

DOI: 10.20103/j.stxb.202401020007

陈有华, 卢欣雨, 张壮, 陈彬. 农业生产社会-生态系统韧性: 维度与度量. 生态学报, 2025, 45(9): 4548-4560.

Chen Y H, Lu X Y, Zhang Z, Chen B. Resilience of agricultural production systems: dimensions and measurements. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(9): 4548-4560.

农业生产社会-生态系统韧性: 维度与度量

陈有华^{1,2}, 卢欣雨¹, 张 壮³, 陈 彬^{4,*}

1 华南农业大学经济管理学院, 广州 510642

2 华南农业大学农业产业发展研究中心, 广州 510642

3 中南财经政法大学工商管理学院, 武汉 430073

4 北京师范大学环境学院, 北京 100875

摘要:学者们已开始从韧性的角度对经济学理论进行系统性反思, 社会-生态系统理论的提出更是对经济学思想形成了巨大冲击, 农业生产作为典型的社会-生态系统, 更需要韧性思想。基于社会-生态系统理论, 界定农业生产基本功能的基础上, 并对农业生产系统多维度韧性进行了定性分析与拓展; 实证上, 结合 FAO 和《中国农业统计年鉴》等数据库, 综合采用局部加权回归散点平滑法、香农熵方法以及广义矩估计方法, 为分析农业生产综合韧性和各维度韧性提供了衡量指标。理论分析表明, 当前理论界应当高度重视农业韧性的复杂性, 重新反思和刻画农业生产系统韧性; 实证结果表明, 1990—2020 年全国农业综合韧性呈“W”型演化趋势, 即分别在 2004 和 2016 年出现最低值, 2016 年后出现快速增长的趋势; 粮食生产波动韧性在 2016 年以前较为稳定, 并无明显的趋势, 但在这之后则呈现出快速提高的趋势; 生态韧性总体呈现倒“V”型趋势, 2003 年后下降趋势明显; 2001—2019 年期间, 中国农业发展韧性则呈现“N”型上升趋势, 其中上海、北京、天津、广东、浙江、辽宁的增幅较为明显。三大韧性的耦合协调度自 2004 年之后趋于稳定, 在 2016 年后得到明显提升, 这体现了农业生产的各维度韧性关系的进一步优化改进。研究结果一定程度上解决了有关韧性概念的争论, 完善和拓展了韧性理论的应用与框架, 揭示了农业生产系统韧性演化路径和规律, 为农业高质量发展提供了理论与现实依据。

关键词:韧性; 农业生产; 农业功能; 粮食安全; 社会-生态系统

Resilience of agricultural production systems: dimensions and measurements

CHEN Youhua^{1,2}, LU Xinyu¹, ZHANG Zhuang³, CHEN Bin^{4,*}

1 College of Economics and Management, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2 Agricultural Industry Development Research Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

3 School of Business Administration, Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan 430073, China

4 School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Scholars have begun to systematically reflect on economic theories from the perspective of resilience. The emergence of the social-ecological system (SES) theory has had a significant impact on economic thought. Agricultural production, as a typical SES, requires the application of resilience thinking. Theoretically, this paper is based on the SES theory. It defines the basic functions of agricultural production and conducts a qualitative analysis and extension of the multi-dimensional resilience of the agricultural production system. Empirically, this paper combines databases such as FAO and the China Agricultural Statistical Yearbook. It employs a combination of locally weighted regression scatter smoothing, Shannon entropy methods, and generalized moment estimation methods to provide measurement indicators for analyzing the

基金项目: 国家自然科学基金一般项目 (72273045); 国家自然科学基金重大项目 (72091511); 广东省自然科学基金杰出青年基金项目 (2024B1515020042); 国家社科基金重大项目 (23&ZD121)

收稿日期: 2024-01-02; **网络出版日期:** 2025-03-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenb@bnu.edu.cn

comprehensive resilience and multi-dimensional resilience of agricultural production. The theoretical analysis shows that the academic community should pay great attention to the complexity of agricultural resilience and re-examine and depict the resilience of the agricultural production system. The empirical results show that the comprehensive agricultural resilience in China exhibited a “W”-shaped evolution trend from 1990 to 2020, with the lowest values occurring in 2004 and 2016, respectively, and a rapid upward trend after 2016. The fluctuation resilience of grain production was relatively stable before 2016 without a clear trend, but it showed a rapid increase after that year. The ecological resilience showed an inverted “V” shape overall, with a significant downward trend after 2003. During the period from 2001 to 2019, the development resilience of China’s agriculture exhibited an “N”-shaped upward trend, with Shanghai, Beijing, Tianjin, Guangdong, Zhejiang, and Liaoning showing more significant increases. The coupling coordination degree of the three types of resilience has been stable since 2004 and has been significantly improved after 2016, reflecting the further optimization and improvement of the relationship between the various dimensions of agricultural production resilience. For the first time, this paper constructs a multi-dimensional resilience indicator for agricultural production from the aspects of production, ecology, and development, providing a theoretical basis and analytical tool for a comprehensive understanding of agricultural resilience. Furthermore, this paper quantitatively measures the various dimensions of agricultural production resilience, more accurately reflecting the complexity and multi-dimensionality of the agricultural system and offering new ideas for the measurement of agricultural resilience. This paper also reveals the coupling coordination relationship between different dimensions of resilience, providing a theoretical basis and practical guidance for formulating agricultural support policies and enhancing the resilience of the agricultural production system.

Key Words: resilience; agricultural production; agricultural functions; food security; social-ecological systems

农业系统不确定性不断增强,需要韧性思维。极端的冲击往往会对农业系统造成严重的影响,甚至是系统崩溃的风险^[1]。近年来不断涌现的外部冲击,如极端气候^[2],俄乌战争^[3]等不断将农业与食物系统推向崩溃的边缘。农业是人类生产、生活与发展的基础,面对日益增加的不确定性,如何提升农业韧性,确保系统的可持续发展,越来越成为世界各国和重要国际组织关注的重要问题^[4-7]。需要特别警惕的是,农业越来越注重垂直整合,少数行业巨头几乎控制着农业生产和分销的各个环节,效率在提高,但韧性在下降^[8]。农业的绿色可持续发展需要韧性思维,以避免陷入效率陷阱。依据韧性的基本思想,可将农业生产韧性定义为农业生产系统受多维复杂冲击后保持原有功能的能力,该能力由稳定性、适应性和可转换性构成^[9-10]。我国粮食产量已多年持续保持 1.3 万亿 t 以上,需要进一步将重点转向其风险应对能力——韧性的考量。

经济学的效率单维度思维存在重大缺陷,需要反思与纠正。经济学追求的是效率,即以充分利用一切可利用的资源,提高社会生产效率为和核心目标^[11];商业管理思想更是坚定地把消除“冗余”视为管理的“杀手铜”,如泰勒的科学管理^[12],松下即时生产^[13]。但消除冗余缓冲的过程也是降低组织韧性的过程。由于过度强调效率,疫情等外部冲击下因供应链断裂而死亡的企业比比皆是,这都是缺乏韧性的表现。追求最大持续产量会导致系统韧性的下降^[14]。经济科学要想生存下去,就需要转变思想,用一种全新的方式来思考人与自然世界的关系,因为地球所提供的资源虽足以满足每个人的需求,但无法满足任何人的贪婪^[8],乃至饥荒和贫困是由获取食物的限制而非缺乏食物本身所导致的。

社会-生态系统理论(Social—Ecological System, SES)的提出,为纠正现有经济发展理论提供了契机。热力学尤其是“熵”理论很好地纠正了牛顿的力学体系^[8],相应地,以韧性思维为核心的 SES 理论则为经济社会发展理论的完善提供了便利^[15],以现有可获资源为约束,在韧性与效率之间权衡,是纠正经济社会理论的重要手段。SES 理论最早由 Gunderson and Holling 提出^[16],其主要思想在于考虑社会与生态系统之间的耦合,并基于韧性的提升促进系统的可持续性发展^[17]。

