结构的优化结果如表3所示。在节水5%和10%情景中,应优先调增玉米种植面积的省份依次为山东、内蒙古、陕西、山西、青海、甘肃,应调减玉米种植面积的省份为河南、河北、新疆和宁夏。随着节水比例的增加,北方10省中河南与河北的玉米优化结果发生变化,

表3 不同节水情景下玉米种植面积的优化结果 (10⁴hm²)Table 3 Optimization results of corn area under different water-saving scenarios (10⁴hm²)

地区	2019年玉米播种面积	节水5%情景		节水10%情景		节水15%情景	
		优化后面积	增减面积	优化后面积	增减面积	优化后面积	增减面积
宁夏	30.00	10.67	-19.33	10.67	-19.33	10.67	-19.33
河北	340.80	230.77	-110.03	206.88	-133.92	182.99	-157.81
河南	380.10	194.97	-185.13	318.32	-61.78	441.66	61.56
山东	384.60	544.97	160.37	544.97	160.37	544.97	160.37
山西	171.50	178.16	6.66	178.16	6.66	178.16	6.66
内蒙古	377.60	418.92	41.32	418.92	41.32	418.92	41.32
陕西	117.70	125.48	7.78	125.48	7.78	125.48	7.78
甘肃	98.80	99.69	0.89	99.69	0.89	99.69	0.89
新疆	99.70	31.25	-68.45	31.25	-68.45	31.25	-68.45
青海	2.10	3.91	1.81	3.91	1.81	3.91	1.81
合计	2002.90	1838.79	-164.11	1938.24	-64.66	2037.70	34.80

其中河南玉米的调减幅度随着节水比例的增加而减少,当节水比例上升至15%时,该省玉米面积由调减转变为调增状态,当水资源约束逐渐增强时,该省需增加低蓝水消耗的玉米种植面积以替代水稻。河南省不同区域玉米种植优势不一,其中豫西和豫南地区玉米种植条件欠佳,豫西地区降雨量少,年均降雨量在340~680 mm区间,且该区域玉米单产水平低,豫南地区虽然降雨充裕,但是该地区多丘陵且光照条件欠佳,可在豫西和豫南区域适当调减玉米种植面积。为提高玉米种植规模,2008年玉米临储政策开始实施,临储政策的提出虽然对保障国家粮食安全意义重大,但却由此引发了玉米库存积压,生态压力加剧等一系列问题,为此国家做出取消临储政策的决定,并提出以“镰刀弯”地区为重点的玉米种植结构调整方案。目前多数省份的玉米种植结构调整成效显著,但是经多目标种植结构优化,河北、新疆、宁夏仍需进一步调减玉米种植面积,这意味着中国需要在巩固已有成果的基础上,进一步推进“镰刀弯”地区玉米调减,扩展区域优势作物的发展空间。在节水5%情景下,河北应调减玉米种植面积110.03万hm²。河北承德、张家口和保定相关县市作为京津冀地区的水源涵养地,该区域西北部年降雨量仅约300 mm,应重点调减该区域的籽粒玉米生产,同时可以在河北省石家庄、唐山、廊坊等市实施玉米与大豆轮作,增加紧缺的大豆供给,同时提高土壤肥力。山东应优先调增玉

米种植面积160.37万hm²,这主要源于山东玉米近15年平均单位质量的蓝水足迹为0.13 m³/kg,不仅低于研究区域的平均水平,并且与当地的水稻和小麦相比同样具有比较优势。内蒙古应调增玉米种植面积41.32万hm²。内蒙古西辽河平原、河套平原和土默川平原水资源丰富,光热条件优异,应扩增该区域粮食主产区的玉米种植面积,同时提升农牧交错区全株青贮玉米产能。内蒙古、陕西、山西在调增优势产区玉米种植面积的同时,应规避在干旱少雨、土壤沙化严重的长城沿线沙化退化区域调增籽粒玉米面积。

