

张家欣, 黄会平, 韩宇平, 等. 水足迹视角下西北旱区种植结构协同调整[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 751-760. ZHANG J X, HUANG H P, HAN Y P, et al. Synergistic adjustment of planting structure in terms of water footprint in arid area of northwest China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 751-760. (in Chinese)

# 水足迹视角下西北旱区种植结构协同调整

张家欣<sup>1,2</sup>, 黄会平<sup>4</sup>, 韩宇平<sup>4</sup>, 邓铭江<sup>1,3</sup>, 杨涛<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 3. 新疆旱区水资源与生态水利工程研究中心, 乌鲁木齐 830000; 4. 华北水利水电大学水资源学院, 郑州 450046)

**摘要:**以西北旱区为例, 采用水足迹模型, 分析主要农作物的耗水特点, 并以水资源消耗量最小、生态安全和经济效益最大化为目标, 构建以耕地资源、水资源和食物安全为约束条件的多目标规划模型对种植结构进行优化。结果表明: 2000—2020 年西北旱区主要作物产量增长 2.41 倍, 种植面积增长 1.24 倍, 粮食作物和经济作物的种植比例由 2:1 向 1:1 转变, 种植结构由专一化向多样化发展; 作物生产水足迹总量从 838.70 亿 m<sup>3</sup> 增至 1 109.05 亿 m<sup>3</sup>, 其中蓝水足迹占比高达 79.09%, 农业生产面临着巨大的水资源压力; 调整作物种植结构, 适当将蔬菜、薯类和豆类的种植面积提高 140.593 万 hm<sup>2</sup>、1.863 万 hm<sup>2</sup> 和 0.340 万 hm<sup>2</sup>, 水资源消耗量可减少 107.25 亿 m<sup>3</sup>, 生态效益可提高 27.47 亿元, 经济效益可提高 470.74 亿元。研究结果对促进西北旱区农业结构优化调整和水资源可持续利用具有重要的参考价值。

**关键词:**西北旱区; 水足迹; 农业种植结构优化; 水安全; 生态安全; 食物安全

**中图分类号:** TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0073

西北旱区有许多重要的农业生产区, 例如被称为“西北粮仓”的河西走廊、被称为“塞上江南”的宁夏平原以及被称为“塞外粮仓”的河套平原<sup>[1-2]</sup>。2016 年西北地区利用了全国 8.5% 的水资源和 16.1% 的种植面积, 生产了全国 13.7% 的粮食<sup>[3]</sup>。因此, 西北地区的农业生产对国家粮食安全乃至世界粮食安全具有重要影响<sup>[4]</sup>。然而, 西北旱区水资源极其稀缺, 仅占全国的 5.7%, 农业用水占到该地区用水总量的 80%<sup>[5]</sup>。因此, 研究西北旱区农作物生产水足迹对提高农业水资源用水效率、保障区域食物安全具有重要意义。

水足迹是国际上水资源定量核算评估的重要工具之一<sup>[6]</sup>。农业水足迹是水足迹中所占比例最大的部分, 是指除去工业和生态水足迹以外的水足迹, 具体是指一定时期和区域内农业在生产过程中所消耗的淡水量, 是评价和调控农业水资源消耗的重要指标<sup>[7]</sup>。目前, 关于水足迹的研究大都围

绕全球、国家、省域和流域等不同空间尺度, 从产品、产业和消费者等不同视角的水足迹量化<sup>[8]</sup>, 而对于水足迹视角下全流域农业结构调整已有研究涉及较少。

本文在 2000—2020 年西北旱区气象、农业生产和消费等数据的基础上, 量作物水足迹(蓝水足迹和绿水足迹)的变化特征, 构建多目标优化调控模型, 探讨水资源集约节约利用及保障食物安全角度下的农业发展路径, 为缓解西北旱区水资源压力、调整食物生产空间布局结构提供理论支持, 从而促进该区农业可持续发展。

## 1 研究区概况和数据来源

### 1.1 研究区概况

西北旱区(73°E ~ 120°E, 30°N ~ 50°N)包括新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西和内蒙古 6 个省(自治区)的 60 个市(州), 总面积约 370 万 km<sup>2</sup>, 占我国国

收稿日期: 2022-12-28 修回日期: 2023-05-09 网络出版时间: 2023-07-10

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20230707.1642.008>

基金项目: 中国工程院咨询项目: 西北灌区农业高效用水与生态服务功能提升策略(2022-XZ-26); 河南省软科学研究计划(222400410118)

作者简介: 张家欣(1997—), 女, 陕西西安人, 博士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: 18309294517@163.com

通信作者: 邓铭江(1960—), 男, 湖南耒阳人, 中国工程院院士, 博士, 主要从事干旱区水资源研究与水利工程建设管理等方面的研究。E-mail: xjdmj@163.com

土面积的 38.52%, 属于干旱半干旱气候, 多年平均降水量小于 400 mm, 多年平均潜在蒸发量为 927.69 mm, 多年平均水资源总量仅为  $1.59 \times 10^{11} \text{ m}^3$ , 仅占我国总量的 5.7%, 是我国最缺水的地区<sup>[5, 9]</sup>。然而, 该区土地、光和热资源丰富, 分布着我国重要的农业生产区和耕地后备资源基地, 保障着我国粮食安全。因此, 对西北旱区农业生产过程中水资源利用现状科学评价可为该地区农业可持续发展提供理论支撑。

## 1.2 数据来源

采用的气象数据来源于中国气象数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>), 包括西北旱区内的 205 个气象站 2000—2020 年逐日地面观测数据, 包括降水、相对湿度、风速、日照时数、最高气温和最低气温。主要作物生育期和作物系数参考联合国粮农组织 (FAO) 灌溉排水 (第 56 号) 报告、《中国主要作物需水量与灌溉》、《北方地区主要农作物灌溉用水定额》及相关文献<sup>[10-13]</sup>。各市主要农作物产量、播种面积、人口等数据来源于中国统计年鉴、各省(自治区)统计年鉴、各市(州)统计年鉴和水资源公报(2000—2020 年)。主要农产品收益和成本来源于《全国农产品成本收益资料汇编》(2000—2020 年)。