农业是一个复杂且典型的 SES,必然成为重要研究对象,农业同时受社会系统和生态系统的影响^[15]。因

此,农业对韧性维度的衡量较其它社会生态系统也更为困难。首先,以量为核心粮食生产态度,容易触及资源承载底线,形成不可以逆的格局^[18]。因此必须在稳定粮食安全低线的基础上,通过促进农业韧性生产,逐步缓解资源诅咒风险,实现粮食安全与可持续性发展双目标;其次,市场的高波动和气候的高不确定决定着农业生产的脆弱性^[19]。因此,需要政策性工具引导适应性技术优化,突破传统小农低水平锁定均衡,实现韧性增长。第三,农村人力资本与机遇缺乏制约着农民发展,但农业的发展需以农民的发展为前提^[20]。因此,需要以农户个体韧性的提升实现农业韧性。农业生产的上述特征决定其必须同时具备生产、生态和发展功能,而农业的重要地位又要求其在面临多维外部冲击时,具备维持原有功能的基础上,不断进行突破和转换,以应对更高的产品需求与更紧的资源约束,即实现 SES 螺旋上升循环。更为重要的是,建设农业强国、提升粮食安全水平必须提升我国农业发展韧性^[21]。

现有的研究中,尽管农业韧性的概念逐渐受到重视,但国内外在该领域的研究仍处于起步阶段,存在诸多不足。首先,现有文献对农业韧性的定义和衡量标准尚未形成统一认识。不同研究往往侧重于农业韧性的某一维度,如生产韧性、发展韧性等,而缺乏一个综合性的分析框架。这导致研究结论可能存在偏差和冲突,难以形成对农业韧性全面而深入的理解。其次,现有研究在农业韧性度量方面存在局限性。许多研究采用单一的指标或方法来衡量农业韧性,忽略了农业系统的复杂性和多维性。农业作为一个典型的社会-生态系统,其韧性不仅受到自然生态因素的影响,还受到人类社会活动的深刻影响。因此,单一维度的度量方法无法准确反映农业韧性的真实状况。

因此,针对以上不足,本文基于 SES 理论,为农业生产系统韧性提供一个新分析思路与研究框架,研究结果可为农业可持续性发展提供理论与现实指导。与现有研究相比,本文的独特价值在于:(1)构建了农业生产系统多维韧性分析框架;本文首次从生产、生态和发展三大方面构建了农业生产多维韧性指标,解决了现有研究在韧性定义和衡量标准上的不统一问题。这一框架为全面理解农业韧性提供了理论基础和分析工具。(2)采用了综合性的度量方法:本文结合了 FAO 和《中国统计年鉴》等数据,对农业生产韧性各维度进行了定量测算。通过 R 韧性、 H 韧性和 W 韧性指标的引入,本文能够更准确地反映农业系统的复杂性和多维性,为农业韧性的度量提供了新思路。(3)揭示了农业生产系统韧性的演化路径和规律:本文通过对我国农业生产系统韧性的历史演变进行实证分析,揭示了 W 型演化趋势和不同维度韧性之间的耦合协调关系。这些发现为制定农业支持政策、提升农业生产系统韧性提供了理论依据和实践指导。

1 韧性理论的演化

1.1 韧性的内涵与外延

韧性(resilience),亦有翻译为复原力、恢复力或弹性,是指系统在不丧失功能的情况下可以吸收的最大压力^[14],源于工程学。Holling 将韧性引入生态学,并使其成为生态领域的重要概念,随后韧性在社会学,如经济学等领域广泛应用。正因为韧性是具有强大的生态学基因,又在社会学领域广泛应用,这为生态学与社会学的融合以及 SES 理论的发展提供了沃土^[16]。Holling 与其他先驱学者共同提出了 SES 理论,对传统经济学理论与实践提出了重大冲击^[15]。韧性在不同学科领域的迁移过程正是该理论的演化与完善过程。韧性概念自提出之日起,便在内涵外延和衡量方法方面都存在较大争议,且目前多数研究多为概念的构建,定量的衡量方法与指标缺乏^[22-23]。Holling 最早的韧性包含抵抗力、适应力和恢复力,这种分解具有误导性,因为最初韧性的核心在于恢复到原有状态。无论是人类的还是生态群落的韧性,通常都被误解为系统对大规模破坏的反应能力,这种能力具有足够的稳定性,使其能够恢复到初始的平衡状态。但在自然、社会和宇宙中,当各部分相互作用时,从来回不到原来的均衡。因此,Walker 等学者对韧性模型进行了修正^[24],修正后的模型更关注系统的可转变性,因为系统可能无法自我维持,这就迫使它向一种新的自组织系统转变。之后韧性模型就由吸收力、适应力、变革力构成^[10,25]。

1.2 韧性理论的发展

1.2.1 早期韧性理论

早期生态韧性是指生态系统在遭受扰动后恢复到原始状态的能力及其恢复速度。该定义描述了系统在平衡状态附近的稳定性,特点是小冲击,单稳态。早期生态韧性的概念本质上属于物理学中的工程韧性。工程韧性较容易衡量,因为其仅需关于当前平衡状态的信息。要么恢复到原有状态,要么系统崩溃,不存在新的状态和均衡,所以早期韧性理论不会考虑系统的变革与可转换性^[14]。由定义可知早期生态韧性的概念包括两个重要因素恢复到原来均衡状态的能力与速度,即系统在遭受同等外部冲击后,恢复时间短和恢复程度高的系统韧性更高。早期韧性系统均衡属单点局部均衡,且认为系统不存在耗散性,在没有崩溃前一定可以恢复到原有均衡状态^[26]。后续研究一般将韧性分解为抵抗力、适应力和恢复力三个维度^[7,27]。

1.2.2 后期韧性理论

自生态韧性的概念提出以来,其在生态学等多领域得到很大的发展,但关于韧性的不同解释也引起了困扰。Walker 等学者对韧性进行了重新定义:一个系统在经历变化时吸收干扰和重组的能力,以便仍然保持基本相同的功能、结构、特性和反馈^[24]。修正后的概念突出了时间动态性和变革性,更适合不确定性环境不断提升的系统。在农业生产系统中,稳定性是系统在面对外部冲击时,能够保持其基本功能和生产能力的能力。可以通过考察农业产量、产值等关键指标的波动情况来衡量^[28-29]。稳定性是农业生产系统韧性的基础,只有保持系统的稳定,才能确保粮食安全和农业生产的可持续性。适应性是农业生产系统在面对外部冲击时,能够调整其生产方式和结构,以适应环境变化的能力。包括作物品种的改良、农业技术的创新、农业政策的调整等方面^[30-31]。适应性是农业生产系统韧性的关键,它决定了系统在面对外部冲击时的恢复能力和发展潜力。可转变性则是指农业生产系统在面对长期或重大冲击时,能够实现系统功能和生产方式的根本性转变的能力。可转变性是农业生产系统韧性的重要保障,它决定了系统在面对重大挑战时的应对能力和转型能力。稳定性、适应性和可转变性是对后期韧性吸收力、适应力和变革力的合理解释。

1.2.3 社会-生态系统韧性理论

生态系统是自我调节系统,为社会提供食物、水、木材和其他资源。随着对资源需求的增加,管理决策正在取代自我调节的属性,破坏了生态系统自我调节能力,进而导致了生态系统的脆弱性^[1],需要将生态系统与社会系统结合管理,这便是社会-生态系统理论(SES)。SES 具有多稳态、非线性、不确定性、整体性和复杂性特征,人的行为在该系统中起关键作用,并对该系统产生深刻影响。适应性治理是管理 SES 的重要手段,相应地,适应性管理和适应性治理都是将韧性理论付诸实践的工具^[32]。

