

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.03.032

CSTR:32310.14.stbcb.2026.03.032

白芳芳,肖亚涛,周淑梅,等.西北地区粮食安全评价及其障碍因子分析[J].水土保持学报,2026,40(3):424-435.

BAI Fangfang, XIAO Yatao, ZHOU Shumei, et al. Assessment and obstacle factor analysis of food security in northwest China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3): 424-435.

西北地区粮食安全评价及其障碍因子分析

白芳芳¹, 肖亚涛², 周淑梅³, 郭魏^{1,4}, 马春芽¹, 乔冬梅¹

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 2. 河南农业大学机电工程学院, 郑州 450002; 3. 河南省驻马店生态环境监测中心, 河南 驻马店 463003; 4. 农业部农产品质量安全水环境因子风险评估实验室, 河南 新乡 53002)

摘要: [目的] 西北地区是我国重要的粮食生产基地, 在保障粮食安全方面责任重大, 评价西北地区粮食安全生产现状及精准识别其主要障碍因子对保障该区农业可持续发展有重要意义。[方法] 基于熵权TOPSIS模型和障碍度模型, 构建粮食安全综合性评价指标体系, 评价西北地区粮食安全现状, 诊断提高粮食安全现状障碍因子, 提出提高西北地区粮食安全现状的关键措施。[结果] 1) 西北地区粮食产量整体呈上升趋势, 其主要粮食作物分别为小麦、玉米、稻谷、豆类、薯类、青稞, 合计占该区粮食产量的97.9%; 2022年西北地区粮食产量为4 859.5万t, 占全国粮食产量的7.1%; 2) 西北地区农业用水总量占用水总量的85.9%, 水资源开发利用率为36.6%, 较全国水资源开发利用率高76.0%, 其中, 甘肃、宁夏、新疆水资源开发利用超过国际水资源开发利用通用警戒线40%。3) 新疆粮食安全现状最好, 其次为青海、陕西、甘肃、宁夏。西北五省区粮食安全障碍因子不一, 总体上, 资源禀赋、有效灌溉率、农业水资源利用效率是影响该区粮食安全的主要障碍因子。[结论] 西北地区水资源极度缺乏, 且水资源开发利用率高, 需合理控制耕地面积, 优化作物种植结构, 推广滴灌、喷灌等高效节水灌溉技术, 提高有效灌溉面积和农业水资源利用效率, 拓宽农业用水来源, 采用跨区域生态补偿等综合手段, 实现该区域水资源可持续利用与粮食安全。

关键词: 西北地区; 粮食安全; 熵权TOPSIS模型; 障碍度模型; 障碍因子

中图分类号: TV213.4; F326.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)03-0424-12

Assessment and Obstacle Factor Analysis of Food Security in Northwest China

BAI Fangfang¹, XIAO Yatao², ZHOU Shumei³, GUO Wei^{1,4}, MA Chunya¹, QIAO Dongmei¹

(1. Institute of Farmland Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

3. Henan Zhumadian Ecological Environment Monitoring Center, Zhumadian, Henan 463003, China;

4. Water Environment Factor Risk Assessment Laboratory of Agricultural Products Quality and Safety, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xinxiang, Henan 453002, China)

Abstract: [Objective] Northwest China is a crucial grain production region in China and bears significant responsibility for ensuring food security. Evaluating the current situation of food security and accurately identifying its main obstacle factors in this region are of great importance for guaranteeing sustainable agricultural development. [Methods] Based on the entropy-weighted TOPSIS model and the obstacle degree model, a comprehensive evaluation index system for food security was constructed. The current status of food security in northwest China was assessed, the key obstacle factors that hinder its improvement were diagnosed, and key measures for enhancing food security in the region were proposed. [Results] 1) The grain output in northwest China showed an overall upward trend. The main grain crops were wheat, maize, rice, legumes, potatoes, and highland barley, which together accounted for 97.9% of the region's total grain output. In 2022, the grain

收稿日期: 2025-11-29

修回日期: 2026-01-27

录用日期: 2026-02-05

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-03-03

资助项目: 河南省科技攻关项目(252102320237); 河南科技智库调研课题项目(HNKJZK-2025-82B); 中国农科院科技创新工程重大任务项目(CAAS-ZDRW202201)

第一作者: 白芳芳(1986—), 女, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事农业水土资源与环境研究。E-mail: baiffang0921@163.com

通信作者: 乔冬梅(1978—), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业水土资源与水环境研究。E-mail: qiaodongmei78@126.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

output in northwest China reached 48.595 million tons, accounting for 7.1% of China's total grain production. 2) Agricultural water use accounted for 85.9% of the total water consumption in the region. The water resource development and utilization rate was 36.6%, which was 76.0% higher than China's average rate. Notably, the water resource development and utilization rates in Gansu, Ningxia, and Xinjiang exceeded the internationally recognized warning threshold of 40%. 3) Xinjiang exhibited the best food security, followed by Qinghai, Shaanxi, Gansu, and Ningxia. The constraint factors for food security differed among the five northwestern provinces. Overall, resource endowment, effective irrigation rate, and agricultural water use efficiency were the main obstacle factors affecting food security in this region. [Conclusion] Northwest China faces extreme water scarcity and a high water resource development and utilization rate. It is necessary to rationally control cultivated land area, optimize crop planting structure, promote high-efficiency water-saving irrigation technologies (e.g., drip and sprinkler irrigation), increase effective irrigated area and agricultural water use efficiency, broaden water sources for agriculture, and adopt cross-regional ecological compensation to achieve sustainable water resource utilization and food security in this region.

Keywords: northwest China; food security; entropy-weighted TOPSIS model; obstacle degree model; obstacle factors

Received: 2025-11-29

Revised: 2026-01-27

Accepted: 2026-02-05

Online(www.cnki.net): 2026-03-03

西北地区在我国占有重要战略地位,但水资源极度贫乏^[1];该区生态环境脆弱,干旱少雨,荒漠化土地面积约占全国的56%^[2-3];水资源短缺和土地退化是制约该地区粮食生产潜力开发的关键自然因素^[4]。全球变暖严重影响西北地区水资源和生态系统稳定性,气候变化导致西北干旱区主要水文要素波动增大,水资源供应的稳定性显著降低^[5]。水资源和土地资源是影响我国粮食安全的两大刚性约束,粮食安全与水资源的可持续利用密切相关^[6],农业水土资源匹配失衡给西北地区粮食安全带来极大威胁^[7]。因此,探索西北地区粮食安全现状及障碍因子对于保障区域粮食安全、促进农业可持续发展、应对人口和经济发展压力、增强农业抗灾减灾能力有重要意义。

关于西北地区农业水资源利用现状及水资源-能源-粮食协同关系已开展了一些研究。已有研究^[8]表明,2011—2020年西北地区农业水资源利用效率有所提升,系统内连接强度和紧密度增强,需加强五省协调合作,发挥核心省份带动作用,促进水资源、经济与技术要素流动,实现区域均衡发展。在全球变暖背景下,气温上升将进一步推高各行业用水需求,加剧干旱化趋势,可能引发更严重的水资源危机与生态退化,因而有必要将西北地区灌溉总面积控制在300万 hm^2 ,并推广节水灌溉与作物结构优化,增强水资源管理的适应能力^[9]。该区农业干旱脆弱性在2010—2020年虽整体下降,但区域差异扩大,呈现“两极”特征,2015年后农业干旱脆弱重心逐渐南移,