(3)北方10省小麦种植结构调整分析

权重情景3下北方10省小麦种植结构的优化结果如表4所示。在3种节水情景中,应优先调减小麦种植面积的地区依次为河南、山东、河北、内蒙古、陕西、山西、青海、甘肃,新疆和宁夏的小麦种植面积需要调增,其中新疆应调增小麦种植面积68.53万hm²。从作物蓝水消耗角度来看,新疆小麦近15年平均单位质量的蓝水足迹为0.09 m³/kg,在各省三大粮食作物生产中占据最佳优势,新疆应合理调整小麦空间布局,在粮食主产区发展种植有机、强筋和富硒小麦,在北疆的高海拔冷凉区和南疆果粮间作区调减低产低效小麦的种植面积,以减少塔里木河流域的地下水开采。河南和山东分别需调减小麦种植面积229.69万hm²和157.72万hm²。由于河南和山东的水资源压力较

表4 不同节水情景下小麦种植面积的优化结果 (10⁴hm²)

Table 4 Optimization results of wheat area under different water-saving scenarios (10⁴hm²)

地区	2019年小麦播种面积	节水5%情景		节水10%情景		节水15%情景	
		优化后面积	增减面积	优化后面积	增减面积	优化后面积	增减面积
宁夏	10.80	16.11	5.31	16.11	5.31	16.11	5.31
河北	232.30	161.59	-70.71	161.59	-70.71	161.59	-70.71
河南	570.70	341.01	-229.69	341.01	-229.69	341.01	-229.69
山东	400.20	242.48	-157.72	242.48	-157.72	242.48	-157.72
山西	54.70	48.34	-6.36	48.34	-6.36	48.34	-6.36
内蒙古	53.80	23.27	-30.53	23.27	-30.53	23.27	-30.53
陕西	96.60	90.01	-6.59	90.01	-6.59	90.01	-6.59
甘肃	74.00	73.17	-0.83	73.17	-0.83	73.17	-0.83
新疆	106.20	174.73	68.53	174.73	68.53	174.73	68.53
青海	10.20	8.39	-1.81	8.39	-1.81	8.39	-1.81
合计	1609.50	1179.10	-430.40	1179.10	-430.40	1179.10	-430.40

2022年11月

高,经多目标种植结构优化,河南的小麦被蓝水消耗水平相近但经济收益高的水稻所替代,山东的小麦的种植空间被低蓝水消耗的玉米所替代。经多目标种植结构优化,河北小麦种植面积应调减70.71万 hm^2 ,这与2021年河北推行的季节性休耕技术路径相一致。河北省可重点在地下水超采的廊坊、保定、沧州、衡水、邢台、邯郸市和雄安新区实施“一季休耕、一季种植”,休耕高耗水的冬小麦,只种植一季玉米、油料或杂粮杂豆等,缓解地下水超采现状,同时给予农户休耕生态补偿,以提升农户收入水平^[23]。经优化,陕西应调减7%的小麦面积以种植现金收益高且蓝水消耗低的玉米。甘肃应调减小麦种植面积0.83万 hm^2 ,主要原因在于甘肃小麦生育期内消耗的蓝水足迹较高,近15年平均单位质量的蓝水足迹为0.59 m^3/kg ,而当地小麦种植的现金收益仅为3535元/ hm^2 ,甘肃小麦单位质量蓝水足迹的经济收益较低。甘肃省应将种植结构调整重点放在中东部严重干旱的县区及河西和沿黄土壤沙化、盐渍化严重的县区,对干旱

缺水、盐碱化严重、土壤沙化的土地实施休耕,涵养地力,更好地落实“藏粮于地”战略。研究区域内各省小麦种植面积的优化结果不随节水情景的转换而变化。从作物种植的比较优势来看,小麦种植的经济效益低于水稻、节水效益低于玉米,随着节水比例增加,作物种植结构主要在水稻和玉米之间进行调整。

(4)种植结构优化效益分析

经优化,在节水5%、10%和15%情景下,北方10省三大粮食作物生产的蓝水足迹总量分别较2019年减少了38亿 m^3 、51亿 m^3 和64亿 m^3 。其中蓝水资源不可持续利用的宁夏、河北、河南、山东、山西的三大粮食作物生产蓝水足迹消耗量均有所减少,河南、山东、山西、内蒙古、陕西、甘肃、青海的绿水资源利用均有所提升(图5)。在节水5%情景下(图5a),蓝水资源不可持续利用的宁夏、河北、河南、山东、山西的三大粮食作物生产蓝水足迹总量均呈减少趋势,其中山东三大粮食作物生产蓝水足迹总量的减少幅度最大,较2019年减少了59亿 m^3 ,