农业不仅具有经济属性,还具有重要的生态属性。农业生产活动对自然生态环境具有重要影响,同时也受到自然生态环境的制约^[33-34]。农业生产方式具有多样性,包括传统农业、现代农业、生态农业等不同类型^[35]。不同类型的农业生产方式在韧性方面表现出不同的特点和优势。因此,在韧性分析中,需要充分考虑农业生产方式的多样性。另外,农业生产系统容易受到自然灾害、市场波动等外部冲击的影响^[36-37]。这些冲击会对农业生产系统的稳定性、适应性和可转变性造成不同程度的影响。因此,在农业生产系统韧性分析中,运用社会-生态系统理论探究农业生产系统内部各要素之间的相互作用关系,以及系统如何应对外部冲击具有重要意义。

1.2.4 韧性、稳定与变革

关于韧性、稳定与变革之间的关系认知是一个逐步完善的过程,早期韧性理论将稳定性作为韧性的属性,但这容易引起对韧性含义的误解^[24],后期学者们将稳定性与韧性相分离,并同变革性共同构成 SES 理论重要属性。SES 必须处理好韧性、稳定性与可变革性三者之间关系,并在三者之间寻求合理的均衡,才能提高提醒可持续性。

按照韧性与稳定性,可将 SES 分为“橡树型”系统与“芦苇型”系统^[15],其基本态势如图 1 所示。“橡树型”系统的特征是稳定性高和韧性风险高,系统在遭受多种持续的外部冲击时,能保持很好地稳定性,但外部

冲击因难以通过波动进行释放,因而会不断累计,一旦累计冲击超过系统韧性阈值,其崩溃的风险较高。“芦苇型”系统则具有完全相反的特性,稳定性低且韧性风险低。该类型系统能通过发幅度波动释放外部冲击,因而其在遭受外部冲击时具有很高的韧性,但稳定性低,系统维持的成本也非常低。但“芦苇型”系统也存在明显缺陷,容易被锁定在低效率的系统均衡,难以突破和提升^[38]。

好的系统必须做韧性与稳定性的平衡,并保持适度的可变革性。以中国农业系统为例,封建小农就像“芦苇型”系统,在面临各种持续的如朝代的耕地、战争与气候灾难后依然能长持续说明其具有极强的韧性。这种超强的韧性也使其被长期锁定在低效的稳定中,未实现自我的突破,然而不断增长的人口与需求要求我国农业突破桎梏并向现代化与规模化转变。但作为一个人口大国,我们也不能以建立“橡树型”农业系统为目标,因为我们无法接受系统因受严重的外部冲击而崩溃的风险。中国农业应该是在“橡树”与“芦苇”之间寻找均衡,即要确立一个风险边界,并在在边界内实现自我超越和突破发展。在确保 1.3 万亿 t 粮食产出的安全底线的前提下,提升农业生产系统韧性。因此,将传统小农户融入现代化大农场,将“芦苇”和“橡树”的特性相结合是提升中国农业生产系统韧性与稳定性的重手段。

2 农业生产的功能与韧性

对韧性的概念与衡量尚无定论,甚至不同研究之间相互冲突,没有一个 SES 系统韧性可以通过单一尺度来理解^[24]。自 Holling 年提出生态韧性以来,如何在实践中衡量韧性是一个悬而未决的挑战^[39]。众多国际组织如 FAO、IFPRI 日益关注食物系统韧性能力的建立^[40],但要想更为准确地衡量农业生产韧性,必须先明确其基本功能,并以此为基础界定农业生产必须对什么韧性。由定义可知,系统韧性的根本源于其功能,传统经济学框架忽视了农业除生产功能外的其他功能,如生态功能和发展功能,只有综合考虑农业多重功能才能更好地考察农业生产系统韧性^[41]。遗憾的是,目前多数研究在尚未分析与明确农业基本功能的情况下就直接分析韧性,必然存在严重偏差。

2.1 农业的基本功能

2.1.1 生产功能

生产功能是农业最基本的功能,表现为农业为社会提供粮食、水果等食物以及其他农产品的能力。生产功能主要通过粮食生产供应以及农业生产效率得以反映,农业生产会受到气候条件、土壤状况等自然条件以及农业资金投入、机械设备等物质投入的影响,同时也会受到国家政策、生产结构、国际形势等影响。近年来,影响农业生产功能的主要因素包括极端天气、生物和技术、动植物病虫害等。气候变化通过减少农业生产和收入、增加风险和扰乱市场,对农村和城市人口的粮食供应构成威胁^[42]。

负面冲击频发,使得人们日益关注如何降低负面冲击对于农业生产功能的不利影响和提高农业生产维度的韧性。降低冲击对于农业生产功能的影响、提高农业生产维度韧性是一项重要挑战,我们可以通过增加农业作物多样化^[43]、完善农业补贴政策^[31]等措施提高农业系统抗灾能力,从而降低外部冲击对农业生产造成的不利影响。作物多样化是农业应对气候冲击的一项重要事前适应措施,在减轻降雨不足和热胁迫对农业生产力的不利影响方面具有有效性^[44]。农业保险补贴可以促进农业技术进步,引入转基因种子提高农作物品质从而促使农业生产韧性提高^[45]。

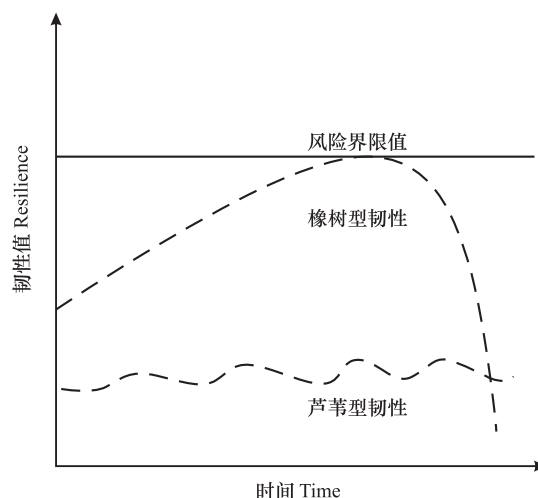


图 1 “橡树型”与“芦苇型”系统示意图

Fig.1 Schematic diagrams of 'oak' and 'reed' systems

2.1.2 生态功能

生态功能是指生态环境和生态进程提供以及保障人类生活所必需的环境条件与效能。农业参与生态系统中物质合成、代谢与循环的过程,同时发挥着净化环境和自我调节的作用,具有生态功能。

保持自然景观与维持生态系统稳定是农业的重要功能和任务,作物多样化是保障生态安全的重要指标。作物多样性是生态系统稳定的基础,对于农业生态功能的作用巨大,具有调节气候、生态种群和保护土壤等功能。作物与其生存环境构成农业生态系统,生存环境的变化会影响农作物种群数量与生存关系,同时农作物种群数量影响生态系统的稳定。

农业生态系统复原力是发展可持续农业的关键驱动力,作物多样性增强了农业生态系统的复原力,使农业生态系统维持正常状态并避开不利影响的可能性增加^[46]。作物多样性通过提高土壤碳、氮和微生物量来维持土壤质量和生产力,是可持续农业生态系统的基石^[47]。作物多样性会对生物多样性产生积极影响,通过增加作物多样性来增加农业景观异质性,有助于减少生物多样性损失^[48]。作物种类多样化,可以抑制农业种植系统中节肢动物害虫的增长以及改善农业生态系统中的生物控制^[49]。

2.1.3 发展功能

农业通过粮食生产维持了社会稳定,具有重要的发展功能。粮食生产安全关系到国家发展,是全球迫切关注的焦点之一。FAO 制定了国际普遍认可的粮食安全衡量标准:第一,国家粮食自给率必须达到 95% 以上。第二,年人均粮食达 400kg 以上。第三,粮食储备应该达到本年度粮食消费的 18%,低于 14% 为粮食紧急状态。2023 年中央一号文件强调要全力抓好粮食生产,确保全国粮食产量保持在 0.65 万亿 kg 以上。粮食产量稳定在 0.65 万亿 kg 以上,能够确保农产品保供稳价,为中国的经济社会发展奠定坚实的物质基础。