形成辐射格局,至2020年热点区已转移至甘肃和青海南部,冷点区则集中于新疆北部,需强化热点区域干旱监测预警,以保障粮食安全与水资源的可持续利用^[10]。面对高水资源压力及未来粮食种植面积可能持续增加的趋势,应合理控制耕地规模、优化作物布局并适度发展旱作农业,推动构建丝路经济带虚拟水流动机制,缓解区域水压力^[11]。从系统协同角度看,水资源消耗是水-能-粮复杂系统协同演进的核心变量,必须坚持“以水定产、量水发展”,因地制宜布局粮食与能源产业规模^[12]。2011—2018年,水资源与能源子系统共同主导西北地区水-能-粮系统的协同演化,粮食子系统处于从属地位,五省协同得分整体上升且省际差距缩小,其中陕西、青海、甘肃高于区域平均值,宁夏逐步接近平均值水平,新疆仍为最低^[13]。目前,西北地区水-能-粮系统整体耦合协调程度仍然不高,水资源与能源是主要制约因素,预计2023—2030年系统仍将延续当前发展特征,实现协调提升需更长时间^[14]。在作物水足迹方面,2000—2018年西北地区农作物生产水足迹呈波动上升趋势,虚拟水流出规模持续扩大,亟需将作物结构优化、虚拟水贸易与跨流域调水相结合,统筹实体水-虚拟水循环,缓解供需矛盾^[15]。基于多目标优化的作物布局研究^[16]表明,三大粮食作物面积碳足迹上升而产量碳足迹下降,绿水足迹高于全国水平,在保障粮食安全前提下,适当扩大小麦面积(+6.7%)、压缩玉米(-5.8%)与水稻(-8.0%)种植,可在经济、资源与生态方面实现综合效益提升。此外,西北地区

地下水储量正以 0.25 cm/a 的速度持续枯竭,地下水干旱与气象干旱显著相关区域占比达 59.3%^[17],而农业灌溉用水反弹效应高达 340%,单位面积产量提升与种植规模扩大是主要驱动因素,因此,需避免片面追求单产最大化,合理推行亏缺灌溉并科学控制灌溉农业发展规模^[18]。

综上可知,西北地区粮食生产面临水资源短缺、灌溉效率低、地下水枯竭、气候变化加剧干旱、水-能源-粮食系统协同性差等问题,关于西北地区粮食安全综合评价的研究相对薄弱,影响西北地区粮食安全的关键因子不明。为此,基于粮食安全内涵及相关的研究理论,从生产安全、生产投入、资源利用效率、资源禀赋、生产效益方面构建西北地区粮食安全综合评价指标体系,基于障碍度模型诊断影响各省区粮食安全的障碍因子,提出保障各省区粮食安全的关键措施。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西北地区包括陕西、甘肃、青海三省及宁夏回族自治区(以下简称宁夏)和新疆维吾尔自治区(以下简称新疆),总面积为 $311.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全国总面积的 32.4%。该区地形复杂多样,深居内陆,距海遥远,该区域以温带大陆性及高寒气候为主,冬寒夏热、降水量少、蒸发量高,水资源严重匮乏且时空分布不均,主要产粮省份(陕西、甘肃、新疆)以占西北地区 67.3% 水资源量生产西北地区 90.1% 的粮食。该地区 2013—2022 年降水量年平均值为 372.3 mm,较全国同期年平均低 44.5%,且蒸发强烈,降水多以大雨或暴雨形式出现,水土流失严重,且水土资源在空间上极不匹配,地均水资源量为全国的 47.7%。西北地区以占全国 7.7% 的粮食播种面积生产全国 7.1% 的粮食,2022 年西北地区新增粮食产量占全国新增粮食产量的 39.2%,是我国重要的粮食生产后备基地,对保障国家粮食安全意义重大。近年来,西北地区大量的粮食生产给该区域脆弱的生态环境带来巨大压力,水资源成为制约该区域粮食安全的主要瓶颈。

1.2 研究方法

1.2.1 熵权 TOPSIS 模型 熵权 TOPSIS 模型的分析流程可分为 3 个关键步骤:首先基于熵权法确定各指标权重,其次对原始数据进行加权处理,最终运用 TOPSIS 模型对加权后的数据进行综合评价。

熵权法克服 AHP 法、专家打分法等主观性的缺点,常用于确定各指标权重^[19-20],具体计算步骤为:

1) 初始指标规范化处理,计算方法为:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个评价对象的第 j 个指标; r_{ij} 为 x_{ij} 的规范化值; $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$, 本文中 $m=5, n=24$ 。

2) 指标熵值计算,计算方法为:

$$e_j = -\frac{\sum_{i=1}^m r_{ij} \times \ln r_{ij}}{\ln m} \quad (2)$$

式中: e_j 为第 j 个指标的熵值。

3) 计算指标权重,计算方法为:

$$\omega_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (3)$$

式中: ω_j 为第 j 个指标的权重,即熵权。

TOPSIS^[21](逼近理想解排序法)是一种多指标综合评价方法,其核心思想是通过计算各方案与理想最优解及最劣解的相对距离来实现排序。该方法具有计算灵活、结果可靠的特点,在粮食安全评价领域应用广泛^[22]。主要计算步骤为:

1) 评价指标归一化处理。

正向指标归一化处理公式:

$$P_{ij} = [x_{ij}^* - x_{\min j}] / [x_{\max j} - x_{\min j}] \quad (4)$$

逆向指标归一化处理公式:

$$P_{ij} = [x_{\max j} - x_{ij}^*] / [x_{\max j} - x_{\min j}] \quad (5)$$

式中: $x_{\min j}$ 为样本集中第 j 个指标的最小值; $x_{\max j}$ 为样本集中第 j 个指标的最大值。

得到归一化矩阵 $P = [P_{ij}]_{m \times n}$ 。

2) 建立加权决策评价矩阵。

权重向量 W 由指标权重 ω_j 组成,基于归一化矩阵 P ,得到归一化加权矩阵 Z ,计算方法为:

$$Z = P \times W = [Z_{ij}]_{m \times n} \quad (6)$$

3) 评价指标归一化后的最优、最劣向量分别为:

$$Z^+ = (Z_{\max 1}, Z_{\max 2}, \dots, Z_{\max n}) \quad (7)$$

$$Z^- = (Z_{\min 1}, Z_{\min 2}, \dots, Z_{\min n}) \quad (8)$$

第 i 个评价对象与最优、最劣方案的距离分别为:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{\max j} - Z_{ij})^2} \quad (9)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{\min j} - Z_{ij})^2} \quad (10)$$

第 i 个评价对象与最优方案的接近程度(C_i)为:

$$C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-) \quad (11)$$

相对贴近度(C_i)取值 0~1, C_i 值越大则评价对象水平越高, C_i 值越低则表示评价对象水平越低。

1.2.2 障碍度模型 采用障碍度模型可有效诊断提高西北五省(区)粮食安全状况的障碍因子。具体计算步骤^[23-24]为:

1)各评价指标对总目标的贡献程度(因子贡献度)可用权重(w_j)表示;

2)计算指标偏离度(I_{ij}): $I_{ij}=1-x_{ij}$;

3)计算各评价指标的障碍度(H_{ij}): $H_{ij}=I_{ij} \times w_j / \sum_{j=1}^n I_{ij} \times w_j$ 。

1.2.3 数据来源 选取24个代表性指标对西北地区粮食安全进行综合评价。数据主要来源于《中国水资源公报》^[25]《中国统计年鉴》^[26]及各省区统计年鉴及水资源公报等。

