数字技术赋能下生态农产品产业链脆弱性的基模分析与韧性治理

王翠霞[1], 胡 涛[1*], 李雅琴[1], 丁 雄[2]

(1. 江西财经大学信息管理与数学学院,江西南昌 330032,中国; 2. 江西财经大学软件与物联网工程学院,江西南昌 330032,中国)

摘 要: [**目的/意义**] 厘清生态农产品产业链脆弱性的结构本源,剖析数字技术、质量溯源与电商平台对其内在反馈回路的调节效应,探究数字技术赋能究竟是消除还是仅缓解了产业链固有的脆弱性,为数字农业与生态农产品产业链治理提供新的理论视角。[**方法**] 运用系统动力学基模分析方法,构建生态农产品产业链成长上限结构模型,识别其脆弱性的内生结构根源;在此基础上,分析数字农技平台、基于物联网与区块链的质量溯源技术以及电商平台对系统反馈回路的调节效应,揭示数字技术可能激活的新抑制回路。[**结果和讨论**] 生态农产品产业链规模扩张、质量提升与溢价增长过程中形成的成长上限基模是其脆弱性的结构根源。数字技术虽能通过增强正向回路、削弱抑制回路来缓解系统成长制约,但无法消除成长上限的结构性根源,且可能激活新的抑制回路,使脆弱性形态发生转移。[**结论**] 生态农产品产业链韧性提升主要依赖于对成长上限的识别与干预,而非单纯依赖技术投入,未来可通过系统动力学仿真与典型区域案例分析,量化关键变量阈值及政策干预效果,为韧性治理提供实践依据。

关键词: 生态农产品;数字技术;脆弱性;成长上限基模;韧性治理;系统动力学;产业链韧性

中图分类号: F323 **文献标识码:** A **文章编号:** SA202604024

引用格式:王翠霞, 胡涛, 李雅琴, 丁雄. 数字技术赋能下生态农产品产业链脆弱性的基模分析与韧性治理[J]. 智慧农业(中英文), 2026, 8(4): 255-267. DOI: 10.12133/j.smartag.SA202604024

WANG Cuixia, HU Tao, LI Yaqin, DING Xiong. Vulnerability of the Ecological Agricultural Product Industry Chain under Digital Technology Empowerment: Archetype Analysis and Resilience Governance[J]. Smart Agriculture, 2026, 8(4): 255-267. DOI: 10.12133/j.smartag.SA202604024 (in Chinese with English abstract)

0 引 言

生态农业生产方式能够显著改善土壤健康与生物多样性,增强农业生态系统对气候扰动的缓冲能力[1]。以绿色、有机、地理标志产品为代表的生态农产品,依托特定地域的自然条件和生态生产方式[2],提升产品附加值、衔接小农户与大市场、满足消费者对食品安全与生态环境的双重关切[3],并通过区域品牌溢价与短链分销等机制提升农户收入稳定性与市场韧性[4]。然而,与常规农产品相比,生态农产品产业链面临更为复杂的脆弱性结构。有机、绿色、无公害等类型在认证标准上虽有梯度差异,但其脆弱性的结构性根源是共通的:生产端严格的技术约束(如禁止或限制化学合成物投入)延长了生产周期,削弱了对霜冻、干旱、病虫害等自然灾害的缓冲能力,导致灾后恢复周期变得更为漫长;认证与品牌溢价高度依赖消费者信任,而品质参差不齐、信息不对称与机会主义行为更易引发信任侵蚀与声誉折损的相互强化;小农户分散经营与高标准的生态生产要求之间存在结构性矛盾,则使质量管控的边际成本随规模扩张而非线性上升。据系统脆弱性理论,脆弱性是源于系统内在结构、易

收稿日期:2026-04-16

基金项目:国家自然科学基金项目(71961009, 72261013);江西省自然科学基金项目(20242BAB25011);江西财经大学第二十届学生科研课题(20251212163401413)

作者简介:王翠霞,博士,教授,研究方向为智慧农业产业链运营管理。E-mail:wangcx1995@126.com

*通信作者:胡 涛,博士研究生,研究方向为智慧农业产业链运营管理。E-mail:ceohutao@163.com

copyright©2026 by the authors (登录 www.smartag.net.cn 免费获取电子版全文)