粮食生产安全关系到国民生存,是衡量国家发展的重要指标。极端气候等负面冲击会严重影响到农业生产从而制约国家经济发展。印度东部由于旱灾造成了严重经济损失,农民福利下降,贫困发生率上升了 12%—33%^[50]。尼日利亚的一项研究表明农业生产率由于降雨冲击下降了 42%,农业生产力的下降对于资产贫困家庭的影响更大^[51]。粮食供不应求会对全球造成极大影响,对于发展中国家特别是贫困国家,人民消费支出主要为食品支出,这些国家往往也是受气候、疾病以及其他冲突危险最大的地区,粮食危机可能会引发这些国家无数民众的生存危机。全球粮食危机也会对许多依赖农业促进经济增长的国家的国家的发展造成影响,在发展中国家,农民频繁遭受冲击导致其农业生产率低下,是限制该地区发展、经济增长缓慢和持续贫困的主要原因^[52]。

2.2 农业韧性的维度

依据韧性理论的演化及其基本内涵,可将农业生产系统韧性定义为:农业生产系统在受到外部扰动与冲击后,通过抵抗、适应、恢复或变革以维持其功能的能力。农业生产功能是确定其韧性维度的基础,依据上文分析,可将农业生产韧性分为生产韧性、生态韧性和发展韧性。三大韧性的界定与衡量过程可相互独立,但三者又相互统一,只有综合考虑各维度的韧性,才能得到合理的结论。此外,与现有研究不同,本文基于农业生产的结果,而非投入变量计算其韧性,能更直观地衡量韧性。

2.2.1 生产 R 韧性

R 韧性最早由 Zampieri 等学者提出^[53],该指标直接源于 Holling 的韧性界定,旨在衡量农业生产系统在不丧失功能的情况下可吸收的最大冲击力。 R 韧性是综合性指标,以系统均值与波动为基础进行计算,能反应观察期内系统综合韧性,但对时间跨度要求高,难以进行定量的因果回归分析。

R 韧性将粮食生产韧性定义为考察期数据波动均值平方与方差比值,即:

$$R_c = \mu^2 / \sigma^2 \quad (1)$$

式中,该方法既可计算单一粮食作物韧性、也可计算多维粮食作物综合韧性。其中 R_c 为粮食作物生产韧性指数, μ 为粮食产量(产值)时间序列均值, σ 为对应的时间序列标准差。 R 韧性直接源于生态韧性的定义,方便捕捉导致生产损失的极端冲击的频率和系统恢复期;考虑了空间异质性和多样性;计算简单且可以很容易地

考虑非线性长期趋势的影响。缺点在于对时间序列长度要求较高,通常需要约 30 个时间跨度样本才能较好地估计 R_c 精度。对于非平稳数据则需采用局部加权回归散点平滑法 (*lowess*) 进行转换后再计算:第一步,平滑转换: $v_i = \text{lowess}(p_i)$;第二步,趋势去除: $\pi_i = p_i / v_i$;第三步,计算新时间序列标准差: $\sigma' = \text{std}(\pi_i)$;第四步,韧性指数计算: $R'_c = (1/\sigma')^2$ 其中 p_i 待评估时间序列,当时间序列平稳时有 $R'_c = R_c$ 。

2.2.2 生态 H 韧性

维持自然生态安全是农业生产的重要功能和任务,多样化是保障生态安全的重要指标。目前关于多样化的衡量指标主要是 Shannon 熵指数^[54],Shannon 熵 (H) 指数源于物理热力学能量耗散熵值理论。Shannon 熵指数在自然科学与社会科学领域都具有非常广泛的应用,也是目前衡量生态韧性的核心指标。Kahiluoto 等学者进一步将农业生产多样性分为品种多样性 (*cultivars diversity*) 和响应多样性 (*response diversity*),品种多样性指的是同一种作物不同品种的多样性,响应多样性则是指作物本身的多样性。另一个应用多样化指数 Simpson 指数^[44],该指数与产业组织理论市场集中度的衡量思路一致,是其相反数。相较而言,Simpson 指数在韧性领域的应用没有 Shannon 指数广泛,因此本文采用 Shannon 熵指数计算农业生产多样化韧性。Shannon 熵指数具体计算如下:

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \log(p_i) \quad (2)$$

式(2)中, p_i 为某种作物出现的概率,可以改作物在总作物中的占比衡量。因此 H 指数是用作物比重对其比重的对数加权求和所得,指数越大说明农业生产多样化程度越高。该指数应用非常灵活,可方便进行多系统耦合。

2.2.3 发展 W 韧性

发展韧性即个人、家庭或综合单元遭受维度冲击后长期避免贫困的能力,该概念将韧性由静态转向动态^[55]。发展韧性是一个结合了福祉理论与韧性理论的微观韧性概念,即将韧性定义为个人或家庭陷入贫困的概率,最早由 Barrett and Constas 提出^[56]。随后 Cisse and Barrett 又提出了发展韧性的计量框架^[57],进一步促进了韧性在发展经济学领域的应用。发展韧性是一个概率性和前瞻性的概念,它考虑了家庭福利分配的当前和未来状况,并量化了家庭摆脱贫困或长期保持非贫困的能力^[58]。一方面,与生态韧性 H 指标类似,发展韧性 W 指标同样具有群体加总性,可方便将微观个体层面的韧性加总为村庄或者社区层面的总体韧性水平。另一方面,与生产韧性 R 指数类似,发展韧性 W 的测量需要在较长的时间范围内收集数据。

发展韧性测量的核心思想是在假定农户收入分布的前提下,基于农户个体数据,包括收入和其他影响收入的变量,运用马尔科夫链估计收入的条件均值和方差,然后基于某一临界值,如 1.9 美元贫困线和收入分布概率密度函数算出每个个体在某一时间点非贫困的概率,即:

第一步,农户收入马尔科夫链均值估计:

$$W_{it} = \sum_{j=1}^k \beta_{Mj} W_{i,t-1}^j + \gamma X_{it} + \varepsilon_{Mit} \quad (3)$$

式(3)中, W_{it} 为个体 i 在 t 时期的福利水平, X_{it} 为个体特征变量, ε_{Mit} 为 0 均值随机误差项。相应的条件期望为:

$$\hat{\mu}_{1it} = E[W_{it} | W_{i,t-1}, X_{it}] = \sum_{j=1}^k \hat{\beta}_{Mj} W_{i,t-1}^j + \hat{\gamma} X_{it} \quad (4)$$

第二步,农户收入方差估计:

$$\hat{\varepsilon}_{Mit}^2 = \sum_{j=1}^k \hat{\beta}_{Vj} W_{i,t-1}^j + \hat{\delta}_V X_{it} + \varepsilon_{Vit} \quad (5)$$

对应的条件方差为:

$$\hat{\mu}_{2it} = \hat{\varepsilon}_{Mit}^2 = \sum_{j=1}^k \beta_{Vj} W_{i,t-1}^j + \delta_V X_{it} \quad (6)$$

W_{it} 可以是正态分布、对数生态分布、伽马分布或者泊松分布。

第三步,发展韧性计算:

$$\hat{\rho}_{it} \equiv P(W_{it} > \bar{W}) = \bar{F}_{W_{it}} \left(\underbrace{\bar{W}}_{\text{Threshold}}; \underbrace{\hat{\mu}_{1it}(W_{it}, X_{it})}_{\text{Mean}}, \underbrace{\hat{\mu}_{2it}(W_{it}, X_{it})}_{\text{Variance}} \right) \quad (7)$$

其中, W_{it} 为个体收入, X_{it} 为控制变量, $\hat{\mu}_{1it}$ 和 $\hat{\mu}_{2it}$ 分别为均值与方差估计量; $\bar{F}(\cdot)$ 为累计分布函数,一旦 $\bar{W}$ 的分布确定,就能计算 $\hat{\rho}$ 。该指标结合了一阶矩(均值)和二阶矩(方差)信息,估计条件矩函数具有两方面重要价值:第一,对滞后财富多项式值的估计允许非线性持久冲击,这可以增强对常见财富冲击的异质响应的预测和识别;第二,可以区分财富和韧性之间的估计关系是由条件平均值还是条件方差的影响所驱动,均值越大,韧性越高;方差越大,韧性越低。