1.3 数据统计与分析

数据处理和作图采用Excel 2010软件;方差分析和相关分析采用SPSS 19软件进行。

2 结果与分析

2.1 西北地区粮食生产状况

2.1.1 西北地区粮食生产指标年际变化 由图1可知,西北地区农作物总播种面积整体呈上升趋势,年平均增长率为1.29%;2022年农作物播种面积较2003年增加29.16%。粮食作物播种面积呈波动上升趋势,2016年粮食作物播种面积最大为 $9\,236.1 \times 10^3 \text{ hm}^2$,之后呈先降低后增加趋势,年平均增长率为0.64%;2022年粮食作物播种面积较2003年增加13.59%。西北地区粮食产量整体呈上升趋势,2015年粮食产量达到次高峰为4731.21万t,之后粮食产量略降低后又增加,2022年粮食产量最高,年平均增长率为2.63%;2022年粮食产量较2003年增加57.37%。西北地区粮食作物单位面积产量整体呈增加趋势,年平均增长率为1.53%;2022年粮食作物单位面积产量较2003年增加34.49%。

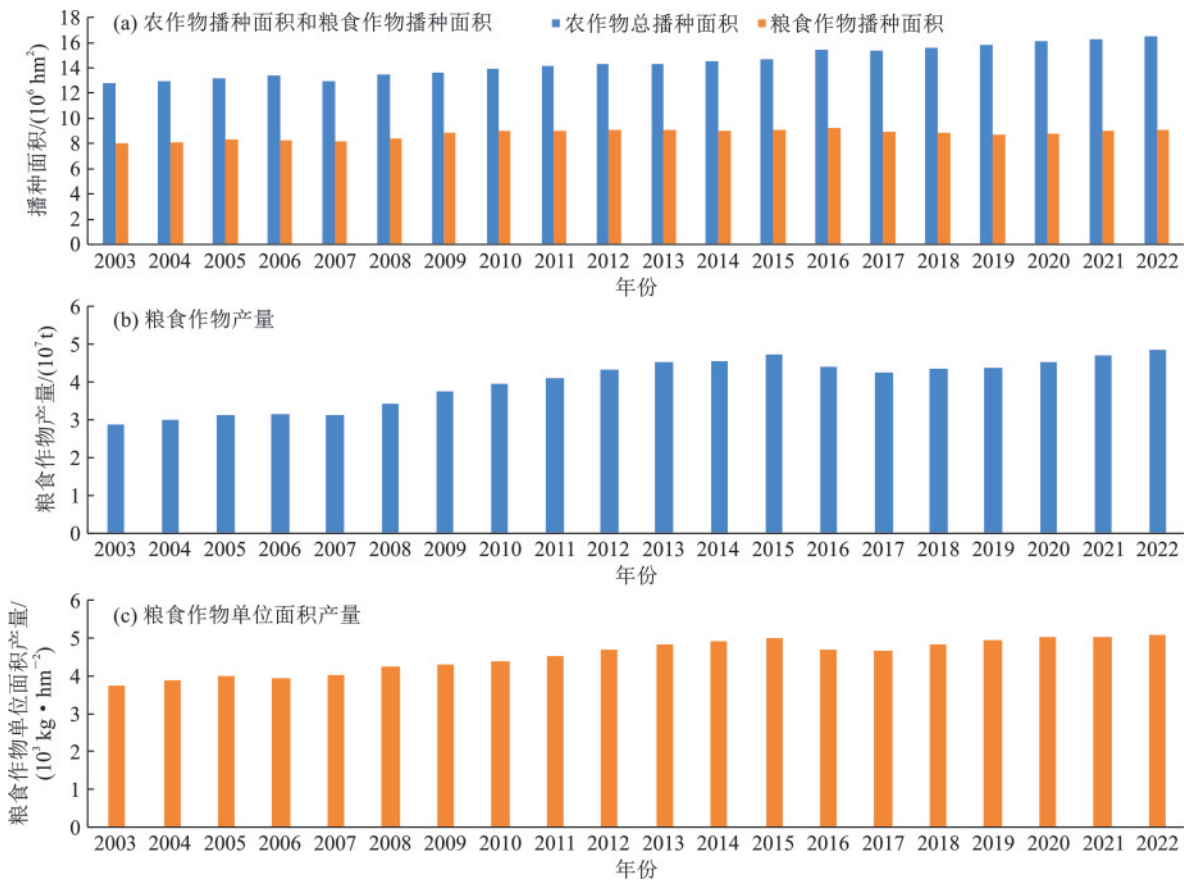


图1 西北地区农作物总播种面积、粮食作物播种面积、粮食产量、粮食单位面积产量

Fig.1 Total sown area of crops, sown area of grain crops, grain output, and grain yield per unit area in northwest China

2.1.2 西北地区主要粮食生产现状分析 由图1可知,2022年,西北地区农作物总播种面积为 $16\,543.0 \times 10^3 \text{ hm}^2$,占全国农作物总播种面积的9.7%;粮食作物播种面积为 $9\,146.9 \times 10^3 \text{ hm}^2$,占全国粮食作物播种面积的7.7%;夏收粮食播种面积为 $3\,231.6 \times 10^3 \text{ hm}^2$,占全国夏收粮食播种面积的12.2%;秋收粮食播种面积为 $5\,915.3 \times 10^3 \text{ hm}^2$,占全国秋收粮食播种面积的

6.8%;小麦播种面积为 $3\,033.7 \times 10^3 \text{ hm}^2$,占全国小麦播种面积的12.9%;玉米播种面积为 $3\,796.7 \times 10^3 \text{ hm}^2$,占全国玉米播种面积的8.8%。西北地区粮食产量为4859.5万t,占全国粮食产量的7.1%;夏收粮食产量为1501.2万t,占全国夏收粮食产量的10.2%;秋粮产量为3358.3万t,占全国秋粮产量的6.6%;小麦产量为1444.3万t,占全国小麦产量的10.5%;玉

米产量为2 653.0万t,占全国玉米产量的9.6%。西北地区粮食单位面积产量为5 080.3 kg/hm²,为全国粮食单位面积产量的87.6%;夏收粮食单位面积产量为4 276.7 kg/hm²,为全国夏收粮食单位面积产量的77.0%;秋粮单位面积产量为5 544.7 kg/hm²,为全国秋粮单位面积产量的94.5%;小麦单位面积产量为4 232.5 kg/hm²,为全国小麦单位面积产量的72.3%;玉米单位面积产量为6 982.5 kg/hm²,为全国玉米单位面积产量的108.5%;提高粮食单位面积产量是保障西北地区粮食安全的重要举措。

西北五省区主要粮食作物分别为小麦、玉米、稻谷、豆类、薯类、青稞,6种作物合计产量分别占陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆粮食产量的97.2%、96.7%、99.1%、96.9%、99.4%,合计占该区粮食产量的97.9%,6种作物分别占该区粮食产量的29.7%、54.6%、2.7%、2.0%、8.4%、0.5%。图3为2022年西北地区主要粮食作物播种面积、粮食作物产量和单位面积粮食产量。陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆主要粮食作物播种面积分别为2 798.2×10³、2 552.0×10³、298.6×10³、584.5×10³、2 411.4×10³ hm²,分别占西北五省区主要粮食作物播种面积的32.4%、29.5%、3.4%、6.8%、27.9%。陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆主要粮食作物产量分别为1 261.4、1 222.7、106.3、364.0、1 802.7万t,分别占西北五省区主要粮食作物产量的26.5%、25.7%、2.2%、7.7%、37.9%。

由图2可知,陕西省玉米、小麦、薯类、豆类、稻谷、青稞播种面积占主要粮食作物播种面积的42.5%、34.2%、11.6%、7.9%、3.8%、0,主要种植粮食作物为玉米和小麦,占全省主要粮食作物播种面积的76.7%;陕西省玉米、小麦、薯类、豆类、稻谷、青稞产量占主要粮食产量的48.9%、34.1%、8.3%、2.9%、