于受到损害并难以恢复的属性[5]。在生态农产品产业链中，任何对自然条件或生产者行为的扰动，都可能通过上述反馈结构被放大，最终引发产量、品质与市场信任的系统性波动。

数字技术有助于推动生态农产品产业链高质量发展，其赋能效应贯穿生产端与需求端。在生产端，数字技术通过提升气象监测的精准度、智能化病虫害预警的及时性，以及生态生产管理的精细化水平，有效降低了农业生产经营中的自然风险与技术不确定性，从而保障了产量、质量的连续性与稳定性；在市场端，以电商平台为代表的数字工具突破了传统销售的地理边界，拓宽了农产品的市场渠道，并借助大数据分析实现供需精准匹配，提升了交易效率与市场响应能力[6]。生产端的稳定性与市场端的流通能力相互促进，共同提升了农产品产业链的整体韧性与价值创造空间。同时，以物联网、区块链为代表的数字技术，被寄望于通过实时数据采集、可信溯源与信息透明化以缓解信息不对称与信任缺失等问题[7,8]。然而，生产主体分散、质量标准不统一等结构性缺陷依然存在[9]；数字化溯源虽增强了透明度，但机会主义行为并未随之消失，区域品牌仍面临“公地悲剧”风险。同时，小农户因数字鸿沟被边缘化、多源数据孤岛削弱信任、过度依赖平台导致利润挤压等现象表明，数字技术反而可能催生新的脆弱性[10]。

既有研究多从品牌治理[11]、产业链韧性[12]或政策评估[13]等单一维度切入，缺乏对产业链脆弱性演化机制的系统诊断。本研究的创新主要体现在三方面：分析框架上，将成长上限基模引入生态农产品产业链脆弱性分析，构建了由正反馈驱动、负反馈制约与数字技术新风险构成的三层因果回路框架，弥补了既有研究静态评估或单一环节诊断的局限；核心发现上，在识别传统增长制约因素的基础上，进一步揭示了数字技术嵌入所激活的三条新抑制回路，表明数字技术赋能可能同时引致小农户挤出、平台利润挤压与同质化竞争等结构性风险；方法应用上，将变量选取、因果连接判定与回路识别建立于文献归纳、案例验证与实地调研的多源证据相互印证之上，增强了基模分析在农业复杂系统问题中的可操作性。

事实上，生态农产品产业链是一个由多重反馈回路构成的动态复杂系统。数字技术在强化市场扩张、信任积累等[14]增强回路的同时，可能意外激活小农户挤出、信任异化、利润挤压等平衡回路，这些平衡回路构成了系统增长的“天花板”。回答上述矛盾，需要超越对数字技术效应的静态评估，从动态系统视角展开机制性分析。

为此，借助系统动力学成长上限基模分析方法[15]，构建生态农产品产业链的因果回路模型，系统识别数字技术背景下三类典型“成长上限”基模的运行机制，探究数字技术与反馈结构的互动路径，并提出超越“技术修补”的系统性韧性治理策略。

1 系统动力学成长上限基模分析方法

系统动力学认为，系统的动态行为主要由其内生反馈结构决定，外部冲击只是“触发器”[16]。系统脆弱性源于其内生反馈结构与外部干扰的交互作用，韧性则体现为系统通过调整结构、吸收干扰、维持核心功能的能力[17]。成长上限（Limits to Growth）是系统思考的九大基础基模之一，其核心结构由正反馈回路（增强回路，R）与（平衡回路，B）构成，后者代表限制增长的“天花板”[15]。彼得·圣吉指出，系统增长放缓的根源通常不在于增强回路太弱，而在于平衡回路被忽视或未被识别。当平衡回路逐渐占据主导地位，系统便进入成长上限状态。因此，有效的干预策略不是继续推动增强回路，而是从平衡回路入手，识别并去除制约增长的关键因素。

生态农产品产业链长期面临增产不增收、提质难溢价等增长趋缓甚至停滞的困境。其制约因素并非源自外部随机扰动，而是由产业链自身成长所内生激活。这正是成长上限基模所刻画的行为模式。基于上述方法论，本研究构建了数字技术赋能背景下生态农产品产业链脆弱性分析的5个步骤。