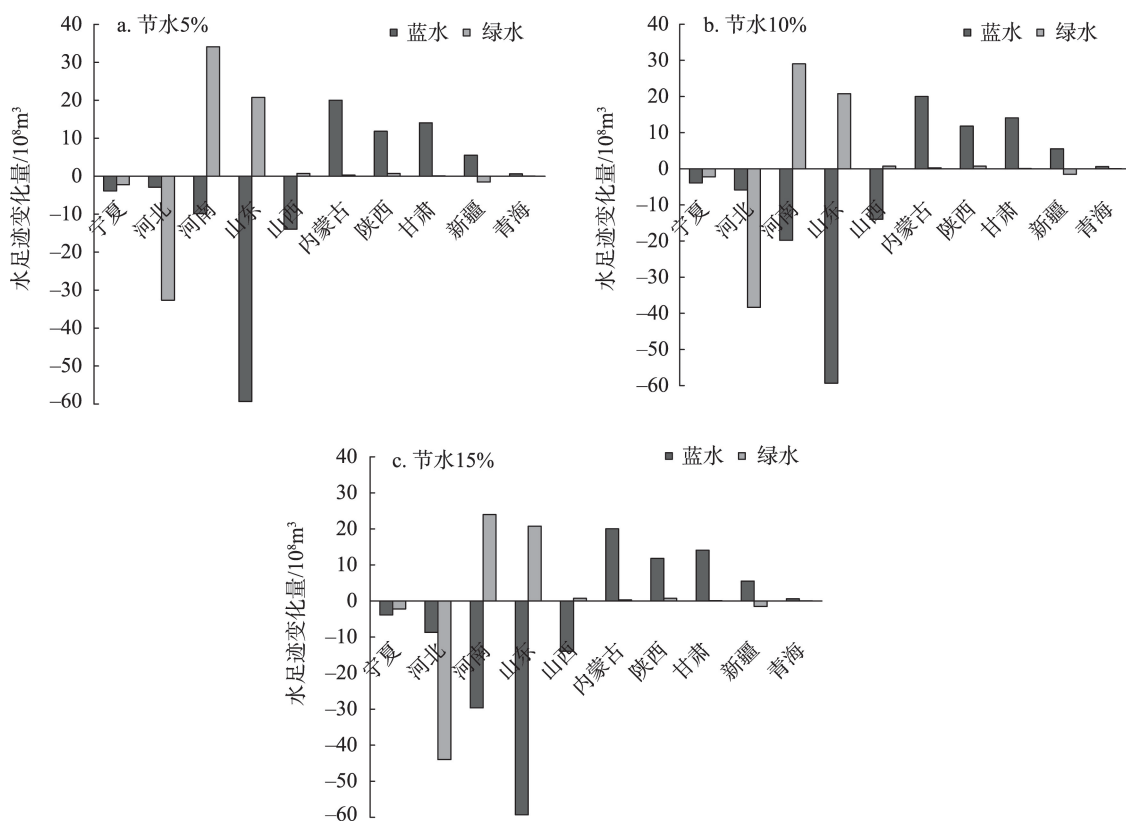


图5 不同节水情景下北方10省三大粮食作物生产水足迹变化量

Figure 5 Changes of water footprints of three major grain crops in 10 northern China provinces under different water-saving scenarios

极大缓解了当地的水资源压力。河南作为水资源压力最大的省份,其三大粮食作物蓝水足迹总量较2019年减少了10亿 m^3 ,绿水足迹总量增加了34亿 m^3 ,优化后的种植结构极大提高了对降水(绿水)的利用,减少了对灌溉水(蓝水)的依赖。由于内蒙古、陕西、甘肃、新疆、青海的作物蓝水足迹消耗量在当地可供农业利用的范围之内,经优化这些区域的蓝水资源利用水平有所上升。节水5%情景下,河南和山东三大粮食作物生产绿水足迹的上升幅度最大,分别较2019年上升了18%和13%。随着节水比例的增加,河北和山东三大粮食作物的生产蓝水足迹和绿水足迹总量均呈减少态势。除节水效益外,优化后北方10省三大粮食作物种植结构可满足北方10省粮食总需求。经测算,节水5%、10%和15%情景下北方10省三大粮食作物的总产量分别为2269亿kg、2225亿kg、2182亿kg,参照中国人均粮食需求量(432.66 kg/人)^[24],各节水情景下北方10省三大粮食作物的总产量均可满足北方10省粮食总需求量。