## 2 研究方法

### 2.1 作物生产水足迹核算

作物生产水足迹由蓝水足迹和绿水足迹组成, 用于反映作物生产用水类型和数量, 计算公式<sup>[14-15]</sup>为

$$W_F = W_{F, \text{blue}} + W_{F, \text{green}} \quad (1)$$

式中:  $W_F$  为作物生产水足迹,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $W_{F, \text{green}}$  为作物生产绿水足迹,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $W_{F, \text{blue}}$  为作物生产蓝水足迹,  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。

作物生产绿水、蓝水足迹分别由作物生育期腾发量中的蓝水、绿水部分与作物单产作比求得, 计算公式为

$$W_{F, \text{blue}} = \frac{10 \times ET_{\text{blue}}}{Y} \quad (2)$$

$$W_{F, \text{green}} = \frac{10 \times ET_{\text{green}}}{Y} \quad (3)$$

式中:  $ET_{\text{blue}}$ 、 $ET_{\text{green}}$  分别为作物生长期的蓝水、绿水腾发量, mm; 10 为单位换算系数, 将水深(mm)转换为单位面积水量,  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ;  $Y$  为作物单位面积产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。

作物生长期蓝水、绿水腾发量的计算公式<sup>[16]</sup>为

$$ET_{\text{green}} = \min(ET_c, P_{\text{eff}}) \quad (4)$$

$$ET_{\text{blue}} = \max(0, ET_c - P_{\text{eff}}) \quad (5)$$

式中:  $ET_c$  为作物需水量<sup>[17]</sup>, mm;  $P_{\text{eff}}$  为作物生育期所利用的有效降水量, mm, 利用美国农业部土壤保持局推荐的 USDASCS 方法计算<sup>[18]</sup>。

### 2.2 作物种植结构优化

多目标优化问题是指需要同时优化两个或两个以上目标的问题, 这些目标可能是相互矛盾的<sup>[19]</sup>。本研究以 2020 年为典型年, 利用 MATLAB 多目标遗传算法对西北旱区的作物种植结构进行优化求解<sup>[20]</sup>。

#### 2.2.1 目标函数

水资源利用目标: 水资源消耗量最小。

作物蓝水资源消耗量最小, 计算公式为

$$\min U_{\text{blue}} = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^{10} x_{ij} q_{ij} C_{ij, \text{blue}} \quad (6)$$

式中:  $U_{\text{blue}}$  为研究时段内的作物生产蓝水足迹总量,  $\text{m}^3$ ;  $C_{ij, \text{blue}}$  为区域  $i$  作物  $j$  的生产蓝水足迹,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $i$  为西北旱区 6 省(自治区);  $j$  为典型作物;  $x_{ij}$  为区域  $i$  作物  $j$  的种植面积,  $\text{hm}^2$ ;  $q_{ij}$  为区域  $i$  作物  $j$  的产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。

作物绿水足迹占比最大, 计算公式为

$$\max U_{\text{green}} = \frac{\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^{10} x_{ij} q_{ij} C_{ij, \text{green}}}{\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^{10} x_{ij} q_{ij} C_{ij}} \quad (7)$$

式中:  $U_{\text{green}}$  为研究时段内的作物生产绿水足迹总量,  $\text{m}^3$ ;  $C_{ij, \text{green}}$  为区域  $i$  作物  $j$  的生产绿水足迹,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;  $C_{ij}$  为区域  $i$  作物  $j$  的生产总水足迹。

生态安全目标: 生态效益最大, 计算公式为

$$\max M_{\text{eco}} = 4.01 \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^{10} e_j x_{ij} \quad (8)$$

式中:  $M_{\text{eco}}$  为生态效益, 元; 4.01 为生态服务价值的当量因子, 分别为食物生产(0.85)、原材料生产(0.40)、水资源供给(0.02)、气体调节(0.67)、气候调节(0.36)、净化环境(0.10)、水文调节(0.27)、土壤保持(1.03)、维护养分循环(0.12)、生物多样性(0.13)、提高美学景观(0.06) 11 种当量因子之和;  $e_j$  为一个生态服务价值当量因子的经济价值, 元/ $\text{hm}^2$ 。

经济目标: 作物净效益最大, 计算公式为

$$\max M = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^{10} x_{ij} q_{ij} (P_{ij} - D_{ij}) \quad (9)$$

式中:  $M$  为作物净效益, 元;  $P_{ij}$  为区域  $i$  作物  $j$  的售价, 元/kg;  $D_{ij}$  为区域  $i$  作物  $j$  的生产成本, 元/kg。

### 2.2.2 约束条件

耕地面积约束。随着城市化的快速发展, 粮食作物种植面积进一步增加潜力较小, 故作物的种植面积上限设为现状年的作物种植面积之和。此外, 考虑约 30% 的农户可接受种植结构的调整, 故将各作物种植面积的下限设置为现状年的 70%, 计算公式为

$$\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^{10} x_{ij} \leq \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^{10} x_{ij,2020} \quad (10)$$

$$70\% x_{ij,2020} \leq x_{ij} \leq \sum_{j=1}^{10} x_{ij,2020} \quad (11)$$

式中:  $x_{ij,2020}$  为区域  $i$  作物  $j$  现状年的种植面积,  $\text{hm}^2$ 。

农业用水量约束。所种植作物的农业灌溉用水量不能超过该年度所能提供的灌溉用水的总量, 计算公式为

$$\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^{10} x_{ij} q_{ij} C_{ij,blue} \leq B \quad (12)$$

式中:  $B$  为西北旱区全年可提供的灌溉用水的总量,  $\text{m}^3$ 。

食物安全约束。食物安全约束的计算公式为

$$\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^{10} x_{ij} q_{ij} \geq \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^{10} P_i D_j \quad (13)$$

式中:  $P_i$  为区域  $i$  的人口数量, 万人;  $D_j$  为人均作物  $j$  的需求量, kg。依据中国居民膳食指南 2021 可知: 年人均谷物(水稻、小麦和玉米)、薯类、大豆、蔬菜、水果、食用油(油料出油率按 40% 来计算)分别为 91.25、36.50、9.10、109.50、73.00、9.13 kg<sup>[21]</sup>; 2020 年人均棉花占有量为 4.2 kg。

非负约束。所有作物的种植面积都不应为负数, 计算公式为

$$0 \leq x_{ij}, \forall i, j (i = 1, 2, 3, \dots, 6; j = 1, 2, 3, \dots, 10) \quad (14)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 西北旱区作物生产现状分析