借鉴 W 韧性的计算思想,将其拓展至农业或粮食生产的发展韧性,用国际粮食安全标准线 400kg 为参照,计算某个经济体长期保障粮食生产安全的概率。基于粮食生产数据的发展韧性计算的重要贡献在于将微观农户韧性的研究拓展至宏观农业生产发展韧性的度量。

3 农业生产系统韧性的度量

3.1 生产韧性的度量

参照 Zampieri 等学者的方法^[59],使用 FAO 的粮食产值数据测度生产波动韧性。该韧性指数主要通过计算一段时间内粮食真实产值与实际产值的差值,用差值波动方差的倒数表示农业生产的长期韧性。但遗憾地是,Zampieri 等学者使用 lowess 函数对产量进行非参拟合时,并未对最优宽带设置进行严格探讨。这导致不同宽带水平下, R 韧性值存在较大差异。考虑到 FAO 的时间维度跨越 1961—2021 年,以三十年为周期,平滑计算农业生产韧性,并以不同宽带进行计算(图 2)。从估计结果看,不同宽带设置均不改变韧性增长趋势,对韧性绝对性存在明显地差异影响。因此,在使用 R 韧性测度农业生产韧性时,分析韧性趋势测度具有较高的可行性。但是测度韧性绝对值大小,仍需在最优宽带选择方法上做出努力。由图 2 可知,我国粮食生产波动韧性在 2016 年以前较为稳定,并无明显的趋势,但在这之后则呈现出快速提高的趋势。该结果说明 2016 年以后,我国粮食生产产量日趋稳定,这从连续 8a 总产超过 1.3 万亿 t 的事实也能得到很好的佐证。

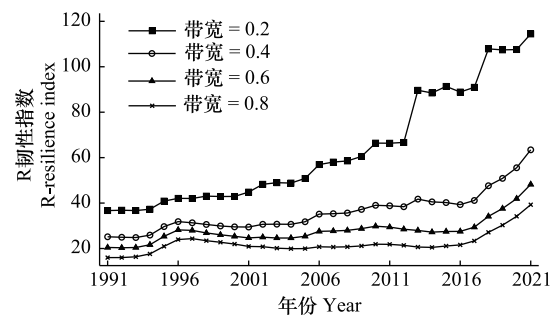


图 2 生产韧性演化趋势

Fig.2 Trends in the evolution of production resilience

性绝对性存在明显地差异影响。因此,在使用 R 韧性测度农业生产韧性时,分析韧性趋势测度具有较高的可行性。但是测度韧性绝对值大小,仍需在最优宽带选择方法上做出努力。由图 2 可知,我国粮食生产波动韧性在 2016 年以前较为稳定,并无明显的趋势,但在这之后则呈现出快速提高的趋势。该结果说明 2016 年以后,我国粮食生产产量日趋稳定,这从连续 8a 总产超过 1.3 万亿 t 的事实也能得到很好的佐证。

3.2 生态韧性的度量

参考 Kahiluoto 等学者,使用 Shannon 指数测度农业生态韧性^[54]。考虑到作物的全面性,我们使用 FAO 数据中有关中国 121 种农作物的收获面积计算农业生态韧性。从估计结果看,中国的农业多样性韧性呈现“倒 V”特征(图 3)。从 1991—2003 年,中国农业生态韧性呈上升趋势;但 2004—2021 年,中国农业生态韧性是下降的。可能是,自 2003 年起,中国逐步实行了以粮食直补、农资补贴、农机具购置补贴、良种补贴,在一定程度上引导了三大主粮种植的扩张,促进了农业“趋粮化”,对农业多样化产生了一定的冲击。农业生产多样化韧性演化趋势提醒,在确保粮食产量 0.65 万亿 kg 基本底线的前提下,不断地加大种子研发,培育多样化的作物与品种,以便更好地应对来自气候变化的风险。农业生产多样化指数的提高也有利于提升社会-生态系统安全性。

3.3 农业发展韧性的度量

按照 Cisse and Barrett 计算家庭复原力的方法^[57],以粮食生产为例,测度农业发展韧性。发展韧性的内涵是:部门在面对各种压力或多重冲击后长时期内避免陷入贫困的能力。各种外界压力指的是灾害面积、灌

溉面积等,通过期望和方差两个方面综合测算发展韧性。假定农业生产具有“S”型特征,控制了人均粮食产出滞后性的一次项、二次项以及三次项^[58]。为了更全面地评估农业发展韧性,进一步引入了受灾面积、化肥施用量等多个关键指标进行计算,这些指标能反映社会因素、外界冲击等对农业生产的影响程度,进而对农业发展韧性构成挑战。

在计算农业发展韧性时,采用了多元回归分析方法,将上述指标作为自变量,人均粮食产出作为因变量,通过构建回归模型来评估各指标对农业发展韧性的影响。模型中还控制了人均粮食产出滞后性的一次项、二次项以及三次项,以反映农业生产的动态特征。通过回归系数的估计和检验,可以得出各指标对农业发展韧性的贡献度和显著性水平,从而更准确地衡量农业发展韧性。

此外,文中还考虑了灌溉面积、农机总动力等生产要素变量,这些变量同样对农业发展韧性具有重要影响。在构建回归模型时,将这些变量也纳入自变量范畴,以更全面地评估农业发展韧性的多维度特征。

所有数据均来自于 2000—2019 年的《中国农村统计年鉴》。国际上粮食安全线为人均 400kg,我国的人均粮食供应约为 480kg,将此作为两个粮食安全门槛(图 4)。鉴于两种粮食安全线的趋势大致相同,仅展示参照国际粮食安全线的发展韧性结果。从时间范围来看,中国农业发展韧性具有“N”型特征。在 2000—2007 期间,农业发展韧性缓慢下降;2008—2016 年,农业发展韧性线性上升;但 2016 年之后,农业发展韧性又出现了明显的下降趋势。

从不同区域展示(表 1)农业发展综合韧性及其变化可知,中国农业发展韧性有所增长,上海、北京、天津、广东、浙江、辽宁的增幅较为明显。主产区的农业发展

韧性及其增长率明显高于非主产区;东北地区和中部地区的农业发展韧性及其增长率,远高于东部地区和西部地区。中国的农业发展韧性的区域间差距可能在拉大。

本文利用图表详细展示了农业生产系统在生产、生态和发展三个维度上的韧性演化趋势。结果显示,生产韧性在 2011 年以前发展平缓,随后呈现出明显的增长趋势,表明我国粮食生产产量日趋稳定。生态韧性呈现出倒“V”趋势,即 2002 年前后出现相反的趋势,这可能与我国农业政策的调整以及作物种植结构的变化有关。发展韧性则呈现出“N”型上升趋势,但在 2016 年之后又出现了明显的下降趋势,这可能受到多种因素的影响,包括自然灾害、市场环境的变化等。

3.4 综合韧性水平

R 、 H 和 W 指数分别从生产、生态和发展三个维度衡量了粮食生产韧性,但三大维度的韧性并非总能协调发展,甚至可能还会产生冲突,如生态韧性的提升一定程度上必须以牺牲生产韧性为代价。因此,为更好地衡量粮食生产韧性,进一步将三维度指标综合为粮食生产综合韧性指标。

为消除不同量纲的影响,将 R 、 H 和 W 三大指数进行归一化处理,使取值在 $[0, 1]$ 之间。归一化处理是一种常用的数据预处理方法,它可以将不同量级或单位的指标转化为无量纲的相对数值,从而方便进行比较和

