



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

中国粮食主产区农业水贫困与粮食生产脆弱性的时空耦合研究

李长松, 周霞, 周玉玺

引用本文:

李长松, 周霞, 周玉玺. 中国粮食主产区农业水贫困与粮食生产脆弱性的时空耦合研究[J]. [农业资源与环境学报](#), 2023, 40(4): 965–975.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0459>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

粮食主产区粮食生产与农业水资源压力脱钩关系研究

刘楚杰, 李晓云, 江文曲

农业资源与环境学报. 2023, 40(2): 479–489 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0009>

山东省粮食生产效率时空演变及影响因素研究

于元赫, 王越, 宫大卫

农业资源与环境学报. 2023, 40(3): 728–738 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0453>

地理探测器与Tobit模型在粤西地区粮食生产效率及影响因子分析中的比较应用

黄馨亿, 任向宁, 马涛, 胡月明, 李波, 张飞扬, 谢健文

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 818–828 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0482>

黄淮海地区土地利用转型与粮食产量耦合关系研究

戈大专, 龙花楼, 屠爽爽, 张英男

农业资源与环境学报. 2017, 34(4): 319–327 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0066>

气候变化对西北半干旱区旱作农业的影响及解决途径

王红丽, 张绪成, 魏胜文

农业资源与环境学报. 2015(6): 517–524 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0093>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李长松, 周霞, 周玉玺. 中国粮食主产区农业水贫困与粮食生产脆弱性的时空耦合研究[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(4): 965–975.

LI C S, ZHOU X, ZHOU Y X. Spatio-temporal coupling of agricultural water poverty and grain production vulnerability in the main grain-producing areas in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(4): 965–975.

中国粮食主产区农业水贫困与粮食生产脆弱性的时空耦合研究

李长松¹, 周霞¹, 周玉玺^{2*}

(1. 山东农业大学经济管理学院, 山东 泰安 271018; 2. 山东农业大学公共管理学院, 山东 泰安 271018)

摘要:为厘清粮食主产区农业水资源与粮食生产的协调适配关系, 促进二者协同发展进而增强我国粮食生产韧性, 本研究构建了农业水贫困和粮食生产脆弱性评价指标体系, 借助主客观赋权法、耦合协调度模型、全局莫兰指数和基尼系数, 分析了2006—2019年粮食主产区农业水贫困、粮食生产脆弱性及二者耦合协调关系的时空演变特征。结果表明: 2006—2019年农业水贫困程度降低了30.45%, 南方降幅高于北方, 整体呈现北高南低的态势; 粮食生产脆弱性降低了71.99%, 北方降幅高于南方, 整体呈现南高北低的态势; 农业水贫困与粮食生产脆弱性的耦合协调度上升了21.99%, 区域差异趋于缩小, 但始终保持北高南低的态势。据此, 本研究提出了降低农业水贫困和粮食生产脆弱性、提升两个系统耦合协调发展的路径。

关键词: 粮食主产区; 农业水贫困; 粮食生产; 脆弱性; 时空耦合

中图分类号: F326.11; F323.213 文献标志码: A 文章编号: 2095-6819(2023)04-0965-11 doi: 10.13254/j.jare.2022.0459

Spatio-temporal coupling of agricultural water poverty and grain production vulnerability in the main grain-producing areas in China

LI Changsong¹, ZHOU Xia¹, ZHOU Yuxi^{2*}

(1. College of Economics and Management, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 2. College of Public Administration, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: To clarify the coordination and adaptation relationship between agricultural water resources and grain production in the main grain-producing areas in China and to promote the coordinated development of the two and thus enhance the resilience of grain production, we constructed an evaluation index system of agricultural water poverty and food production vulnerability in this study. We used subjective and objective weighting methods, coupling coordination degree model, global Moran's index, and Gini coefficient to analyze the characteristics of the spatio-temporal evolution of agricultural water poverty and food production vulnerability and their coupling and coordination relationship in the main food-producing areas. The results showed that: from 2006 to 2019 the agricultural water poverty decreased by 30.45%, with larger decrease rate in the south than those in the north, showing a trend of high water poverty in the north and low in the south. The vulnerability of grain production decreased by 71.99%, with larger decreases rate in the north than those in the south, showing a trend of high vulnerability in the south and low vulnerability in the north. The coupling coordination degree between agricultural water poverty and food production vulnerability increased by 21.99%, and the regional difference tended to narrow, maintaining the trend of high and low coupling coordination in the north and south, respectively. Based on this, we proposed a way to reduce agricultural water poverty and food production vulnerability and to enhance the coupling and coordinated development of the two systems.

Keywords: main grain producing areas; agricultural water poverty; grain production; vulnerability; spatio-temporal coupling

收稿日期: 2022-07-13 录用日期: 2022-11-03

作者简介: 李长松(1995—), 男, 山东烟台人, 博士研究生, 研究方向为农业资源与环境管理。E-mail: lcssdauwin@163.com

*通信作者: 周玉玺 E-mail: sofia612@sdau.edu.cn

基金项目: 国家社会科学基金项目(21BJY130, 19BGJ171)

Project supported: The National Social Science Foundation of China(21BJY130, 19BGJ171)

<http://www.aed.org.cn>

我国是世界第一人口大国,解决好 14 亿人口的吃饭问题始终是党和国家的头等大事。近年来,我国粮食产量稳步增长,粮食产能基本稳定在 6.5 万 t 以上(数据来源于国家统计局)。但是,我国粮食供求长期处于紧平衡的格局并未改变^[1-2],粮食生产面临的生态环境污染、资源过量消耗等问题日益突出,资源环境对粮食生产的约束趋紧,脆弱性特征逐渐凸显^[3]。水是粮食生产最重要的物质要素,水资源供求矛盾、水环境污染、水利设施粗放、用水效率低下等问题给粮食生产和粮食生产能力带来严峻挑战^[4],严重制约我国社会经济的稳定持续发展。因此,厘清农业水资源与粮食生产的协调适配程度,促进二者的协同发展进而增强粮食生产韧性,仍是全社会广泛关注的焦点。

水贫困理论依据一般贫困理论,将水资源禀赋、开发、利用、管理状态以及开发利用主体的水资源利用能力、权利和生计影响有机结合,为集成水资源管理提供了全新视角^[5]。Sullivan 等^[5]提出了水贫困指数(WPI)的概念,从水资源状况、供水设施、利用能力、使用效率和环境状况 5 个维度评价区域相对缺水程度^[6],更好地反映了水资源本底条件、用水环境、经济社会环境、制度环境及生态环境的情况^[7]。近年来学者们对 WPI 框架进行了丰富和拓展:为反映水、粮食、贫困间的关系,在 WPI 体系中加入了食物、健康和生产力指标^[6];为反映区域气候脆弱性,将空间地理信息和自然灾害指标纳入 WPI 体系^[8];为更好地使用 WPI 评价中国水资源稀缺状况,添加了反映社会适应能力的指标^[4]。随着水贫困理论向农业领域的应用拓展,“农业水贫困”的概念应运而生,即由于农村水资源禀赋不足、用水权利缺失、用水能力不足、水资源管理水平低下,导致农业减产、农民减收所引起的贫困^[4]等。研究表明,我国存在严重的农业水贫困问题^[4,9-10],表现为农业水资源短缺^[11]、农田水污染^[7]、用水效率低下^[4]等。近年来我国农业水贫困整体呈现出良好的发展和改进态势^[8,12],农业水贫困程度始终保持着“中-西-东”递减的空间分布格局^[10],空间差异呈持续扩大的演进趋势^[8-9]。从水贫困驱动因素的空间分异特征来看,资源因素对北方省份的影响较为突出^[4],设施和能力因素是中、西部地区的主要驱动力^[12],使用因素对东南、西南和西北地区的影响更为显著^[6,13],环境要素对东北、东部地区的驱动效果更为明显^[14]。