（1）问题界定。识别由增强回路驱动增长、但已出现增长放缓、波动加剧或功能退化迹象的关键指标。例如，生态农产品市场规模的持续扩张是否伴随小农户参与率下降，溯源系统的广泛部署是否同步提升了消费者信任，据此界定本研究关注的成长上限现象。

（2）因果结构建模。建立涵盖生产、流通、消费各环节的因果反馈结构模型，标注增强回路与平衡回路的极性，识别数字技术在回路中的嵌入节点。

（3）脆弱性识别。基于因果结构模型，系统分析产业链的脆弱性来源。重点关注外部干扰（如自然灾害、掺假事件、市场波动）如何通过系统的反馈结构被放大或衰减，以及哪些平衡回路构成了脆

弱性的结构性根源。

（4）干预机制评估。评估数字技术对不同反馈回路的作用效应：数字技术对特定增强回路是强化还是削弱，对特定平衡回路是激活强化还是缓解，以及在缓解某一脆弱性的同时是否催生了新的脆弱性。

（5）治理策略推导。基于系统动力学的“杠杆点”理论[5]，识别干预系统中具有最大影响力的结构节点，并据此提出超越“技术中心主义”的系统性韧性治理策略，以削弱制约增长的关键平衡回路，实现主导回路由脆弱性向韧性的结构性转换。

2　生态农产品产业链系统因果结构分析

2.1 生态农产品产业链的增长与受阻动态

生态农产品产业链在正反馈驱动下通常呈现产量扩张、品牌价值提升与收益增长的态势。以赣南脐橙为例，该产业自规模化发展以来，规模、品牌价值与果农收益持续增长。然而，近年来多个产区相继出现增长趋缓甚至受阻迹象：收购价从往年4～6元/kg跌至不足3元/kg，早采、掺假、冒用品牌等行为屡禁不止，黄龙病发病率上升，成本持续上涨挤压利润空间[18]。五常大米、阳澄湖大闸蟹等产业链亦普遍存在质量信任危机、生态承载力约束或小农户行为失控等问题[19,20]。

上述增长受阻现象并非偶然的市场波动。从系统动力学视角看，外部冲击（如极端天气、病虫害、价格波动）通常引发短期扰动，系统在扰动过后能够恢复原有功能；但当系统持续呈现增长趋缓、波动加剧乃至功能退化时，则表明其内部反馈结构已发生改变，脆弱性正在累积。因此，持续性的增长受阻是系统内在脆弱性的外在表征，产业链脆弱性具有结构性根源，系统已进入“成长上限”基模的典型行为模式。为此，需识别驱动增长的增强回路与构成制约的平衡回路，揭示数字技术赋能背景下脆弱性的演化机制。

2.2 数字技术赋能下产业链的增长机制识别

核心变量选取兼顾理论溯源与经验锚定。理论层面，依据成长上限基模所揭示的“增长受制于内生约束”这一核心逻辑，识别自然资源条件水平、生态承载力、市场容量、信任阈值等增长制约因素；经验层面，以“生态农业”“农产品产业链”“系统动力学”等为关键词，在Web of Science和中国知网中进行检索，筛选出在相关研究中出现频次较高的候选变量，初步形成包含20余个变量的初始变量集；再经由赣南脐橙、五常大米、横州数字茉莉等典型案例的实地调研予以补充、归并与剔除，最终提炼出表1所列的本研究因果回路分析及模型构建所涉及的14个核心变量及各变量最具代表性的支撑来源。筛选标准为：契合“增长受制于内生约束”这一理论逻辑且文献高频出现者优先纳入，理论逻辑成立但文献支撑不足者须经案例佐证，与上述理论逻辑不符合者予以剔除。对于气候变化、宏观经济波动等外生变量，因其不属于系统内生反馈结构，未纳入核心变量体系，仅在文字分析中作为外部扰动加以讨论。

因果关系的连接基于三类依据：一是理论逻辑，依据经济学及农业经济学中的公认原理推断变量间的因果方向；二是文献证据，参考已有实证研究中的因果推断结论；三是案例事实，来自赣南脐橙、五常大米、横州数字茉莉等案例调研中观察到的实际关联。对于多源证据指向一致的因果链，其连接可靠性较高；对于存在争议的因果链，则综合权衡后作出判断，并在正文相应位置说明其依据。