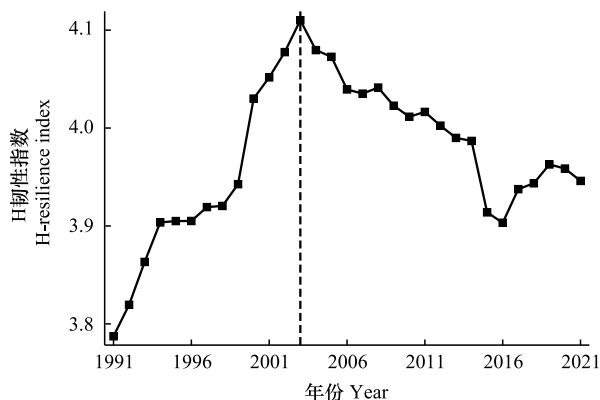


图 3 生态韧性演化趋势

Fig.3 Trends in the evolution of ecological resilience

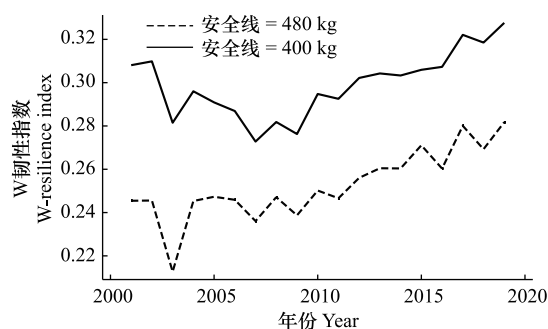


图 4 农业发展韧性演化趋势

Fig.4 Trends in the evolution of agricultural development resilience

综合分析。

表 1 分地区农业发展综合韧性及其变化

Table 1 Comprehensive resilience of agricultural development by subregion and its evolution									
地区 Area	总样本 Total sample	2001	2019	变化率/% Rate of change	地区 Area	总样本 Total sample	2001	2019	变化率/% Rate of change
主产区 Main producing areas	0.477	0.469	0.541	15.37	江西	0.389	0.433	0.461	6.46
非主产区 Non main producing areas	0.248	0.228	0.250	9.55	河南	0.490	0.485	0.532	9.76
东部 Eastern	0.156	0.156	0.164	4.96	湖北	0.341	0.374	0.430	15.03
上海	0.004	0.001	0.020	>200	湖南	0.361	0.392	0.359	-8.43
北京	0.006	0.000	0.003	>200	西部 Western	0.331	0.320	0.352	9.90
天津	0.073	0.002	0.101	>200	云南	0.213	0.263	0.214	-18.75
山东	0.401	0.445	0.475	6.69	内蒙古	0.758	0.712	0.994	39.59
广东	0.031	0.009	0.040	>200	四川	0.335	0.375	0.369	-1.61
江苏	0.343	0.358	0.369	3.01	宁夏	0.487	0.409	0.415	1.36
河北	0.355	0.411	0.312	-24.15	广西	0.242	0.291	0.217	-25.20
浙江	0.066	0.036	0.078	114.91	新疆	0.570	0.413	0.783	89.72
福建	0.123	0.139	0.074	-46.45	海南	0.139	0.071	0.123	74.48
东北 Northeast	0.780	0.686	0.823	19.92	甘肃	0.305	0.279	0.304	9.24
吉林	0.946	0.916	0.997	8.78	西藏	0.268	0.326	0.291	-10.73
辽宁	0.462	0.250	0.560	124.40	贵州	0.249	0.236	0.210	-11.17
黑龙江	0.932	0.892	0.911	2.10	重庆	0.378	0.413	0.339	-18.06
中部 Central	0.401	0.390	0.454	16.57	陕西	0.229	0.269	0.217	-19.42
安徽	0.549	0.476	0.634	33.25	青海	0.131	0.106	0.098	-7.00
山西	0.274	0.178	0.309	73.45	平均值 Average value	0.337	0.321	0.363	12.84

数据来源:《中国统计年鉴》

以指数加权乘法法则计算综合韧性,即:

$$R_{c,t}=R_t^{\alpha}\times H_t^{\beta}\times W_t^{\gamma}$$

(8)

式中, $\alpha+\beta+\gamma=1$ 。其中, α 、 β 、 γ 分别为生产韧性、生态韧性和发展韧性的权重,代表了对不同韧性维度的重视程度; R_c 为综合韧性指数, t 表示时间(年份),其它参数与上文含义相同。这种加权乘法法则能够综合考虑各个维度的韧性,并体现出它们之间的相互影响。当某一维度的韧性较高时,它会在综合韧性中占据较大的比重;反之,当某一维度的韧性较低时,它会在综合韧性中起到较小的贡献。

根据参数不同取值,得出综合韧性指标(图 5)。

由图 5 可知:首先,2000—2020 年我国粮食生产综合韧性演化呈现“W”趋势,且近年来呈上升趋势。其中 2000—2016 年间,粮食生产韧性并无明显趋势,并在在 2004 和 2016 年达到最低生平,但 2016 年以后我国粮食生产韧性呈明显上升趋势。其次,不同权重取值模拟结果显示,重视发展韧性的综合韧性水平最高,而重视生产韧性的综合韧性水平最低。然而 2016 年以后,情况有所变化,以生产韧性为重的韧性指数逐渐上升至第一位,而以生态韧性为重的综合韧性指数变得最低。说明近年来我国粮食生产产量趋于稳定,但粮食生产多样化水平在下降,这些结论从 R 和 H 分维度韧性也能发现。再次说明无法通过单维度衡量农业生产系统韧性。

图 6 分析了韧性三个维度的协调一致性演化情况,进一步计算了其耦合协调度,结果显示韧性三维度的

耦合协调度与综合韧性指标具有相似的演化趋势。耦合度是反映系统之间相互作用、相互影响的程度。在农业生产系统中,生产韧性、生态韧性和发展韧性之间也存在着相互耦合的关系。耦合度越高,说明它们之间的相互作用越紧密,系统整体韧性水平也越高。耦合协调度是耦合度和协调度的综合体现,是反映系统内部各个要素之间既相互作用又协调一致的程度。通过计算耦合协调度,可以更全面地了解农业生产系统内部各个韧性维度之间的相互作用和协调情况。

虽然三个维度的韧性在演化过程中呈现出不同的趋势,但它们之间并非完全独立,而是存在一定的关联和相互影响。生产韧性的提升可能会在一定程度上牺牲生态韧性,因为增加粮食产量可能需要更多的土地、水资源和化肥等投入,从而对环境造成一定的压力。同样,发展韧性的提升也可能对生产韧性和生态韧性产生影响。因此,在制定农业政策时,需要充分考虑三个维度韧性之间的协同。

4 结论与建议

本文主要研究结论主要有四点:第一,农业生产是一个典型的复杂社会-生态系统,其演化发展是自然生态与人类社会共同作用的结果,需要从社会-生态系统框架进行研究;第二,农业具有多重不同功能,相应的韧性也具有多为目标,必须系统考虑农业系统多维度韧性及其相互间的关系,避免研究结论的偏差和冲突,而在农业支持政策实施过程可根据不同韧性维度的权衡,更针对性地施策;第三,韧性是一个复杂的概念,无法通过任何单一维度和单一指标进行衡量,必须在明确农业功能的基础上,寻找系统指标。第四,我国农业生产系统韧性总体呈现 W 型演化趋势,近年来综合韧性有所提升,但不同维度韧性耦合协调度有待提高。

针对以上结论,提出以下政策建议推动农业生产系统韧性:

(1) 加强农业生产系统韧性的综合评估:建立完善的农业生产系统韧性评估体系,综合考虑生产、生态和发展三大维度,定期发布韧性评估报告,为政策制定提供科学依据。

(2) 提升生产韧性,保障粮食安全:加大对粮食生产的支持力度,提高粮食生产的稳定性和适应性,确保粮食产量稳定增长,满足国家粮食安全需求。推动农业技术创新,提高农业生产效率和质量,降低生产成本,增强农业生产系统的竞争力。