5.8%、0,主要粮食作物玉米和小麦总产量占全省主要粮食作物产量的83%。甘肃省玉米、小麦、薯类、豆类、稻谷、青稞播种面积占主要粮食作物播种面积的42.1%、29.0%、22.6%、6.2%、0.1%、0,主要种植粮食作物为玉米和小麦,占全省主要粮食作物播种面积的71.1%;甘肃省玉米、小麦、薯类、豆类、稻谷、青稞产量占主要粮食产量的54.3%、24.3%、18.2%、3.1%、0.1%、0,主要粮食作物玉米和小麦产量占全省主要粮食作物产量的78.6%。青海省小麦、青稞、薯类、玉米、豆类、稻谷播种面积占主要粮食作物播种面积的33.9%、31.1%、22.7%、7.6%、4.7%、0,主要种植粮食作物为小麦、青稞和薯类,占全省主要粮食作物播种面积的87.7%;青海省小麦、青稞、薯类、玉米、豆类、稻谷产量占主要粮食产量的34.7%、22.1%、26.0%、13.9%、3.3%、0,主要粮食作物小麦、薯类和青稞总产量占全省主要粮食作物产量的82.8%。宁夏玉米、小麦、薯类、稻谷、豆类、青稞播种面积占主要粮食作物播种面积的62.6%、13.9%、13.8%、5.0%、4.7%、0,主要种植粮食作物为玉米、小麦、薯类,占全省主要粮食作物播种面积的90.3%;宁夏玉米、小麦、薯类、稻谷、豆类、青稞产量占主要粮食产量的76.0%、7.5%、8.9%、6.5%、1.1%、0,主要粮食作物玉米、小麦、薯类总产量占全省主要粮食作物产量的92.4%。新疆小麦、玉米、豆类、稻谷、薯类、青稞播种面积占主要粮食作物播种面积的47.8%、47.5%、2.2%、1.5%、1.0%、0,主要种植粮食作物为小麦、玉米,占全省主要粮食作物播种面积的95.3%;新疆小麦、玉米、豆类、稻谷、薯类、青稞产量占主要粮食产量的36.3%、59.9%、0.8%、1.9%、1.1%、0,主要粮食作物玉米和小麦总产量占全省主要粮食作物产量的96.2%。

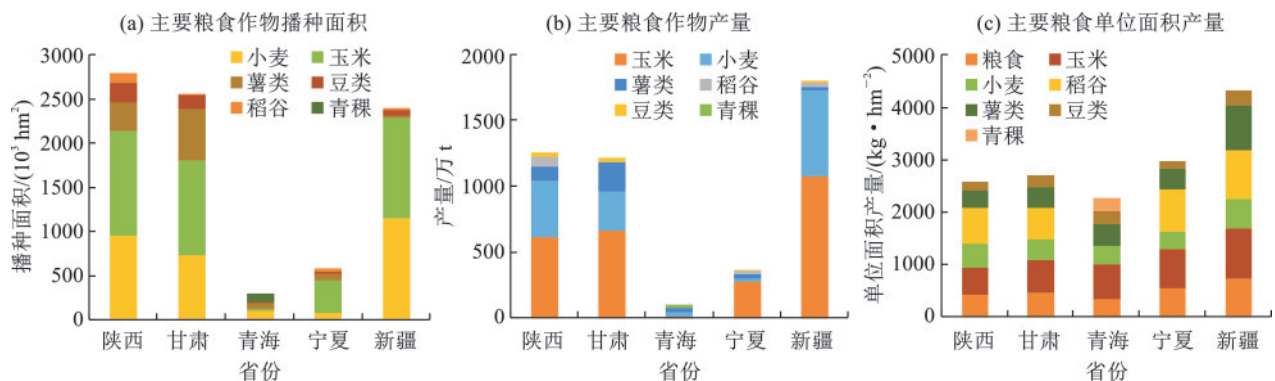


图2 西北地区主要粮食作物播种面积、主要粮食作物产量、主要粮食作物单位面积产量

Fig.2 Sown area, grain yield, and grain yield per unit area of major grain crops in northwest China

新疆粮食单位面积产量最高为7 451.0 kg/hm²,较陕西、甘肃、青海、宁夏分别高73.2%、59.0%、110.8%、37.3%。新疆玉米单位面积产量最高为9 432.1

kg/hm²,较陕西、甘肃、青海、宁夏分别高81.7%、52.6%、44.2%、24.7%。新疆小麦单位面积产量最高为5 664.8 kg/hm²,较陕西、甘肃、青海、宁夏分别高

26.3%、85.6%、104.4%、122.3%。新疆薯类单位面积产量最高为 8 498.4 kg/hm²,较陕西、甘肃、青海、宁夏分别高 163.2%、119.9%、109.0%、110.4%。新疆稻谷单位面积产量最高为 9 425.2 kg/hm²,较陕西、甘肃、宁夏分别高 36.4%、56.3%、17.0%。新疆豆类单位面积产量最高为 2 764.9 kg/hm²,较陕西、甘肃、青海、宁夏分别高 65.6%、17.6%、12.3%、95.0%。因此,西北地区新疆单位面积主要粮食作物产量最高。

2.2 西北地区用水现状与需求分析

由表 1 可知,西北地区水资源总量多年平均值为 2 385.5×10⁸ m³,仅占全国水资源总量多年平均值的 8.2%,是我国最缺水的区域。西北地区用水总量多年平均值为 872.5×10⁸ m³,农业用水总量多年平均值为 749.7×10⁸ m³,占用水总量的 85.9%;有效灌溉面积多年平均值为 8 537.9×10³ hm²,占全国有效灌溉面积的 12.7%,仅占西北五省区农作物总播种面积的 55.1%;人均综合用水量多年平均值为 894.4 m³,较全国平均值高 107.0%;西北地区旱灾受灾面积 1 098.4×10³ hm²,占全国旱灾受灾面积的 12.6%;西北地区降水量多年平均值为 372.3 mm,潜在蒸散量是降水量的 5 倍以上;西北地区水资源开发利用率

多年平均值为 36.6%,较全国水资源开发利用率多年平均值高 76.0%,陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆水资源开发利用率多年平均值分别为 21.5%、44.0%、3.3%、636.2%、63.6%,较全国水资源开发利用率多年平均值分别高 3.4%、111.5%、- 84.1%、2 958.7%、205.8%,其中甘肃、宁夏、新疆水资源利用率超过了国际水资源开发利用率通用警戒线 40%。

2022 年西北地区耕地实际灌溉平均用水量为 6 886.5 m³/hm²,较全国平均值高 27.2%;农田灌溉水有效利用系数 0.563,较全国低 1.5%;2013—2022 年,陕西省农业用水总量平均值为 57.0×10⁸ m³,甘肃省农业用水总量平均值为 90.5×10⁸ m³,青海省农业用水总量平均值为 19.4×10⁸ m³,宁夏回族自治区农业用水总量平均值为 58.5×10⁸ m³,新疆维吾尔自治区农业用水总量平均值为 524.3×10⁸ m³,分别占各省区用水总量的 62.1%、78.6%、74.9%、85.4%、91.8%,各省区农业用水占比均较高。2022 年陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆农田灌溉水有效利用系数分别为 0.583、0.578、0.506、0.570、0.579,虽已取得一定进步,但与国际先进水平农田灌溉水有效利用系数 0.7~0.8 相比仍有较大提升空间。

