http://www.resourcesindustries.net.cn zycy@cugb.edu.cn

数字技术赋能粮食体系韧性的空间效应研究

冯 飞，李温馨

（延安大学 经济与管理学院，陕西 延安 716000）

摘 要：基于 2011—2022 年中国 30 个省份的面板数据，运用熵权 TOPSIS 法对数字技术和粮食体系韧性的指标体系进行测度，并采用空间杜宾模型考察数字技术对粮食体系韧性的空间溢出效应，以期为优化我国数字农业布局、筑牢粮食安全根基提供决策依据。研究表明：1）基于三维核密度图分析，从区域层面看，2011—2022 年我国粮食主产区的粮食体系韧性呈现“提升—分化—集中”的演化特征；主销区表现为先提升后回落的波动态势；产销平衡区则呈现前期提升集聚、后期分散回落的阶段性特征。从全国整体来看，全国粮食体系韧性虽呈逐年增长态势，但在空间维度上存在显著的“俱乐部收敛”特征，区域发展不均衡问题较为突出。2）计量结果表明，数字技术对粮食体系韧性具有显著的促进作用，且表现出强劲的正向空间溢出效应，溢出效应占总效应的 79.5%，远高于直接效应。在更换权重矩阵和剔除样本后，该结果依然稳健。3）区域异质性分析表明，三大粮食功能区直接效应均正向显著，主销区溢出效应占总效应的比重最高（80.6%），产销平衡区次之（58.9%），主产区溢出效应不显著。基于上述结论，提出以下政策建议：应充分释放数字技术的空间溢出红利，借助发达地区的数字技术优势，强化跨区域辐射带动作用；结合三大粮食功能区的资源禀赋与功能定位，因地制宜实施梯度化数字技术推广策略，构建“主销区引领、主产区攻坚、平衡区衔接”的全域数字赋能格局，通过数字技术协同驱动区域粮食体系韧性均衡提升，从而为筑牢国家粮食安全屏障提供理论支撑与实践路径。

关键词：数字技术；粮食体系韧性；空间溢出效应；空间杜宾模型

中图分类号：F326.11 **文献标识码**：A **文章编号**：1673－2464（2026）05－0060－12

The Spatial Effects of Digital Technology Empowering Food System Resilience

FENG Fei, LI Wenxin

(*School of Economics and Management*, *Yan'an University*, *Yan'an* 716000, *China*)

Abstract: Based on provincial panel data from 30 provinces in China from 2011 to 2022, the entropy-weighted TOPSIS method is used to measure the indicator systems of digital technology and food system resilience, and the spatial Durbin model is employed to examine the spatial spillover effect of digital technology on food system resilience, aiming to provide a decision-making basis for optimizing China's digital agriculture layout and consolidating the foundation of food security. Based on the three-dimensional kernel density plot analysis, at the regional level, from 2011 to 2022, the food system resilience of China's main grain-producing areas exhibits an evolutionary characteristic of "improvement-differentiation-concentration"; the main grain-selling areas show a fluctuating trend of first increasing and then

收稿日期：2026－01－14；**修订日期**：2026－04－24；**责任编辑**：胡媛。

网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/11.5426.td.20260921.1448.004 **DOI**：10.13776/j.cnki.resourcesindustries.20260727.003

基金项目：延安市科技计划项目（2023－SFGG－125）。

第一作者简介：冯飞，博士、教授，主要从事农业经济研究。E-mail：ydjgy_ ff@163.com

通信作者简介：李温馨，硕士生，主要从事农业经济研究。E-mail：18891161777@163.com

引用格式：冯飞，李温馨，2026. 数字技术赋能粮食体系韧性的空间效应研究[J]. 资源与产业，28(5)：60－71.

FENG Fei, *LI Wenxin*, 2026. *The spatial effects of digital technology empowering food system resilience*[J]. *Resources & Industries*, 28(5): 60－71.

declining; and the production-marketing balance areas present a phased characteristic of improvement and agglomeration in the early period and dispersion and decline in the later period. At the national level, although China's food system resilience shows a year-by-year growth trend, it exhibits significant "club convergence" in the spatial dimension, and the problem of unbalanced regional development is relatively prominent. The econometric results show that digital technology has a significant promoting effect on food system resilience and demonstrates a strong positive spatial spillover effect, with the spillover effect accounting for 79.5% of the total effect, far higher than the direct effect. This result remains robust after replacing the weight matrix and excluding samples. Regional heterogeneity analysis shows that the direct effects in all three major grain functional areas are positive and significant. The main grain-selling areas have the highest proportion of spillover effect in the total effect (80.6%), followed by the production-marketing balance areas (58.9%), while the spillover effect in the main grain-producing areas is not significant. Based on the above conclusions, it is proposed that the spatial spillover dividend of digital technology should be fully released, and the digital technology advantages of developed regions should be leveraged to strengthen cross-regional radiation and driving effects. In combination with the resource endowments and functional positioning of the three major grain functional areas, differentiated digital technology promotion strategies should be implemented according to local conditions, and a comprehensive digital empowerment pattern of "main grain-selling areas leading, main grain-producing areas tackling key problems, and balance areas connecting" should be built. Through digital technology, the balanced improvement of regional food system resilience should be collaboratively driven, thereby providing theoretical support and practical pathways for building a solid national food security barrier.

Key words: digital technology; food system resilience; spatial spillover effect; spatial Durbin model

0　引言

2025 年中央一号文件锚定粮食安全保障核心目标，明确提出严守耕地保护红线、强化农业科技与装备创新支撑、健全粮食生产支持政策体系等关键举措，为持续提升粮食及重要农产品供给保障能力、牢牢掌握粮食安全主动权提供了顶层设计遵循。粮食安全作为国家安全的重要基石，直接关乎经济社会稳定运行与国家长治久安，把饭碗牢牢端在自己手中，是我国必须长期坚守的战略底线。2024 年我国粮食总产量突破 7×10^9 t，实现高位基础上的丰产稳产，口粮自给率超过 95%，基本实现了口粮绝对安全的战略目标，有力回应了"谁来养活中国"的世纪之问（王可山，2023）。然而，我国粮食安全仍面临内外双重冲击。从内部看，粮食安全治理存在央地政府信息不对称的困境（马俊凯等，2025），耕地"非粮化"趋势凸显（魏后凯，2020），传统农业粗放式管理导致资源过度消耗、土地质量下降等问题，制约了粮食产能的高质量提升；从外部看，地缘政治冲突、国际粮食贸易格局重构等因素，进一步加剧了粮食安全的不确定性。因此，提升粮食体系韧性是抵御外部风险和化解内部矛盾、筑牢国家粮食安全屏障的抓手。