(3) 强化生态韧性,促进可持续发展:加强农业生态保护,推动农业绿色发展,提高农业生态系统的稳定

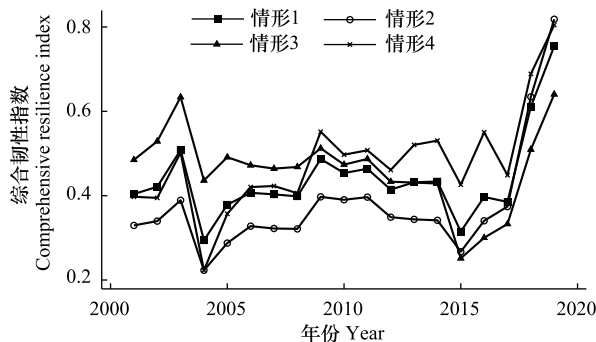


图5 综合韧性演化趋势

Fig.5 Trends in the evolution of integrated resilience

情形 1: $(\alpha, \beta, \gamma) = (\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$; 情形 2: $(\alpha, \beta, \gamma) = (\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})$; 情形 3: $(\alpha, \beta, \gamma) = (\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4})$; 情形 4: $(\alpha, \beta, \gamma) = (\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2})$; 参数数值大小代表对该韧性维度的重视程度。2004 年与 2016 年综合韧性为 0, 原因是标准化处理后这两年有分维度指标出现最小值, 进而被标准化为 0, 乘积运算后的综合指标就为 0, 但该处理过程并不影响韧性的真实趋势

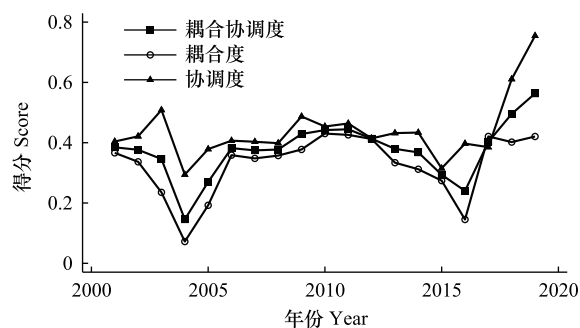


图6 耦合协调度

Fig.6 Degree of coupling coordination

在对三大韧性指数归一化处理的基础上计算耦合协调度, 其中耦

$$\text{耦合度的计算为: } C = \sqrt[3]{\frac{R_N \times H_N \times W_N}{(R_N + H_N + W_N)^3}}; \text{协调度的计算为 } T = \frac{1}{3}$$

$$(R_N + H_N + W_N), \text{耦合协调度的计算为: } CT = \sqrt{C \times T}$$

性和恢复力。优化农业种植结构,鼓励作物多样化种植,减少农药和化肥的使用,降低农业对环境的负面影响。

(4) 提升发展韧性,助力农民增收:加强农民培训和教育,提高农民的综合素质和技能水平,增强农民应对市场风险和自然灾害的能力。推动农业产业化发展,培育农业龙头企业,带动农民增收致富,实现农业高质量发展。

(5) 促进不同维度韧性的耦合协调:制定综合性的农业支持政策,平衡生产、生态和发展三大维度的关系,避免单一维度的发展导致其他维度韧性的下降。加强部门间的协作和配合,形成合力,共同推动农业生产系统韧性的提升。

本文为农业韧性的研究提供了一个分析框架,但有关韧性的界定与衡量还较为粗糙,需要更多深入系统的研究。我国已实现“粮食基本自给,口粮绝对安全”粮食安全现状,今后的农业支持政策应偏向于农业生产系统韧性提升及其不同维度的耦合协调,形成粮食安全的长期保障。

参考文献(References):

- [1] DeFries R, Nagendra H. Ecosystem management as a wicked problem. *Science*, 2017, 356(6335): 265-270.
- [2] Mushtaq S, Kath J, Stone R, Henry R, Läderach P, Reardon-Smith K, Cobon D, Marcussen T, Cliffe N, Kristiansen P, Pischke F. Creating positive synergies between risk management and transfer to accelerate food system climate resilience. *Climatic Change*, 2020, 161(3): 465-478.
- [3] Hellegers P. Food security vulnerability due to trade dependencies on *Russia* and Ukraine. *Food Security*, 2022, 14(6): 1503-1510.
- [4] Seekell D, Carr J, Dell'Angelo J, D'Odorico P, Fader M, Gephart J, Kumm M, Magliocca N, Porkka M, Puma M, Ratajczak Z, Rulli M C, Suweis S, Tavoni A. Resilience in the global food system. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(2): 025010.
- [5] Meuwissen M P M, Feindt P H, Spiegel A, Termeer C J A M, Mathijs E, de Mey Y, Finger R, Balman A, Wauters E, Urquhart J, Vigani M, Zawalińska K, Herrera H, Nicholas-Davies P, Hansson H, Paas W, Slijper T, Coopmans I, Vroege W, Ciecchomska A, Accatino F, Kopainsky B, Poortvliet P M, Candel J J L, Maye D M, Severini S, Senni S, Soriano B, Lagerkvist C J, Peneva M, Gavrilescu C, Reidsma P. A framework to assess the resilience of farming systems. *Agricultural Systems*, 2019, 176: 102656.
- [6] Agnolucci P, Rapti C, Alexander P, De Lipsis V, Holland R A, Eigenbrod F, Ekins P. Impacts of rising temperatures and farm management practices on global yields of 18 crops. *Nature Food*, 2020, 1(9): 562-571.
- [7] 刘晓星, 张旭, 李守伟. 中国宏观经济韧性测度——基于系统性风险的视角. *中国社会科学*, 2021(1): 12-32.
- [8] 杰里米·里夫金. 韧性时代. 郑挺颖, 阮南捷, 译. 北京: 中信出版社, 2022.
- [9] Slijper T, de Mey Y, Poortvliet P M, Meuwissen M P M. Quantifying the resilience of European farms using FADN. *European Review of Agricultural Economics*, 2022, 49(1): 121-150.
- [10] 郝爱民, 谭家银. 农村产业融合赋能农业韧性的机理及效应测度. *农业技术经济*, 2023(7): 88-107.
- [11] Gibbons R. What is economic sociology and should any economists care? *Journal of Economic Perspectives*, 2005, 19(1): 3-7.
- [12] Ishii K. A production research to create new value of business output. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(23/24): 7313-7328.
- [13] Kamalahmadi M, Yu Q P, Zhou Y P. Call to duty: just-in-time scheduling in a restaurant chain. *Management Science*, 2021, 67(11): 6751-6781.
- [14] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [15] 德·马库斯·布伦纳梅尔. 韧性社会. 孙国峰译. 北京: 中信出版社, 2022.
- [16] Gunderson L H, Holling C S. *Panarchy: understanding transformations in systems of humans and nature*, Washington DC: Island Press, 2002.
- [17] Garmestani A S, Benson M H. A framework for resilience-based governance of social-ecological systems. *Ecology and Society*, 2013, 18: art9.
- [18] Savary S, Akter S, Almekinders C, Harris J, Korsten L, Rötter R, Waddington S, Watson D. Mapping disruption and resilience mechanisms in food systems. *Food Security*, 2020, 12(4): 695-717.
- [19] Gangopadhyay P K, Khatri-Chhetri A, Shirsath P B, Aggarwal P K. Spatial targeting of ICT-based weather and agro-advisory services for climate risk management in agriculture. *Climatic Change*, 2019, 154(1): 241-256.
- [20] Brown P R, Afroz S, Chialue L, Chiranjeevi T, El S, Grünbühl C M, Khan I, Pitkin C, Reddy V R, Roth C H, Sacklokhham S, Williams L J. Constraints to the capacity of smallholder farming households to adapt to climate change in South and Southeast Asia. *Climate and Development*, 2019, 11(5): 383-400.
- [21] 魏后凯, 崔凯. 建设农业强国的中国道路: 基本逻辑、进程研判与战略支撑. *中国农村经济*, 2022(1): 2-23.
- [22] Quinlan A E, Berbés-Blázquez M, Haider L J, Peterson G D. Measuring and assessing resilience: broadening understanding through multiple disciplinary perspectives. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 53(3): 677-687.
- [23] Upton J, Constenla-Villoslada S, Barrett C B. Caveat utilitor: a comparative assessment of resilience measurement approaches. *Journal of Development Economics*, 2022, 157: 102873.
- [24] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, Kinzig A P. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 2004, 9(2): art5.
- [25] Douxchamps S, Debevec L, Giordano M, Barron J. Monitoring and evaluation of climate resilience for agricultural development-A review of currently available tools. *World Development Perspectives*, 2017, 5: 10-23.

