气候变化视角下中国粮食生产韧性时空差异及影响因素研究*

——以粮食主产区为例

张永旺，周欣欣

（西北农林科技大学经济管理学院，陕西 杨凌 712100）

摘 要：面对日益严峻的气候变化形势，粮食生产韧性的提升显得尤为重要。以中国13个粮食主产区为研究对象，基于气候变化对粮食生产的影响构建综合评价指标体系，运用熵值法、核密度估计、泰尔指数、灰色预测模型和灰色关联度模型，对2009—2021年各地区粮食生产韧性进行测度评价，分析时空演进特征、地区差异，进一步预测未来3年的发展状况，并探索不同气候条件下影响粮食生产韧性的因素及其差异。研究发现，粮食主产区在研究时段内均呈稳步提升趋势，但各地区提升速率有一定差距；四大气候分区区域内粮食生产韧性水平发展较为均衡；粮食主产区总体差异较小，大致呈先下降后上升的趋势，近年来主要归因于区域间的差异；预计2025年将有9个粮食主产区迈入高粮食生产韧性行列；粮食主产区会受到农村劳动力外流、城镇化率、农产品外贸依存度、年降水量、财政支农力度等因素的影响。最后，结合时空分异特征和影响因素，建议提升粮食生产韧性必须统筹区域协调发展，发挥政府与市场作用并推动气候适应型农业发展，从而促进粮食主产区粮食综合生产能力的提升。

关键词：粮食主产区；气候变化；粮食生产韧性；适应力；时空差异

中图分类号：F323 **文献标志码**：A **文章编号**：1674-9189(2024)06-0063-14

一、引言与文献综述

“民以食为天，食以粮为先”。粮食主产区是保障我国粮食安全的重要屏障和核心防线，主产区粮食生产直接与粮食安全挂钩，影响地区甚至国家的和谐稳定(刘影等，2015)。中国是全球气候变化的敏感区和影响显著区(何可等，2021)，粮食产量及稳定性不仅受到农业生产水平及其他自然和社会因素的影响，而且受气象因素影响越来越大(张学珍等，2019)。农业因其对自然资源和天气条件的依赖，成为受气候变化影响最直接、最脆弱的行业(李先德等，2022；陈帅等，2016)，且气候变化对农业生产的影响最直接、最明显地体现在粮食产量上(丑洁明等，2022)。鉴于中国农业特别是粮食生产的基础性地位、发展瓶颈，以及日益严峻的气候变化形势，未来气候变化对粮食生产的诸多影响将进一步凸显(陈帅等，2016)，亟待提升粮食生产的抗风险能力，弱化气候因素对粮食生产的影响(李雪

*项目来源：陕西省生态空间治理重点课题(2022HZ1845)；中央高校基本科研业务费人文社科项目(2452023316)；2024年度陕西省哲学社会科学研究专项智库项目(2024ZD492)。

作者简介：张永旺，男，博士，讲师，研究方向：农业经济理论与政策、资源经济与环境管理。

等，2021）。面对未来气候影响下的粮食生产风险，必须大力发展韧性、弹性农业，全面提升未来气候变化应对能力（高江波等，2022）。因此，应科学构建气候适应型粮食生产韧性评价指标体系，对不同气候条件下的各粮食主产区粮食生产韧性水平进行评价，分析其时空演进特征、地区差异，预测未来发展趋势，并找出影响粮食生产韧性的关键因素。

韧性这一概念最早由Holling提出并应用于生态学，指一个系统遭受外部冲击影响后复原的能力（Holling，1973）。近年来，学者纷纷将韧性概念引入农业领域，研讨农业产业链韧性、农业经济韧性、农业发展韧性、农业生态韧性等（何亚莉等，2021；蒋辉，2022；于伟等，2019；Zimmerer et al., 2022）。有研究表明，中国各类粮食生产能力总体呈上升趋势，但区域差异逐渐扩大（卢新海等，2020）。中国政府高度重视农业发展和粮食生产，相关研究也针对粮食生产展开，主要涉及到粮食生产碳排放量、粮食生产效率、粮食生产地位及贡献比较、粮食生产空间格局、粮食综合生产能力等（张青青等，2023；张利国等，2016；陈璐等，2017；杜蓉等，2023；辛岭等，2018），注重对现状、存在问题的分析及影响因素的探寻，关注其与经济发展、收入水平的相互关系（马彪等，2019；齐蘅等，2017）。

在全球气候变暖、极端天气频发的趋势下，粮食减产现象尤为严重（Burt et al., 2016）。而气候变化对沉积物流失的影响又受到粮食生产土地管理的限制（Ockenden et al., 2017）。未来气候变化对粮食主产区粮食生产安全的影响不容忽视（崔宁波等，2021）。目前关于气候因素与粮食生产的研究包括粮食作物气候生产潜力、粮食产量气候响应以及气候变化对粮食生产的影响（罗海平等，2021；王婕等，2021；陈帅等，2016）。也有学者从不同粮食生产功能区出发考虑气候变化对粮食安全的影响（苏芳等，2022）。我国在发展中国家率先制定和实施国家适应气候变化战略，提出建设可持续的气候适应性韧性社会（吴绍洪等，2020）。通过技术创新、政策机制保障和生产投入增加等人为因素，可在一定程度上缓解气候变化给粮食生产带来的负面影响（吴普特等，2010）。因此，对于粮食生产系统而言，加强适应能力建设是迫切需要和必然要求（谢立勇等，2014）。

综上，现有研究仍然存在些许不足。第一，虽然学者切实关注农业韧性，但却较少着眼于粮食生产韧性。第二，韧性评价目前尚未统一，少有考虑农民应对气候变化的适应能力；而针对气候变化对粮食生产的影响，未能考虑不同气候条件下各地区粮食生产韧性水平差距与其背后的原因。

鉴于此，本文着眼于粮食生产问题，以13个粮食主产区为研究对象，考虑农民气候适应性行为，基于气候变化对粮食生产的影响构建综合评价指标体系，对2009—2021年粮食主产区粮食生产韧性水平进行测度和评价，利用核密度估计展现各气候分区粮食生产韧性水平的时空演进态势，采用泰尔指数分解粮食主产区及四大气候分区粮食生产韧性时空差异及贡献率，对未来3年的粮食生产韧性水平进行动态预测并观察区域发展差异，采用灰色关联度模型探析影响不同气候分区粮食生产韧性水平的因素。最后，从统筹粮食生产区域协调发展与关注重点区域、发挥政府与市场作用和发展气候适应型农业三方面提出政策建议，以期为提升粮食主产区粮食生产能力，推动粮食产业发展提供参考。