#### 3.1.1 作物产量演变特征

西北旱区主要作物总产量在时间序列上呈现增

加趋势, 由 2000 年的 6976.83 万 t 增至 2020 年的 16 827.79 万 t, 增长率为 141.20%。分阶段来看: 2000—2003 年, 主要作物总产量较低, 均值仅为 7 051.84 万 t, 该阶段国家正处于种植业结构调整过程中, 加之西北旱区退耕还林工程的实施致使耕地面积减少以及西部大开发战略的实施促使城镇化、工业化步伐加快, 农业劳动力供给不足, 从而影响了该区域主要作物的产量; 2004—2016 年, 主要作物总产量实现了 13 年连增, 并从 2008 年开始屡创新高, 2016 年达到最高(18 447.82 万 t), 这个阶段随着我国一系列农业保护政策的出台, 加快农业科技创新、推进高标准基本农田建设等措施, 有效调动了农户种粮积极性; 2017—2020 年, 对粮食种植结构调整进行了全面部署, 作物总产量略微减小, 下降率为 2.74%。见图 1。

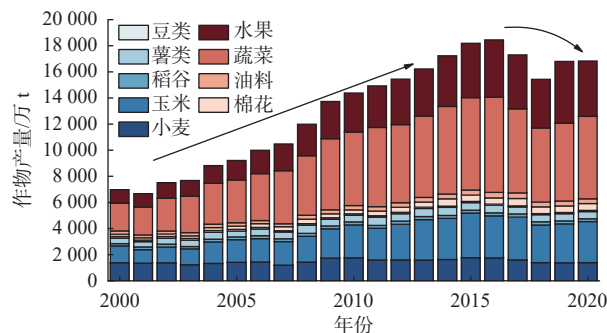


图 1 2000—2020 年西北旱区作物产量变化趋势

Fig. 1 Temporal variations of crop yield in arid area of northwest China from 2000 to 2020

从具体作物产量变化趋势来看: 玉米产量呈现出波动性增长走势, 由 2000 年的 1 283.83 万 t 增至 2020 年的 3 149.66 万 t, 增长了 2.45 倍, 年均增长率为 6.92%。这是随着 2003 年国家惠农政策的实施, 以及政府颁布的玉米库存政策以保护性价格收购玉米, 大大增加了农户种植玉米的积极性; 小麦产量呈现出波动性变化, 总体由 2000 年的 1 380.95 万 t 增至 2020 年的 1 384.94 万 t; 薯类产量年均增长率仅 1.46%, 年均增幅 9.13 万 t, 增幅明显小于小麦和玉米; 稻谷产量由 2000 年的 181.54 万 t 稳定增长到 2020 年的 213.18 万 t, 增长 31.64 万 t, 增长变化趋势较稳定; 2000—2020 年豆类产量呈现出减小的趋势, 年均减幅 3.04 万 t, 年均下降率 1.19%; 棉花产量呈上升趋势, 由 2000 年的 173.49 万 t 增至 2020 年的 521.67 万 t, 增长 2.01 倍; 油料产量由 2000 年的 249.76 万 t 增至 2020 年的 366.71 万 t, 增长了 0.47 倍; 2000—2020 年蔬菜产量总体呈增长的

趋势,增长率为 197.02%;水果产量变化趋势基本与蔬菜一致,产量由 2000 年的 1 040.01 万 t 增至 2020 年的 4 240.34 万 t,年均增长率 14.65%,年均增幅 199.11 万 t。

### 3.1.2 作物播种面积演变特征

西北旱区作物播种总面积在时间序列上整体呈现出先上升后下降的趋势,主要可分为以下几个阶段:2000—2002 年,受城镇化和农业结构调整等影响,作物播种面积小幅度下降,由 1 448.85 万  $\text{hm}^2$  降至 1 401.99 万  $\text{hm}^2$ ,下降率仅为 3.23%;2003—2015 年,得益于农业补贴政策制度的贯彻落实和严格执行、市场经济的开放以及农业机械化水平的提高,作物播种总面积呈增加趋势,增量为 578.20 万  $\text{hm}^2$ ,年均增长率 2.26%。2016 年至今,建设用地的增加以及劳动力外出务工导致的耕地“撂荒”现象,一定程度上打破了原有耕地种植的规模,作物播种面积略有降低,2020 年降至 1 797.46 万  $\text{hm}^2$ 。见图 2。

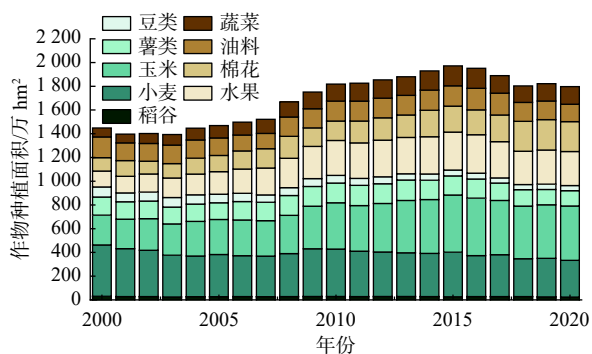


图 2 2000—2020 年西北旱区作物播种面积变化趋势

Fig. 2 Temporal variations of crop planting area in arid area of northwest China from 2000 to 2020

玉米播种面积呈现出稳定增长的趋势,由 2000 年的 251.147 万  $\text{hm}^2$  增长到 2016 年的 483.990 万  $\text{hm}^2$ ,后又回落到 2020 年的 458.174 万  $\text{hm}^2$ 。小麦播种面积经历了“下降—上升—下降”3 个阶段:第一阶段“下降”过程发生在 2000—2004 年,播种面积由 432.502 万  $\text{hm}^2$  降至 342.173 万  $\text{hm}^2$ ;第二阶段“上升”过程发生在 2005—2010 年,该阶段小麦播种面积由 355.035 万  $\text{hm}^2$  增至 399.961 万  $\text{hm}^2$ ;第三阶段的“下降”过程发生在 2011—2020 年,减少了 72.429 万  $\text{hm}^2$ 。薯类播种面积呈现“倒 U 形”变化趋势。稻谷播种面积基本上呈稳定下降趋势,由 2000 年的 30.727 万  $\text{hm}^2$  降至 2020 年的 23.799 万  $\text{hm}^2$ ,年均下降率 1.07%。豆类播种面积呈明显下降趋势,由 2000 年的 84.579 万  $\text{hm}^2$  降至 2020 年的 42.655 万  $\text{hm}^2$ 。棉花播种面积总体呈上升趋势,近