"藏粮于地、藏粮于技"是我国粮食安全战略的根本方针，2018—2024 年中央一号文件连续 7 年聚焦数字农业发展，将数字技术定位为粮食安全保障的核心支撑要素。粮食产业天然具有弱质性、外部性与周期性特征，单纯依靠产业内生积累难以突破发展瓶颈，而大数据、物联网、5G 通信、人工智能等新一代数字技术向农业农村领域的加速渗透，为粮食产业转型升级提供了机遇。数字技术通过重构粮食生产要素配置、优化粮食产业供给结构，提升了粮食生产效率和质量（李盛竹等，2024），推动粮食体系向高质量、高韧性方向演进。在此背景下，运用空间计量模型探究数字技术赋能粮食体系韧性的空间效应，对保障国家粮食安全具有重要的理论价值与现实意义。

目前关于数字技术和粮食体系韧性的研究已取得一定成果，现有文献主要聚焦于两方面：数字技术与粮食体系韧性水平的测度与评价，以及影响因素与实证检验。在数字技术的测度研究中，其内涵界定逐步深化。邢小强等（2019）提出数字技术是一种通用目的技术，包括硬件技术、软件技术与网络技术三大类。从广义层面看，人工智能、大数据、云计算、物联网和虚拟现实等都属于新一代的数字技术（罗英，2022）。此后，学者们进一步探索数字技术发展水平的测度体系，既包含了关键词词频、

数字技术专利申请数等单一维度指标，也涵盖了多维度综合评价指标。与此同时，实证研究显示数字技术是提升粮食绿色全要素生产率（李豫新等，2025）、粮食单产（彭建仿等，2024）的核心要素。在粮食体系韧性方面，Hodbod et al.（2015）首次将韧性概念引入粮食生产系统，其核心内涵始终聚焦系统面对压力时，能够通过抵抗、吸收、适应与恢复等一系列动态过程，维护其功能不被破坏或迅速回稳。在测度方面，Tendall et al.（2015）认为粮食体系韧性是应对意外冲击时所表现出的抵抗能力，评价维度相对单一；郝爱民等（2022）突破这一局限，从抵抗力、适应力和变革力 3 个维度衡量粮食体系韧性，左秀平等（2024）对中国粮食体系韧性发展水平时空格局进行探讨。在影响因素方面，数字经济（汪振等，2024）、农村流通数字化（王妍霏等，2025）是提升粮食体系韧性的关键因素。综上所述，既有研究已围绕数字技术和粮食体系韧性进行系统性论述，为本文提供了有益借鉴，但现有文献中缺乏对数字技术与粮食体系韧性二者之间直接的关联性研究和深度分析，关于数字技术对粮食体系韧性的空间效应关注较少。因此，本研究的边际贡献体现在以下 3 个方面：1）通过构建“数字技术－粮食体系韧性－粮食体系韧性提升策略”的空间溢出效应理论分析框架，将粮食体系韧性界定为粮食稳产供给，为保障粮食安全提供理论依据；2）将研究视角扩展至空间领域，以 2011—2022 年我国省级面板数据为样本，运用熵权 TOPSIS 法对两者水平进行测度，借助空间计量模型探究数字技术对粮食体系韧性的空间效应，为研究粮食系统领域提供方法借鉴；3）进行区域异质性分析，分区域探究数字技术对粮食体系韧性的空间效应差异，进而提出具有针对性的政策建议，为有关部门高效推进数字技术应用提供理论依据。

1 理论分析与研究假说

1.1 粮食体系韧性的理论内涵

在粮食体系领域，国内外对粮食体系的理解存在明显差异。国外研究多强调家庭或个人层面对食物的可及性；而国内则更突出国家层面的粮食供给保障，强调总量充足与质量安全。基于上述分析并结合我国国情，本文将粮食体系韧性定义为：在面临内外源冲击时，粮食系统能够有效维持或快速恢复其稳定供给能力，保障粮食供给安全，从而持续满足国民粮食需求的一种综合能力。具体包含 3 个方面：抵抗能力、适应能力和变革能力。抵抗能力是指在面对自然灾害等不可抗力因素时，能够保障粮食供给的基本能力；适应能力是指能够根据外界不确定性环境做出相应调整，持续提供良性粮食供给的能力；变革能力是指当粮食体系面临自身发展瓶颈及天然脆弱属性凸显时，能够借助外力条件进行底层创新，实现粮食产业结构转型升级的能力。

1.2 数字技术对粮食体系韧性的直接作用效应

数字技术通过强化粮食体系韧性的 3 个核心维度——抵抗能力、适应能力与变革能力——来提升粮食体系韧性。基于技术赋能理论，数字技术在精准农业领域的深度应用，为提升抵抗能力提供了关键支撑。物联网和卫星遥感技术能够实现对农田环境和作物生长状态的实时监测与精准调控（Trivelli et al.，2019），这不仅能够优化资源利用效率，还能显著降低自然灾害和病虫害对粮食生产的负面影响，从而提升粮食生产稳定性，增强粮食体系抵抗能力。系统韧性理论强调数字技术在增强粮食体系整体适应性方面的作用。通过整合大数据、人工智能和地理信息系统等技术，粮食体系能够实现对病虫害的实时监测和预警，从而实现农田的精准施肥（Talaviya et al.，2020）。同时，基于气象数据和历史灾害记录的风险预警模型能够提前为农民和粮食企业发出警报，使其有足够的时间采取应对措施（Larisa，2020）。这一提前预警和快速响应机制通过做出适配调整，能显著降低外部冲击对粮食体系的破坏程度，增强粮食体系适应能力。数字技术能够推动粮食产业核心技术的场景化应用，破解传统农业“靠天吃饭、技术落后”的脆弱性根源。通过数字孪生、智能装备等技术的深度应用，推动粮食产业从劳动密集型向集约化、智能化的方向转型，增强粮食体系变革能力。据此，提出假设 1：数字技术对粮食体系韧性具有正向促进作用。