二、研究设计

（一）研究区域

2003年，财政部印发《关于改革和完善农业综合开发若干政策措施的意见》，首次明确现今粮食主产区的划定范围。2004年全国农业和粮食工作会议进一步确定了粮食主产区的区域划分，以粮食产量、人均占有量、商品粮库存等为指标，将河北、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、江苏、安徽、江西、山东、河南、湖北、湖南、四川13个省（区）确定为粮食主产区。到目前为止，农业农村部尚未对粮食主产区的划分作进一步的调整和完善。

为便于后文研究，本文基于中国气候分布地图，将13个粮食主产省区分为四种气候类型区域。其中，河北、内蒙古、辽宁、吉林划定为温带大陆性季风气候区；黑龙江和山东为温带季风气候区；江苏、安徽、河南为温带与亚热带季风过渡型气候区；江西、湖北、湖南和四川为亚热带季风气候区。

（二）数据来源

考虑数据的可获得性，本文以2009—2021年中国13个粮食主产区为研究样本，数据来源于《中国水利年鉴》《中国人口和就业年鉴》《中国农业机械工业年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国经营管理统计年报》《中国农村经济情况统计资料》《中国农村合作经济统计年报》《中国农村政策与改革统计年报》《中国保险年鉴》《中国休闲农业年鉴》《中国农业年鉴》《中国统计年鉴》及各省统计年鉴、中经网统计数据库、国家土地调查、国家气象科学数据共享服务平台、中国农村金融服务报告、CSMAR数据库、中国互联网发展状况统计报告、农业农村部和商务部对外贸易司。逐年均温栅格数据由逐月均温栅格数据处理得到，逐月均温栅格数据来源于国家青藏高原科学数据平台。年日照时数整理于《中国地面气候资料日值数据集（V3.0）》。部分缺失数据通过线性插值法补齐。

（三）指标体系

目前，学术界对粮食生产韧性的概念内涵尚未达成共识，定量评价研究较少。现有研究主要关注粮食系统韧性应对的风险与挑战，强调干扰的存在和粮食系统的自我恢复力，却忽略了粮食生产的可持续性对气候变化的响应。粮食生产受气候因素影响日趋加深，因此，管理者和农业生产者能否对气候变化及其产生的影响做出适应性反应，缓解气候变化潜在的不利影响对于综合评估粮食生产韧性不可或缺。根据蒋辉等（2023）相关学者的研究及适应性循环理论，气候变化视角下，粮食生产韧性是指地区粮食生产系统在遭受外部冲击时的抵御能力、适应能力和恢复能力。在此基础上，参考青平等（2023）将我国粮食安全韧性分解为抵抗能力、适应能力和变革能力，从抵抗力、适应力和恢复力3方面构建粮食生产韧性评价指标体系，指标选取主要参照蒋辉等（2023）、郑家喜等（2024）的研究。抵抗力分为粮食生产条件和粮食生产能力2个维度；适应力分为农民生计能力和适应行为调整2个维度；恢复力分为经济增长、生态治理、技术进步、组织支持和金融服务5个维度。共计27个指标（见表1）。

抵抗力层面，粮食生产韧性中的抵抗力主要体现为气候冲击后的农产品有效供给，即粮食生产系统抵抗外界干扰时能保持原有粮食生产水平的稳定性。依据杨翠红等（2022）对耕地、水、劳动力、机械化等对粮食生产的限制与影响的研究，将耕地、劳动力、农资、农业用水等作为粮食生产投入。对应地，聚焦粮食生产的结果，通过粮食单产直观感受粮食生产能力，土地生产率间接反映粮食生产潜力。

适应力层面，粮食生产韧性中的适应力主要体现为气候冲击后的农业适应性，包括适应能力和适应方式。参考董玥等（2023）对农户生计韧性的评价，从缓冲能力、认知能力以及健康状况衡量农民生计能力，适应行为调整主要是指农民遭受风险冲击后的学习转型行为和组织管理行为。人均可支配收入和农业保险保费收入在一定程度上可以帮助农民缓解风险压力，受教育程度能够间接反映农民自身面对风险的接受力及能否采取应对措施，农村每千人卫生技术人员表征农民的健康状况能否得到保障从而进行正常生产，乡镇文化站和互联网普及率则从外部考虑农民接收农业风险信息、先进技术和应对方法的便捷性。进一步，结合周曙东等（2013）应对气候变化的适应性对策，从加强水利农田基础设施建设，发展休闲农业和土地流转非粮化等转型发展措施反映农民适应气候变化的调整与参与行为。其中，发展休闲农业用休闲农业年营销收入衡量，土地流转非粮化=（1−流转用于种植粮食作物的面积）/家庭承包耕地流转总面积*100%，以水利建设投资完成额衡量加强水利农田基础设施建设。

恢复力层面，粮食生产韧性中的恢复力主要体现为气候冲击后的农业再造力，即恢复增强粮食生产能力所带来的综合效益。在蒋辉等（2023）研究的基础上，将农业机械化作业服务人员占比替换为紧密度更高的农业科技人员数，并增加对组织支持和金融服务的考量。农业专业合作社能够在市场经济

条件下提升农业产业发展水平，帮助农民增收，促进先进农业科技的推广和应用；农业保险赔付能够支持受灾农民恢复生产；涉农贷款同样起到助推农业增效、农民增收的引擎作用。

表1　粮食主产区粮食生产韧性水平评价指标体系

目标层	准则层	指标层	单位	指标属性	指标权重
抵抗力	粮食生产条件	单位粮食播种面积化肥使用量	千克/公顷	负向	0.0461
		单位粮食播种面积农膜使用量	千克/公顷	负向	0.0301
		单位粮食播种面积农药使用量	千克/公顷	负向	0.0262
		单位粮食播种面积农业用水量	万立方米/公顷	负向	0.0326
		农业机械化总动力*（粮食播种面积/农作物播种面积）	—	正向	0.0481
		粮食复种指数	—	正向	0.0484
		有效灌溉率	%	正向	0.0625
		第一产业劳动力占比	%	正向	0.0349
	粮食生产能力	粮食单产	千克/公顷	正向	0.0155
		土地生产率	万元/公顷	正向	0.0692
适应力	农民生计能力	农民人均可支配收入	元	正向	0.0426
		农业保险保费收入	百万元	正向	0.0238
		农民平均受教育年限	年	正向	0.0201
		农村每千人卫生技术人员	人/千人	正向	0.0760
		乡镇文化站	个	正向	0.0732
		互联网普及率	%	正向	0.0446
	适应行为调整	发展休闲农业	亿元	正向	0.0373
		土地流转非粮化	%	负向	0.0440
		加强水利基础设施建设	万元	正向	0.0319
恢复力	经济增长	第一产业增加值	亿元	正向	0.0355
		农村居民人均消费支出指数	—	正向	0.0215
	生态治理	受灾率	%	负向	0.0099
		水土流失治理面积*（粮食播种面积）/农作物播种面积	万公顷	正向	0.0279
	技术进步	农业科技人员数*（粮食播种面积）/农作物播种面积	人	正向	0.0339
	组织支持	农业专业合作社数量	个	正向	0.0220
	金融服务	农业保险赔付支出	百万元	正向	0.0086
		涉农贷款	亿元	正向	0.0335