21 年增长了 1.23 倍。油料播种面积经历了“下降—上升—下降”不同的发展阶段:第一阶段的“下降”过程发生在 2000—2007 年,受效益、劳动力等因素的影响,播种面积减少了 26.20%;第二阶段的“上升”过程发生在 2008—2017 年,这个时期国家推出了一系列有关油菜籽、花生、芝麻等的生产支持政策,油料播种面积进入了恢复性增长阶段,播种面积由 162.993 万  $\text{hm}^2$  增至 184.069 万  $\text{hm}^2$ ;2018—2020 年为第三阶段。蔬菜产量总体呈增长的趋势,由 2000 年的 75.929 万  $\text{hm}^2$  增至 2020 年的 1 48.751 万  $\text{hm}^2$ ,增长了 95.91%。水果播种面积自 2000 年的 134.234 万  $\text{hm}^2$  增至 2020 年的 287.010 万  $\text{hm}^2$ ,增长了 113.81%。见图 2。

## 3.2 西北旱区作物生产水足迹总量变化特征分析

### 3.2.1 作物生产水足迹总量演变特征

2000—2020 年西北旱区作物生产水足迹总量整体处于高位波动状态,由 2000 年的 838.70 亿  $\text{m}^3$  增至 2015 年的 1 283.42 亿  $\text{m}^3$ ,随后随着农业用水效率的提高降至 2020 年的 1 109.05 亿  $\text{m}^3$ ,年均生产水足迹总量约为 1 044.38 亿  $\text{m}^3$ ,见图 3。其中蓝水足迹总量增长了约 0.31 倍,年均增长率为 0.85 亿  $\text{m}^3$ ,占作物生产水足迹总量的比例维持在 72.94%~81.55%,仍是西北旱区作物生产用水的主要来源。受全球气候变暖的影响,伴随着降水量的增加,绿水足迹总量有所增加,从 2000 年的 166.73 亿  $\text{m}^3$  增至 2020 年的 226.09 亿  $\text{m}^3$ ,增加了 59.36 亿  $\text{m}^3$ ,占比由 19.88% 提高到 20.39%,降低了西北旱区作物用水对于蓝水的依赖程度。需要注意的是,全球变暖促使西北旱区降水量增加的同时,也加剧了西北旱区的干旱程度,从而增加了农业用水负担及农业干旱的风险<sup>[22]</sup>,西北旱区食物安全用水的形势依然严峻。

从作物水足迹的构成来看,具体作物生产水足迹均值由大到小依次为玉米(219.06 亿  $\text{m}^3$ )>小麦(187.98 亿  $\text{m}^3$ )>园林水果(165.33 亿  $\text{m}^3$ )>棉花(134.60 亿  $\text{m}^3$ )>蔬菜(116.34 亿  $\text{m}^3$ )>薯类(79.71 亿  $\text{m}^3$ )>油料(76.66 亿  $\text{m}^3$ )>豆类(31.12 亿  $\text{m}^3$ )>稻谷(20.21 亿  $\text{m}^3$ )>瓜果(13.36 亿  $\text{m}^3$ )。其中,玉米也是蓝、绿水足迹的主要消耗者(分别占蓝水、绿水足迹总量的 21.15%、20.31%),这与西北旱区农业种植结构密切相关。见图 4。

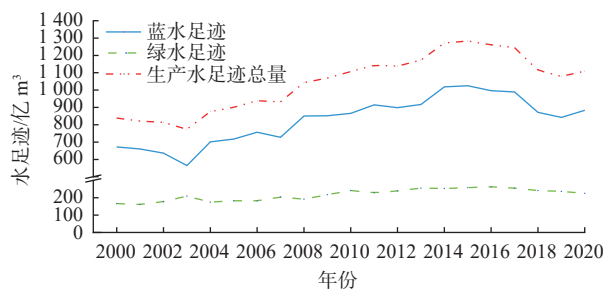


图3 2000—2020年西北旱区作物生产水足迹总量变化趋势

Fig. 3 Temporal variations of total water footprint of crop production in arid area of northwest China from 2000 to 2020

具体作物生产水足迹总量时间演变过程:小麦和豆类生产水足迹总量表现出下降趋势,分别由

2000年的225.73亿 $m^3$ 和44.09亿 $m^3$ 降至2020年的167.13亿 $m^3$ 和21.28亿 $m^3$ 。玉米、蔬菜、棉花、瓜果和园林水果生产水足迹总量呈现出显著增加趋势:玉米增速最快,年均增长率8.53%;园林水果次之,从2000年的88.50亿 $m^3$ 增至2020年的196.53亿 $m^3$ ,年均增长率6.34%;瓜果增速最慢,近21年仅增加8.48亿 $m^3$ (图5),这主要归功于区域产业结构的调整。2000—2020年,我国大豆进口量呈现出显著增加的态势,2020年进口规模超1亿t。受大豆进口量的影响,西北旱区豆类播种面积和产量显著减少,一定程度上降低了豆类生产对水资源的需求量。与此同时,在国家政策调控下,农户更倾向于种植玉米,大大增加了玉米的种植力度。

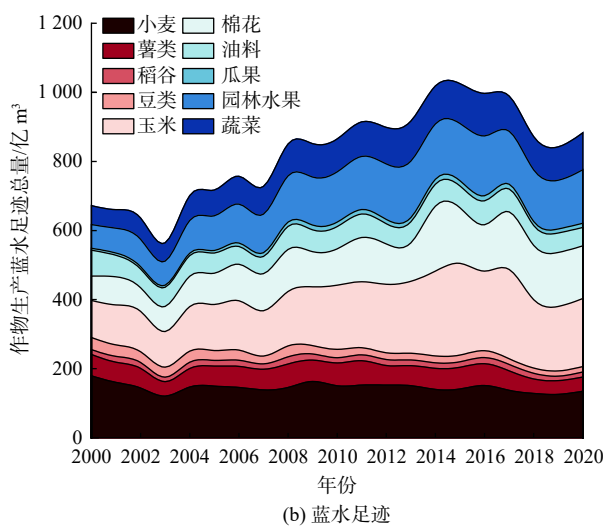
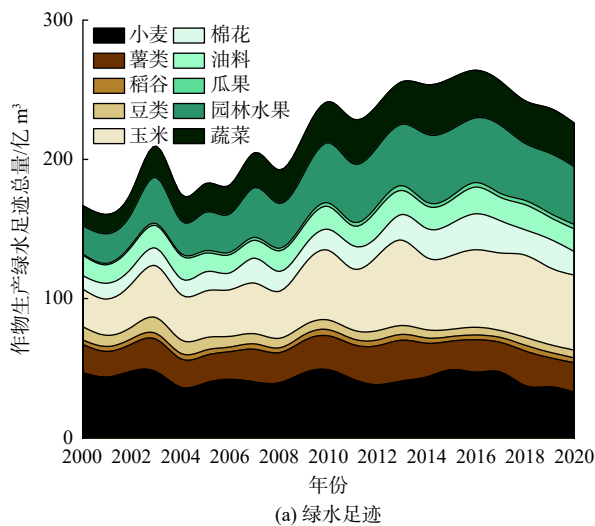