因果回路的构建严格遵循系统动力学的因果链极性准则：正因果链（+）指首尾变量同向变化，负因果链（–）指反向变化。例如，依据一般生产逻辑，农产品单位面积产量与总产量同向变动，故“单位面积产量→生态农产品产量”为正因果（“+”）；而平台商向农户转嫁的成本越多，农户利润则越低，故“平台成本转嫁→农户利润”为负因果（“–”）。回路极性由回路中负因果链数量的奇偶性决定：负因果链为偶数条时，回路为正反馈（增强回路，R）；奇数条时，则为负反馈（平衡回路，B）。生态农产品产业链的持续增长，根植于若干相互强化的正反馈回路。据此，从产业内生动力与数字技术赋能两个维度，本研究识别出4条内生增长的正反馈回路（R1～R4），以及数字技术对上述回路形成的3条增强路径，如图1所示。

2.2.1　产业链内生的增长机制

（1）R1：“规模-收益”互促回路。生态生产规模的扩大直接提升生态农产品产量。在有效需求能够吸收新增供给的阶段，产量增长通过销售渠道转化为更高的销售收入，进而提升农户净收益。农户将净收益再投入生态生产，进一步扩大规模，形成如图1所示的“规模-收益”互促增强回路（R1）。该回路为产业发展奠定供给基础，是产业扩张期的核心增长动力。

表1 生态农产品产业链脆弱性研究的核心变量定义、所属回路与主要依据

Table 1 Definition of core variables, their respective circuits, and primary rationale for studying the vulnerability of the ecological agricultural product industry chain

变量	含义	所属回路	主要依据
生态生产规模	生态认证面积或养殖数量,受土地承载力约束	R1,B1,B2,B3	SANDERS等[1];BRZEZINA等[17];赣南脐橙案例[18]
土壤肥力及生物多样性	土壤能够持续、适时地供给并协调植物生长所需的水分、养分、空气、热量和无毒害物质的能力,以及自然界生命形式的丰富程度和复杂程度	B2	STAVE和KOPAINSKY[5];BRZEZINA等[17]
自然资源条件水平	为进行生态友好的农业生产所具备的自然资源基础,环境质量水平及系统调节能力	B2	STAVE和KOPAINSKY[5];BRZEZINA等[17]
市场需求	消费者购买生态农产品的总需求量	R2,B4,B5	STERMAN[16];BRZEZINA等[17]
生态农产品质量	符合认证标准的合格率	R2, B2,R3,R4,B4, B5, B6,B7	张小允等[7];董玉婷等[9]
消费者感知效用	消费者认为购买生态农产品能获得的收益(健康、安全、环保、口感等)	R2,R3, R4,B4,B5,B6,B7	MA等[14];李保勇等[21]
品牌声誉	生态农产品品牌在消费者、分销商、监管机构等利益相关者心中形成整体质量认知、可信赖程度和情感认同	R4,B4,B5,B6,B7	李保勇等[21];王翠霞等[22]
消费者支付意愿	消费者为了获得某种特定产品而愿意支付的最高价格	R3,B4,B5,B6	曾贤刚和罗卉轩[23];张俊妍等[24]
小农户挤出率	因数字或认证门槛退出的农户比例	B8	茉莉花产业案例[25];张永奇和单德朋[26]
平台利润挤压	平台转嫁成本对农户利润的压缩程度	B9	盒马村案例[27];万琳和李祖佩[28]
同质化竞争	产品之间的替代性强,缺乏差异化	B10	MA等[14];STERMAN[16]
农户净收益	农户从事生态生产获得的总收入减去总成本	R1,R2,R3,R4,B1,B2,B3,B4	BRZEZINA等[17];张永奇和单德朋[26]
溢价率	生态农产品价格相对于同类常规产品价格的超额比例	R3,R4,B2,B4,B5,B6,B7	沈兴兴等[3];王星宇等[4]
收购价格	农户出售农产品的单位价格	R3,R4,B2,B3,B4	京东案例[29];CHUNG[30]