（四）研究方法

1. 改进的熵值法

在综合评价前，首先将正向指标、负向指标同趋势变化处理。本文采用改进的熵值法，将所有经过最大最小标准化后的指标$x_{i,j}$(i=1, 2, …, m；j=1, 2, …, n)向右平移0.0001个单位以消除极端值的影响，形成目标层、准则层和指标层，依次计算指标比重$p_{i,j}$、第j项指标熵值e_j以及差异系数g_j，然后根据各分项指标标准化平移后的值及权重w_j的乘积加权，得到第i个评价对象的粮食生产韧性指数GPR_i。

$$x'_{i,j}=x_{i,j}+0.0001 \tag{1}$$

$$p_{i,j}=\frac{x'_{i,j}}{\sum_{i=1}^{m}x'_{i,j}} \tag{2}$$

$$e_j=-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}p_{i,j}\ln p_{i,j} \tag{3}$$

$$g_j = 1 - e_j \tag{4}$$

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^{n} g_j} \tag{5}$$

$$GPR_i = \sum_{j=1}^{n} x'_{i,j} \times w_j \tag{6}$$

2. Kernel密度估计

本文利用Stata 17，运用Kernel密度方法分析粮食主产区四大气候分区粮食生产韧性水平的分布态势。默认核函数为Epanechnikov核，为当前最有效、应用最广泛的一种非参数密度估计算法。假设有n个数$X_1, X_2, \cdots, X_n$，则随机变量X的核密度函数估计量为

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh}\sum_{i=1}^{n} K\left(\frac{x - X_i}{h}\right) \tag{7}$$

其中，$K(\cdot)$为核函数，$X_1, X_2, \cdots, X_n$为各省区粮食生产韧性水平值，x为均值，n为待估计的样本总量，h为窗宽。

Epanechnikov核的函数式为

$$K(x) = \frac{3}{4}\left(1 - x^2\right) I(|x| \leqslant 1) \tag{8}$$

其中，$I(\cdot)$为示性函数，当括号中的条件为真时$I(\cdot)=1$，当括号中的条件为假时$I(\cdot)=0$。

3. Theil指数及分解

近年来，泰尔指数常被用于分析区域差异。本文运用Stata 17软件计算泰尔指数，分析13个粮食主产区区域内和区域间粮食生产韧性水平的差异及其贡献率。一般地，具体计算公式如下：

$$T = \frac{1}{k}\sum_{q=1}^{k}\left(\frac{S_q}{\bar{S}} \times \ln\frac{S_q}{\bar{S}}\right) = T_w + T_b \tag{9}$$

$$T_w = \sum_{p=1}^{4}\left(\frac{k_p}{k} \times \frac{\bar{S}_p}{\bar{S}} \times \frac{1}{k_p}\sum_{q=1}^{k_p}\left(\frac{S_{pq}}{\bar{S}_p} \times \ln\frac{S_{pq}}{\bar{S}_p}\right)\right) \tag{10}$$

$$T_b = \sum_{p=1}^{4}\left(\frac{k_p}{k} \times \frac{\bar{S}_p}{\bar{S}} \times \ln\frac{\bar{S}_P}{\bar{S}}\right) \tag{11}$$

式(9)中，T表示13个粮食主产区的总体差异泰尔指数，为区域内差距和区域间差距之和，$T \in [0,1]$，泰尔指数越小，说明粮食生产韧性的总体差异越小，反之则说明总体差异越大。q表示省份，k表示省份数量，S_q表示省份q的粮食生产韧性水平，$\bar{S}$表示13个粮食主产区粮食生产韧性水平的平均值。式(10)为粮食生产韧性的区域内差异泰尔指数T_w，式中，k_p表示区域p的省份数量，S_{pq}表示区域p省份q的粮食生产韧性发展水平，$\bar{S}_p$表示区域p的粮食生产韧性水平均值。式(11)为区域间差异泰尔指数T_b。另外，T_w/T和T_b/T分别定义为区域内差异和区域间差异对总体差异的贡献率，$(S_p/S)\times(T_p/T)$为各区域对区域内总体差异的贡献率，S_p表示区域p内各省份的粮食生产韧性水平之和，S则表示13个粮食主产区粮食生产韧性水平之和。

4. 灰色预测模型GM(1,1)

国内外已有研究将灰色预测模型用于粮食领域，主要是对粮食产量的预测。灰色预测的主要特点是适用于少量数据时使用，考虑到本文的样本量较小，该方法较为适宜。本文使用灰色预测模型做短期预测，通过鉴别系统因素之间发展趋势的相异程度，并对原始数据进行灰色生成寻找系统变动的规

律，生成有较强规律性的数据序列，然后建立相应的微分方程模式，从而预测粮食主产区粮食生产韧性未来发展状况。主要步骤包括数据的检验与处理、建立GM(1,1)模型和检验预测值。灰色预测模型精度等级见表2。

表2　灰色预测模型精度等级

模型精度等级	后验差比值C	小误差概率p
1级(好)	C≤0.35	0.95≤p
2级(合格)	0.35 < C≤0.50	0.80≤p<0.95
3级(勉强)	0.50 < C≤0.65	0.70≤p<0.80
4级(不合格)	0.65 < C	p<0.70

5. 灰色关联度模型

利用灰色关联度模型研究粮食生产韧性的影响因素。选择参考序列和比较序列；运用初值法对变量进行无量纲化处理；依次求出差序列、最大差和最小差；计算关联系数，分辨系数δ取0.5；计算各影响因素的关联度。一般而言，关联的强度越大，该关联为因果关联的可能性就越大。故关联度越大，该指标对粮食生产韧性的影响程度越高。