- [26] Dakos V, Kéfi S. Ecological resilience: what to measure and how. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(4): 043003.
- [27] 夏楚瑜, 董照樱子, 陈彬. 城市生态韧性时空变化及情景模拟研究——以杭州市为例. *生态学报*, 2022, 42(1): 116-126.
- [28] 伍骏骞, 方师乐, 李谷成, 徐广彤. 中国农业机械化发展水平对粮食产量的空间溢出效应分析——基于跨区作业的视角. *中国农村经济*, 2017(6): 44-57.
- [29] 陈飞, 范庆泉, 高铁梅. 农业政策、粮食产量与粮食生产调整能力. *经济研究*, 2010, 45(11): 101-114, 140.
- [30] 陈宏伟, 穆月英. 节水灌溉设施的粮食生产增效机制. *华南农业大学学报: 社会科学版*, 2021, 20(4): 76-89.
- [31] 高鸣, 王颖. 农业补贴政策对粮食安全的影响与改革方向. *华南农业大学学报: 社会科学版*, 2021, 20(5): 14-26.
- [32] 宋爽, 王帅, 傅伯杰, 陈海滨, 刘焱序, 赵文武. 社会-生态系统适应性治理研究进展与展望. *地理学报*, 2019, 74(11): 2401-2410.
- [33] 于法稳. 新时代农业绿色发展动因、核心及对策研究. *中国农村经济*, 2018(5): 19-34.
- [34] 尹昌斌, 李福夺, 王术, 郝艾波. 中国农业绿色发展的概念、内涵与原则. *中国农业资源与区划*, 2021, 42(1): 1-6.
- [35] 李文华, 刘某承, 闵庆文. 中国生态农业的发展与展望. *资源科学*, 2010, 32(6): 1015-1021.
- [36] 丁宇刚, 孙祁祥. 气候风险对中国农业经济发展的影响——异质性及机制分析. *金融研究*, 2022(9): 111-131.
- [37] 令涛, 赵桂芹. 农业保险与农业生产韧性: 内在逻辑及实证检验. *华南农业大学学报: 社会科学版*, 2024, 23(2): 94-106.
- [38] 李小云, 林晓莉, 徐进. 小农的韧性: 个体、社会与国家交织的建构性特征——云南省勐腊县河边村疫情下的生计. *农业经济问题*, 2022, 43(1): 52-64.
- [39] Capdevila P, Stott I, Oliveras Menor I, Stouffer D B, Raimundo R L G, White H, Barbour M, Salguero-Gómez R. Reconciling resilience across ecological systems, species and subdisciplines. *Journal of Ecology*, 2021, 109(9): 3102-3113.
- [40] Fan S G, Headey D, Rue C, Thomas T. Food systems for human and planetary health: economic perspectives and challenges. *Annual Review of Resource Economics*, 2021, 13: 131-156.
- [41] 罗必良. 中国农业现代化的战略定位. *中国农村经济*, 2023, (11): 42-30.
- [42] Lipper L, Thornton P, Campbell B, Baedeker T, Braimoh A, Bwalya M, Caron P, Cattaneo A, Garrity D, Henry K, Hottle R, Jackson L, Jarvis A, Kossam F, Mann W, McCarthy N, Meybeck A, Neufeldt H, Remington T, Sen P, Sessa R, Shula R, Tibu A, Torquebiau E. Torquebiau E. Climate Smart Agriculture for Food Security. *Nature Climate Change*, 2014, 5(4): 386-386.
- [43] Lin B B. Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for environmental change. *BioScience*, 2011, 61(3): 183-193.
- [44] Birthal P S, Hazrana J. Crop diversification and resilience of agriculture to climatic shocks: Evidence from India. *Agricultural Systems*, 2019, 173: 345-354.
- [45] Chemeris A, Liu Y, Ker A P. Insurance subsidies, climate change, and innovation: Implications for crop yield resiliency. *Food Policy*, 2022, 108: 102232.
- [46] Matsushita K, Yamane F, Asano K. Linkage between crop diversity and agro-ecosystem resilience: Nonmonotonic agricultural response under alternate regimes. *Ecological Economics*, 2016, 126: 23-31.
- [47] McDaniel M D, Tiemann L K, Grandy A S. Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta-analysis. *Ecological Applications*, 2014, 24(3): 560-570.
- [48] Sirami C, Gross N, Baillod A B, Bertrand C, Carrié R, Hass A, Henckel L, Miguet P, Vuillot C, Alignier A, Girard J, Batáry P, Clough Y, Violle C, Giralt D, Bota G, Badenhauer I, Lefebvre G, Gauffre B, Vialatte A, Calatayud F, Gil-Tena A, Tischendorf L, Mitchell S, Lindsay K, Georges R, Hilaire S, Recasens J, Solé-Senan X O, Robleño I, Bosch J, Barrientos J A, Ricarte A, Marcos-García M Á, Miñano J, Mathevet R, Gibon A, Baudry J, Balent G, Poulin B, Burel F, Tscharntke T, Bretagnolle V, Siriwardena G, Ouin A, Brotons L, Martin J L, Fahrig L. Increasing crop heterogeneity enhances multitrophic diversity across agricultural regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(33): 16442-16447.
- [49] Murrell E G. Can agricultural practices that mitigate or improve crop resilience to climate change also manage crop pests? *Current Opinion in Insect Science*, 2017, 23: 81-88.
- [50] Pandey S. Economic costs of drought and rice farmers' coping mechanisms. *International Rice Research Notes*, 2009, 32(1): 5-11.
- [51] Amare M, Jensen N D, Shiferaw B, Cissé J D. Rainfall shocks and agricultural productivity: implication for rural household consumption. *Agricultural Systems*, 2018, 166: 79-89.
- [52] Carter M, Janvry A, Sadoulet E, Sarris A. Index-based weather insurance for developing countries: a review of evidence and a set of propositions for up-scaling. *Revue d'économie du développement*, 2014, 23(1): 5-57.
- [53] Zampieri M, Ceglar A, Dentener F, Toreti A. Wheat yield loss attributable to heat waves, drought and water excess at the global, national and subnational scales. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(6): 064008.
- [54] Kahiluoto H, Kaseva J, Balek J, Olesen J E, Ruiz-Ramos M, Gobin A, Kersebaum K C, Takáč J, Ruget F, Ferrise R, Bezak P, Capellades G, Dibari C, Mäkinen H, Nendel C, Ventrella D, Rodríguez A, Bindi M, Trnka M. Decline in climate resilience of European wheat. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(1): 123-128.
- [55] 李晗, 陆迁. 无条件现金转移支付与家庭发展韧性——来自中国低保政策的经验证据. *中国农村经济*, 2022(10): 82-101.
- [56] Barrett C B, Constan M A. Toward a theory of resilience for international development applications. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(40): 14625-14630.
- [57] Cissé J D, Barrett C B. Estimating development resilience: a conditional moments-based approach. *Journal of Development Economics*, 2018, 135: 272-284.
- [58] Phadera L, Michelson H, Winter-Nelson A, Goldsmith P. Do asset transfers build household resilience? *Journal of Development Economics*, 2019, 138: 205-227.
- [59] Zampieri M, Weissteiner C J, Grizzetti B, Toreti A, van den Berg M, Dentener F. Estimating resilience of crop production systems: From theory to practice. *Science of the Total Environment*, 2020, 735: 139378.