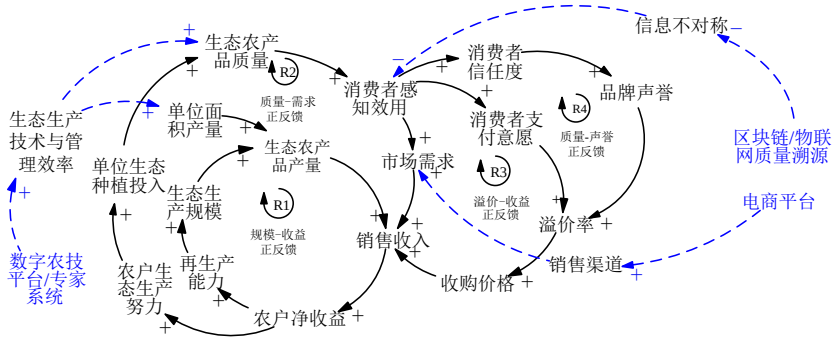


图1 生态农产品产业系统持续增长的正反馈驱动机制

Fig. 1 The positive feedback-driven mechanism for sustained growth of the ecological agricultural product industry system

(2) R2:“质量-需求”互促正反馈回路。图1中回路R2刻画了以质量为纽带、实现生产端与消费端的正向联动的“质量-需求”互促增强机制。回路逻辑路径如下:农户净收益提升激励其增加有机肥、生物农药、绿色防控等生态生产要素的投入,从而提高农产品质量;更高质量的产品有助于增强消费者感知效用,进而拉动市场需求增长;市场需求的增长通过价格传导机制,最终反哺农户收入与净收益,形成闭合的正反馈循环。

(3) R3:“溢价-收益”互促正反馈回路。图1中回路R3刻画了生态价值向经济收益转化的“溢价-收益”互促增强机制,是产业实现高附加值增长的核心来源。该机制的逻辑路径如下:生态农产品凭借其质量与生态属性形成品牌溢价,直接增加农户的单位收益;更高的收益激励农户加强标准化管理、分级分选、品质管控等生产经营,从而持续

稳定产品品质并增强消费者感知效用；消费者支付意愿的提升又进一步支撑溢价水平的维持与提升，形成闭合的正反馈循环。

（4）R4：“质量-声誉”强化正反馈回路。图1中回路R4刻画了“质量-声誉”强化机制，该回路通过长期累积效应塑造产业核心竞争力，推动产业从产品竞争走向品牌竞争。其具体逻辑为：长期稳定的质量投入能够持续积累品牌声誉，品牌声誉的提升又进一步促进了生态农产品高溢价率的实现，进而带动收购价格与整体收益水平上升；农户净收益的增加使其有能力持续投入标准化生产与质量管控，进一步稳定并提升产品质量，由此形成闭合的正反馈循环。

上述4条回路以农户净收益为核心节点相互耦合：R1奠定规模基础，R2拓展市场需求，R3实现价值转化，R4塑造品牌竞争力，共同构成产业可持续发展的内生动力机制。

2.2.2　数字技术赋能对内生增长机制的增强效应

如图1所示，数字技术通过3条增强路径作用于规模-收益（R1）、质量-需求（R2）、溢价-收益（R3）及质量-声誉（R4）4条内生增长回路。

（1）数字农技平台增强R1与R2。数字农技平台着眼于生产端，通过将分散农户的生产经验标准化，为农户系统化普及生态种养技术、生产管理经验及市场信息，推动生态生产从经验驱动向数据驱动转型，使规模扩张不再以牺牲品质为代价，从而增强R1（规模-收益）与R2（质量-需求）的运行效率。在赣南脐橙产区，“橙信通”大数据平台通过病虫害预警、专家问诊、视频教程及案例库，将生态种植经验系统化传递给中小农户，有效保障了产品产量和质量的稳定性[31]。

（2）质量溯源技术增强R2与R4。质量溯源技术侧重于解决信息不对称问题，通过物联网与区块链的实时数据采集与可信溯源，使消费者可扫码查看产地、施肥、检测报告等信息，降低信息不对称、提升信任水平，增强R2（质量-需求）与R4（质量-声誉）的运行效率。