1.3 数字技术对粮食体系韧性的空间溢出效应

根据新经济地理学理论，知识与技术等要素的外溢并非无差别扩散，而是呈现出明确的地理方向性与空间局限性（陈建军等，2009）。鉴于此，数

字技术对粮食体系韧性的赋能作用并非局限于技术应用地的本地效应，更会通过技术要素扩散、知识要素传播、创新人才流动，并依托要素的正外部性或溢出效应（宋海荣，2005），对邻近地区产生辐射作用。以数字基站、农业物联网为核心的数字基础设施，具备网络外部性与规模经济效应。核心区域的技术设施布局形成后，通过通信技术延伸服务边界，使邻近地区无需重复建设核心设施即可接入数字生态，显著降低其技术应用的固定成本。这种核心区域发力、邻近地区受益的技术扩散模式，推动数字技术从高禀赋地区向低禀赋地区流动，邻近地区可共享核心区域的农田监测数据、智能灌溉调控系统等技术成果，直接优化本地粮食生产的风险防控能力，进而强化粮食体系韧性的抵御能力；数字平台的技术特性打破了行政区域对农业知识传播的限制，核心区域基于大数据分析形成的最优种植方案库、灾害预警模型等决策知识，通过云端共享可实现跨区域重复利用。邻近地区可直接借鉴核心区域的技术经验与数据成果，优化本地粮食种植结构与生产布局，提升风险应对的精准度，增强邻近地区粮食体系韧性的适应能力；数字创新人才作为知识与技术的核心载体，人才跨区域流动是打破技术壁垒、实现隐性知识传播的关键路径。一方面，人才流动直接提供先进种植技术、数字化管理经验等；另一方面，通过数字协作平台，创新人才可以产生持续的知识溢出。邻近地区通过吸纳数字人才和溢出的知识，将“数字红利”迅速转化为粮食生产动能，从技术应用层面与产业升级层面增强粮食体系韧性的变革能力；加之地理空间邻近，技术传播与信息共享渠道更为畅通，各地主动借鉴周边地区先进经验，为增强区域粮食体系韧性创造有利条件（赵巍等，2023）。因此，数字技术通过技术要素的基础设施辐射、知识要素的平台化共享、创新人才的跨区域流动实现对邻近地区粮食体系韧性的正向空间溢出。据此，提出假设 2：数字技术对邻近地区粮食体系韧性有促进作用。

2　研究设计

2.1　模型设定

2.1.1　空间自相关性

全局莫兰指数衡量研究区域内数据的整体空间关联程度，通过将要素对的每一个要素值与平均值进行对比，观察邻近要素的值是否相似，若相似，则表明出现空间聚类现象（刘卓颖，2012）。本文采用全局莫兰指数检验 2011—2022 年我国 30 个省份的数字技术和粮食体系韧性的空间相关性，其计算公式为

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

式中：$I(d)$ 为全局莫兰指数；x_i 为区域 i 的观测值；$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i}^{n}x_i$，为观测区域的平均值；$w_{i,j}$ 为空间权重矩阵 $\boldsymbol{W}$ 里的元素；$s^2=\frac{1}{n}\sum_{i}^{n}(x_i-\bar{x})^2$，为观测区域的方差。$I(d)$ 的取值范围为 $[-1,1]$，当 $I(d)>0$ 时，表明数字技术与粮食体系韧性存在空间正相关；当 $I(d)<0$ 时，表明数字技术与粮食体系韧性存在空间负相关；当 $I(d)=0$ 时，表明数字技术与粮食体系韧性不存在空间相关性，属于独立随机分布。

2.1.2　空间权重矩阵

进行空间计量分析的前提是度量区域之间的空间距离。由于邻接矩阵无法反映相邻区域的影响程度差异，所以本文采用经济距离权重矩阵和经济地理嵌套矩阵进行空间计量分析。

经济距离权重矩阵为

$$\boldsymbol{W}_{ij}=\begin{cases}\dfrac{1}{|\mathrm{pgdp}_i-\mathrm{pgdp}_j|}(i\neq j)\\0(i=j)\end{cases},\quad(2)$$

式中 pgdp_i 和 pgdp_j 分别为一定时期内地区 i 和地区 j 的人均 GDP。

经济地理嵌套矩阵为

$$\boldsymbol{W}_{ij}=\frac{w_{ij}^{\mathrm{eco}}}{d_{ij}^2},\quad(3)$$

式中：w_{ij}^{eco} 为经济权重矩阵的元素；d_{ij} 为地区 i 与 j 地区的距离。

2.1.3　空间计量模型

空间计量模型主要有空间误差模型（SEM）、空间滞后模型（SAR）与空间杜宾模型（SDM）。SDM 的核心优势在于能够同时捕捉因变量与自变量的双重空间溢出效应，从而更全面地刻画复杂的空间关联关系。因此，本文构建空间杜宾模型分析数字技术对粮食体系韧性的空间效应。

$$FSR_{it} = \theta_1 + \lambda \boldsymbol{W} FSR_{it} + \delta_1 DIG_{it} + \theta_1 \boldsymbol{W} DIG_{it} + \delta_i \sum Control_{it} + \theta_1 \boldsymbol{W} \sum Control_{it} + \mu_i + \pi_t + \varepsilon_{it}, \quad (4)$$

式中：FSR 为粮食体系韧性；DIG 为数字技术水平；λ 为粮食体系韧性的空间相关系数；δ_1 为直接效应系数；θ_1 为数字技术的空间溢出系数；μ_i 为空间固定效应；π_t 为时间固定效应；ε_{it} 为随机误差项。

2.2 变量选取与说明

2.2.1 核心解释变量：数字技术水平

从农业领域来看，数字技术是指应用于农业生产与管理环节的数字化、信息化及智能化技术，核心目标是提升农业生产效率、优化农产品质量、实现提质增效（彭建仿等，2024）。本文从数字信息化和数字互联化两方面选取指标，其本质是对具体数字技术应用效果的综合性与过程性量化表征。参考杨军鸽等（2023）、方湖柳等（2022）的研究，构建的数字技术发展水平评价指标体系如表 1 所示。

2.2.2 被解释变量：粮食体系韧性

根据前文理论分析，将粮食体系韧性定义为：在面临内外源性冲击时，粮食系统能够有效维持或快速恢复其稳定的供给能力，从而保障粮食供给安全。由此可见，粮食体系韧性不能用单一指标简单衡量。参考相关文献（郑骏川等，2025），选择抵抗能力、适应能力、变革能力 3 个子维度，共 18 个指标，构建粮食体系韧性评价指标体系（表 2），并采用熵权 TOPSIS 法进行测算。