图4 2000—2020年西北旱区具体作物生产蓝、绿水足迹总量变化趋势

Fig. 4 Temporal variations of total blue and green water footprints of specific crop production in arid area of northwest China from 2000 to 2020

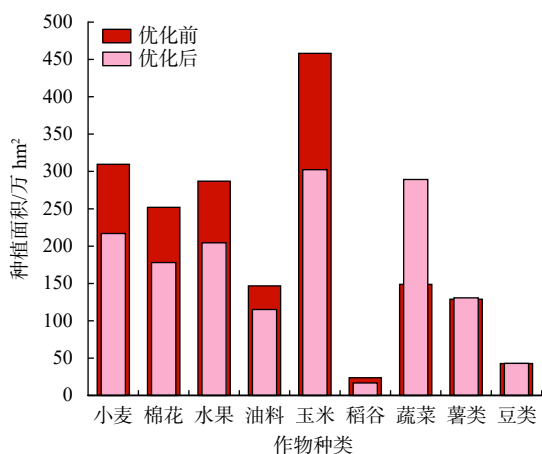


图5 2020年西北旱区作物种植面积优化前后对比

Fig. 5 Comparison before and after the optimization of crop planting area in arid area of northwest China in 2020

3.2.2 具体作物生产蓝水足迹总量演变特征  
西北旱区具体作物生产蓝水足迹总量均表现出与生产水足迹相似的变化规律。小麦生产蓝水足

迹总量呈不显著下降趋势( $P > 0.05$ ), 2003年最小(120.20亿 $m^3$ ), 2000年最大(179.11亿 $m^3$ )。玉米生产蓝水足迹总量在2000—2015年不断增加,并在2015年达到最大值265.27亿 $m^3$ ,随后呈倒U形变化,最低值出现在2019年,为186.98亿 $m^3$ 。稻谷生产蓝水足迹总量最大值为20.96亿 $m^3$ ,最小值为12.99亿 $m^3$ ,极值比为1.61,均值为16.44亿 $m^3$ ,变异系数(CV)为11.27%,说明西北旱区稻谷生产蓝水足迹总量在研究期内变化幅度不大。薯类生产蓝水足迹总量从2000年的62.16亿 $m^3$ 降至2020年的41.18亿 $m^3$ ,降幅为33.76%。豆类生产蓝水足迹总量呈显著减少趋势( $P < 0.05$ ),年均变化率为0.99亿 $m^3$ 。2000年豆类生产蓝水足迹值最大,为34.71亿 $m^3$ ,2019年最小,为15.01亿 $m^3$ 。园林水果生产蓝水足迹在研究期内呈增加趋势,由2000年的68.36亿 $m^3$ 增至2020年的155.03亿 $m^3$ ,增加了1.27倍。2000—2020年,西北旱区瓜果生产蓝水足

迹增加了 111.57%，由 5.76 亿  $m^3$  增至 12.20 亿  $m^3$ 。近 21 年棉花生产蓝水足迹呈显著增加趋势 ( $P < 0.05$ )，极值比为 2.76，均值为 118.35 亿  $m^3$ ，CV 为 29.43%。油料的生产蓝水足迹总体呈增减交替变化，最大值出现在 2000 年，为 74.95 亿  $m^3$ ，最小值出现在 2007 年，为 49.90 亿  $m^3$ 。见图 4。

### 3.2.3 具体作物生产绿水足迹总量演变特征

从具体作物生产绿水足迹总量时间演变过程来看，2000—2020 年小麦生产绿水足迹总量呈下降趋势，由 2000 年的 46.62 亿  $m^3$  降至 2020 年的 32.58 亿  $m^3$ 。玉米生产绿水足迹总量在 2000—2013 年逐渐增加，在 2013 年达到最高值 61.30 亿  $m^3$ ，随后呈波动变化。近 21 年稻谷生产绿水足迹总量变化较稳定，波动范围为 3.37 亿 ~ 4.33 亿  $m^3$ ，多年均值为 3.78 亿  $m^3$ 。薯类生产绿水足迹总量整体变化不大，维持在 18.43 亿 ~ 29.26 亿  $m^3$ 。2000—2020 年豆类生产绿水足迹总量减少了 18.98 亿  $m^3$ ，2003 年最大 (11.55 亿  $m^3$ )，2017 年最小 (4.93 亿  $m^3$ )。园林水果和瓜果生产绿水足迹总量在研究期内均呈现显著增加趋势 ( $P < 0.05$ )，分别由 2000 年的 20.14 亿  $m^3$  和 1.17 亿  $m^3$  增至 2020 年的 41.50 亿  $m^3$  和 3.22 亿  $m^3$ 。2000 年，西北旱区棉花生产绿水足迹总量为 14.59 亿  $m^3$ ，到 2020 年，棉花生产绿水足迹总量为 16.28 亿  $m^3$ ，增长了 11.60%。油料生产绿水足迹总量最大值为 12.86 亿  $m^3$ ，最小值为 19.29 亿  $m^3$ ，极值比为 1.50，均值为 15.79 亿  $m^3$ ，CV 为 11.67%。见图 4。