（3）电商平台增强R1与R3。电商平台的核心功能在于打通市场端，通过产地直采与源头直发模式，拓宽销售半径、提升农户收入，从而显著增强R1（规模-收益）与R3（溢价-收益）的运行效率。赣南脐橙产区对接京东平台后，产地直采与物流让利模式有效降低了成本、拓宽了销路，使农户收益显著提升[29]。

结论1：数字技术通过数字农技平台、质量溯源技术与电商平台这3条关键路径，协同增强了生态农产品产业链中4条增长回路的运行效率，进而提升其内生增长能力。

上述正向效应的实现程度因经营主体而异。具备一定组织规模和技术吸纳能力的龙头企业与合作社，更容易将数字技术内化为质量控制工具，并通过品牌溢价覆盖新增成本。而对于分散经营的小农户，受限于数字技能、资金实力与议价能力，数字技术的正向效应往往难以充分兑现，甚至可能因无法满足平台标准化要求而面临市场准入障碍。后文将进一步分析数字技术赋能可能给小农户带来的挤出风险。

2.3　基于成长上限基模的产业链脆弱性结构溯源

生态农产品产业链的持续增长，根植于正反馈回路R1～R4的内生驱动。然而，系统动力学“成长上限”基模表明，增长过程会同时激活抑制性的负反馈回路。当后者逐渐占据主导地位，增长将趋于停滞[15,16]。

随着生态农产品产业链规模扩大，自然承载力、市场容量与声誉折损风险等抑制性约束逐步显现，形成负反馈调节回路。文献与案例表明，成本攀升、品质离散、市场饱和、替代品竞争、同质化竞争、信任侵蚀、声誉折损等因素制约增长，由此提炼出对应的B1～B7主导平衡回路。上述主导回路的判定通过文献归纳、案例验证与实地调研3种途径交叉确认，使识别过程基于经验事实而非主观判断。当这些负反馈调节效应不断增强，主导回路从正反馈转换为负反馈，增长将随之停滞，陷入“成长上限”困境，这正是产业链脆弱性的核心结构根源。本节从规模扩张、质量提升与生态溢价三个维度，构建成长上限基模，揭示产业链脆弱性的内在成因。

2.3.1　规模扩张成长上限基模下的产业链脆弱性

如图2所示，规模与收益相互促进的正反馈回路R1驱动生态生产规模与农户收益持续增长。然而，随着规模扩张，3条负反馈回路（B1、B2与B3）相继激活，相互耦合、彼此强化，从成本、质量与需求端抑制R1，构成生态生产规模扩张的成长上限。

生态农业生产根植于生态系统之中，这意味着其依赖于土壤、水、空气、生物多样性、营养物质

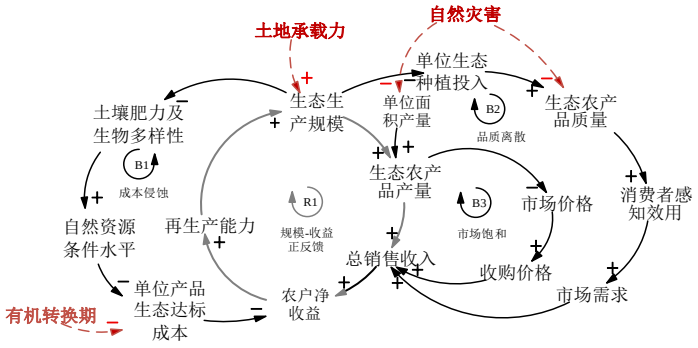


图2 生态农产品产业链脆弱性的规模扩张成长上限基模

Fig. 2 Limits to growth archetype of scale expansion of vulnerability in the ecological agricultural product industry chain

等自然资源条件水平[17]。与一般工业品供应链不同，生态农业的成本侵蚀具有滞后效应，有机转换期（2～3年）内投入持续增加但产出增长滞后，成本压力在时间上被显著放大。随着生产规模持续扩张，土壤肥力退化与生物多样性减少，削弱了自然资源水平，在此背景下，农户为达到生态生产标准，需要承担更高的维护成本，这直接压缩了其净收益空间；同时，生态农业的规模扩张还受制于有机转换期（2～3年）的时间约束，单位成本随扩张规模的上升速率更快。这进一步削弱农户的再投资能力，二者共同构成了因成本递增而自我抑制的成本侵蚀规模扩张回路（B1）。这一滞后效应使得B1回路在生态农业中的制约效应比一般工业品更强，若忽略此特性，B1回路将被低估，从而高估系统增长潜力。