为实现北方10省水资源与经济效益的最优耦合,提高蓝水资源的利用效益,本文使用单位蓝水足迹的现金收益来表征种植结构优化的经济效益,优化结果如图6所示。在5%、10%和15%节水情景下北方10省平均单位蓝水足迹的现金收益均有所提高,分别较2019年增加了4%、3%和2%。在节水5%情景下(图6a),河南、山东、山西、内蒙古、陕西、甘肃、新疆的单位蓝水足迹的现金收益均存在不同程度的上升,其中新疆单位蓝水足迹的现金收益上涨幅

度最大,从2019年的5.32元/ m^3 上升至7.75元/ m^3 。随着节水比例的上升,河北和河南单位蓝水足迹的现金收益略有下降。经优化,宁夏、河北与青海的作物单位蓝水足迹的现金收益有所下降,其中宁夏单位蓝水足迹的现金收益从4.03元/ m^3 下降至3.77元/ m^3 ,主要源于宁夏调减了现金收益高的水稻和玉米的种植面积。在节水5%情景下河北和青海单位蓝水足迹的现金收益分别较2019年下降0.25%和1.07%,2019年河北三大粮食生产所消耗的蓝水足迹总量超出区域可供农业利用蓝水资源的82%,经优化,河北三大粮食作物生产蓝水足迹总量减少了31.08%,现金收益减少了31.25%,现金收益的降幅高于蓝水足迹的降幅是河北单位蓝水足迹的现金收益略微下降的主要原因。

5 结论与启示

5.1 结论

本文基于水足迹视角,在揭示区域三大粮食作物种植结构与水资源压力关系的基础上,探讨不同目标权重情景下北方10省三大粮食作物种植趋势,并从水资源安全、粮食安全、经济效益3个维度出发,构建了不同节水情景下北方10省三大粮食作物种植结构优化模型。主要结论如下:

(1)粮食作物种植结构与水资源压力密切相关,北方10省中各粮食功能区的水资源压力表现出不同的特征。河北、河南、山东等粮食主产区处于中高水资源压力状态,并且水资源压力呈现先下降后上升的趋势,粮食生产结构与水资源的矛盾日益凸显。陕西、甘肃、新疆、青海等粮食产销平衡区则

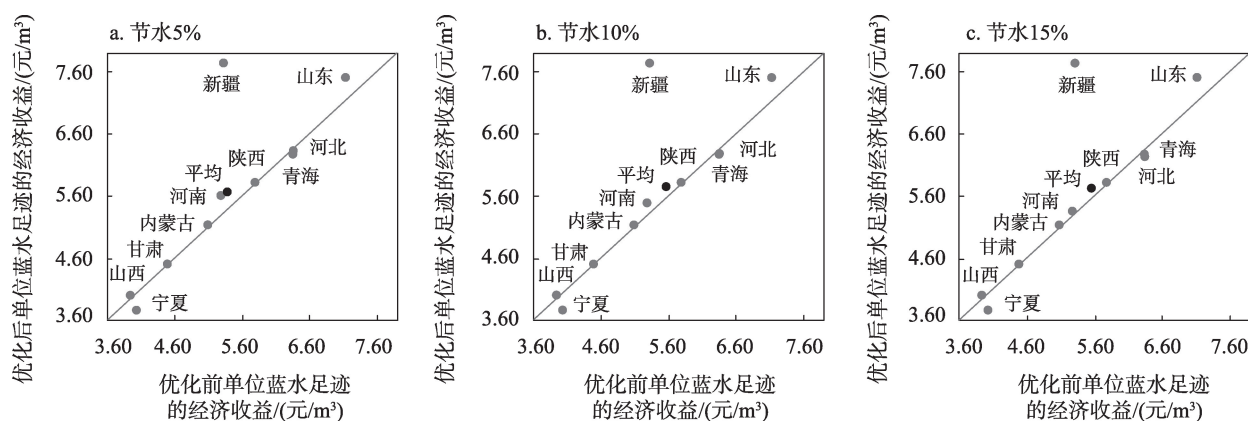


图6 不同节水情景下北方10省种植结构优化的经济效益

Figure 6 Economic benefits of structure optimization in 10 northern China provinces under different water-saving scenarios