表 1 西北地区用水现状
Table 1 Current status of water use in northwest China

地区	2013—2022 年平均值					2022 年				
	水资源总量/ (10 ⁸ m ³)	用水总量/ (10 ⁸ m ³)	农业用水总量/ (10 ⁸ m ³)	有效灌溉面积/ (10 ³ hm ²)	人均综合用水量/ m ³	降水量/ mm	旱灾面积/ (10 ³ hm ²)	水资源开发利用率/%	耕地实际灌溉平均用水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	农田灌溉水有效利用系数
陕西	426.4	91.8	57.0	1 243.9	238.3	724.6	352.7	21.5	4 012.5	0.583
甘肃	261.7	115.2	90.5	1 319.0	447.3	303.4	403.7	44.0	6 270.0	0.578
青海	788.8	25.9	19.4	206.2	438.4	342.3	60.6	3.3	6 802.5	0.506
宁夏	10.8	68.5	58.5	526.9	998.5	317.5	139.3	636.2	9 187.5	0.570
新疆	897.8	571.2	524.3	5 241.9	2 349.4	173.7	142.1	63.6	8 157.0	0.579
西北	2 385.5	872.5	749.7	8 537.9	894.4	372.3	1 098.4	36.6	6 886.5	0.563
全国	28 925.0	6 023.3	3 759.1	67 492.1	432.1	670.3	8 686.7	20.8	5 412.0	0.572

2023 年陕西省河流水质总体优, I~III 类优良水质断面占国控断面的 97.8%, IV~V 类水质断面占 2.2%;城市及县级集中式生活饮用水水源达标率 100%;上半年农田灌溉水监测断面达标率 81.3%,下半年达标率 93.8%,主要超标指标为粪大肠菌群、悬浮物和 pH。2023 年甘肃省地表水国控断面水质优于 III 类比例为 95.9%, IV~V 类水质断面占 4.1%;51 个地下水国控点位中, I~IV 类水质点位占比为 80%, V 类占 20%,主要超标指标为氯化物和钠。在不考虑天然背景值影响下,饮用水水质总体达标。2022 年青海省布设的国省控水质监测断面显示地表

水水质优良,全省 27 个国家地下水环境质量监测考核点水质状况稳定。2023 年宁夏地表水环境质量稳定,全区 20 个地表水国家考核断面水质优良比例为 80%;监测的湖库中沙湖为 IV 类水质,其余均达到或优于 III 类;主要入黄排水沟 II~III 类水质断面占 68.5%, IV 类水质断面占 28.6%,劣 V 类水质断面占 2.9%;全区地下水水质为 I~IV 类点位占 71.4%, V 类占 28.6%。2023 年,新疆地表水监测的 243 个区控断面中, I~III 类水质断面占 91.4%; IV 类水质断面占 4.5%;劣 V 类水质断面占 4.1%,主要污染指标为化学需氧量、氯化物和总磷; I~III 类地下水水质监

测点占 65.1%，Ⅳ类地下水水质监测点 9.3%，Ⅴ类地下水水质监测点占 25.6%，主要超标指标为硫酸盐、氯化物、钠等；全区灌溉水水质监测点水质达标占 85.7%，水质超标监测点占 14.3%，主要超标指标为悬浮物、全盐量、氯化物。

综上可知，西北地区水资源极度缺乏，且水资源开发利用率高，但水质呈现“总体改善、局部恶化”的特点，因此需合理控制耕地面积，优化作物种植结构，适当发展旱作农业，提高农业水资源利用效率，从污染源头防控，跨区域生态补偿等综合手段，实现该区域水资源可持续利用与水环境质量提升，保障

该区域农业可持续发展。

2.3 西北地区粮食安全综合评价及障碍因子分析

2.3.1 西北地区粮食安全综合评价指标体系构建为提升粮食生产质量和效率，保障地区粮食安全，同时响应国家粮食安全战略，应对全球化挑战。结合西北地区水资源禀赋、粮食生产状况、经济和社会发展水平，根据粮食安全内涵及相关的研究理论，综合熵权 Topsis 模型特点，从生产安全、生产投入、资源利用效率、资源禀赋、生产效益共 5 个准则层共选取 24 个评价指标^[19, 22]，构成西北地区粮食安全综合评价指标体系(表 2)。

表 2 西北地区粮食安全综合评价指标体系

Table 2 Comprehensive evaluation index system for food security in northwest China

目标层	准则层	指标层	指标计算方法	属性		
生产安全	生产安全	农作物总播种面积/(10 ³ hm ²)		正向		
		粮食作物播种面积/(10 ³ hm ²)		正向		
		粮食产量/万 t		正向		
		粮食单位面积产量/(kg·hm ⁻²)		正向		
		夏收粮食单位面积产量/(kg·hm ⁻²)		正向		
		秋粮单位面积产量/(kg·hm ⁻²)		正向		
		农作物受灾面积/(10 ³ hm ²)		逆向		
		水灾受灾面积/(10 ³ hm ²)		逆向		
		旱灾受灾面积/(10 ³ hm ²)		逆向		
		粮食生产安全	生产投入	单位面积农用化肥施用折纯量/(kg·hm ⁻²)	农用化肥施用折纯量/农作物总播种面积	逆向
单位面积农用氮肥施用折纯量/(kg·hm ⁻²)	农用氮肥施用折纯量/农作物总播种面积			逆向		
单位面积农用复合肥施用折纯量/(kg·hm ⁻²)	农用复合肥施用折纯量/农作物总播种面积			逆向		
农业机械总动力/万 kW				正向		
地方财政农林水事务支出/亿元				正向		
农业气象观测业务站点个数/个				正向		
资源利用效率	资源利用效率			耕地实际灌溉平均用水量/(m ³ ·hm ⁻²)		逆向
				农田灌溉水有效利用系数		正向
				有效灌溉率/%	有效灌溉面积/总耕地面积	正向
				农业水资源利用效率系数/(kg·m ⁻³)	粮食产量/农业用水量	正向
资源禀赋	资源禀赋	地均水资源占有量/(m ³ ·hm ⁻²)	水资源总量/灌溉面积	正向		
		人均水资源量/(m ³ ·人 ⁻¹)		正向		
		降水量/mm		正向		
生产效益	生产效益	农村居民人均可支配收入/元		正向		
		农林牧渔业增加值/亿元		正向		

注：指标属性中“正向”表示数值越大越好；“逆向”表示数值越小越好。

2.3.2 西北地区粮食安全综合评价指标权重 基于西北地区粮食安全评价体系，运用熵权法计算得出各指标权重分布(表 3)。由表 3 可知，指标熵值与权重呈显著负相关，其中地均水资源占有量(9.2%)贡献度最高，反映出该指标信息价值最大，说明其是影响西北地区粮食安全的主要因子，其次是人均水资源量、有效灌溉率、耕地实际灌溉平均用水量，单位

面积农用复合肥施用折纯量、旱灾受灾面积、农村居民人均可支配收入、夏收粮食单位面积产量、水灾受灾面积、农田灌溉水有效利用系数权重均较小。综上所述可知，地均水资源占有量是影响西北地区粮食安全的基本因素。

2.3.3 西北地区粮食安全评价指标障碍度 运用障碍度模型进行障碍因子诊断有利于识别西北地区粮

食安全的主要障碍因子。由图 3 可知,陕西省生产安全准则层障碍度最大为 33.92%,其次是资源禀赋、生产投入障碍度;陕西省农业水资源利用效率和农业生产效益较高,故资源利用效率及生产效益障碍度较低。甘肃省资源禀赋障碍度最大为 33.57%,其次为生产安全障碍度和资源利用效率障碍度。青海生产安全障碍度最大为 38.79%,其次为资源利用效率障碍度和生产投入障碍度。宁夏资源禀赋障碍度最大为 27.32%,生产效益障碍度最低为 6.95%,其他障碍度相差不大。新疆生产效益障碍度为 0,但资源禀赋障碍度最大为 46.97%。