分散经营下的大规模生产难以维持统一的品质管控，导致生态农产品质量参差不齐、整体品质下降，消费者感知效用随之降低，需求萎缩，农户收益下降，再投资能力进一步削弱，形成品质离散抑制规模扩张回路（B2）。生态农产品的品质受土壤、气候、病虫害等自然条件影响显著，品质离散度远高于标准化程度较高的工业品，使得B2回路的反馈周期更短、波动幅度更大。

规模扩张带来的总产量超出市场需求，供过于求导致价格下行，进一步削弱生产规模扩张动力，构成市场饱和抑制规模扩张回路（B3）。生态农产品具有“经验品”与“信任品”双重特征，消费者无法在购买前或食用后完全验证其生态价值，信任侵蚀与声誉折损的相互强化机制比工业品供应链更加脆弱和不可逆，修复所需时间远超一般工业品。

此外，生态农业生产对自然条件的高度依赖性使其极易遭受极端天气、病虫害等外生冲击。由于无公害、绿色、有机等认证标准严格限制了化学合成农药与化肥的使用，灾后产量与品质的恢复周期更长、不确定性更高。一次严重灾害可能直接逆转规模与收益的正向互促（R1），使系统在短期内跌入“低产出-低投入”的恶性循环。因此，生态农产品规模扩张的上限不仅是经济成本与市场容量的函数，更是土地承载力、自然风险暴露程度与系统灾后恢复能力的函数。

结论2：生态农产品生产存在由土地承载力、生态成本、市场容量与品质管理共同决定的最优规模边界。一旦突破阈值，成本攀升、供过于求、质量参差等负反馈将逆转规模与收益的互促关系，导致收益递减，使产业陷入内生性规模陷阱。

2.3.2 质量提升成长上限基模下的产业链脆弱性

如图3所示，质量与需求相互促进的正反馈回路R2驱动生态农产品质量提升与农户收益持续增长。然而，随着质量提升，溢价率增长，两条负反馈回路（B4与B5）相继激活，从替代品竞争与同质化竞争两个维度抑制R2，构成生态农产品质量提升的成长上限。

与工业品不同，生态农产品的“生态价值”具有经验品与信任品的双重特征。经验品特征表现为口感、风味等需通过消费才能感知的品质；信任品特征表现为农残、有机认证等消费者无法自行验证的品质。这一双重特征使得信息不对称问题在生态农产品中比工业品更为突出，质量信号传递的有效性高度依赖品牌声誉和第三方认证。

质量提升带来的溢价率上升，一方面吸引同类生态产品大量进入，同质化竞争加剧压低收购价格，农户收益不增反降，抑制其努力投入与质量维持意愿，构成同质化竞争抑制回路（B4）；另一方面扩大了生态农产品与普通农产品的价差，促使部分价格敏感型消费者转向低值低价替代品，导致生态农产品市场份额下降、需求被分流，农户收益增

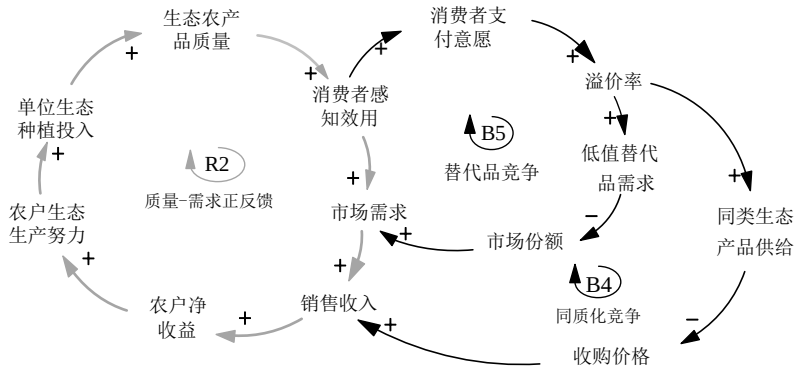


图3　生态农产品产业链脆弱性的质量提升成长上限基模

Fig. 3　Limits to growth archetype of quality improvement of the vulnerability in the ecological agricultural product industry chain