表 1 数字技术发展水平评价指标体系

Table 1 Evaluation indicator system of digital technology development level

一级指标	二级指标	计算方法	属性
数字信息化	光缆密度	长途光缆线路长度/省份面积/（km/km²）	+
	移动电话基站密度	移动电话基站数/省份面积/（个/km²）	+
	信息传输、软件和信息技术服务业法人单位数	信息传输、软件和信息技术服务业法人单位数/个	+
	人均电信业务总量	电信业务总量/年末常住人口/（亿元/万人）	+
	人均软件业务收入	软件业务收入/年末常住人口/（元/人）	+
数字互联化	互联网接入端口密度	互联网接入端口数/年末人口/（个/人）	+
	移动电话普及率	每百人拥有的移动电话数/（部/百人）	+
	宽带互联网用户人数占常住人口比重	互联网接入用户数/年末人口/（户/人）	+

表 2 粮食体系韧性评价指标体系

Table 2 Evaluation indicator system of food system resilience

一级指标	二级指标	指标计算	属性
抵抗能力	人均耕地面积	粮食播种面积/农业从业人口数/（hm²/人）	+
	人均有效灌溉面积	有效灌溉面积/乡村总人口/（hm²/人）	+
	单位面积粮食产量	粮食产量/粮食播种面积/（kg/hm²）	+
	粮食劳动生产率	农业总产值/乡村总人口/（万元/人）	+
	粮食土地生产率	农业总产值/粮食播种面积/（万元/hm²）	+
	粮食生产价格指数	种植业生产价格指数/（%）	+
适应能力	农村路网通达性	农村公路通路里程/万 km	+
	农村信息化水平	农村宽带接入用户数	+
	农膜使用	农膜使用量/粮食播种面积/（kg/hm²）	−
	化肥使用	化肥使用量/粮食播种面积/（kg/hm²）	−
	农药使用	农药使用量/粮食播种面积/（kg/hm²）	−
	抗灾指数	（受灾面积 − 成灾面积）/受灾面积/（hm²）	−
	农村人均用电量	农村用电量/乡村总人口/[（kW·h）/人]	+
	进出口依存度	农产品进出口总额/农业总产值×100/%	+

续表 2

一级指标	二级指标	指标计算	属性
变革能力	机械化水平	农业机械总动力/粮食播种面积，万 W/hm^2	+
	人均农林牧渔业生产总值	农林牧渔生产总值/乡村总人口，亿元/人	+
	农业科技专利数	农业科技专利数，件	+
	地方财政科学技术支出	地方财政科学技术支出，亿元	+

2.2.3　控制变量

为保证研究结果的可靠性，除数字技术外，将影响粮食体系韧性的其他因素纳入控制变量。参考李豫新等（2025）的做法，选取以下 5 个指标作为控制变量：工业化水平（IDP）、经济发展水平（EDL）、人口密度（*PD*）、产业结构（STR）、对外开放程度（DOP）。其中，工业化水平用第二产业增加值与地区生产总值之比来衡量，该水平上升表明某地区工业化程度高，能够推动粮食产业从“靠天吃饭”的传统模式转向高效稳定的现代农业模式；经济发展水平采用人均地区生产总值取对数来衡量，该水平提高表明粮食产业发展所需的经济基础较好；人口密度采用地区总人口占地区行政区划面积的比重衡量，该指标提高在一定程度上表明从事粮食产业人数上升，进而影响粮食体系韧性；产业结构采用第二产业增加值和第三产业增加值占地区生产总值的比重衡量，该指标上升有助于优化粮食产业链，进而提升粮食体系韧性（郝爱民等，2022）；对外开放程度采用各省份进出口总额与地区生产总值的比值来衡量，该指标反映了各省份经济与全球市场的互动深度，对外开放程度高的省份，能够通过外部市场和资源提升粮食体系韧性。

2.3　数据来源与描述性统计

本文以 2011—2022 年我国 30 个省份（除西藏、港澳台外）为研究对象，数据来源于《中国农村统计年鉴》《中国统计年鉴》、EPS 数据库。各变量的描述性统计如表 3 所示。

表 3　变量的描述性统计

Table 3　Descriptive statistics of variables

变量	均值	标准差	最小值	最大值
数字技术	0.272	0.128	0.033	0.625
粮食体系韧性	0.188	0.105	0.088	0.710
工业化水平	0.405	0.079	0.165	0.547
经济发展水平	10.869	0.457	9.936	12.075
人口密度	5.473	1.289	2.076	8.270
产业结构	0.902	0.523	0.759	0.997
对外开放程度	0.271	0.277	0.013	1.294

3　实证结果与分析

3.1　粮食体系韧性的时空特征分析

运用 MATLAB 软件绘制 2011—2022 年我国粮食主产区、主销区、产销平衡区以及全国范围的粮食体系韧性核密度分布（图 1）。

图 1(a) 展示了粮食主产区粮食体系韧性的动态演进特征。可以看出，2011—2013 年粮食体系韧性分布在 0.15 ~ 0.2 的低韧性区间，且核密度峰值偏低，说明该时期多数省份粮食体系韧性处于中等偏低水平，省份间粮食体系韧性差异小；2014—2018 年核密度曲线形成峰值更高的波峰，韧性分布区间拓宽至 0.2 ~ 0.25，表明粮食体系韧性区域异质性显著提升，区域发展逐步分化升级；2019—2022 年，高密度区向 0.25 ~ 0.3 的高韧性区间移动，同时核密度数值维持高位，并于 2019 年达到峰值 14.87，反映此阶段粮食体系韧性实现整体性提升，高韧性成为各省的主要聚集方向。整体而言，核密度曲线波峰、波谷交替更迭，说明粮食主产区粮食体系韧性存在阶段性起伏波动，但韧性稳步提升的长期发展态势明确，整体呈现“提升—分化—聚集”的演化特征。

图 1(b) 展示了粮食主销区粮食体系韧性的动态演进特征。可以看出，2011—2014 年粮食体系韧性整体偏低（0.2 ~ 0.4），省际韧性差异较小；2015—2020 年粮食体系韧性快速提升（0.4 ~ 0.8），中高韧性成为主要聚集方向；2021—2022 年粮食体系韧性向低韧性区间回落，且聚集程度有所