2022年11月

面临中低程度的水资源压力。

(2)区域粮食生产的目标权重变化会显著影响当地种植结构调整及农业耗水情况。客观权重情景下,受经济效益的牵引,北方10省会减少玉米和小麦的种植面积以种植高收益、高蓝水消耗的水稻。随着目标权重向蓝水消耗最小化目标倾斜,北方10省水稻的种植面积呈现减少态势,同时蓝水资源消耗总量将减少。

(3)经种植结构优化,在节水5%情景下,河南需调增水稻种植面积,应调减水稻种植面积的地区依次为内蒙古、山东、宁夏、河北、陕西、山西、新疆、甘肃、青海,应调增玉米种植面积的地区依次为山东、内蒙古、陕西、山西、青海、甘肃,应调减玉米种植面积的地区为河南、河北、新疆和宁夏,应调增小麦种植面积的地区为新疆和宁夏,应调减小麦种植面积的地区依次为河南、山东、河北、内蒙古、陕西、山西、青海、甘肃。当节水比例上升至10%时,各省三大粮食作物种植面积的增减方向与节水5%情景一致。当节水比例上升至15%时,河南的玉米种植面积由调减转态转变为调增状态,其余省份各作物种植面积的增减方向保持不变。

(4)经种植结构优化,北方10省主要粮食作物种植的节水效益与经济效益显著提升,具体表现在节水5%、10%和15%情景下,北方10省三大粮食作物生产的蓝水足迹总量较2019年减少了38亿 m^3 、51亿 m^3 和64亿 m^3 ,平均单位蓝水足迹的现金收益较2019年增加了4%、3%和2%。

5.2 启示

由于不同区域的作物需水特征及水资源禀赋存在差异,应积极发挥各地区的种植优势进行种植结构优化,提升作物生育期内需水与地区降雨期的吻合度,从而提高绿水的利用效率,减少蓝水消耗。在水资源稀缺地区适当压缩高蓝水消耗作物的种植面积,以水限产,适水种植。针对水资源富余的地区,可以在保障水资源安全的基础上增加高收益作物的种植面积,从而促使农民增粮增收,实现农业可持续发展。在探索结构型节水的同时,可以充分挖掘南水北调的供水潜力,将河北省南水北调工程的剩余水源直接用于地下超采区的粮食生产,保障华北地区粮食生产用水。同时加快推动南

水北调西线工程建设,适当向河西走廊引水,挖掘西北地区后备耕地资源。

需要指出的是,本文仍存在不足之处。种植结构优化是一个涉及社会、经济、生态等多个子系统的复杂问题,本文仅从经济效益、水资源安全与粮食安全3个角度提出北方10省的种植结构优化方案,如何细化研究区域的空间单元并从多角度构建种植结构优化模型是未来研究中一个重要的课题。

参考文献(References):