三、粮食主产区粮食生产韧性时空分异分析

（一）粮食生产韧性水平测度评价

由表3可知，13个粮食主产区粮食生产韧性水平在研究时段内均呈现出稳步提升趋势，但提升速率具有一定差距。从各年水平排名和年均增速来看，山东和河南的粮食生产韧性水平位居前列，2009、2021年均位于前三名；湖北年均增速最快，提升幅度为0.319，由2009年的第13名上升为2021年的第9名。说明湖北始终重视粮食安全，把粮食生产置于突出地位，不断深化农业供给侧结构性改革，夯实了粮食生产基础。内蒙古、辽宁和吉林2009、2021年粮食生产韧性水平排名均较为落后，未能突破0.500，且内蒙古年均增速最慢，与同为2009年落后地区的辽宁相比发展较慢。内蒙古、辽宁和吉林地广人稀，土地集约利用管理存在问题，应整治和盘活闲置土地，提高土地利用效率。从整体均值来看，温带与亚热带季风过渡型气候区的粮食生产韧性水平普遍高于其他三个气候分区。具体而言，河南的平均水平最高，吉林的平均水平最低，均值相差0.164，可见区域之间发展存在较大差异。辽宁、黑龙江和江西在2009、2021年的排名位置无变化，而黑龙江和江西的年均增速分别为第三、二位。说明两省正在有序推进粮食生产工作，稳步夯实粮食安全根基。

利用等间隔法将粮食主产区粮食生产韧性划分为5个等级(高韧性区为数据类型拓展区域)。如表4所示。为直观地展示2009—2021年各粮食主产区等级变化过程，利用Arcmap10.6对数据进行可视化处理见图1。

由表4和图1可知，2009年尚无达到中等韧性水平和高等韧性水平的地区，大多数省份处于低韧性水平，仅有5个省份为较低韧性水平，说明粮食主产区整体粮食生产韧性水平较低，但区域差异不显著。到2015年，13个粮食主产区所有地区均已脱离低韧性水平状态，黑龙江、安徽、湖南的进步较大，从低韧性跨级提升到中韧性，成功加入“第二梯队”。其余10个省份相对于2009年均有升级变化，如内蒙古、辽宁、吉林、江西和湖北5省区从低韧性上升为较低韧性；河北、江苏、山东、河南和四川5省从较低韧性发展为中韧性。相比2015年，2021年各粮食主产区的粮食生产韧性均提升了一个等级。内蒙古、辽宁、吉林、江西、湖北继续提升至中等韧性水平；河北、黑龙江、江苏、安徽、山东、河南、湖南、四川进一步转变为较高韧性区。

表3 粮食主产区分省区粮食生产韧性水平及排名

省(区)	2009	2015	2021	均值	均值排名	年均增速排名
河北	0.393	0.549	0.646	0.532	4	11
内蒙古	0.307	0.433	0.493	0.421	11	13
辽宁	0.296	0.422	0.495	0.399	12	10
吉林	0.286	0.394	0.489	0.389	13	8
黑龙江	0.331	0.506	0.606	0.489	8	3
江苏	0.391	0.538	0.700	0.538	3	5
安徽	0.348	0.497	0.638	0.496	7	4
江西	0.298	0.419	0.574	0.429	10	2
山东	0.401	0.553	0.709	0.551	2	6
河南	0.429	0.552	0.694	0.553	1	12
湖北	0.266	0.460	0.585	0.450	9	1
湖南	0.362	0.503	0.631	0.502	6	7
四川	0.386	0.515	0.654	0.519	5	9

表4 2009—2021年粮食主产区韧性水平等级变化

粮食生产韧性	2009年	2015年	2021年
低韧性区 (0.0001~0.3770)	内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、 安徽、江西、湖北、湖南	—	—
较低韧性区 (0.3771~0.4880)	河北、江苏、山东、 河南、四川	内蒙古、辽宁、吉林、 江西、湖北	—
中韧性区 (0.4881~0.5980)	—	河北、黑龙江、江苏、安徽、 山东、河南、湖南、四川	内蒙古、辽宁、吉林、 江西、湖北
较高韧性区 (0.5981~0.7090)	—	—	河北、黑龙江、江苏、安徽、 山东、河南、湖南、四川
高韧性区 (0.7091~1.0000)	—	—	——

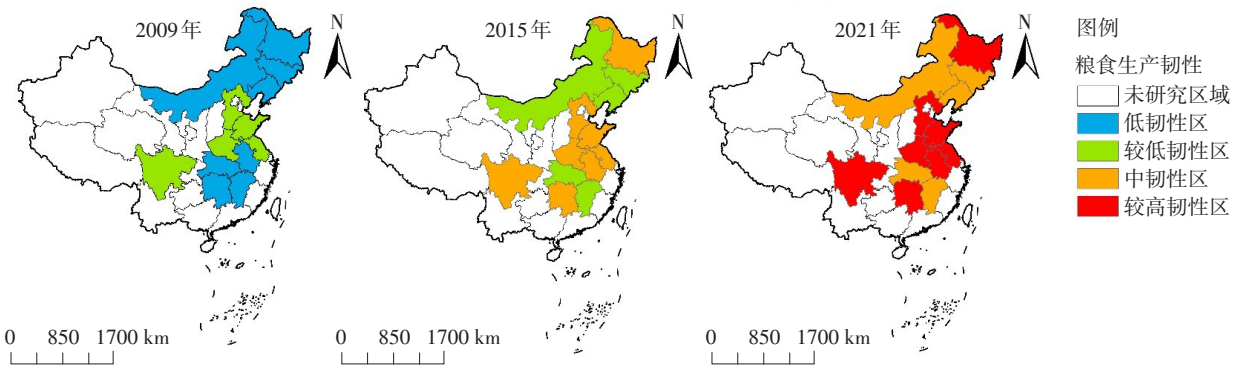

图1 粮食主产区韧性等级变化分布

基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1822号的标准地图制作，底图无修改。

（二）粮食生产韧性水平动态演进特征

图2展示了粮食主产区四大气候分区粮食生产韧性水平的分布动态。首先，从分布的位置来看，粮食主产区四大气候分区分布的中心明显向右平移，这意味着各地区的粮食生产韧性水平不断提高，演变速度较快。其次，从峰值的特征来看，温带大陆性季风气候区粮食生产韧性水平分布的峰值在研究期内呈现先下降后上升的趋势，且“主次峰”的状态无明显变化，说明该气候区内各地粮食生产韧性水平差距先变大后变小。与之相反，温带季风气候区粮食生产韧性水平分布的峰值在研究期内呈现先上升后下降的趋势，说明该气候区内各地粮食生产韧性水平差距先变小后变大。温带与亚热带季风过渡型气候区和亚热带季风气候区均由单峰向多峰演进，相较之下，后者的多峰形态更为明显，说明亚热带季风气候区内各地粮食生产韧性差距缩小速度更快。温带季风气候区和温带与亚热带季风过渡型气候区的演变速度明显快于温带大陆性季风气候区和亚热带季风气候区，说明前两个地区粮食生产韧性水平总体较高。温带大陆性季风气候区主峰较其他三个气候分区宽，说明温带大陆性气候区内部发展差异高于其他三个气候分区。最后，从分布形态来看，四大气候分区的核密度曲线拖尾不明显，说明四大气候分区区域内的粮食生产韧性水平发展较为均衡。综上所述，13个粮食主产区粮食生产韧性水平不断提高，区域间存在一定差距，应积极推进区域协调发展。