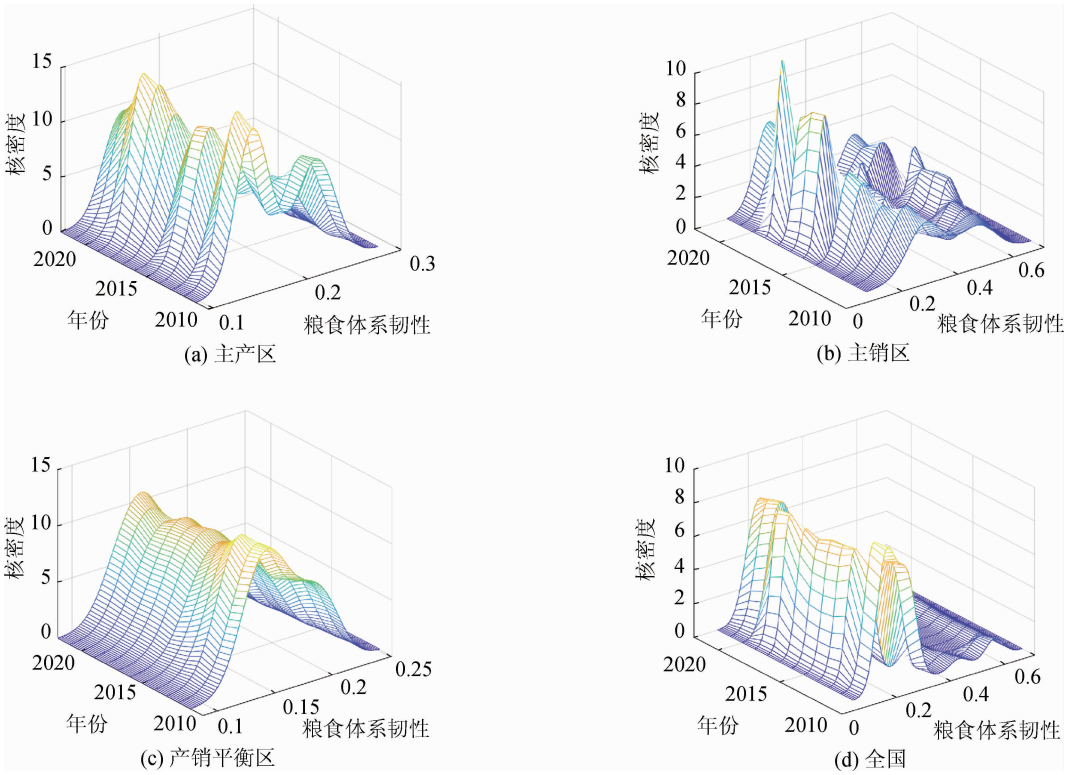


图 1 中国粮食体系韧性的时空特征

Fig. 1 Spatio-temporal characteristics of China's food system resilience

下降。整体来看，主销区粮食体系韧性呈现“先提升、后回落”的动态特征，且以中韧性水平为主。

图 1(c) 展示了粮食产销平衡区粮食体系韧性的动态演进特征。可以看出，2011—2013 年峰值从低韧性区间移动至 0.15 ~0.2 区间，同时核密度值上升，说明该阶段粮食体系韧性逐步提升并向中等偏低水平聚集；2013—2022 年核密度值逐渐下降，韧性区间略有拓宽，但核心仍在 0.15 ~0.2 之间，说明粮食体系韧性整体水平的集中程度降低。整体来看，产销平衡区粮食体系韧性以 2013 年为分水岭，呈现前期提升集聚、后期分散回落的动态特征。

图 1(d) 展示了全国粮食体系韧性的动态演进过程。可以看出，2011—2019 年粮食体系韧性持续提升，并在中等偏上区间高度聚集；2019—2022 年分布范围拓宽，同时出现多极化趋势，表明省份间的韧性水平差异日益扩大，且存在“俱乐部收敛”现象。这也与侯怡爽等（2026）的研究结果一致，我国粮食生产与经济、人口要素的空间错配问题日益凸显。经济、人口与粮食生产的空间非协同演变，进一步加剧了粮食主产区、主销区、产销平衡区的发展失衡，也因此使得粮食体系韧性呈现出明显的空间俱乐部收敛特征。

整体来看，我国粮食体系韧性前期逐步提升至中高韧性，后期保持中高水平且分布分散。主销区粮食体系韧性水平最强，主产区次之，产销平衡区最弱。尽管各省份粮食体系韧性有所提升，区域间差异依然显著，未来需持续提升韧性水平，缩小地区间的发展差异。

3.2 空间相关性检验

经济距离权重矩阵的核心优势在于突破地理邻接的物理限制，能更准确地捕捉“俱乐部收敛”现象；同时，根据三维核密度估计图分析可知，我国粮食体系韧性在空间上也呈现这一特征。因此，本文采用空间经济距离矩阵计算各省份数字技术与粮食体系韧性的全局莫兰指数，结果见表 4。2011—2022 年数字技术和粮食体系韧性的全局莫兰指数均在 1% 水平上显著为正，且莫兰指数均大于 0.5，说明二者具有明显的强空间相关性。

3.3 空间溢出效应分析

为了确定最终使用的空间计量模型，进行如下

表 4　空间自相关检验

Table 4　Spatial autocorrelation test

年份	粮食体系韧性		数字技术	
	Moran's *I*	*Z* 值	Moran's *I*	*Z* 值
2011	0.692***	4.942	0.741***	5.015
2012	0.697***	5.005	0.752***	5.142
2013	0.645***	5.261	0.764***	5.211
2014	0.636***	5.196	0.764***	5.135
2015	0.661***	5.436	0.756***	5.065
2016	0.649***	5.532	0.707***	4.706
2017	0.677***	5.739	0.709***	4.703
2018	0.693***	5.768	0.633***	4.161
2019	0.707***	5.675	0.648***	4.262
2020	0.647***	4.617	0.614***	4.093
2021	0.669***	4.780	0.706***	4.706
2022	0.680***	4.832	0.687***	4.584