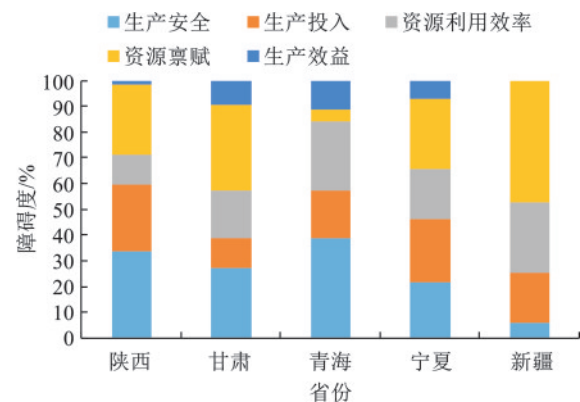


图 3 西北地区粮食安全评价指标准则层障碍度
Fig.3 Obstacle degrees of evaluation criterion layers for food security in northwest China

表 3 熵值法计算指标权重

Table 3 Index weights calculated using entropy method

指标	信息熵值 (e)	信息效用值(d)	权重系数 (w)/%
受灾面积	0.776 9	0.223 1	3.77
水灾受灾面积	0.863 1	0.136 9	2.31
旱灾受灾面积	0.842 2	0.157 8	2.67
单位面积农用化肥施用折纯量	0.794 4	0.205 6	3.47
单位面积农用氮肥施用折纯量	0.752 3	0.247 7	4.19
单位面积农用复合肥施用折纯量	0.838 5	0.161 5	2.73
耕地实际灌溉平均用水量	0.677 3	0.322 7	5.45
农作物总播种面积	0.765 1	0.234 9	3.97
粮食作物播种面积	0.785 0	0.215 0	3.63
粮食产量	0.791 0	0.209 0	3.53
粮食单位面积产量	0.767 0	0.233 0	3.94
夏收粮食单位面积产量	0.859 8	0.140 2	2.37
秋粮单位面积产量	0.734 4	0.265 6	4.49
农业机械总动力	0.749 8	0.250 2	4.23
地方财政农林水事务支出	0.736 6	0.263 4	4.45
农业气象观测业务站点个数	0.812 1	0.187 9	3.18
农田灌溉水有效利用系数	0.869 2	0.130 8	2.21
有效灌溉率	0.626 2	0.373 8	6.32
农业水资源有效利用系数	0.719 8	0.280 2	4.74
地均水资源占有量	0.456 0	0.544 0	9.20
人均水资源量	0.571 8	0.428 2	7.24
降水量	0.742 4	0.257 6	4.36
农村居民人均可支配收入	0.854 2	0.145 8	2.46
农林牧渔业增加值	0.699 3	0.300 7	5.08

由表 4 可知,陕西省生产安全准则层中,秋粮单位面积产量障碍度最大,其次是农作物受灾面积、粮食单位面积产量、旱灾受灾面积;生产投入准则层中,单位面积农用化肥施用折纯量、单位面积农用氮肥施用折纯量、单位面积农用复合肥施用折纯量障碍度均较高;资源利用效率准则层中主要是有效灌溉率的障碍度,其他因子障碍度为 0;资源禀赋准则层中地均水资源占有量和人均水资源量障碍度较高,降水量障碍度为 0;生产效益准则层障碍度较低为 1.19。因此,陕西省粮食安全主要障碍因子为地均水资源占有量、人均水资源量、有效灌溉率。

甘肃省生产安全准则层中,农作物受灾面积障碍度最大,其次是秋粮单位面积产量、粮食单位面积产量;资源利用效率准则层中主要是有效灌溉率的障碍度(10.30);资源禀赋准则层中地均水资源占有量和人均水资源量障碍度较高,降水量障碍度较低;生产投入和生产效益准则层障碍度均较低。因此,甘肃省粮食安全主要障碍因子为地均水资源占有量、人均水资源量、有效灌溉率。

青海省生产安全准则层中,秋粮单位面积产量障碍度最大,其次为农作物总播种面积、粮食单位面积产量、粮食作物播种面积;资源利用效率准则层中有效灌溉率的障碍度最大,其次是农业水资源利用效率系数、耕地实际灌溉平均用水量;生产投入准则层中,地方财政农林水事务支出、农业机械总动力障碍度较大,单位面积农用化肥施用折纯量、单位面积农用氮肥施用折纯量、单位面积农用复合肥施用折纯量障碍度为 0;生产效益准则层中,农林牧渔业增加值障碍度较大;资源禀赋准则层障碍度较低。因此,青海省粮食安全主要障碍因子为有效灌溉率、农林牧渔业增加值、秋粮单位面积产量、地方财政农林水事务支出、农业机械总动力。

表4 西北地区粮食安全评价指标障碍度
Table 4 Obstacle degrees of evaluation indexes for food security in northwest China

准则层	障碍因子	陕西	甘肃	青海	宁夏	新疆
生产安全	农作物总播种面积	2.74	2.88	6.92	4.90	0
	粮食作物播种面积	0	0.75	6.33	4.27	2.06
	粮食产量	1.91	2.00	6.16	4.09	0
	粮食单位面积产量	5.67	4.91	6.87	2.80	0
	夏收粮食单位面积产量	1.01	1.32	4.13	1.38	0
	秋粮单位面积产量	6.93	5.72	7.83	3.73	0
	受灾面积	6.75	5.76	0.33	0	3.47
	水灾受灾面积	4.13	1.45	0.22	0.27	0
生产投入	旱灾受灾面积	4.78	2.81	0	0.28	0.80
	单位面积农用化肥施用折纯量	6.21	1.76	0	2.88	7.11
	单位面积农用氮肥施用折纯量	7.50	2.11	0	3.34	9.95
	单位面积农用复合肥施用折纯量	4.89	0.77	0	2.36	2.38
	农业机械总动力	1.77	1.62	7.38	5.45	0
	地方财政农林水事务支出	2.45	2.21	7.43	6.12	0
	农业气象观测业务站点个数	3.28	2.89	3.86	4.37	0
	耕地实际灌溉平均用水量	0	4.75	6.50	7.32	14.41
资源利用效率	农田灌溉水有效利用系数	0	0.25	3.85	0.51	0.30
	有效灌溉率	11.31	10.30	9.47	6.37	0
	农业水资源有效利用系数	0	3.16	7.08	5.32	12.54
资源禀赋	地均水资源占有量	15.40	15.58	0	12.64	21.70
	人均水资源量	12.10	11.93	0	9.95	13.75
	降水量	0	6.06	4.74	4.72	11.53
生产效益	农村居民人均可支配收入	0.85	4.34	2.05	0.09	0
	农林牧渔业增加值	0.34	4.66	8.86	6.85	0

宁夏生产安全准则层中,农作物总播种面积、粮食作物播种面积、粮食产量障碍度较大;生产投入准则层中,地方财政农林水事务支出、农业机械总动力、农业气象观测业务站点个数障碍度较大;资源利用效率准则层中耕地实际灌溉平均用水量、有效灌溉率、农业水资源利用效率系数的障碍度较大;资源禀赋准则层障碍度最高,地均水资源占有量、人均水资源量障碍度较大;生产效益准则层中,农林牧渔业增加值障碍度较大。因此,宁夏粮食安全主要障碍因子为地均水资源占有量、人均水资源量、耕地实际灌溉平均用水量。

新疆生产安全准则层中,农作物受灾面积、粮食作物播种面积障碍度较大;生产投入准则层中,单位面积农用氮肥施用折纯量、单位面积农用化肥施用折纯量障碍度较大;资源利用效率准则层中耕地实际灌溉平均用水量、农业水资源利用效率系数的障碍度较大;资源禀赋准则层障碍度最高,地均水资源占有量、人均水资源量、降水量障碍度均较大;生产