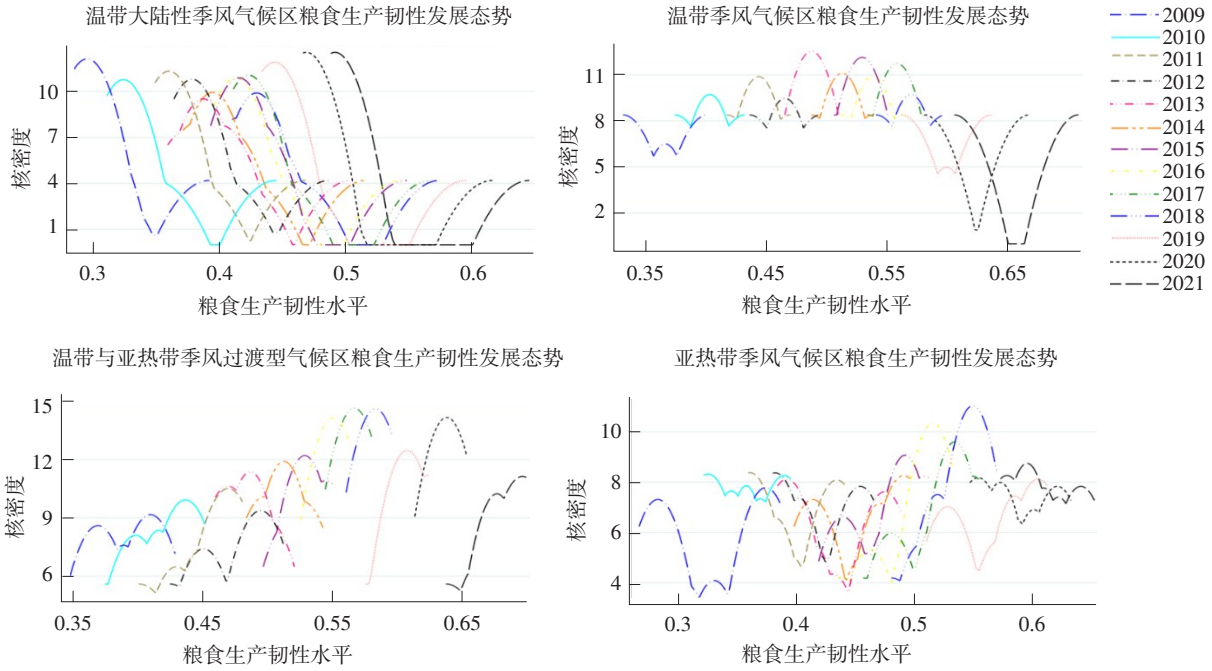

图2　粮食主产区四大气候分区粮食生产韧性水平核密度估计

（三）粮食生产韧性地区差异分析

运用泰尔指数分析粮食主产区及四大气候分区的地区差异。根据公式计算粮食主产区粮食生产韧性水平的总体差异、区域内差异、区域间差异及其贡献率，具体见表5。

首先，粮食主产区粮食生产韧性水平的总体差异较小，研究时段内大致呈先下降后上升的趋势，总体泰尔指数于2015年达到最低值，说明该年地区发展较为均衡。另外，总体泰尔指数从2009年的1.057%到2021年的0.774%，整体差异有所缩小，说明逐渐以统筹区域发展思路解决粮食主产区经济社会协调发展问题。其次，从粮食生产韧性的差异结构来看，以2018年为分水岭，2018年之前粮食

主产区粮食生产韧性水平的差异来源主要是区域内差异，平均贡献率为61.98%，2018年之后粮食主产区粮食生产韧性水平的主要差异来源则变成区域间差异，平均贡献率为55.76%，说明粮食主产区四大气候分区之间的发展差距逐渐显现。最后，针对粮食主产区四大气候分区，除2009年外，温带大陆性季风气候区的内部差异均远超其他三个气候分区，意味着温带大陆性季风气候区区域内部粮食生产韧性水平存在较大的不平衡。温带季风气候区、温带与亚热带季风过渡型气候区对区域内差异的贡献率一直很小，说明两区域内各省份粮食生产韧性发展差异相对较小。亚热带季风气候区区域内差异及贡献度整体呈下降趋势，从2009年的29.880到2021年的5.626，说明亚热带季风气候区粮食生产韧性发展差距在不断缩小，可能是得益于良好的光热、水土条件和物种多样性等优势。

表5 2009—2021年粮食主产区及四大气候分区粮食生产韧性的泰尔指数及贡献率

年份	总体差异	区域间差异及贡献率	区域内差异及贡献率	区域内差异及贡献率的分解			
				温带大陆性季风	温带季风	温带与亚热带季风过渡型	亚热带季风
2009	0.0106	0.0033 (31.315)	0.0073 (68.685)	0.0084 (22.685)	0.0046 (7.148)	0.0036 (8.959)	0.0108 (29.880)
2010	0.0082	0.0025 (30.891)	0.0057 (69.109)	0.0113 (39.908)	0.0026 (5.158)	0.0030 (9.233)	0.0042 (14.830)
2011	0.0065	0.0020 (30.294)	0.0045 (69.706)	0.0075 (33.562)	0.0018 (4.548)	0.0029 (11.224)	0.0044 (20.312)
2012	0.0064	0.0021 (32.759)	0.0043 (67.241)	0.0072 (32.304)	0.0020 (5.200)	0.0029 (11.510)	0.0039 (18.263)
2013	0.0066	0.0023 (35.196)	0.0043 (64.804)	0.0081 (35.136)	0.0010 (2.623)	0.0013 (4.991)	0.0049 (22.031)
2014	0.0072	0.0032 (44.150)	0.0040 (55.850)	0.0083 (32.190)	0.0013 (3.032)	0.0011 (3.948)	0.0040 (16.729)
2015	0.0062	0.0024 (39.257)	0.0038 (60.743)	0.0084 (38.537)	0.0010 (2.725)	0.0010 (3.921)	0.0032 (15.464)
2016	0.0070	0.0035 (49.498)	0.0035 (50.502)	0.0082 (32.436)	0.0012 (2.829)	0.0005 (1.897)	0.0030 (13.315)
2017	0.0071	0.0035 (48.808)	0.0036 (51.192)	0.0092 (35.435)	0.0009 (2.168)	0.0004 (1.420)	0.0028 (12.226)
2018	0.0073	0.0039 (52.997)	0.0034 (47.003)	0.0094 (34.687)	0.0013 (2.888)	0.0004 (1.281)	0.0019 (8.093)
2019	0.0080	0.0043 (53.741)	0.0037 (46.259)	0.0089 (29.793)	0.0019 (3.995)	0.0007 (2.172)	0.0026 (10.266)
2020	0.0073	0.0042 (57.655)	0.0031 (42.345)	0.0075 (27.933)	0.0024 (5.529)	0.0004 (1.330)	0.0018 (7.574)
2021	0.0077	0.0045 (58.656)	0.0032 (41.473)	0.0076 (26.237)	0.0031 (6.675)	0.0009 (2.886)	0.0014 (5.626)