注：*** 表示在 1% 水平上显著

检验。如表 5 所示，模型通过了 LM 检验和稳健 LM 检验，且均具有显著性。Wald 检验在 1% 的水平上显著，表明空间杜宾模型不会退化为 SEM 模型；LR 检验在 1% 的置信水平下拒绝原假设，表示空间杜宾模型不会退化为 SAR 模型，因此选择空间杜宾模型。根据 Hausman 检验结果，选择固定效应。综上，本文最终采用固定效应的空间杜宾模型进行回归分析。

表 5　经济距离矩阵的空间计量模型适用性检验结果

Table 5　Applicability test results of the spatial econometric model based on the economic distance matrix

检验	统计值	*P* 值
LM spatial error	3.567	0.059
Robust LM spatial error	100.573	0.000
LM spatial lag	17.562	0.000
Robust LM spatial lag	114.568	0.000
Wald test for SAR	61.04	0.000
Wald test for SEM	54.82	0.000
LR spatial lag	56.07	0.000
LR spatial error	51.16	0.000
Hausman	45.42	0.000

如表 6 所示，测度粮食体系韧性空间溢出效应的 rho 系数为 -0.191，在 1% 的水平上显著，即本省粮食体系韧性每提升 1%，将通过省际溢出效应使邻近省份降低 0.191%。该结果与左秀平等（2024）的研究一致，表明中国粮食体系韧性存在梯度效应，即不同地区粮食体系韧性水平存在差异，且这种差异在动态演进过程中可能进一步扩

表 6　空间杜宾模型回归结果

Table 6　Regression results of the spatial Durbin model

变量	数字技术对本地区粮食体系韧性的影响	数字技术对邻近地区粮食体系韧性的影响	直接效应	溢出效应	总效应
DIG	0.165**	0.562***	0.125*	0.485***	0.610***
	(2.58)	(6.40)	(1.87)	(5.61)	(7.31)
IDP	-0.284***	-0.893***	-0.220***	-0.767***	-0.987***
	(-5.96)	(-15.73)	(-5.20)	(-13.83)	(-20.49)
EDL	0.023	-0.014	0.027	-0.018	0.009
	(1.02)	(-0.42)	(1.12)	(-0.55)	(0.42)
PD	-0.004*	0.012***	-0.005**	0.012***	0.007*
	(-1.81)	(3.25)	(-2.36)	(3.60)	(1.66)
STR	-0.143*	0.923***	-0.217***	0.864***	0.647***
	(-1.89)	(7.67)	(-3.05)	(7.88)	(5.65)
DOP	0.07***	-0.104***	0.079***	-0.109***	-0.030
	(3.89)	(-3.15)	(4.43)	(-3.71)	(-1.08)
rho	-0.191*** (-3.71)				
R^2	0.462 9				

注：括号内为 *t* 值；***、** 和 * 分别表示在 1%、5% 和 10% 水平上显著；下同

大。本地粮食体系的韧性提升可能使其在区域竞争中处于更有利的位置，而邻近地区如果未能及时调整和提升，自身韧性会逐渐落后。此外，数字技术水平对粮食体系韧性的空间交互项在 1% 水平上显著为正。其中，直接效应系数为 0.125，在 10% 水平上显著，说明数字技术水平提升会促进本地粮食体系韧性。这得益于物联网、卫星定位等数字技术实现精准种植、灌溉与施肥，提高农业生产效率，同时借助数字化手段提供精准天气预报和灾害预警，增强抗灾能力，从而提升粮食体系韧性。由此，假说 1 成立。此外，空间溢出效应系数为 0.485，在 1% 水平上显著为正，约为直接效应的 4 倍，占总效应的 79.5%。对比可见，溢出效应远大于直接效应，说明数字技术亦能提高邻近地区的粮食体系韧性。由此，假说 2 成立。

3.4 稳健性检验

为检验回归结果的稳健性，首先采用剔除北京、天津、上海 3 个直辖市数据进行稳健性检验，其原因在于：根据国家统计局数据，近 10 年北京、天津和上海的农业总产值占地区总产值的比值远低于其他省份。其次，用经济地理嵌套矩阵进行稳健性检验，这是因为它能同时捕捉空间邻近性和经济互动强度，克服单一矩阵的局限性，使模型更贴近复杂的现实经济活动。结果表明，数字技术对粮食体系韧性的直接效应、溢出效应和总效应均在 5% 水平上显著为正。其中，在剔除 3 个直辖市的稳健性检验中，溢出效应占总效应的比重为 54.2%；在更换经济地理嵌套矩阵后，该比重为 79.2%，表明数字技术的正向溢出效应在不同情境下均保持强劲，且在考虑经济联系与地理距离时更为显著，进一步验证了空间外溢机制的重要作用。综上，数字技术能够有效提升本省和邻近省份粮食体系韧性水平，这进一步表明本文结果具有稳定性和可靠性。

表 7 稳健性检验结果

Table 7 Robustness test results

变量	剔除北京、天津、上海			经济地理嵌套矩阵		
	直接效应	溢出效应	总效应	直接效应	溢出效应	总效应
DIG	0.136***	0.161***	0.297***	0.234**	0.892***	1.126***
	(3.42)	(3.58)	(9.23)	(2.39)	(3.34)	(5.04)
控制变量	控制			控制		
rho	−0.447***			−0.908***		
R^2	0.492 8			0.232 1		
N	324			360		

3.5 区域异质性分析

我国粮食功能区的划分本质上依据区域资源禀赋与国家粮食安全战略形成的差异化定位，即主产区承担粮食总量供给，主销区聚焦供应链稳定性，产销平衡区兼顾生产保障与区域供需调节，各功能区对粮食体系韧性的核心诉求不尽相同。因此，若忽视功能区定位差异，开展数字技术对粮食体系韧性的笼统空间效应研究，将导致研究结论缺乏针对性。此外，华坚等（2024）在粮食资源空间配置与区域产业韧性研究中，立足功能区差异，分析了资源禀赋对粮食安全保障的影响，为本文开展区域异质性分析提供了思路。基于此，为进一步验证区域差异下数字技术对粮食体系韧性的溢出作用，将 30 个省份样本按粮食功能进行划分，进行异质性检验。从表 8 可以看出，三大粮食功能区的回归结果差异明显，具有较强的区域异质性。

具体而言，粮食主产区的数字技术对粮食体系韧性的直接效应和总效应显著为正，但溢出效应不显著；粮食主销区的直接效应、溢出效应和总效应均显著为正，其中直接效应系数为 0.401，高于主产区和产销平衡区，溢出效应占总效应的 80.6%；粮食产销平衡区的三项效应均显著为正，溢出效应占比为 58.9%。