总体来看,学者们丰富拓展了水贫困理论^[5-8,15],测度了不同尺度的水贫困程度^[4,9,12],厘清了水贫困驱动要素及空间关联格局^[6,8,13,16-17],延展分析了水贫困

与经济贫困^[18]、社会发展^[19]、幸福感^[20]、农业现代化^[10]的适配协调关系,而对农业水贫困与粮食生产脆弱性协调适配关系缺乏深入研究。为此,本研究以 2006—2019 年作为研究时段,构建了农业水贫困和粮食生产脆弱性的评价指标体系,借助主客观赋权法、耦合协调度模型、全局莫兰指数、基尼系数等方法,揭示了粮食主产区农业水贫困、粮食生产脆弱性及二者耦合协调关系的时空演变特征,旨在为制定提升我国粮食生产韧性的政策提供理论依据和参考。

1 理论分析

水资源是粮食生产最重要的自然资源,其合理分配和高效利用对保障粮食持续增产意义重大。现阶段,我国农业水资源总量不足、时空分布不均匀、结构性稀缺以及水生态环境恶化等问题严重制约粮食生产能力,加剧粮食生产脆弱性^[21]。具体来说,农业水贫困对粮食生产脆弱性的影响可以综合表征为农业水资源短缺、农业用水效率低、农业水污染 3 个方面。

1.1 农业水资源短缺对粮食生产脆弱性的影响

农业水资源短缺与自然资源禀赋差、水权缺失和用水能力不足密切相关。当农业供水量难以满足作物需水量时,一方面会加剧作物水分胁迫,降低土地产出能力,提高粮食生产系统的暴露性水平;另一方面,化肥施用效果对水资源具有高度依赖性^[11],水资源短缺导致肥效发挥受阻,会加剧粮食生产波动,弱化粮食生产系统的适应能力。此外,农业用水短缺、灌溉成本高会导致农民种粮收益减少,青壮年劳动力向非农产业转移,强化劳动力对粮食生产的约束^[22],使“理性小农”调整种植结构、降低复种指数、减少灌溉次数,导致粮食生产系统的暴露性和敏感性上升,加剧粮食生产脆弱性。

1.2 农业用水效率低对粮食生产脆弱性的影响

农业水资源的低效利用主要表现为水资源利用能力不足、现代农业节水灌溉技术应用普及性差、作物水分生产率低。农业用水效率低意味着农业水资源供给量与作物生长需水量不匹配、不均衡^[11],农业水资源存在投入冗余和无益消耗情况^[11]。在农业水资源总量一定的情况下,农业水资源低效投入会导致区域层面的农业用水保障能力弱化,提升粮食生产系统的暴露性水平。

1.3 农业水污染对粮食生产脆弱性的影响

受工业“三废”、城乡生活垃圾、农业污染的影响,农业水污染事故频发,导致农业生态环境恶化,生态

环境承载力降低。一方面水污染会造成水资源的正常功能受限,弱化水土匹配关系,影响粮食生产数量和质量,加剧粮食生产的暴露性和敏感性水平;另一方面,水污染的扩散和转移会进一步恶化水质^[23],加剧农业水资源短缺,强化水资源对粮食生产的刚性约束,给粮食生产系统带来冲击和压力。

2 研究方法与指标体系设计

2.1 研究方法

2.1.1 主客观赋权法

基于构建的农业水贫困和粮食生产脆弱性评价指标体系,采用熵权法(EVM)和层次分析法(AHP)确定各指标权重,借助D-S证据理论合成主客观综合权重,实现两种赋权法有机结合,保证系统指标权重的科学、真实、合理,具体步骤如下。

(1)熵权法确定指标权重,公式为:

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{i=1}^n (1 - e_j)} \quad (1)$$

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m \left[\left(\frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}} \right) \times \ln \left(\frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}} \right) \right], \quad k = \frac{1}{\ln m} \quad (2)$$

式中: w_j 为第 j 项指标的权重; e_j 为第 j 项指标的信息熵; m 为评价年数; n 为评价指标数量; k 为波尔茨曼常量。

(2)层次分析法确定子系统及指标权重。研究邀请了20名资源与环境领域的专家对农业水贫困、粮食生产脆弱性各子系统及指标进行对比赋值,通过层次分析法确定各子系统及指标权重。

(3)D-S证据合成理论确定综合权重,公式为:

对于 $\forall A \subseteq \Theta$,识别框架 Θ 上有限个Mass函数 $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$ 的Dempster合成规则为:

$$w_{ij} = (m_1 \oplus m_2)(A) = \frac{1}{k} \sum_{A_1 \cap A_2 = A} m_1(A_1) \times m_2(A_2) \quad (3)$$

$$k = \sum_{A_1 \cap A_2 \neq \phi} m_1(A_1) \times m_2(A_2) = 1 - \sum_{A_1 \cap A_2 = \phi} m_1(A_1) \times m_2(A_2) \quad (4)$$

式中: k 为归一化因子; m_1 为熵权法得出的客观权重; m_2 为AHP方法得出的主观权重; w_{ij} 为D-S证据理论得出的综合权重。

(4)确定农业水贫困综合评价得分:

$$AWP = \frac{w_r R + w_f F + w_a A + w_u U + w_e E}{w_r + w_f + w_a + w_u + w_e} \quad (5)$$

式中:AWP代表农业水贫困综合评价得分; R, F, A, U, E 分别代表资源、设施、能力、使用、环境子系统综合评价得分; w_r, w_f, w_a, w_u, w_e 分别代表层次分析法确定的子系统权重。

(5)确定粮食生产脆弱性综合评价得分:

$$FPV = \frac{x_e E + x_s S + x_a A}{x_e + x_s + x_a} \quad (6)$$

式中:FPV代表粮食生产脆弱性综合评价得分; E, S, A 分别代表暴露性、敏感性、适应性子系统综合评价得分; x_e, x_s, x_a 分别代表层次分析法确定的子系统权重。

2.1.2 耦合协调度模型

为研究农业水贫困与粮食生产脆弱性的相互影响状态,利用耦合协调度模型^[21],定量分析农业水贫困与粮食生产脆弱性的相互作用程度,反映两个系统间的协调水平和发展层次,具体算法如下:

$$C = 2 \times \left\{ \frac{f(x) \times g(x)}{[f(x) + g(x)]^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$T = \alpha \times f(x) + \beta \times g(x) \quad (8)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (9)$$

式中: C 为耦合度; T 为综合协调指数; D 为耦合协调度; $f(x)$ 和 $g(x)$ 分别表示农业水贫困和粮食生产脆弱性得分,数值越大表明对应的贫困和脆弱性程度越轻; α, β 是待定权数,反映农业水贫困与粮食生产脆弱性的影响系数,假定农业水资源和粮食生产同等重要,故令 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