注：括号内数值为贡献率，单位为%。各年区域差异贡献率之和与总体贡献率存在0.1%以内的差，可能是原始数据小数点位数四舍五入造成的浮动偏差。

（四）粮食生产韧性动态预测及模型精度检验

利用灰色预测模型预测13个粮食主产区粮食生产韧性水平，并通过后验差检验法检验模型预测结果精度。基于2009—2021年13个粮食主产区粮食生产韧性测度值，利用灰色预测模型对各粮食主产区未来3年粮食生产韧性水平进行预测，结果显示，首先，13个地区均通过数据光滑检验，说明适宜采用GM(1,1)模型；其次，后验差比C值均小于0.35，说明预测结果精度等级好；最后，小误差概率p值检验均为1，再度说明预测结果精度高，较为科学、合理。

从粮食生产韧性时序演变来看，13个粮食主产区的粮食生产韧性将继续呈现稳步增长的发展态势，各粮食主产区粮食生产韧性水平将得到显著提高。从粮食生产韧性等级变化来看，到2025年，将有9个粮食主产区进入高粮食生产韧性行列，韧性值分别增长至0.7237、0.7096、0.8141、0.7696、0.8156、0.7722、0.7369、0.7522、0.7739，温带季风气候区和温带与亚热带季风过渡型气候区区域内所有省份均达到高韧性水平，其中，江苏和山东率先突破0.8000；2026年，江西成功提升至高韧性水平；到2027年，将有7个省区粮食生产韧性水平达到0.8000以上，而内蒙古、辽宁和吉林仍然未能突破中等韧性的上限，可见各粮食主产区区域间发展差距进一步拉大。从粮食生产韧性空间格局变化来看，粮食生产韧性地域性分异显著存在，且地区间差异呈现进一步扩大的趋势，尤其是温带大陆性季风气候区即粮食主产区北部地区。全球变暖趋势仍在持续，粮食生产重心逐渐向北偏移，未来粮食安全的重任将更多地落在我国北方地区，但南北方气候差异较大，北方不具备类似南方优渥的农业自然资源条件，尤其是水资源，因此要高度重视粮食主产区受大陆季风影响地区的粮食生产韧性变化，做好区域间的“交接”协调，提升粮食主产区整体实力。

四、粮食主产区粮食生产韧性影响因素关联度探析

（一）影响因素选取

本文在梳理和总结现有文献（蒋辉等，2023；董玥等，2023；王跃梅等，2013；高颖等，2013；徐志刚等，2017）的基础上，从自然和非自然两个角度选择影响粮食生产韧性的指标。自然因素包括降水、气温和光照三个主要的气候要素。非自然因素包括政府层面的财政支农力度、市场层面的农产品交易情况、农产品对外依存度以及社会层面的劳动力流动和城镇化进程。具体衡量见表6。

表6　影响因素变量

分类	自变量	序号	具体指标	单位
自然因素	年降水量	X_1	年降水量	毫米
	年均温	X_2	年均温	℃
	年日照时数	X_3	年日照时数	小时
非自然因素	财政支农力度	X_4	涉农支出占财政支出比例	%
	农产品交易市场	X_5	农产品市场成交额	万元
	农产品外贸依存度	X_6	（农产品进出口总额*汇率/10 000）/农林牧渔业总产值	%
	农村劳动力外流	X_7	农村外出务工劳动力人数	万人
	城镇化率	X_8	年末城镇人口比重	%

（二）影响因素关联度分析

如表7所示，13个粮食生产区粮食生产韧性主要受到农村劳动力外流、城镇化率、农产品外贸依存度、年降水量、财政支农力度等因素影响，对应关联度分别为0.7044、0.6709、0.6637、0.6173、

0.5664。各气候分区所有影响因素与粮食生产韧性的关联度均大于0.5000。四大气候分区粮食生产韧性发展均受到农村劳动力外流和农产品外贸依存度的强烈影响。具体而言，温带大陆性季风气候区和温带季风气候区粮食生产韧性发展均与国内农产品交易市场状况联系紧密，温带与亚热带季风过渡型气候区则相反。温带季风气候区相对于其他三个气候分区，受到气候要素影响最小，而易受到财政支农力度的影响。温带与亚热带季风过渡型气候区和亚热带季风气候区粮食生产韧性发展的主要影响因素极为相似，前者受到城镇化进程的强烈影响，且对气候要素影响较为敏感。

表7 粮食主产区及四大气候分区2009—2021年粮食生产韧性主要影响因素排序

地区	关联度排序							
	1	2	3	4	5	6	7	8
温带大陆性季风	X_7 (0.6737)	X_6 (0.6415)	X_5 (0.6357)	X_8 (0.6235)	X_1 (0.6084)	X_4 (0.5693)	X_2 (0.5239)	X_3 (0.5100)
温带季风	X_7 (0.6814)	X_4 (0.6783)	X_5 (0.6639)	X_6 (0.6127)	X_8 (0.5976)	X_2 (0.5501)	X_1 (0.5433)	X_3 (0.5338)
温带与亚热带季风过渡型	X_8 (0.9009)	X_7 (0.8979)	X_6 (0.8700)	X_1 (0.8103)	X_3 (0.8054)	X_2 (0.7923)	X_4 (0.7492)	X_5 (0.5530)
亚热带季风	X_6 (0.7997)	X_8 (0.7095)	X_7 (0.7035)	X_1 (0.6676)	X_5 (0.6641)	X_4 (0.5666)	X_2 (0.5665)	X_3 (0.5640)
无气候划分	X_7 (0.7044)	X_8 (0.6709)	X_6 (0.6637)	X_1 (0.6173)	X_4 (0.5664)	X_2 (0.5481)	X_3 (0.5473)	X_5 (0.5442)