通过比较三大粮食功能区空间溢出效应占总效应的比重可知，除主产区不显著外，主销区的溢出效应显著高于产销平衡区，排序为，主销区 > 产销平衡区 > 主产区。

表 8　异质性分析结果

Table 8　Heterogeneity analysis results

区域	DIG			rho
	直接效应	溢出效应	总效应	
主产区	0.192***	0.113	0.305***	0.041
	(4.62)	(1.17)	(2.61)	
主销区	0.401*	1.665***	2.067***	−0.272***
	(1.81)	(4.41)	(4.15)	
产销平衡区	0.300***	0.433***	0.734***	0.239***
	(4.58)	(3.52)	(4.20)	

4　研究结论及建议

数字技术对粮食体系韧性的正向空间溢出效应满足我国粮食安全观的内在要求。本文采用熵权 TOPSIS 法评估了 2011—2022 年我国数字技术水平和粮食体系韧性水平，在此基础上运用 MATLAB 软件绘制三大粮食功能区以及全国的粮食体系韧性三维核密度估计图，同时计算莫兰指数分析两者时空分布特征，运用空间杜宾模型分析数字技术对粮食体系韧性的空间溢出效应。

1）根据三维核密度估计图，分区域来看，我国粮食主销区粮食体系韧性水平最高，主产区韧性水平最低，产销平衡区居中；整体来看，我国粮食体系韧性水平呈现上升态势，并且在“中等偏上”韧性区间高度聚集，但呈现多极化趋势，存在“俱乐部收敛”现象。

2）数字技术对粮食体系韧性具有双重作用：一方面，数字技术能够直接提高本地粮食体系韧性；另一方面，数字技术对邻近地区粮食体系韧性具有正向空间溢出效应，使得邻近地区粮食体系韧性提升。该结论在剔除 3 个直辖市样本和更换空间权重矩阵后依然稳健。

3）数字技术对粮食体系韧性的空间溢出效应具有区域异质性。在直接效应方面，三大粮食功能区均显著，其中主销区影响最强，产销平衡区次之，主产区最弱；在溢出效应方面，主销区大于产销平衡区，而主产区溢出效应不显著。在直接效应和间接效应方面，主销区效果均优于其余二者，可能的解释为：主销区经济实力强，对数字技术的资金投入能力和吸收效率更高，直接效应也会更突出；粮食主销区大多为发达省份，凭借强劲的经济辐射能力和庞大的粮食需求，能够通过市场牵引形成对粮食需求的溢出，也会通过技术扩散直接提升邻近地区的粮食体系韧性，且其知识要素和创新人才资源极为丰富，因此溢出效应也更显著。

基于以上研究结论，提出如下建议。

1）注重发挥数字技术对粮食体系韧性的促进作用。加大对网络宽带、5G 基站等基础设施的投入，推动粮区基础设施均衡覆盖，夯实技术基础，为数字技术赋能粮食体系韧性提供保障，增强粮食体系韧性的抵抗能力。推动数字技术与农业深度融合，鼓励农业企业、科研机构和高校开展合作，研发和推广适用于不同区域粮食生产的数字技术解决方案，以具体问题为导向，科技创新为手段，数字人才为载体，采用差异化数字技术策略提升适应能力。以技术高禀赋区为示范，通过跨区域推广、人才培育与流动，推动数字技术落地与产业升级，突破变革能力。

2）充分发挥数字技术赋能粮食体系韧性的空间溢出效应。为进一步扩大数字技术的空间溢出效应，政府应该分区域精准布局数字技术基建，优化区域协同发展机制，形成区域内自主发展和区域间协同发展的格局。在主销区建设数字粮仓，整合物联网、区块链与人工智能技术，实现从供给端到需求端的全链条可视化；在主产区推进数字农田建设，补贴北斗农机、土壤传感器等先进农业设备，提升生产端的数字化水平；在产销平衡区构建区域粮食数据平台，打通产销数据壁垒，助力区域间粮食供需精准匹配。同时，政府可以通过政策引导和资金支持，鼓励农业企业开展跨区域的数字技术应用项目，促进技术要素流向低禀赋地区，充分利用数字技术的溢出效应。各功能区应统筹协调发展，为技术扩散、知识传播、人才流动奠定坚实基础，从而充分发挥数字技术赋能粮食体系韧性的空间溢出效应。

3）因地制宜，推进农业数字技术梯次提升。立足三大功能区的资源禀赋、功能定位以及数字技术对粮食体系韧性的区域异质性，聚焦各区域核心短板，实施差异化提升策略。主产区以粮食生产为核心目标，应以数字技术赋能生产为核心，优先推进基础数字设备全覆盖，并且提升小农户和合作社数字化应用能力，提升粮食体系抵抗能力和适应能力；主销区经济实力雄厚，对数字技术的吸收和转

化效率更高，应重点打造数字供应链引领型发展模式，鼓励本地龙头企业与周边区域建立帮扶关系，提升粮食体系适应能力和变革能力；产销平衡区具备粮食生产和销售双重功能，应积极与主销区开展农业数字技术合作交流，打通主销区需求数据与主产区供应数据的共享通道，承接主销区技术外溢与主产区生产数据反馈，最终形成主销区引领、主产区攻坚、平衡区衔接的全域数字技术赋能粮食体系韧性格局。

参考文献

陈建军，陈国亮，黄洁，2009. 新经济地理学视角下的生产性服务业集聚及其影响因素研究：来自中国 222 个城市的经验证据[J]. 管理世界(4)：83-95.