2.1.3 全局莫兰指数

全局空间自相关常用来分析全局区域总体的聚集、离散和随机分布形式^[6],本研究采用全局莫兰指数(Global Moran's I)测算粮食主产区农业水贫困、粮食生产脆弱性及二者间耦合协调度的空间关联程度。全局莫兰指数计算公式如下:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{s^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (10)$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (11)$$

式中: $\bar{x}$ 为样本均值; s^2 表示样本方差; w_{ij} 为空间权重矩阵第 i 行第 j 列元素,Global Moran's I 的取值范围为 $[0, 1]$,当 I 值大于0时,表示空间正相关,其值越大,空间趋同性越明显;当 I 值小于0时,表示空间负相关,

其值越小,空间差异性越大;当 I 值接近于0时,表示空间呈随机性。

2.1.4 基尼系数

借鉴赵雪雁等^[10]的研究,利用基尼系数反映农业水贫困与粮食生产脆弱性耦合协调度的区域差异。计算公式如下:

$$G_0 = \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |D_j - D_i| / n(n-1) \right] / 2u \quad (12)$$

式中: G_0 表示耦合协调度的基尼系数; D_i 、 D_j 表示每一年的耦合协调度; n 为粮食主产省份数量; u 为各省当年协调度的平均值。

2.2 评价指标体系构建及权重计算

2.2.1 农业水贫困指标体系构建及权重计算

国际社会常用水贫困指数(WPI)来评价一个国家或地区水资源的相对贫困程度,反映区域水资源本底条件、生态环境状态以及水资源利用和开发能力,该体系由资源、设施、能力、使用和环境5个子系统构成^[16]。结合粮食主产区农业生产实际,从农业领域出发,对水贫困体系适当扩充和更换指标,着重从资源和社会能力角度来考察农业水资源的稀缺性(表1)。

资源子系统反映水资源的承载能力,重点关注区域间气候差异和农业水资源的保障程度^[8]。该系统包括年降水量(X_1)、单位耕地面积水资源占有量(X_2)2个指标, X_1 表征区域气候差异的年际水资源补给能

力, X_2 表征农业水资源的保障和可利用程度。设施子系统反映与农业灌溉相关的农田水利设施建设发展状态。该系统包括节水灌溉类机械拥有量(X_3)、地均水库库容水平(X_4)2个指标, X_3 表征农业节水灌溉设施的应用普及程度, X_4 表征水资源调蓄的设施水平。能力子系统着重反映政府支持能力、农业用水能力、劳动力禀赋能力对农业水资源利用和管理能力的影响^[4]。该系统包括节水灌溉率(X_5)、旱涝保收率(X_6)、水利设施投资率(X_7)、农村居民人均可支配收入(X_8)、农业劳动力老龄化率(X_9)、高中及以上农业劳动力占比(X_{10})6个指标, X_5 、 X_6 表征农业用水技术能力和综合能力, X_7 表征政府对农业用水的财政支持力度, X_8 、 X_9 、 X_{10} 表征农业劳动力的技术采纳和用水管理行为对农业水资源的影响。使用子系统主要反映农业水资源的用水效率和生产力水平。该系统包括有效灌溉率(X_{11})、万吨粮食产量平均用水量(X_{12}), X_{11} 表征农田水利建设对水资源的适应情况, X_{12} 表征农业用水效率。环境子系统反映农业生产经营活动对水资源生态环境的冲击,选用农药施用强度(X_{13})、化肥施用强度(X_{14})作为代表指标。

2.2.2 粮食生产脆弱性指标体系构建及权重计算

参考相关研究成果^[3,24],结合我国粮食主产区的实际情况,从暴露性、敏感性、适应性3个子系统层面构建了粮食生产脆弱性评价指标体系(表2),反映粮

表1 粮食主产区农业水贫困评价指标体系

Table 1 Index system of agricultural water poverty evaluation in main grain producing areas

系统层 System layer	系统层权重 System layer weight	指标层 Index layer	单位 Unit	熵权法权重 EVM weight	AHP权重 AHP weight	D-S综合权重 D-S comprehensive weight
资源	0.206 9	年降水量 X_1	mm	0.350 4	0.454 5	0.310 1
		单位耕地面积水资源占有量 X_2	$\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	0.649 6	0.545 5	0.689 9
设施	0.245 5	节水灌溉类机械拥有量 X_3	万套	0.572 8	0.476 2	0.549 3
		地均水库库容水平 X_4	$10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	0.427 2	0.523 8	0.450 7
能力	0.258 3	节水灌溉率 X_5	%	0.312 1	0.233 6	0.419 9
		旱涝保收率 X_6	%	0.056 5	0.189 5	0.061 7
		水利设施投资率 X_7	%	0.090 4	0.181 2	0.094 3
		农村居民人均可支配收入 X_8	元	0.342 1	0.141 3	0.278 4
		农业劳动力老龄化率 X_9	%	0.087 8	0.127 2	0.064 3
		高中及以上劳动力占比 X_{10}	%	0.111 1	0.127 2	0.081 4
使用	0.163 3	有效灌溉率 X_{11}	%	0.551 0	0.397 6	0.447 5
		万吨粮食产量平均用水量 X_{12}	10^8 m^3	0.449 0	0.602 4	0.552 5
环境	0.126 0	农药施用强度 X_{13}	$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	0.460 0	0.500 0	0.460 0
		化肥施用强度 X_{14}	$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	0.540 0	0.500 0	0.540 0

注:无标记的指标代表正向指标,即指标值越大,水资源越不贫困;*代表负向指标,即指标值越大,水资源越贫困。

Note: Unmarked indicators represent positive indicators, that is, the larger the indicator value, the less poverty; * represents a negative indicator, that is, the larger the indicator value, the poorer the water.

表2 粮食主产区粮食生产脆弱性评价指标体系

Table 2 Index system of grain production vulnerability evaluation in main grain producing areas

系统层 System layer	系统层权重 System layer weight	指标层 Index layer	单位 Unit	熵权法权重 EVM weight	AHP权重 AHP weight	D-S综合权重 D-S comprehensive weight
暴露性	0.333 3	单位粮食播种面积劳动力 Y_1	人·hm ⁻²	0.213 2	0.221 9	0.173 8
		单位粮食播种面积用水量 Y_2	m ³ ·hm ⁻²	0.105 7	0.221 9	0.086 2
		人均粮食播种面积 Y_3	hm ² ·人 ⁻¹	0.626 9	0.299 1	0.688 8
		作物成灾率 Y_4	%	0.054 2	0.257 1	0.051 2
敏感性	0.333 3	农业生产资料价格指数 Y_5	%	0.061 7	0.182 1	0.038 9
		粮食作物播种面积占比 Y_6	%	0.156 6	0.286 1	0.155 1
		非农业产值比例 Y_7	%	0.127 3	0.218 5	0.096 3
		人均粮食产量 Y_8	kg·人 ⁻¹	0.654 4	0.313 3	0.709 7
适应性	0.333 3	粮食生产机械化水平 Y_9	kW·hm ⁻²	0.242 6	0.189 7	0.226 0
		粮食生产化肥施用强度 Y_{10}	kg·hm ⁻²	0.139 1	0.178 0	0.121 6
		粮食生产农药施用强度 Y_{11}	kg·hm ⁻²	0.170 4	0.178 0	0.149 0
		有效灌溉率 Y_{12}	%	0.156 0	0.221 7	0.169 9
		财政支农强度 Y_{13}	元·hm ⁻²	0.291 9	0.232 6	0.333 5

注:无标记的指标代表正向指标,即指标值越大,粮食生产越不脆弱;*代表负向指标,即指标值越大,粮食生产越脆弱。

Note: Unmarked indicators represent positive indicators, that is, the greater the index value, the less fragile; * represents a negative indicator, that is, the greater the index value, the more vulnerable.