- [1] 张玲玲,丁雪丽,沈莹,等. 中国农业用水效率空间异质性及其影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(4): 817-828. [Zhang L L, Ding X L, Shen Y, et al. Spatial heterogeneity and influencing factors of agricultural water use efficiency in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(4): 817-828.]
- [2] 刘楚杰,李晓云,聂媛. 基于重心模型的粮食生产与水资源时空耦合分析[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(6): 1026-1036. [Liu C J, Li X Y, Nie Y. The spatio-temporal coupling analysis of grain production and water resources based on the barycenter model[J]. Research of Agricultural Modernization, 2021, 42(6): 1026-1036.]
- [3] Falkenmark M, Widstrand C. Population and water resources: A delicate balance[J]. Population Bulletin, 1992, 47(3): 1-36.
- [4] 田欣,熊翌灵,刘尚炜,等. 中国省际水资源压力的转移模式[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(12): 75-83. [Tian X, Xiong Y L, Liu S W, et al. Deciphering the pattern for inter-provincial water stress transferring: A case study on China's mainland[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(12): 75-83.]
- [5] 热孜娅·阿曼,方创琳,赵瑞东. 新疆水资源承载力评价与时空演变特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(7): 1576-1585. [Reziya A M, Fang C L, Zhao R D. Research on the water resources carrying capacity and spatial-temporal characteristics in Xinjiang[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(7): 1576-1585.]
- [6] 张凯,陆海曙,陆玉梅. 三重属性约束的承载力视角下中国省际水资源利用效率测度[J]. 资源科学, 2021, 43(9): 1778-1793. [Zhang K, Lu H S, Lu Y M. Measurement of inter-provincial water resource use efficiency in China from the perspective of carrying capacity with triple attribute constraints[J]. Resources Science, 2021, 43(9): 1778-1793.]
- [7] 丁超,胡永江,王振华,等. 虚拟水社会循环视域下的水资源承载力评价[J]. 自然资源学报, 2021, 36(2): 356-371. [Ding C, Hu Y J, Wang Z H, et al. Assessment of water resources carrying capacity from the perspective of virtual water social cycle[J]. Journal

- of Natural Resources, 2021, 36(2): 356–371.]
- [8] Mohammadrezapour O, Yoosefdoost I, Ebrahimi M. Cuckoo optimization algorithm in optimal water allocation and crop planning under various weather conditions (case study: Qazvin plain, Iran)[J]. Neural Computing and Applications, 2017, 31(6): 1879–1892.
- [9] 黄丽丽, 黄振芳. 区间两相模糊多目标模型在种植结构优化中的应用: 以辽宁省大连市为例[J]. 资源科学, 2016, 38(11): 2157–2167. [Huang L L, Huang Z F. Application of inexact two-phase fuzzy multi-objective programming method to crop area planning[J]. Resources Science, 2016, 38(11): 2157–2167.]
- [10] 曹雪, 阿依吐尔逊·沙木西, 金晓斌, 等. 水资源约束下的干旱区种植业结构优化分析: 以新疆库尔勒市为例[J]. 资源科学, 2011, 33(9): 1714–1719. [Cao X, Shamuxi A, Jin X B, et al. Planting structure optimization in the Arid area with constrained water resources: A case study of Korla, Xinjiang[J]. Resources Science, 2011, 33(9): 1714–1719.]
- [11] Luo B, Liu X, Zhang F, et al. Optimal management of cultivated land coupling remote sensing-based expected irrigation water forecasting[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127370.
- [12] 王璐, 杜雄, 王荣, 等. 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, et al. 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.]
- [13] 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 P, Zhao M, Zhang Y, 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): 346–357.]
- [14] 殷琳琳, 尹心安. 中国主要粮食作物种植结构调整区域优先序研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(6): 856–863. [Yin L L, Yin X A. Priority area determination for planting structure adjustment of main food crops in China[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2020, 56(6): 856–863.]
- [15] 姜鲁光, 杨成, 封志明, 等. 面向多目标情景的大清河流域水资源利用权衡[J]. 资源科学, 2021, 43(8): 1649–1661. [Jiang L G, Yang C, Feng Z M, et al. Multi-scenario trade-off on water resources utilization in Daqing River Basin[J]. Resources Science, 2021, 43(8): 1649–1661.]
- [16] 段爱旺. 北方地区主要农作物灌溉用水定额[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004. [Duan A W. Irrigation Water Quota of Main Crops in Northern China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004.]
- [17] 郑永丹. 中国主要粮食作物生育期时空格局及其变化[D]. 武汉: 华中师范大学, 2015. [Zheng Y D. Research on the Spatial-Temporal Distribution of Growth Period Main Grain Crops and Its Change in China[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2015.]
- [18] 操信春, 束锐, 郭相平, 等. 基于BWSI与GWSI的江苏省农业生产水资源压力评价[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(6): 856–864. [Cao X C, Shu R, Guo X P, et al. Water stresses evaluation of agricultural production in Jiangsu Province using BWSI and GWSI[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(6): 856–864.]
- [19] 陈秧分, 王国刚, 王丽娟. 农户生产决策视角下我国粮食生产格局变化机制[J]. 经济地理, 2016, 36(7): 139–145. [Chen Y F, Wang G G, Wang L J. Change mechanism of China's grain production from the perspective of peasant household's decision behavior[J]. Economic Geography, 2016, 36(7): 139–145.]
- [20] 张翠玲, 强文丽, 牛叔文, 等. 基于多目标的中国食物消费结构优化[J]. 资源科学, 2021, 43(6): 1140–1152. [Zhang C L, Qiang W L, Niu S W, et al. Options of Chinese dietary pattern based on multi-objective optimization[J]. Resources Science, 2021, 43(6): 1140–1152.]
- [21] 陈曼, 甘臣林, 梅昀, 等. 农户生计视角下农地流转绩效评价及障碍因子诊断: 基于武汉城市圈典型农户调查[J]. 资源科学, 2019, 41(8): 1551–1562. [Chen M, Gan C L, Mei Y, et al. Farmland transfer performance and obstacles from the perspective of farmers' livelihood: Based on rural household survey of greater Wuhan Metropolitan Area[J]. Resources Science, 2019, 41(8): 1551–1562.]
- [22] 李啸虎, 杨德刚. 基于水足迹的节水型城郊种植业结构优化研究: 以乌鲁木齐市为例[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 298–304. [Li X H, Yang D G. Study of the structure optimization of water-saving suburban cropping in arid lands based on the water footprint: A case study in Urumqi City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 298–304.]
- [23] 柳荻, 胡振通, 柳金昊. 休耕生态补偿对农户收入的影响: 以地下水超采区为例[J]. 资源科学, 2022, 44(2): 350–364. [Liu D, Hu Z T, Liu J H. Impact of fallowed farmland eco-compensation on farmers' income: A case study of groundwater over-exploited areas[J]. Resources Science, 2021, 44(2): 350–364.]
- [24] 于昊辰, 曾思燕, 王庆宾, 等. 多情景模拟下新时代中国耕地保护底线预测[J]. 资源科学, 2021, 43(6): 1222–1233. [Yu H C, Zeng S Y, Wang Q B, et al. Forecast on China's cultivated land protection baseline in the new era by multi-scenario simulations[J]. Resources Science, 2021, 43(6): 1222–1233.]