五、结论与政策建议

（一）结论

本文基于气候变化视角，考虑气候对粮食生产的影响及人为应对自然变化的行为，构建粮食生产韧性综合评价指标体系，以探讨2009—2021年13个粮食主产区粮食生产韧性水平及其气候分区的动态演变过程与影响因素的差异化。主要结论如下：

在水平测度方面，粮食主产区粮食生产韧性水平在研究时段内均呈稳步提升趋势，但各地区提升速率有一定差距。2009—2021年，粮食主产区从最初13个均位于中等韧性水平之下发展到所有地区均达到中等及以上韧性水平，说明随着年份的推移，粮食主产区粮食生产韧性整体水平逐步提升，区域间差距正在扩大，存在个别地区发展速度较慢的情况。

在动态演进特征方面，首先，从分布的位置来看，粮食主产区四大气候分区分布的中心明显向右平移，各地区的粮食生产韧性水平不断提高，演变速度较快。其次，从峰值的特征来看，温带大陆性季风气候区内各地粮食生产韧性水平差距先变大后变小，温带季风气候区则与之正相反；温带季风气候区和温带与亚热带季风过渡型气候区粮食生产韧性水平总体较高；亚热带季风气候区内各地粮食生产韧性差距缩小速度最快。最后，从分布形态来看，四大气候分区无明显拖尾现象，区域内粮食生产韧性水平发展较为均衡。

在地区差异分析方面，首先，从总体来看，粮食主产区粮食生产韧性水平的差异较小，研究时段内大致呈先下降后上升的趋势，于2015年达到最低值，但研究时段始末对比相对下降。其次，从结构来看，研究期内粮食主产区粮食生产韧性水平的差异来源以2018年为分水岭，区域间差异逐渐赶超区域内差异。粮食主产区四大气候分区之间的发展差距显现。最后，分区域来看，温带大陆季风气候区对区域内粮食生产韧性水平差异贡献度最大，地区发展相对不平衡。

在动态预测方面，从时序演变来看，粮食主产区的粮食生产韧性将继续呈现稳步增长的发展态势，各地区粮食生产韧性水平将得到显著提高。从空间格局来看，粮食生产韧性地域性分异显著存在，且地区间差异将进一步扩大，尤其是粮食主产区北部地区。

在影响因素方面，粮食主产区粮食生产韧性水平主要受到农村劳动力外流、城镇化率、农产品外贸依存度、年降水量、财政支农力度等因素的影响，且不同气候分区粮食生产韧性的影响因素存在异质性。

（二）政策建议

第一，统筹粮食生产区域协调发展，重点关注粮食主产区北部地区韧性的提升。一方面，从内部侧重点来看，随着全球气候变暖，南北方作物生产条件变化，中国粮食生产重心逐渐北移。应切实加强北部地区农田基础设施配套建设，提高农业灾害抵御能力和转型应对能力。针对粮食作物种植范围北扩，模拟气候变化对各种粮食作物包括水稻、小麦、玉米、大豆等的影响，及时调整优化农业生产结构和经营体制，适当引入晚熟品种，以提升粮食生产韧性。另一方面，要着眼整体发展，发挥各地气候独特优势，推动特色农业产业发展，加强各省区之间的农业产业分工与协作，打造更具竞争力、稳定性的粮食产业链，构建规制协同、产业互动、设施共建、服务共享、政策联动的粮食生产功能区新格局，实现跨省级行政区联动发展。

第二，发挥政府作为与市场作用，提升粮食生产系统韧性。一方面，发挥政府在强化支农惠农政策方面的主导作用。政府应加大粮食生产保护性补贴力度，适当提高粮食收购价格，稳定粮食作物生产，促进农民增收和粮食规模经营发展，但在粮食补贴政策落实的过程中要注重合理、规范分配，提高政策的针对性与适用性。另一方面，发挥市场配置粮食资源的决定性作用。发展粮食生产必须以市场为导向，培育健全县域粮食市场，发挥各农业经营主体作用，针对粮食产业发展“补短板、破瓶颈、图进步”，与政府农业宏观调控协调配合，共同营造良好的市场环境。

第三，主动适应气候变化，推动气候适应型农业发展。面对中长期气候变化和极端天气增多的挑战，要及时调整生产方式、改变作物品种、引入先进技术，从科技层面提高农业系统气候恢复力。要完善和落实农业保险、信用贷款等政策，运用多种现代化管理手段保障和支持农业生产行动。协调粮食生产和城镇化发展二者的关系，促进农业要素流动、资源重置以及耕地利用效率提升，保持城镇化率与粮食产量之间的长效均衡。最后，建立粮食主产区横向利益补偿机制，吸引高质量劳动力回流，提高粮食主产区粮食生产能力。

参考文献

[1] 刘影, 肖池伟, 李鹏, 等. 1978–2013年中国粮食主产区“粮–经”关系分析[J]. 资源科学, 2015, 37(10): 1891–1901.

[2] 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.

[3] 张学珍, 李侠祥, 张丽娟, 等. RCP 8.5气候变化情景下21世纪印度粮食单产变化的多模式集合模拟[J]. 地理学报, 2019, 74(11): 2314–2328.

[4] 李先德, 孙致陆, 赵玉菡. 全球粮食安全及其治理: 发展进程、现实挑战和转型策略[J]. 中国农村经济, 2022(6): 2–22.

[5] 陈帅, 徐晋涛, 张海鹏. 气候变化对中国粮食生产的影响——基于县级面板数据的实证分析[J]. 中国农村经济, 2016(5): 2–15.

[6] 丑洁明, 董文杰, 徐洪, 等. 气候变化影响中国粮食安全研究的新思路[J]. 气候与环境研究, 2022, 27(1): 206–216.

[7] 李雪, 吕新业. 现阶段中国粮食安全形势的判断: 数量和质量并重[J]. 农业经济问题, 2021(11): 31–44.

[8] 高江波, 刘路路, 郭灵辉, 等. 气候变化和物候变动对东北黑土区农业生产的协同作用及未来粮食生产风险[J]. 地理学报, 2022, 77(7): 1681–1700.

[9] 何亚莉, 杨肃昌. “双循环”场景下农业产业链韧性锻铸研究[J]. 农业经济问题, 2021(10): 78–89.