食生产系统在受到自然、社会、经济及环境因素胁迫时的易损性,以及系统在遭到破坏后的恢复能力^[24]。其中,暴露性子系统反映粮食生产系统遭受环境、社会等各种因素的压力和冲击状态,包括单位粮食播种面积劳动力(Y_1)、单位粮食播种面积用水量(Y_2)、人均粮食播种面积(Y_3)、作物成灾率(Y_4)4个指标。其中, Y_1 、 Y_2 、 Y_3 表征劳动力、水、耕地等要素带给粮食生产系统的压力; Y_4 表征自然灾害对粮食生产的冲击状态。敏感性子系统反映系统受到外界冲击产生的正向或负向影响程度,包括农业生产资料价格指数(Y_5)、粮食作物播种面积占比(Y_6)、非农业产值比例(Y_7)、人均粮食产量(Y_8)4个指标。其中 Y_5 、 Y_6 、 Y_7 、 Y_8 分别表征粮食生产系统受到冲击和胁迫对农业生产成本、种植结构、产业结构和粮食产出能力的影响。适应性子系统由经济、技术、基础设施等因素决定,反映系统处理、适应协调变化并从受损状态复原的能力^[25],包括粮食生产机械化水平(Y_9)、粮食生产化肥施用强度(Y_{10})、粮食生产农药施用强度(Y_{11})、有效灌溉率(Y_{12})、财政支农强度(Y_{13})5个指标。其中 Y_9 表征粮食生产系统对劳动力约束的适应和替代能力; Y_{10} 、 Y_{11} 、 Y_{12} 表征化肥、农药、水利投入对粮食稳产增产的保障能力; Y_{13} 表征国家财政夯实粮食生产基础、保障粮食生产能力的资金投入规模^[21]。

2.2.3 数据来源

本研究所用指标数据来自2007—2020年《中国

统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国水利统计年鉴》《中国环境统计年鉴》以及2006—2019年《中国水资源公报》,个别年份存在数据缺失,采用相邻年份插值法补齐。为将粮食生产要素从广义农业生产要素中剥离出来,借鉴李明文等^[26]的权重系数法,对劳动力、水、化肥、农药、机械要素投入进行调整。其中,粮食生产劳动力用系数 A 调整,粮食生产的水、化肥、农药、机械要素用系数 B 调整。两种权重系数分别为:

$$A=(\text{粮食播种面积}/\text{农作物播种面积})\times(\text{农业产值}/\text{农林牧渔业产值}) \quad (13)$$

$$B=\text{粮食播种面积}/\text{农作物播种面积} \quad (14)$$

3 实证分析

3.1 农业水贫困的时空格局变化

3.1.1 农业水贫困的时间变化

2006—2019年粮食主产区的农业水贫困程度整体呈持续改进态势,农业水贫困平均变化率为30.45%(表3)。整体来看,2006—2019年南北方地区的农业水贫困程度均呈下降趋势,南方和北方地区的农业水贫困平均变化率分别为33.05%、28.11%,农业水贫困程度始终保持北高南低的态势。

由表4可知,2006—2019年资源、设施、能力、使用和环境5个子系统的得分整体趋于增长,变化率分别为3.71%、60.84%、59.76%、39.16%、3.97%,对农业水贫困系统改进的影响程度分别为2.28%、23.34%、

表3 农业水贫困测度得分及变化率

Table 3 Score and change rate of agricultural water poverty

地区 Area	得分 Score			2006—2019变化率 Change rate/%
	2006—2010	2011—2015	2016—2019	
河北	0.333 8	0.365 0	0.396 7	30.70
内蒙古	0.315 2	0.362 9	0.399 0	48.21
辽宁	0.304 3	0.356 3	0.376 1	36.39
吉林	0.280 1	0.306 2	0.348 1	20.33
黑龙江	0.297 9	0.327 7	0.332 4	26.82
山东	0.417 1	0.450 9	0.485 4	25.60
河南	0.338 9	0.340 4	0.365 9	12.10
江苏	0.373 3	0.420 0	0.449 0	30.31
安徽	0.343 3	0.362 3	0.387 8	16.81
江西	0.365 6	0.426 6	0.449 1	34.51
湖北	0.327 4	0.386 2	0.423 2	54.27
湖南	0.356 7	0.382 9	0.421 2	24.53
四川	0.312 3	0.354 5	0.390 6	43.21
北方	0.326 8	0.358 5	0.386 2	28.11
南方	0.346 4	0.388 8	0.420 2	33.05
均值	0.335 8	0.372 4	0.401 9	30.45

40.49%、30.61%、3.28%，表明研究期内粮食主产区的农田水利设施建设和发展速度较快，农业水资源的利用能力和利用效率明显提升，资源和环境子系统改进发展滞后是缓解农业水贫困的关键障碍因素。

3.1.2 农业水贫困的空间分布变化

为分析粮食主产区农业水贫困的空间分布特征，借助 Stata 17 软件计算得到 2006、2013、2019 年农业水贫困的 Global Moran's I 值分别为 0.417、0.294、0.204，且 Global Moran's I 的 P 值均通过显著性假设检验 ($P < 0.1$)，说明 2006—2019 年农业水贫困具有显著的空间正相关性，即农业水贫困的高-高、低-低聚集程度较高。从 Global Moran's I 值的变化来看，研究期内农业水贫困的空间趋同性呈逐渐降低的演进特征。

利用 ArcGIS 10.8 软件，采用自然断点分级法绘制了农业水贫困的空间分布图，将粮食主产省(自治区)分为富裕地区、较富裕地区、中等贫困地区、较贫困地区、严重贫困地区 5 种等级，如图 1 所示。

2006—2019 年粮食主产区农业水贫困等级始终保持着北高南低的空间分布特征。①2006—2013 年，农业水贫困等级的空间分布变化较大，有 8 个省(自治区)的农业水贫困等级发生转变，农业水贫困等级由较高贫困地区大范围向较低贫困地区转移。其中，内蒙古、辽宁、江苏、湖北、四川、江西 6 省(自治区)实现了农业水贫困等级的降低，吉林、河南 2 省农业水贫困等级提升。北方地区以中等贫困地区和较贫困地区为主；南方地区的农业水贫困等级整体趋于降低，以较富裕地区和中等贫困地区为主。②2013—2019 年，农业水贫困等级的空间分布变化较小，仅有 2 个省的农业水贫困等级发生改变，农业水贫困等级整体趋于提升。其中，辽宁、安徽 2 省由中等贫困地区转变为较贫困地区。北方地区以中等贫困地区和严重贫困地区为主；南方地区以富裕地区和较富裕地区为主。