Planting structure optimization of three main grain crops in 10 northern China provinces based on water footprint method

NIE Yuan, LI Xiaoyun, JIANG Wenqu, LIU Nianjie

(College of Economics and Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The shortage of water resources and the conflicts in the water-land-crop system are increasingly more prominent in constricting the sustainable development of China's grain production. As an important measure of water-saving, structure optimization is of great significance to ensure water resource sustainable development and food security in China. This study focused on 10 northern China provinces, revealed the relationship between water resources pressure and three main grain crops' structure from the perspective of water footprint, and explored the optimization of the structure under different priority policy targets. We constructed a multi-objective structure optimization model to obtain the structure optimization scheme of the grain crops in the northern region under different target-weight scenarios. The results show that: The water resource pressure indices are generally high and tightening in the regions where there are large scales of grain cropping. When using the entropy weight method to objectively assign weights to the economic benefits, blue water (irrigation water) consumption, and green water (rainwater) utilization goals, the results show that the northern region should increase the planting area of high-yield and high-water-consuming rice. As the weight of the blue water consumption minimizing target gradually increases, rice planting area and blue water consumption will gradually decrease. Under the 15% water-saving scenario, Shandong, Shanxi, Inner Mongolia, Shaanxi, Gansu, and Qinghai should increase corn planting areas and reduce rice and wheat planting areas; Ningxia and Xinjiang should increase wheat planting areas and reduce rice and corn planting areas; and Henan should increase rice and corn planting areas and reduce wheat planting area. The blue water footprints of major grain crops decrease by 3.8 billion cubic meters, 5.1 billion cubic meters, and 6.4 billion cubic meters, and the net income per unit of blue water footprint increases by 4%, 3%, and 2% compared to 2019 through structure optimization under the three water saving scenarios. This study provides a realistic way to alleviate water stress in northern China, which is of great significance for ensuring the national food security and realizing sustainable agricultural development in China.

Key words: water footprint; grain production; water resources pressure; planting structure optimization; multi-objective planning