方湖柳，潘娴，马九杰，2022. 数字技术对长三角产业结构升级的影响研究[J]. 浙江社会科学(4)：25-35，156-157.〔Fang Huliu，Pan Xian，Ma Jiujie，2022. The impact of digital technologies on the upgrading of industrial structure in Yangtze River Delta[J]. Zhejiang Social Sciences(4)：25-35，156-157.〕

郝爱民，谭家银，2022. 数字乡村建设对我国粮食体系韧性的影响[J]. 华南农业大学学报(社会科学版)，21(3)：10-24.〔Hao Aimin，Tan Jiayin，2022. Impact of digital rural construction on food system resilience[J]. Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition)，21(3)：10-24.〕

侯怡爽，马永欢，祝培甜，等，2026. 中国经济－人口－粮食产量重心的演变特征及耦合关系[J]. 资源与产业，28(1)：53-66.〔Hou Yishuang，Ma Yonghuan，Zhu Peitian，et al.，2026. Evolution and coupling among China's economy-population-grain production gravity center[J]. Resources & Industries，28(1)：53-66.〕

华坚，杨梦依，曹慧敏，2024. 粮食主产区的新型城镇化与粮食安全：基于土地规模化经营中介效应检验[J]. 资源与产业，26(1)：50-60.〔Hua Jian，Yang Mengyi，Cao Huimin，2024. New urbanization and grain security in major grain producing areas based on mediating effects of land scaling operation[J]. Resources & Industries，26(1)：50-60.〕

李盛竹，薛枫，姜金贵，2024. 农业数字化对中国粮食新质生产力的影响效应研究[J]. 农林经济管理学报，23(4)：435-445.〔Li Shengzhu，Xue Feng，Jiang Jingui，2024. Effect of agricultural digitization on new productive forces of food in China[J]. Journal of Agro-Forestry Economics and Management，23(4)：435-445.〕

李豫新，项升，2025. 数字技术发展对粮食绿色全要素生产率的影响研究[J]. 中国农业资源与区划，46(9)：55-63.〔Li Yuxin，Xiang Sheng，2025. Research on the impact of digital technology development on green total factor productivity of grain[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning，46(9)：55-63.〕

刘卓颖，2012. 多尺度人口增长的空间统计分析[J]. 测绘通报(2)：65-67.〔Liu Zhuoying，2012. The analysis of spatial statistics by use of multi-distance[J]. Bulletin of Surveying and Mapping(2)：65-67.〕

罗英，2022. 数字技术风险程序规制的法理重述[J]. 法学评论，40(5)：151-160.〔Luo Ying，2022. Jurisprudential restatement of digital technology risk procedural regulation[J]. Law Review，40(5)：151-160.〕

马俊凯，李光泗，2025. 数字技术赋能国家粮食安全治理：基于央地关系视角[J]. 农村经济(4)：42-50.〔Ma Junkai，Li Guangsi，2025. Digital technology enabling national food security governance：Based on the perspective of central-local relationship[J]. Rural Economy(4)：42-50.〕

彭建仿，黄世成，2024. 粮食安全视角下数字技术对粮食单产的影响机制[J]. 华南农业大学学报(社会科学版)，23(4)：77-92.〔Peng Jianfang，Huang Shicheng，2024. Mechanisms of digital technology's impact on grain yield from perspective of food security[J]. Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition)，23(4)：77-92.〕

宋海荣，2005. 新经济增长理论述评及其政策取向[J]. 统计与决策(9)：113-115.

王可山，2023. 新时代我国粮食安全保障的成就与经验[J]. 改革(9)：99-109.〔Wang Keshan，2023. Achievements and experiences of China's food security in the new era[J]. Reform(9)：99-109.〕

王妍霏，叶举，曹杰，2025. 农村流通数字化影响粮食体系韧性的机理及效应研究[J]. 长江流域资源与环境，34(2)：423-436.〔Wang Yanfei，Ye Jü，Cao Jie，2025. Mechanism and effect of digitalization of rural circulation on the resilience of grain system[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin，34(2)：423-436.〕

汪振，刘滨，朱家仪，2024. 数字经济对中国粮食体系韧性的影响[J]. 中国农业大学学报，29(11)：261-275.〔Wang Zhen，Liu Bin，Zhu Jiayi，2024. Effects of the digital economy on China's food system resilience[J]. Journal of China Agricultural University，29(11)：261-275.〕

魏后凯，2020.“十四五”时期中国农村发展若干重大问题[J]. 经济研究参考(8)：110-113.

邢小强，周平录，张竹，等，2019. 数字技术、BOP 商业模式创新与包容性市场构建[J]. 管理世界，35(12)：116-136.〔Xing Xiaoqiang，Zhou Pinglu，Zhang Zhu，et al.，2009. Digital technology，BOP business model innovation and inclusive market building[J]. Journal of Management World，35(12)：116-136.〕

杨军鸽，王琴梅，2023. 数字技术与农业高质量发展：基于数字生产力的视角[J]. 山西财经大学学报，45(4)：47-63.〔Yang Junge，Wang Qinmei，2023. Digital technology and high-quality agricultural development：From the perspective of digital productivity[J]. Journal of Shanxi University of Finance and Economics，45(4)：47-63.〕

赵巍，徐筱雯，2023. 数字经济对农业经济韧性的影响效应与作用机制[J]. 华南农业大学学报(社会科学版)，22(2)：87-96.〔Zhao Wei，Xu Xiaowen，2023. Effect and mechanism of digital economy on the resilience of agricultural economy[J]. Journal of South China

Agricultural University(Social Sciences Edition), 22(2): 87-96.〕

郑骏川, 周世昕, 李璨, 2025. 中国粮食体系韧性测度、时空分异及推进路径: 基于三大粮食功能区及四大经济区域的比较视角[J]. 中国农业资源与区划, 46(1): 1-12.〔Zheng Junchuan, Zhou Shixin, Li Can, 2025. Measurement, spatiotemporal differentiation, and promotion path of resilience in China's grain system: A comparative perspective based on the three major grain functional zones and the four major economic regions[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 46(1): 1-12.〕

左秀平, 叶林祥, 2024. 中国粮食体系韧性: 水平测度及动态演进[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 23(1): 88-101.〔Zuo Xiuping, Ye Linxiang, 2024. China's grain system resilience: Level measurement and dynamic evolution[J]. Journal of South China Agricultural University (Social Sciences Edition), 23(1): 88-101.〕

Hodbod J, Eakin H, 2015. Adapting a social-ecological resilience framework for food systems[J]. Journal of Environmental Studies and Sciences, 5(3): 474-484.

Larisa H, 2020. Sustainability driven by agriculture through digital transformation[J]. Sustainability, 12(20): 8596.

Talaviya T, Shah D, Patel N, et al., 2020. Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 4: 58-73.

Tendall D M, Joerin J, Kopainsky B, et al., 2015. Food system resilience: Defining the concept[J]. Global Food Security, 6: 17-23.

Trivelli L, Apicella A, Chiarello F, et al., 2019. From precision agriculture to Industry 4.0: Unveiling technological connections in the agrifood sector[J]. British Food Journal, 121(8): 1730-1743.