效益准则层障碍度为0。因此,新疆粮食安全主要障碍因子为地均水资源占有量、耕地实际灌溉平均用水量、人均水资源量、农业水资源利用效率系数、降水量、单位面积农用氮肥施用。

2.3.4 西北地区粮食安全评价结果 由表5可知,五省区的粮食安全水平存在明显差异。新疆粮食安全评价的相对贴适度最高,达到0.523,表明其粮食安全综合状况在西北地区最为理想;青海粮食安全评价的相对贴适度为0.491,排名第2;陕西和甘肃粮食安全评价的相对贴适度分别为0.437和0.397,排名第3和第4;而宁夏粮食安全评价的相对贴适度最低,仅为0.284,表明其粮食安全水平有待提升。从区域整体来看,西北地区的粮食安全水平呈“西高东低”的分布格局,与该地区的自然资源禀赋和农业生产条件基本吻合。新疆和青海凭借其相对优越的农业生产条件和水资源保障能力,粮食安全水平较高;而陕西、甘肃和宁夏则由于自然条件限制和农业发展水平等因素,粮食安全水平相对较低。

表5 西北地区粮食安全熵权TOPSIS评价

Table 5 Entropy-weighted TOPSIS evaluation of food security in northwest China

省区	正理想解距离(D^+)	负理想解距离(D^-)	相对贴近度(C)	排序结果
陕西	0.161	0.125	0.437	3
甘肃	0.154	0.101	0.397	4
青海	0.149	0.144	0.491	2
宁夏	0.185	0.073	0.284	5
新疆	0.138	0.151	0.523	1

3 讨论

西北地区作为我国重要的生态屏障和粮食生产基地,其粮食安全受水资源短缺、生态环境脆弱、农业投入不足等多重因素制约。本研究表明,2003—2022年西北地区粮食产量年均增长率为2.63%,2022年较2003年增加57.37%,但单位面积产量仅为全国平均水平的87.6%,表明增产主要依赖播种面积的扩大,与黄季焜^[27]的研究结论一致,即我国粮食增产长期依赖资源投入,粮食生产效率提升有限。

水资源禀赋(地均水资源占有量、人均水资源量)是制约西北粮食安全的核心因素,尤其在新疆、甘肃和宁夏表现突出。新疆尽管粮食单位面积产量较高(7 451.0 kg/hm²),但水资源开发利用率达63.6%,远超国际水资源开发利用通用警戒线(40%),与刘欢等^[28]提出的新疆地区水资源超载问题相符。应优化作物种植结构,大力推广膜下滴灌+水肥一体化技术,加强水资源精准管理,控制地下水开采,促进生态修复实现水资源的可持续性利用。甘肃地均水资源占有量和人均水资源量低、有效灌溉率低,与赵子萌等^[29]研究结论一致,表明该地区人均水资源生态承载力较低,长期处于水资源生态不可持续发展和易遭受恶化威胁的状态。因此,应构建“工程节水-农艺节水-管理节水”三位一体体系,重点发展集雨补灌、膜下滴灌等高效节水技术,推广抗旱品种与保护性耕作,建立水权交易市场,进而实现水资源优化配置与粮食稳产双赢。宁夏水资源开发利用甚至高达636.2%,主要依赖黄河过境水^[25],其粮食生产可持续性面临严峻挑战;未来需通过节水技术升级、产业转型和跨区域协作实现农业可持续发展;同时,气候变化可能导致水资源不确定性增加,需加强适应性管理。陕西省粮食安全的主要障碍因子包括地均水资源占有量、人均水资源量、受灾面积等,与郝雪纯等^[30]研究结论一致,主要是因为陕西省水资源时空分布不均,呈现“南多北少,夏丰冬枯”的典型特征^[31],作物关键生育期常遇春旱^[32],导致水资源利用

效率不足50%^[33]。因此,应大力推进高标准农田建设,通过土壤改良和节水灌溉提高秋粮单位面积产量;完善气象灾害预警系统,建立覆盖全省的农业保险体系;创新经营模式,培育新型农业经营主体;通过多维度协同措施,可显著增强陕西省粮食综合生产能力,确保区域粮食安全。此外,有效灌溉率和耕地实际灌溉平均用水量的障碍度较高,表明灌溉水利用效率较低,如青海的农田灌溉水有效利用系数仅为0.506,较全国均值低11.5%,生产安全准则层障碍度较大,指标层有效灌溉率障碍度最大,主要是因为灌溉基础设施覆盖不足,且老化严重,部分农田仍依赖雨养农业,导致水资源无法有效输配至田间^[34]。因此推广高效节水灌溉技术、改造老旧渠道、种植耐旱作物、建设蓄水工程、实施智能灌溉是提升青海水资源利用率,保障粮食稳产增产的关键措施。

4 结论

1)西北地区粮食产量整体呈上升趋势;2022年,西北地区以占全国8.2%的水资源生产全国7.1%的粮食;由于水资源时空分布不均导致该区水资源开发利用率高,较全国水资源开发利用率高76.0%。

2)新疆粮食安全水平最高,其次为青海、陕西、甘肃、宁夏。陕西和甘肃粮食安全主要障碍因子均为地均水资源占有量、人均水资源量、有效灌溉率;青海省粮食安全主要障碍因子为有效灌溉率、农林牧渔业增加值、秋粮单位面积产量、地方财政农林水事务支出、农业机械总动力。宁夏粮食安全主要障碍因子为地均水资源占有量、人均水资源量、耕地实际灌溉平均用水量。新疆粮食安全主要障碍因子为地均水资源占有量、耕地实际灌溉平均用水量、人均水资源量、农业水资源利用效率系数、降水量、单位面积农用氮肥施用。

3)提高西北地区的粮食安全水平的关键措施为:一方面,推广高效节水灌溉技术并完善灌溉设施,结合高标准农田建设,提升农业基础设施水平;另一方面,优化作物种植结构,积极推广耐旱作物与适水种植模式,以适应区域水资源条件。另外,还需统筹区域水资源管理,系统提升农业水资源利用效率和土地生产力,从而增强粮食生产的可持续性、稳定性。

参考文献:

- [1] 张宁,杨肖,陈彤.中国西部地区水-能源-粮食系统耦合协调度的时空特征[J].中国环境科学,2022,42(9):4444-4456.
ZHANG N, YANG X, CHEN T. Research on the coupling coordination of water-energy-food system and its temporal and spatial characteristics [J]. China Environmental Science, 2022, 42(9): 4444-4456.