3.2 粮食生产脆弱性的时空格局变化

3.2.1 粮食生产脆弱性的时间变化

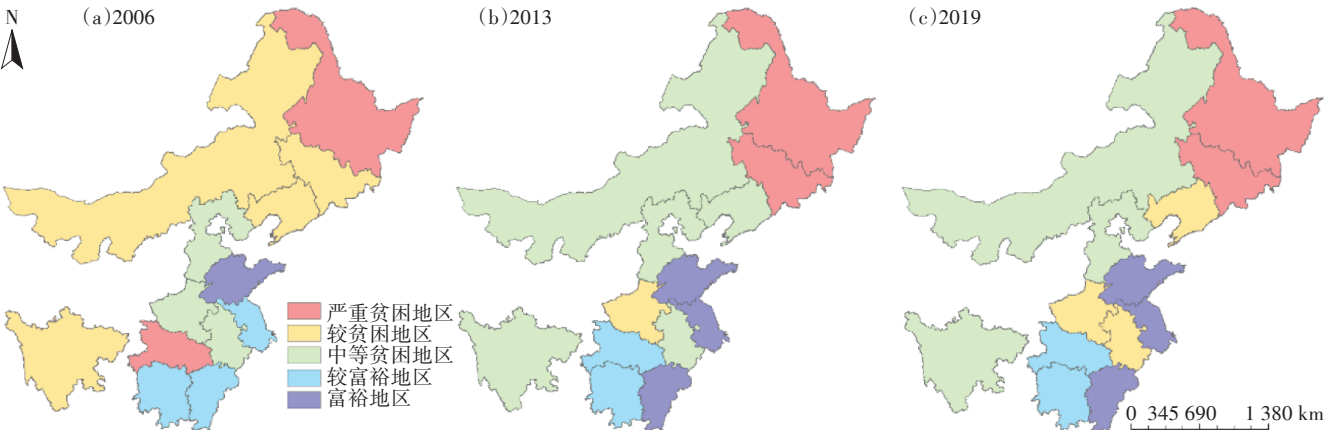
2006—2019 年粮食主产区的粮食生产脆弱性呈快速改进趋势，由表 5 可知，粮食生产脆弱性平均变化率为 71.99%。整体来看，南北方地区的粮食生产脆弱性水平差异明显，北方地区的脆弱性水平低于南方地区，2006—2019 年南北方地区的粮食生产脆弱性水平均呈快速下降趋势，南方和北方地区的粮食生产脆弱性平均变化率为 67.16%、75.27%，粮食生产脆弱性始终保持着南高北低的空间分布特征。

由表 4 可知，2006—2019 年期间，暴露性、敏感性、适应性 3 个子系统得分均呈持续上升态势，平均变化率为 45.33%、49.62%、117.86%，表明在研究期内

表4 农业水贫困与粮食生产脆弱性子系统得分、变化率及影响程度

Table 4 Score, change rate and influence degree of agricultural water poverty and grain production vulnerability

指标 Index	农业水贫困系统 Agricultural water poverty system					粮食生产脆弱性系统 Grain production vulnerability system		
	资源 Resource	设施 Facility	能力 Ability	使用 Use	环境 Environment	暴露性 Exposure	敏感性 Sensibility	适应性 Adaptability
2006—2010	0.065 4	0.043 2	0.075 0	0.080 5	0.071 7	0.084 9	0.072 8	0.100 2
2011—2015	0.071 2	0.054 3	0.088 9	0.092 1	0.065 9	0.095 4	0.086 9	0.140 6
2016—2019	0.063 5	0.057 6	0.102 2	0.101 4	0.077 2	0.109 8	0.100 7	0.160 5
2006—2019变化率/%	3.71	60.84	59.76	39.16	3.97	45.33	49.62	117.86
影响程度/%	2.28	23.34	40.49	30.61	3.28	21.71	21.06	57.23



该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作,底图无修改。下同。

图1 农业水贫困的时空格局

Figure 1 Temporal and spatial pattern of agricultural water poverty

表5 粮食生产脆弱性测度得分及变化率

Table 5 Score and change rate of grain production vulnerability

地区 Area	得分 Score			2006—2019变化率 Change rate/%
	2006—2010	2011—2015	2016—2019	
河北	0.266 9	0.331 4	0.328 2	32.12
内蒙古	0.262 5	0.360 4	0.463 1	155.64
辽宁	0.213 5	0.261 0	0.303 5	75.69
吉林	0.310 2	0.397 2	0.475 7	67.89
黑龙江	0.357 8	0.493 3	0.627 6	136.10
山东	0.277 9	0.318 0	0.335 9	27.82
河南	0.286 0	0.338 5	0.366 5	42.15
江苏	0.250 5	0.309 5	0.340 1	60.94
安徽	0.260 5	0.315 6	0.362 4	58.11
江西	0.244 4	0.297 2	0.324 4	60.78
湖北	0.203 4	0.250 3	0.293 3	63.96
湖南	0.239 0	0.290 5	0.331 7	61.13
四川	0.180 0	0.234 9	0.270 5	118.75
北方	0.282 1	0.357 1	0.414 4	75.27
南方	0.229 6	0.283 0	0.320 4	67.16
均值	0.257 9	0.322 9	0.371 0	71.99

粮食生产系统处理、适应、协调外界冲击和压力的能力显著提升,粮食生产韧性得到稳定提高。暴露性、敏感性、适应性子系统对粮食生产脆弱性系统改进的影响程度分别为21.71%、21.06%、57.23%,适应性子系统是粮食生产脆弱性改进的主要驱动因素。

3.2.2 粮食生产脆弱性的空间分布变化

为分析粮食主产区粮食生产脆弱性的空间分布格局,借助 Stata 17 软件计算得到 2006、2013、2019 年粮食生产脆弱性的 Global Moran's I 值分别为 0.152、

0.378、0.537,且 Global Moran's I 的 P 值均通过显著性假设检验 ($P<0.01$),说明 2006—2019 年粮食生产脆弱性的空间正相关性显著,粮食生产脆弱性高-高相邻、低-低相邻的聚集分布较为广泛。从 Global Moran's I 值的变化看,2006—2019 年粮食生产脆弱性的空间变化幅度较大,说明该时期内粮食生产脆弱性的空间趋同性急剧增强,空间关系不稳定。

利用 ArcGIS 10.8 软件,使用自然断点分级法绘制了粮食生产脆弱性的空间分布图,将粮食主产省(自治区)分为低脆弱地区、较低脆弱地区、中等脆弱地区、较严重脆弱地区、严重脆弱地区 5 种等级,如图 2 所示。