## 3.3 作物种植结构优化调控

### 3.3.1 种植结构优化前后对比

以 2020 年西北旱区典型作物的种植面积为基准，在不增加资金、技术投入、用水量和耕地面积的前提下，最大限度优化种植结构，在缓解区域水资源和保障生态安全的基础上促进区域经济发展。优化后的种植结构正是充分考虑西北旱区的生态安全、水安全和社会经济发展，以满足食物最低需求、种植面积和农业用水量为约束的结果。优化后的作物种植结构与 2020 年相比，表现出不同程度的变化。整体而言，相较于现状的 1 797.46 万  $hm^2$ ，调整后的西北旱区作物种植面积减少 16.76%，为 1 496.26 万  $hm^2$ ，见图 5。这在一定程度上缓解了西北旱区的水资源、耕地资源压力，保障了西北旱区的水安全和生态安全。

从具体作物来看：种植结构优化后小麦的种植面积减少 29.99%，从 309.662 万  $hm^2$  减少到

216.800 万  $hm^2$ 。玉米种植面积减少 132.414 万  $hm^2$ 。这个结果与《全国种植业结构调整规划 (2016—2020 年)》的玉米种植面积一致。稻谷的种植面积减少 30.01%，豆类种植面积提高 0.80%，从 42.655 万  $hm^2$  增至 42.995 万  $hm^2$ 。薯类种植面积略微增长，从 128.79 万  $hm^2$  增加到 130.653 万  $hm^2$ 。水果的种植面积减少了 82.523 万  $hm^2$ ，蔬菜种植面积增加 140.593 万  $hm^2$ 。棉花种植面积从 251.926 万  $hm^2$  减少到 177.897 万  $hm^2$ 。油料种植面积优化后减少 21.56%。见图 5。

### 3.3.2 目标函数值优化前后对比

水资源消耗目标函数值。考虑到西北旱区水资源消耗问题，通过提高蓝水利用效率、发挥节水效益，进而缓解区域水资源压力。经作物种植结构优化后，西北旱区蓝水利用量可减少 107.25 亿  $m^3$ 。从具体作物来看：调整后的玉米蓝水利用量减少最多，较调整前减少了 62.98 亿  $m^3$ ；其次是水果，较现状年减少了 49.61 亿  $m^3$ ；而后依次是棉花、小麦、油料和稻谷。豆类、薯类和蔬菜的蓝水利用量有所增加，这主要是在综合考虑各个目标函数的基础上进行的优化，而非对水资源利用量单一进行优化。见图 6。

生态安全目标函数值。西北旱区是我国极其重要的生态屏障，改善生态系统、搞好生态建设是西北旱区开发建设的前提条件。因此农业生产不能仅局限于食物供给与经济产出，农业与自然之间的协调发展需要得到重视，生态效益逐渐成为农业生产过程中一个重要的考虑因素。因此，借助生态服务价值对农业生产过程中的生态效益进行量化，以追求种植结构优化后的农业生产所带来的生态效益最大，实现生态安全。

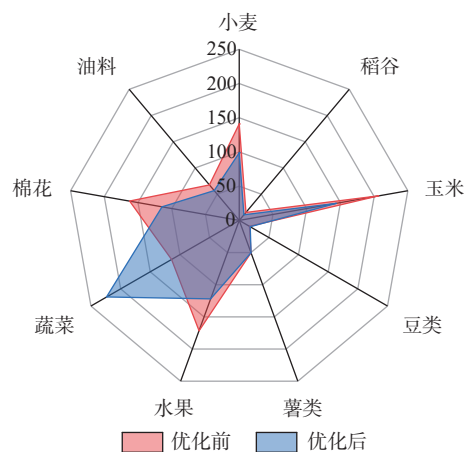


图 6 2020 年西北旱区优化前后水资源消耗目标函数值

Fig. 6 Water safety objective function value before and after optimization in arid area of northwest China in 2020

在不增加技术投入的基础上,仅通过种植结构优化可以提高西北旱区的生态安全水平。然而由于结构优化过程中生态安全目标函数不是单一的目标函数,还需综合考虑水安全和经济效益目标以及各种约束条件,这些因素导致模型在优化过程中进行了博弈,这也导致种植结构优化后的西北旱区生态安全目标函数值增加程度较小。仅从现状年的645.85亿元增加到种植结构优化后的673.32亿元,仅增加了4.25%,见图7。但这也足以说明,仅通过种植结构调整,可以提高西北旱区的生态效益,进而实现该区的生态安全。

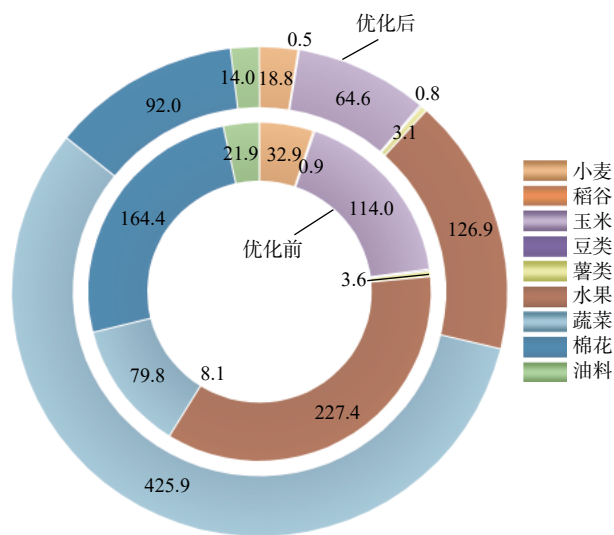


图7 2020年西北旱区优化前后生态安全目标函数值  
Fig. 7 Ecological security objective function value before and after optimization in arid area of northwest China in 2020

经济目标函数值。为保障区域的食物安全,实现农业生产的可持续发展,必须提高农业生产的净效益,从而调动农民种地的积极性,保证高质量的劳动力。通过种植结构的优化,可明显提高西北旱区的作物净效益目标函数值,实现增值470.74亿元(现状为1716.64亿元)。见图8。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

随着我国区域经济的失衡发展和城市化的快速推进,人口的分布与农业的生产呈明显的空间错位<sup>[23-24]</sup>。自2003年起,西北旱区作物生产量逐渐高于当地作物消费量,“北粮南运”的局面逐渐加剧,这也促使西北旱区在保障全国粮食安全方面的地位逐步提升,见图9。然而,西北旱区自身水资源十分匮乏<sup>[25]</sup>,给当地的食物生产带来了较大的压力。