- [2] 刘轩, 栗晓玲, 刘雨翰, 等. 西北地区生态干旱脆弱性评估[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 65-73.
LIU X, SU X L, LIU Y H, et al. Vulnerability assessment of ecological drought in northwest China[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 65-73.
- [3] 国家林业和草原局. 中国荒漠化和沙化状况公报[M]. 北京: 国家林业和草原局, 2015.
State Forestry Administration P. R. China. A bulletin of status quo of desertification and sandification in China [M]. Beijing: National Forestry and Grassland Administration, 2015.
- [4] 陈亚宁, 李忠勤, 徐建华, 等. 中国西北干旱区水资源与生态环境变化及保护建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 385-393.
CHEN Y N, LI Z Q, XU J H, et al. Changes and protection suggestions in water resources and ecological environment in arid region of northwest China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(3): 385-393.
- [5] 张强, 杨金虎, 王朋岭, 等. 西北地区气候暖湿化的研究进展与展望[J]. 科学通报, 2023, 68(14): 1814-1828.
ZHANG Q, YANG J H, WANG P L, et al. Progress and prospect on climate warming and humidification in northwest China [J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(14): 1814-1828.
- [6] 王浩, 杨贵羽, 杨朝晖. 水资源约束下保障粮食安全的战略思考[J]. 中国科学院院刊, 2013, 28(3): 329-336, 321.
WANG H, YANG G Y, YANG Z H. Thinking of agriculture development in China based on regional water resources and land cultivation [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, 28(3): 329-336, 321.
- [7] 唱彤, 李云玲. 基于水资源可利用量的我国水土资源匹配状况分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(6): 74-80.
CHANG T, LI Y L. Analysis on spatial matching patterns of available water resources and irrigated arable land in China [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(6): 74-80.
- [8] GAO Y, ZHAO Y L, LI K Y, et al. Analysis of the spatial correlation network structure of agricultural water use efficiency in northwest China [J]. Agronomy, 2023, 13(10): e2509.
- [9] GUO Y, SHEN Y J. Agricultural water supply/demand changes under projected future climate change in the arid region of northwestern China [J]. Journal of Hydrology, 2016, 540: 257-273.
- [10] 李菲菲, 周霞, 周玉玺. 西北地区农业干旱脆弱性评估及时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2023, 40(4): 663-669.
LI F F, ZHOU X, ZHOU Y X. Vulnerability assessment and spatiotemporal distribution of agricultural drought in northwest China [J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 663-669.
- [11] 王玉宝, 刘显, 史利洁, 等. 西北地区水资源与粮食安全可持续发展研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(5): 38-44.
WANG Y B, LIU X, SHI L J, et al. Sustainable development of water resources and food security in northwest China [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(5): 38-44.
- [12] 支彦玲, 王慧敏, 张帆, 等. 西北地区水资源、能源和粮食系统协同关系评估: 基于复杂系统协同进化视角[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(10): 76-85.
ZHI Y L, WANG H M, ZHANG F, et al. Assessment on the synergy of water-energy-food system in the northwest China: Based on the complex system co-evolution theory [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(10): 76-85.
- [13] 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.
SUN C Z, WEI Y Q, ZHAO L S. Co-evolution of water-energy-food nexus in arid areas: Take northwest China as an example [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(2): 320-333.
- [14] 郝仪佳, 夏咏, 张扬, 等. 西北地区水-能源-粮食系统耦合协调发展时空动态及预测分析[J]. 水土保持研究, 2025, 32(3): 251-259
HAO Y J, XIA Y, ZHANG Y, et al. Research and forecast analysis on the coupling coordinated development of water-energy-food system in northwest China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(3): 251-259.
- [15] 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.
ZHANG J X, DENG M J, LI P, et al. Security pattern and regulation of agricultural water resources in northwest China from the perspective of virtual water flow [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 131-140.
- [16] 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.
- [17] 栗晓玲, 褚江东, 张特, 等. 西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 34-42.
SU X L, CHU J D, ZHANG T, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in northwest China [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 34-42.
- [18] 许航, 李韬, 宋健峰. 旱区农业灌溉用水反弹效应及其区域差异: 以西北五省(区)为例[J]. 资源科学, 2021, 43(9): 1808-1820.
XU H, LI T, SONG J F. Estimation, driving factors, and regional differences of agricultural irrigation water

- rebound effect in arid areas: Examples of five provinces in northwestern China [J]. *Resources Science*, 2021, 43(9):1808-1820.
- [19] 张小允, 鲍洁, 许世卫. 基于熵权TOPSIS模型的中国粮食安全评价研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(4):35-44. ZHANG X Y, BAO J, XU S W. Research on the evaluation of China's food security based on entropy weight topsis model[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(4):35-44.
- [20] 雪宝, 汤骅, 程泉, 等. 基于熵权TOPSIS法的灌溉用水效率评价[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(5):82-89. XUE B, TANG H, CHENG Q, et al. Evaluating irrigation water efficiency using entropy weight-TOPSIS method: A case study[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(5):82-89.
- [21] 白芳芳, 齐学斌, 乔冬梅, 等. 黄河流域九省区农业水资源利用效率评价和障碍因子分析[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(3):146-152. BAI F F, QI X B, QIAO D M, et al. Evaluation of agricultural water resource utilization efficiency and obstacle factor diagnoses in nine provinces of the Yellow River basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(3):146-152.
- [22] ZHANG X Y, WANG Y, BAO J, et al. A research on the evaluation of China's food security under the perspective of sustainable development: Based on an entropy weight TOPSIS model[J]. *Agriculture*, 2022, 12(11):e1926.
- [23] JING X D, TAO S T, HU H, et al. Spatio-temporal evaluation of ecological security of cultivated land in China based on DPSIR-entropy weight TOPSIS model and analysis of obstacle factors[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 166:e112579.
- [24] 陈宇, 刘燕, 赵志强. 交口灌区农业水土资源承载力评价及障碍因子诊断[J]. *灌溉排水学报*, 2024, 43(7):98-105. CHEN Y, LIU Y, ZHAO Z Q. The carrying capacity of agricultural soil and water resources and its determinants in Jiaokou irrigation district [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2024, 43(7):98-105.
- [25] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报-2022[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2023. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *China water resources bulletin-2022* [M]. Beijing: China Water Power Press, 2023.
- [26] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023. National Bureau of Statistics of China. *China statistical yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
- [27] 黄季焜. 中国粮食安全与农业发展: 过去和未来[J]. *中国农业综合开发*, 2020(11):8-10. HUANG J K. Food security and agricultural development in China: Past and future [J]. *Agricultural Comprehensive Development in China*, 2020(11):8-10.
- [28] 刘欢, 宋孝玉, 李磊, 等. 中国31省(市、自治区)水资源承载力评价及预测研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(4):226-237. LIU H, SONG X Y, LI L, et al. Evaluation and prediction of water resources carrying capacity in 31 provinces, municipalities and autonomous regions of China [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(4):226-237.
- [29] 赵子萌, 曹永强, 常志冬, 等. 黄河沿线九省区水土资源生态承载力耦合协调分析[J]. *水资源保护*, 2023, 39(6):121-129. ZHAO Z M, CAO Y Q, CHANG Z D, et al. Coupling coordination analysis of ecological carrying capacity of water and land resources in nine provinces along the Yellow River [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(6):121-129.
- [30] 郝雪纯, 王志强, 李莉, 等. 西部地区“水-能源-粮食”系统安全评价及障碍因子识别研究[J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(11):250-257. HAO X C, WANG Z Q, LI L, et al. Study on security evaluation and obstacle factor identification of "Water-Energy-Food" system in western China [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(11):250-257.
- [31] LI L, XIAO Z N, LUO S X, et al. Projected changes in precipitation extremes over Shaanxi Province, China, in the 21st century [J]. *Advances in Meteorology*, 2020, 2020(1):e1808404.
- [32] 薛天翼, 白建军. 基于TVDI和气象数据的陕西省春季旱情时空分析[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(4):240-246. XUE T Y, BAI J J. Spatiotemporal variations of spring drought based on TVDI and meteorological index in Shaanxi Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(4):240-246.
- [33] 刘浩然, 党素珍, 任玉玲, 等. 沿黄九省区水资源利用效率及影响因素[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2025, 23(2):267-276. LIU H R, DANG S Z, REN Y L, et al. Water resource utilization efficiency and influencing factors in nine provinces along the Yellow River [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology*, 2025, 23(2):267-276.
- [34] 刘景政, 穆月英. 我国农田水利设施的时空特征与强化对策研究[J]. *山西农业大学学报(社会科学版)*, 2023(6):16-30. LIU J Z, MU Y Y. Study on spatiotemporal characteristics and strengthening countermeasures of farmland water conservancy facilities in China [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Social Science Edition)*, 2023(6):16-30.