[10] 蒋辉. 中国农业经济韧性的空间网络效应分析[J]. 贵州社会科学, 2022(8): 151-159.
[11] 于伟, 张鹏. 中国农业发展韧性时空分异特征及影响因素研究[J]. 地理与地理信息科学, 2019, 35(1): 102-108.
[12] 卢新海, 柯楠, 匡兵. 中国粮食生产能力的区域差异和影响因素[J]. 中国土地科学, 2020, 34(8): 53-62.
[13] 张青青, 曲衍波, 展凌云, 等. 中国粮食生产碳排放动态演进及驱动效应[J]. 地理学报, 2023, 78(9): 2186-2208.
[14] 张利国, 鲍丙飞. 我国粮食主产区粮食全要素生产率时空演变及驱动因素[J]. 经济地理, 2016, 36(3): 147-152.
[15] 陈璐, 胡月, 韩学平, 等. 国家粮食安全中主产区粮食生产及其贡献的量化对比分析[J]. 中国土地科学, 2017, 31(9): 34-42.
[16] 杜蓉, 柳思维, 蔡荣. 中国粮食空间生产格局演变特征及其驱动机制[J]. 经济问题, 2023, (8): 92-102.
[17] 辛岭, 高睿璞, 蒋和平. 我国粮食主产区粮食综合生产能力评价[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(9): 37-45.
[18] 马彪, 陈璐. 粮食主产区粮食生产与经济发展的"剪刀差"现象分析[J]. 农村经济, 2019(5): 51-59.
[19] 齐蘅, 吴玲. 我国粮食主产区粮食生产与收入水平的协调度分析[J]. 经济地理, 2017, 37(6): 156-163.
[20] 崔宁波, 董晋. 主产区粮食生产安全: 地位、挑战与保障路径[J]. 农业经济问题, 2021(7): 130-144.
[21] 罗海平, 邹楠, 胡学英, 等. 1980—2019年中国粮食主产区主要粮食作物气候生产潜力与气候资源利用效率[J]. 资源科学, 2021, 43(6): 1234-1247.
[22] 王婕, 张建云, 鲍振鑫, 等. 粮食产量对气候变化驱动水资源变化的响应[J]. 水科学进展, 2021, 32(6): 855-866.
[23] 苏芳, 刘钰, 汪三贵, 等. 气候变化对中国不同粮食产区粮食安全的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(8): 140-152.
[24] 吴绍洪, 赵东升. 中国气候变化影响、风险与适应研究新进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(6): 1-9.
[25] 吴普特, 赵西宁. 气候变化对中国农业用水和粮食生产的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 1-6.
[26] 谢立勇, 李悦, 钱凤魁, 等. 粮食生产系统对气候变化的响应: 敏感性与脆弱性[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(5): 25-30.
[27] 蒋辉, 陈瑶, 刘兆阳. 中国粮食生产韧性的时空格局及其影响因素[J]. 经济地理, 2023, 43(6): 126-134.
[28] 青平, 邓秀新, 闵师, 等. "双循环"背景下我国粮食安全韧性及风险管控战略研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(4): 26-38.
[29] 郑家喜, 赵妍, 卫增. 基于空间马尔科夫链的粮食生产韧性动态演进及趋势预测[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2024(3): 104-117.
[30] 杨翠红, 林康, 高翔, 等. "十四五"时期我国粮食生产的发展态势及风险分析[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(8): 1088-1098.
[31] 董玥, 杨忍, 邓颖贤, 等. 粮食主产区典型镇域的农业系统变化与农户生计韧性评价——以河南省高杨店镇为例[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(5): 1208-1222.
[32] 周曙东, 周文魁, 林光华, 等. 未来气候变化对我国粮食安全的影响[J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2013, 13(1): 56-65.
[33] 王跃梅, 姚先国, 周明海. 农村劳动力外流、区域差异与粮食生产[J]. 管理世界, 2013(11): 67-76.
[34] 高颖, 田维明, 张宁宁. 扩大农产品市场开放对中国农业生产和粮食安全的影响[J]. 中国农村经济, 2013(9): 4-17.
[35] 徐志刚, 谭鑫, 郑旭媛, 等. 农地流转市场发育对粮食生产的影响与约束条件[J]. 中国农村经济, 2017(9): 26-43.
[36] Burt T, Boardman J, Foster I, et al. More Rain, Less Soil: Long-term changes in rainfall intensity with climate change[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2016, 41(4): 563-566.
[37] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1-23.
[38] Ockenden M C, Hollaway M J, Beven K J, et al. Major agricultural changes required to mitigate phosphorus losses under climate change[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 161.
[39] Zimmerer K S, Olivencia Y J, Rodriguez L P, et al. Assessing social-ecological connectivity of agricultural landscapes in Spain: Resilience implications amid agricultural intensification trends and urbanization[J]. Agricultural Systems, 2022, 203: 103525.

（责任编辑：肖舒苑）

Spatial-temporal Differences and Influencing Factors of Grain Production Resilience in China from Perspective of Climate Change

—— A Case Study of Major Grain Producing Areas

ZHANG Yongwang, ZHOU Xinxin

(College of Economics and Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Facing the increasingly severe climate change situation, improving the resilience of food production is particularly important. Taking 13 major grain producing areas in China as the research objects, based on the influence of climate change on grain production, a comprehensive evaluation index system was established. By using entropy method, kernel density estimation, theil index, gray prediction model and grey relational degree model, the grain production resilience of each region from 2009 to 2021 was measured and evaluated, the characteristics of temporal and spatial evolution and regional differences were analyzed, the development situation in the next three years was further predicted, and the factors affecting the resilience of grain production under different climatic conditions and their differences were explored. It could be found that: the main grain producing areas had shown a steady upward trend during the research period, but there was a certain gap in the promotion rate in different regions. The development of grain production resilience level in the four climatic zones was relatively balanced. The overall difference in the main grain producing areas was small, which showed a general trend of first decreasing and then increasing, in recent years, mainly attributed to regional differences. It is expected that nine major grain producing areas would enter the ranks of high grain production resilience in 2025. The main grain producing areas will be influenced by rural labor outflow, urbanization rate, dependence on foreign trade of agricultural products, annual precipitation, financial support for agriculture, and other factors. Finally, based on the spatiotemporal differentiation characteristics and influencing factors, it was suggested that enhancing the resilience of grain production required coordinated regional development, focusing on the role of government and market in the grain field, and promoting the development of climate adaptive agriculture, in order to promote the comprehensive production capacity of grain in major grain producing areas.

Key words: major grain producing areas; climate change; grain production resilience; adaptability; spatial-temporal differences