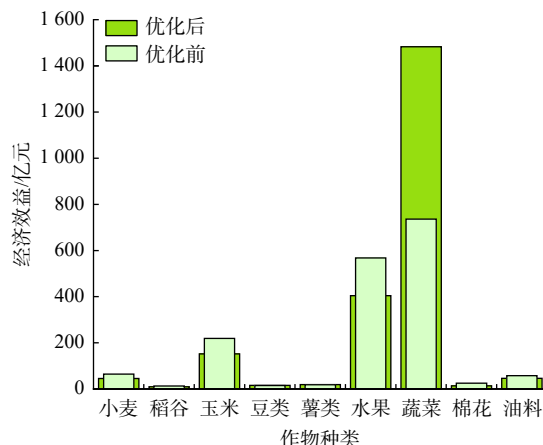


图8 2020年西北旱区优化前后经济效益安全目标函数值  
Fig. 8 Economic benefit and safety objective function value before and after optimization in arid area of northwest China in 2020

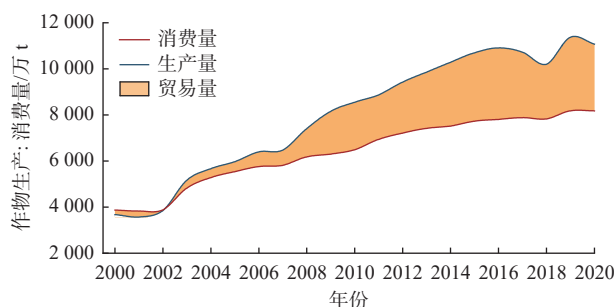


图9 2000—2020年西北旱区作物生产/消费格局变化趋势(不考虑蔬菜)

Fig. 9 Change trend of crop production/consumption pattern in arid area of northwest China from 2000 to 2020 (vegetables are not considered)

相关研究<sup>[26]</sup>表明,作物种植结构的优化,有助于提高农业水资源利用效率,缓解水资源压力,促进粮食可持续生产。例如:秦智雅等<sup>[24]</sup>研究通过调整节水型、均衡型和发展型3种农业产业结构,嘉兴市农业水足迹和经济效益均实现了不同程度的优化;涂家婷等<sup>[27]</sup>研究发现汉江流域大部分地区在减少小麦和玉米的种植面积后,粮食作物的经济效益将提高39%,水资源生产力将提高12%;郭萍等<sup>[28]</sup>从经济、社会、资源和生态4个角度对河套灌区作物种植结构进行优化来缓解粮食生产过程中对环境造成的负面压力。本文的研究结果与上述结论相一致,优化后的作物种植面积可同时对资源、生态和经济带来正面效应,可为西北旱区的作物种植结构规划提供新的研究视角和更加全面合理的建议。但是,本研究未考虑作物适宜种植分区情况,未来还需进一步完善。

### 4.2 结论

本文从水足迹的视角提出了农业产业结构多目标优化模型,以西北旱区为研究对象,通过核算作

物生产水足迹,基于水安全、生态安全、食物安全及经济效益对西北旱区作物种植结构进行了优化,主要得到以下结论:

2000—2020 年,伴随着西北旱区农业生产规模的逐渐扩大,农业生产水足迹总量高位波动,年均生产水足迹总量超 1 000 亿  $\text{m}^3$ ,其中作物生产蓝水足迹比例在 72.94%~81.55% 波动,造成了巨大的农业供水压力。

通过模型对作物种植结构进行调整后,作物种植面积降至 1 496.26 万  $\text{hm}^2$ ,蓝水利用量可减少 107.25 亿  $\text{m}^3$ ,生态效益增加 4.25%,实现经济效益增长 470.74 亿元,在保证经济效益的同时能够有效缓解当前农业水资源短缺压力,有利于保障区域水安全和生态安全。

根据水足迹优化调控结果,建议西北旱区在相关规划中注重农业产业结构的优化,适当提高蔬菜、薯类和豆类的种植面积,减少其他作物的种植面积。

#### 参考文献:

- [1] 邓铭江. 中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略[J]. *地理学报*, 2018, 73(7): 1189-1203. DOI: 10.11821/dlxb201807001.
- [2] 刘显. 国际化绿色化背景下中国西北地区粮食安全研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021. DOI: 10.27409/d.cnki.gxbnu.2021.000085
- [3] 王玉宝, 刘显, 史利洁, 等. 西北地区水资源与食物安全可持续发展研究[J]. *中国工程科学*, 2019, 21(5): 38-44. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2019.05.017.
- [4] FENG B B, ZHOU L, XIE D, et al. A quantitative review of water footprint accounting and simulation for crop production based on publications during 2002-2018[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106962. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106962.
- [5] 张家欣, 邓铭江, 李鹏, 等. 虚拟水流视角下西北地区农业水资源安全格局与调控[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(1): 131-140. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.01.014.
- [6] 苗俊霞. 气候变化背景下农业水足迹评价与优化模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020. DOI: 10.27204/d.cnki.glzhu.2020.000227
- [7] 管驰明, 张洋洋, 石常峰. 农业虚拟水消耗影响因素分解及时空差异: 以西北5省(自治区)为例[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(5): 193-201. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0109.
- [8] 刘徐然, 李小雅, 赵耀, 等. 基于冬小麦水足迹的黄河流域农业结构协同调整[J]. *人民黄河*, 2022, 44(S1): 30-32. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2022.s1.013.
- [9] 邓铭江, 龙爱华, 李江, 等. 西北内陆河流域“自然—社会—贸易”三元水循环模式解析[J]. *地理学报*, 2020, 75(7): 1333-1345. DOI: 10.11821/dlxb20200701.
- [10] 佟玲. 西北干旱内陆区石羊河流域农业耗水对变化环境响应的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [11] 邱美娟, 刘布春, 刘园, 等. 中国北方苹果种植需水特征及降水适宜性[J]. *应用气象学报*, 2021, 32(2): 175-187. DOI: 10.11898/10017313.20210204.
- [12] 李剑萍, 耿秀华, 韩颖娟, 等. 宁夏马铃薯需水量的时空特征分析[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(26): 15888-15892+15914. DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2011.26.205.
- [13] 张瑞涵. 气候变化条件下黄河流域的作物灌溉需水量[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [14] 韩宇平, 李新生, 黄会平, 等. 京津冀作物水足迹时空分布特征及影响因子分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(4): 26-34. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0093.
- [15] 孙世坤, 王玉宝, 吴普特, 等. 小麦生产水足迹区域差异及归因分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(13): 142-148. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.13.020.
- [16] 王丽川, 侯保灯, 周毓彦, 等. 基于水足迹理论的北京市水资源利用评价[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(04): 680-688. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0071.
- [17] ZHANG J X, DENG M J, YANG T, et al. Spatiotemporal pattern of reference crop evapotranspiration and its response to meteorological factors in northwest China over years 2000-2019[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29: 69831-69848. DOI: 10.1007/s11356-022-20654-8.
- [18] 刘显, 徐悦悦, 孙从建, 等. 黄河上中游水资源与粮食安全耦合关系特征分析: 以陕甘宁青为例[J]. *地球环境学报*, 2022, 13(4): 369-379. DOI: 10.7515/JEE212036.
- [19] 杨改强, 刘亚红, 郭萍, 等. 汾河灌区水资源多目标优化配置模型研究[J]. *节水灌溉*, 2022(8): 8-15.