2006—2019 年,粮食生产脆弱性等级的空间分布变化大,粮食生产脆弱性整体呈现从东北向西南逐渐增强的空间分布特征。①2006—2013 年,有 9 个省(自治区)的粮食生产脆弱性等级发生改变,粮食生产脆弱性由较低脆弱地区大范围向较高脆弱地区转变。其中,吉林、河北、山东、河南、安徽、湖北、湖南、江西 8 省的粮食生产脆弱性等级提高,仅内蒙古实现了粮食生产脆弱性等级的降低。北方地区以较低脆弱地区和中等脆弱地区为主;南方地区主要为中等脆弱地区、较严重脆弱地区和严重脆弱地区。②2013—2019 年,有 10 个省(自治区)的粮食生产脆弱性等级发生转变,粮食生产脆弱性由较高脆弱地区大范围向较低脆弱地区转移。其中,内蒙古、吉林、辽宁、河南、安徽、江苏、湖南、江西 8 省(自治区)实现了粮食生产脆弱性等级的降低,河北、山东 2 省粮食生产脆弱性呈现加剧趋势。北方地区以低脆弱地区和较低脆弱地

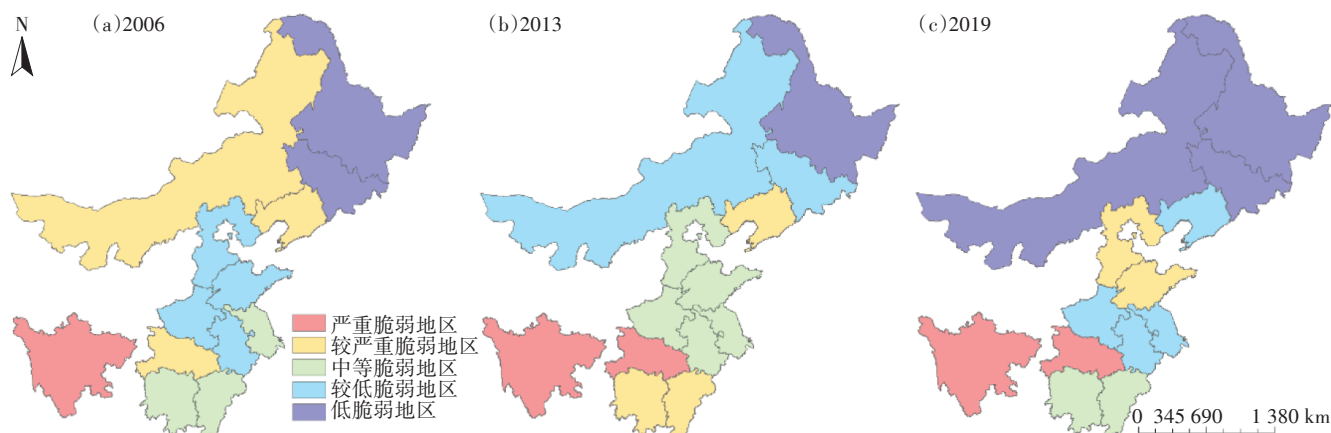


图2 粮食生产脆弱性的时空格局

Figure 2 Temporal and spatial pattern of grain production vulnerability

区为主;南方地区则主要为较低脆弱地区、中等脆弱地区和严重脆弱地区。

3.3 农业水贫困与粮食生产脆弱性耦合协调度的时空格局变化

3.3.1 农业水贫困与粮食生产脆弱性耦合协调度的时序变化和区域差异

为进一步揭示粮食主产区农业水贫困与粮食生产脆弱性耦合协调关系并进行区域差异分析,利用耦合协调度模型计算了农业水贫困与粮食生产脆弱性的耦合协调度,结果见图3。2006—2019年农业水贫困与粮食生产脆弱性耦合协调度上升了21.99%,南方和北方地区的耦合协调度分别上升了22.37%、21.69%,耦合协调度始终保持着北高南低的空间分布特征。

如图4所示,2006—2019年粮食主产区农业水贫困与粮食生产脆弱性耦合协调度的基尼系数降低了6.35%,耦合协调度的区域差异趋于缩小,区域间差

异是粮食主产区差异的主要来源。分区域来看,南北方地区耦合协调度的变化趋势差异明显。北方地区的基尼系数趋于增长,增幅为9.73%,区域差异呈小幅扩大趋势;南方地区的基尼系数呈降低趋势,降幅达50.07%,区域差异急剧缩小。

3.3.2 农业水贫困与粮食生产脆弱性耦合协调度的空间分布变化

为分析粮食主产区农业水贫困与粮食生产脆弱性耦合协调度的空间分布格局,借助Stata 17软件计算得到2006、2013、2019年耦合协调度的Global Moran's I 值分别为0.125、0.159、0.312,且Global Moran's I 的 P 值均通过的显著性假设检验($P < 0.1$),说明2006—2019年农业水贫困与粮食生产脆弱性耦合协调度具有显著的空间正相关性,即耦合协调度高的省(自治区)趋于聚集,耦合协调度低的省(自治区)也趋于聚集。2006—2019年耦合协调度的Global Moran's I 值快速增长,说明研究期内耦合协调度的空间趋同性逐

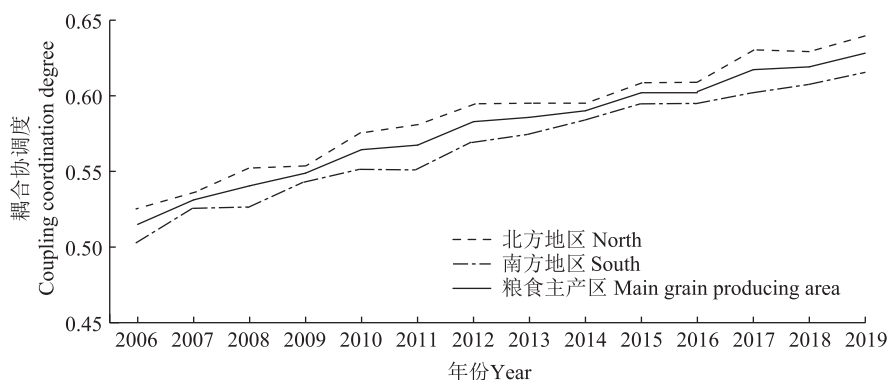


图3 农业水贫困与粮食生产脆弱性耦合协调度变化趋势

Figure 3 Change trend of coupling coordination degree between agricultural water poverty and grain production vulnerability

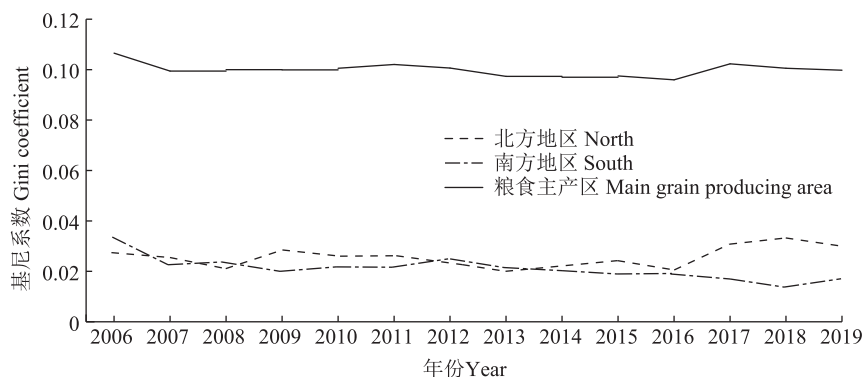


图4 农业水贫困与粮食生产脆弱性耦合协调度区域差异

Figure 4 Regional differences in agricultural water poverty and grain production vulnerability

渐增强。

利用 ArcGIS 10.8 软件,使用自然断点分级法绘制了农业水贫困与粮食生产脆弱性耦合协调度的空间分布图,将粮食主产省(自治区)分为高度协调地区、较高协调地区、中等协调地区、较低协调地区、低度协调地区 5 种等级,如图 5 所示。

2006—2019 年农业水贫困与粮食生产脆弱性耦合协调等级始终保持北高南低的空间分布特征。①2006—2013 年,农业水贫困与粮食生产脆弱性耦合协调度的空间分布格局变化较大,有 6 个省(自治区)的耦合协调等级发生变化。其中,黑龙江、内蒙古、江西 3 省(自治区)的耦合协调等级实现了跃升,吉林、河南、安徽 3 省耦合协调等级降低。北方地区以高度协调地区和较高协调地区为主;南方地区以较高协调地区和中等协调地区为主。②2013—2019 年,农业水贫困与粮食生产脆弱性耦合协调等级的空

间分布格局变化较小,有 4 个省(自治区)的耦合协调等级发生变化,耦合协调等级整体趋于降低。其中,仅内蒙古实现了耦合协调等级的跃升,河北、山东、河南 3 省的耦合协调等级呈下降趋势。北方地区的耦合协调等级趋于降低,以高度协调地区、较高协调地区和较低协调地区为主;南方地区耦合协调等级的空间分布格局保持稳定,仍以较高协调地区和中等协调地区为主。

4 结论与建议

4.1 结论

本研究构建了粮食主产区农业水贫困和粮食生产脆弱性的评价指标体系,分析了农业水贫困、粮食生产脆弱性及二者耦合协调度的时空演变特征,得出以下结论:

(1)2006—2019 年粮食主产区的农业水贫困程

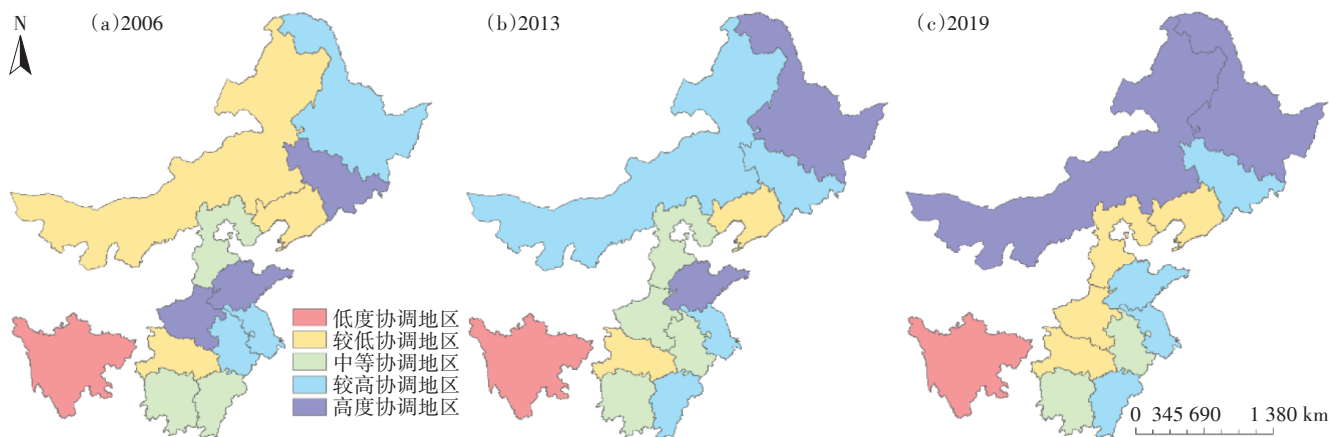


图5 农业水贫困与粮食生产脆弱性耦合协调度的空间分布

Figure 5 Spatial distribution of coupling coordination degree between agricultural water poverty and grain production vulnerability

度呈持续下降趋势,降幅为30.45%。其中,南方地区水贫困程度降低了33.05%,北方地区降低了28.11%,农业水贫困程度始终保持着北高南低的空间分布特征。资源、设施、能力、使用和环境5个子系统对农业水贫困系统改进的影响程度分别为2.28%、23.34%、40.49%、30.61%、3.28%,设施、能力、使用子系统是缓解农业水贫困的主要驱动因素,资源和环境子系统是缓解农业水贫困的主要障碍因素。

(2)2006—2019年粮食主产区的粮食生产脆弱性呈快速下降趋势,降幅为71.99%。其中,南方地区粮食生产脆弱性降低了67.16%,北方地区降低了75.27%,粮食生产脆弱性始终保持南高北低的空间分布特征。暴露性、敏感性、适应性3个子系统对粮食生产脆弱性系统改进的影响程度分别为21.71%、21.06%、57.23%,适应性子系统是粮食生产脆弱性改进的主要驱动因素。

(3)2006—2019年粮食主产区农业水贫困与粮食生产脆弱性的耦合协调度稳步提升,增幅为21.99%,始终保持北高南低的空间分布格局,区域差异趋于缩小,区域间差异是粮食主产区差异的主要原因。

4.2 政策建议

为促进粮食主产区农业水资源与粮食生产的协调发展,增强粮食生产韧性进而保障国家粮食安全,基于研究结论提出如下建议:

(1)资源和环境子系统是制约农业水贫困改进的主要障碍。各地区要以水资源承载力为基础,制定与水资源条件相适应的产业布局规划,科学确定行业用水定额,保障农业灌溉用水;优化粮食种植结构,适当调减北方水资源超载地区的粮食种植面积,调增南方丰水地区的粮食播种面积,促进农业种植与水资源承载能力相均衡;加快农业遥感和智能决策技术在农业生产领域的应用,精准监控、判别作物营养和病虫害的动态变化,提高化肥、农药使用管理精度;开发绿色高效化肥和农药等农作物绿色防控产品和技术,推动生物肥料、生物农药对传统农药、化肥的绿色替代。

(2)设施、能力和使用子系统是缓解农业水贫困、提升粮食生产韧性的重要驱动力。要加大农田水利等基础设施的资金投入力度,建设完善蓄水、引水和跨地区调水等水利设施,推动老旧灌区的续建配套和现代化改造,增强农业水资源的开发、获取和利用能力;通过研发应用优质抗旱作物品种、推广普及喷灌

微灌等农业节水灌溉技术、实施农业用水定额管理、贯彻农业水价综合改革等方式,提高农业用水效率。

(3)适应性能力是粮食生产脆弱性系统改进优化的关键。要优化财政支农投入供给,推动丘陵山区农田宜机化改造,建设高标准农田,夯实农业生产基础条件;重视杂交技术、基因技术、节肥、节药和各式农业机械等现代技术的研发和应用,提高劳动生产效率和土地产出能力。

参考文献:

- [1] 钱宸,李凡,李先德,等.基于农户经济和环境“双优”目标的粮食主产区化肥施用优化模拟分析:以邯郸地区小麦生产为例[J].自然资源学报,2021,36(6):1481-1493. QIAN C, LI F, LI X D, et al. Analysis of fertilizer-use optimization under the joint frame work of economic rationality and environmental sustainability: evidence from wheat farmers in Handan, Hebei Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(6):1481-1493.
- [2] 黄馨亿,任向宁,马涛,等.地理探测器与Tobit模型在粤西地区粮食生产效率及影响因子分析中的比较应用[J].农业资源与环境学报,2020,37(6):818-828. HUANG X Y, REN X N, MA T, et al. Comparative application of geographical detector and Tobit model in analysis of grain production efficiency in the western Guangdong region and its influencing factors[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(6):818-828.
- [3] 姚成胜,殷伟,黄琳,等.中国粮食生产与消费能力脆弱性的时空格局及耦合协调性演变[J].经济地理,2019,39(12):147-156. YAO C S, YIN W, HUANG L, et al. Spatial-temporal pattern and coupling coordination evolution of the vulnerability of food production and consumption ability in China[J]. *Economic Geography*, 2019, 39(12):147-156.
- [4] 张华,王礼力.中国农业水贫困评价及时空特征分析[J].资源科学,2019,41(1):75-86. ZHANG H, WANG L L. Evaluation and spatial-temporal characteristics of agricultural water poverty in China[J]. *Resources Science*, 2019, 41(1):75-86.
- [5] SULLIVAN C, CHARLES J, ERIC C, et al. Mapping the links between water, poverty and food security[R]. Wallingford: Report on the Water Indicators Worksshop Held at the Centre for Ecology and Hydrology, 2005.
- [6] SHEN J L, ZHAO Y K, SONG J F. Analysis of the regional differences in agricultural water poverty in China: based on a new agricultural water poverty index[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 270: 107745.
- [7] 杨倩,王梅,韩林芝,等.水贫困评价问题研究进展[J].生态经济,2016,32(1):170-175. YANG Q, WANG M, HAN L Z, et al. Progress in the study of water poverty evaluation[J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(1):170-175.
- [8] LIU W X, ZHAO M J, HU W, et al. Spatial-temporal variations of water poverty in rural China considered through the KDE and ESDA models[J]. *Natural Resources Forum*, 2018, 42(4):254-268.

- [9] 孙冬营, 刘新波, 龙兴乐, 等. 基于WPI模型的中国水贫困时空异质性研究[J]. 南京工业大学学报(社会科学版), 2020, 19(5): 104–114, 116. SUN D Y, LIU X B, LONG X L, et al. Spatial and temporal heterogeneity of water poverty in China based on WPI model[J]. *Journal of Nanjing Tech University (Social Science Edition)*, 2020, 19(5): 104–114, 116.
- [10] 赵雪雁, 高志玉, 马艳艳, 等. 2005—2014年中国农村水贫困与农业现代化的时空耦合研究[J]. 地理科学, 2018, 38(5): 717–726. ZHAO X Y, GAO Z Y, MA Y Y, et al. Spatio-temporal coupling between rural water poverty and agricultural modernization in China from 2005 to 2014[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(5): 717–726.
- [11] 徐依婷, 穆月英, 张哲晰. 中国粮食生产用水效率的影响因素及空间溢出效应[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2022(4): 76–89. XU Y T, MU Y Y, ZHANG Z X. The influencing factors and spatial spillover effects of water use efficiency of grain production in China[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2022(4): 76–89.
- [12] 孙才志, 吴永杰, 刘文新. 基于DPSIR-PLS模型的中国水贫困评价[J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 1079–1088. SUN C Z, WU Y J, LIU W X. Application of DPSIR-PLS model to analyze water poverty in China[J]. *Arid Land Geography*, 2017, 40(5): 1079–1088.
- [13] 孙才志, 王雪妮, 邹玮. 基于WPI-LSE模型的中国水贫困测度及空间驱动类型分析[J]. 经济地理, 2012, 32(3): 9–15. SUN C Z, WANG X N, ZOU W. Measurement and spatial driving type analysis for water poverty in China based on WPI-LSE model[J]. *Economic Geography*, 2012, 32(3): 9–15.
- [14] 孙才志, 汤玮佳, 邹玮. 中国农村水贫困测度及空间格局机理[J]. 地理研究, 2012, 31(8): 1445–1455. SUN C Z, TANG W J, ZOU W. Measure of water poverty conditions and its spatial pattern mechanism in China's rural areas[J]. *Geographical Research*, 2012, 31(8): 1445–1455.
- [15] JEMMALI H. Mapping water poverty in Africa using the improved multidimensional index of water poverty[J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2017, 33(4): 649–666.
- [16] NABEALLAH Y, NEMATOLLAH M S, RASSOUL Z A, et al. Investigating the effects of climate change, drought, and agricultural sector policies on the trend of the water poverty index in Iran[J]. *Aqua-Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 2022, 71(3): 433–449.
- [17] 杨玉蓉, 张青山, 邹君. 基于村级尺度的农村水贫困评价: 以常德澧县梅家港村为例[J]. 生态经济, 2013(7): 24–28, 32. YANG Y R, ZHANG Q S, ZOU J. The assessment of rural water poverty based on a community scale: taking changed Lixian Meijiagang Village as an example[J]. *Ecological Economy*, 2013(7): 24–28, 32.
- [18] BOOYSEN M J, GERBER S. Water scarcity and poverty: the lasting impact of a maintenance campaign at South African schools across the affluence divide[J]. *Water Science and Technology*, 2021, 84(10): 3246–3256.
- [19] DOUGLAS S. Understanding human development, poverty and water scarcity patterns in the Brazilian semi-arid through cluster analysis[J]. *Environmental Science and Policy*, 2021, 125: 167–178.
- [20] NADEEM A M, CHEO R, SHAOAN H. Multidimensional analysis of water poverty and subjective well-being: a case study on local household variation in Faisalabad, Pakistan[J]. *Social Indicators Research*, 2018, 138(1): 207–224.
- [21] 李长松, 周玉玺. 中国粮食主产区农业水资源脆弱性与粮食安全时空耦合关系研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(6): 722–732. LI C S, ZHOU Y X. Research on the spatio-temporal coupling relationship between agricultural water resources vulnerability and food security in China's main grain producing areas[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(6): 722–732.
- [22] 何可, 宋洪远. 资源环境约束下的中国粮食安全: 内涵、挑战与政策取向[J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 45–57. HE K, SONG H Y. China's food security under the constraints of resources and environment: connotation, challenges and policy orientation[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2021, 21(3): 45–57.
- [23] 戢梦雪, 毛霞, 屈彪. 环境治理、水污染与农业发展[J]. 农村经济, 2021(7): 58–67. JI M X, MAO X, QU B. Environmental control, water pollution and agricultural development[J]. *Rural Economy*, 2021(7): 58–67.
- [24] 姚成胜, 殷伟, 李政通. 中国粮食安全系统脆弱性评价及其驱动机制分析[J]. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1720–1734. YAO C S, YIN W, LI Z T. The vulnerability assessment and driving mechanism analysis of China's food security system[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(8): 1720–1734.
- [25] YENI F, ALPAS H. Vulnerability of global food production to extreme climatic events[J]. *Food Research International*, 2017, 96: 27–39.
- [26] 李明文, 王振华, 张广胜. 农业服务业促进粮食高质量发展了吗? 基于272个地级市面板数据的门槛回归分析[J]. 农业技术经济, 2020(7): 4–16. LI M W, WANG Z H, ZHANG G S. Has agriculture services industry promote the development of high-quality grain? Threshold regression analysis based on panel data of 272 prefecture-level cities[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2020(7): 4–16.