- [20] 王宏伟,张鑫,邱俊楠,等.基于多目标遗传算法的西宁市水资源优化配置研究[J].*水土保持通报*, 2012, 32(2): 150-153. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2012.02.016.
- [21] 陈敏.西北生态脆弱区水资源优化配置及生态修复研究[D].北京:华北电力大学,2020. DOI: 10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.001629
- [22] 阴晓伟,吴一平,赵文智,等.西北旱区潜在蒸散发的气候敏感性及其干旱特征研究[J].*水文地质工程地质*, 2021, 48(3): 20-30. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012012.
- [23] 阴亚丽.中国“北粮南运”伴生的区域虚拟水流动过程解析与应对策略[D].杨凌:西北农林科技大学,2021. DOI: 10.27409/d.cnki.gxbnu.2021.001905
- [24] 秦智雅,俞洁,孙国金,等.基于水足迹的嘉兴市农业产业结构优化模型[J].*浙江大学学报(理学版)*, 2022, 49(5): 613-622. DOI: 10.3785/j.issn.1008-9497.2022.05.013.
- [25] 孙才志,魏亚琼,赵良仕.干旱区水—能源—粮食纽带系统协同演化:以中国西北地区为例[J].*自然资源学报*, 2022, 37(2): 320-333. DOI: 10.31497/zrzyxb.20220204.
- [26] 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. DOI: 10.12396/js-gg.2022206.
- [27] 涂家婷,周敏.基于水足迹理论和多目标模糊规划的粮食作物种植结构优化和农业用水管理研究:以汉江流域为例[J].*安徽农业科学*, 2022, 50(11): 187-193. DOI: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.11.048.
- [28] 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. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.036.

## Synergistic adjustment of planting structure in terms of water footprint in arid area of northwest China

ZHANG Jiaxin<sup>1,2</sup>, HUANG Huiping<sup>4</sup>, HAN Yuping<sup>4</sup>, DENG Mingjiang<sup>1,3</sup>, YANG Tao<sup>1,2</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098, China; 3. Engineering Research Center of Water Resources and Ecological Water Conservancy in Cold and Arid Area of Xinjiang, Urumqi 830000, China; 4. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** Northwest China is a strategic reserve area for China's agriculture production. There are many key agricultural production areas like “the northwest breadbasket (Hexi Corridor)”, “the abundant place outside the Great Wall (Ningxia Plain)”, and “the granary beyond the Great Wall (Hetao Plain)”, produce 12 % of the country's grain with 10 % of the country's water resources and 15 % of the grain planting area. With the rapid growth of urbanization and regional trade, the pattern of grain transportation from the north to the south has gradually changed, and thus northwest China's role in ensuring national food security has become increasingly prominent. However, northwest China is the most water-scarce place. The total amount of water resources in this region only accounts for 5.7 % of the national total, and the amount of water resources per unit area is only 15 % of the national average. But agricultural irrigation water in this area accounts for more than 80% of total local water consumption, which is 1.23 times that of China. The shortage and waste of water resources in the region seriously restrict the sustainable development of agriculture. Therefore, optimizing water allocation, adjusting crop planting structure, and maximizing economic and ecological benefits have important practical significance for promoting the efficient use of water resources and sustainable development of agriculture in this region. Based on the climate data of 205 stations in northwest China from 2000 to 2020, the water footprint model was used to analyze the evolution characteristics of water consumption of main crops in northwest China. A multi-objective planning model with constraints of cultivated land resources, water resources, and food security is constructed to optimize the planting structure to minimize water consumption, ecological security, and economic benefits maximization. Results showed that (1) from 2000 to 2020, the yield of main crops increased by 1.40 times (from 70 million tons in 2000 to 168 million tons in 2020) and the planting area increased by 0.24 times (from 14.49 million hm<sup>2</sup> in 2000 to 17.98 million

hm<sup>2</sup> in 2020) in northwest China. The planting structure developed from specialization to diversification, and the planting proportion of food crops and cash crops changed from 2 : 1 to 1 : 1. (2) The total water footprint of crop production increased from 83.87 billion m<sup>3</sup> to 110.91 billion m<sup>3</sup>. The total blue water footprint increased by about 1.31 times, and the total green water footprint increased by 5.94 billion m<sup>3</sup>. (3) Although global warming has increased precipitation in the arid northwest region and alleviated agricultural water consumption in the region. However, the proportion of the total blue water footprint to the total water footprint of crop production remains between 72.94 % and 81.55 %, which reflects that agricultural production in northwest China faced huge pressure on water resources. (4) By adjusting the crop planting structure, appropriately increase the planting area of vegetables, potatoes, and beans by  $1\,405.93 \times 10^3 \text{ hm}^2$ ,  $18.63 \times 10^3 \text{ hm}^2$ , and  $3.40 \times 10^3 \text{ hm}^2$ , and reduce the planting area of other crops. To effectively alleviate the pressure of the current agricultural water shortage while ensuring economic benefits, to ensure regional water security and ecological security, 10.73 billion m<sup>3</sup> of blue water resources could be saved, the ecological benefits could be increased by 4.25 % and the economic benefits could be increased by 47.074 billion yuan. The research conclusion could provide technical and decision-making support for the green and high-quality development of agriculture in the northwest arid area.

**Key words:** northwest China; water footprint; optimization of agricultural planting structure; water security; ecological security; food security