长受限，质量提升激励减弱，形成低价替代品抑制质量提升回路（B5）。

结论3：生态农产品生产中，质量提升并非无限可持续。当同质化竞争与市场替代的强度超过产品差异化所能维持的溢价空间时，质量与收益的互促关系将发生逆转，使收益由递增转为递减，产业陷入内生性的低收益均衡。

2.3.3　生态溢价成长上限基模下的产业链脆弱性

在生态认证、品牌建设与消费者口碑的相互强化下，正反馈回路R3与R4驱动生态农产品的品牌溢价与单位收益持续提升。然而，高溢价所诱发的道德风险行为，使系统面临信任侵蚀与声誉折损的双重约束，如图4中负反馈回路B6与B7所示。

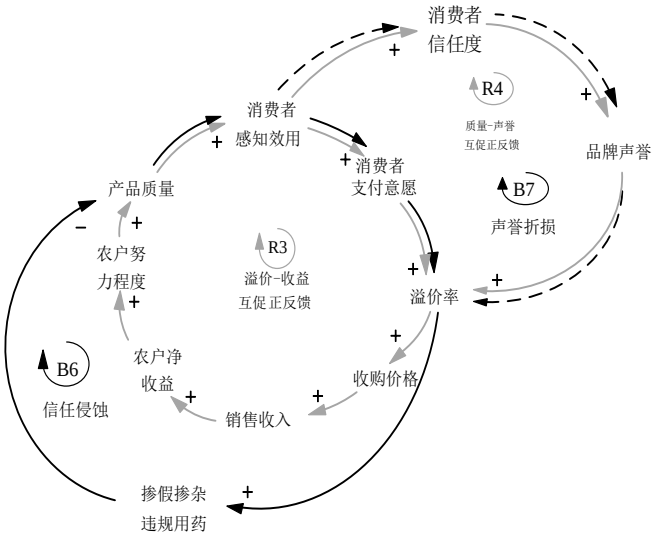


图4　生态农产品产业链脆弱性的生态溢价成长上限基模

Fig. 4　Limits to growth archetype of ecological premium of the vulnerability in the ecological agricultural product industry chain

（1）信任侵蚀回路B6。随着生态产品溢价上升，部分经营主体的机会主义短期逐利行为增加，1掺杂、违规施用化肥农药等行为导致产品质量参差不齐，整体质量下降，消费者感知效用与支付意愿同步下降。生态农产品的信任品属性使其溢价机制比工业品品牌更为脆弱，在监管与追溯体系不完善的条件下，信任侵蚀对溢价水平形成直接约束。

（2）声誉折损回路B7。随着消费者感知效用持续下降，产品累积的品牌声誉受到折损，生态认证的公信力下降，质量信号传递有效性降低，品牌对溢价的支撑作用弱化，最终抑制品牌溢价的进一步提升，形成声誉折损对溢价增长的抑制效应。工业品的品牌溢价可通过持续的质量控制和广告投入维持，而生态农产品的信任一旦受损，消费者难以自行甄别真伪，信任侵蚀会迅速蔓延至整个品类或产区，声誉折损的修复周期长达数年。信任持续受损进一步弱化品牌声誉，溢价收缩与信任流失再度压缩收益空间。

结论4：生态农产品溢价增长在驱动收益提升的同时，内生地引发信任侵蚀与声誉折损等负反馈。这一自我抑制结构在信任品属性下比工业品品牌机制更加敏感和不可逆，是系统溢价增长停滞且信任难以修复的脆弱性根源。

3　数字技术赋能对成长上限基模的调节效应分析

如图5所示，数字技术通过数字农技平台、质量溯源与电商平台，对成长上限基模中的正反馈与负反馈回路产生不对称影响。本节在2.2.2小节数字技术赋能对正向增强回路（R1～R4）强化作用分析的基础上，进一步剖析这3项技术对抑制回路（B1～B6）的调节效应。

3.1　生产端数字技术赋能对产业链成长上限的调节效应

如图5蓝色虚线因果链所示，生产端数字农技

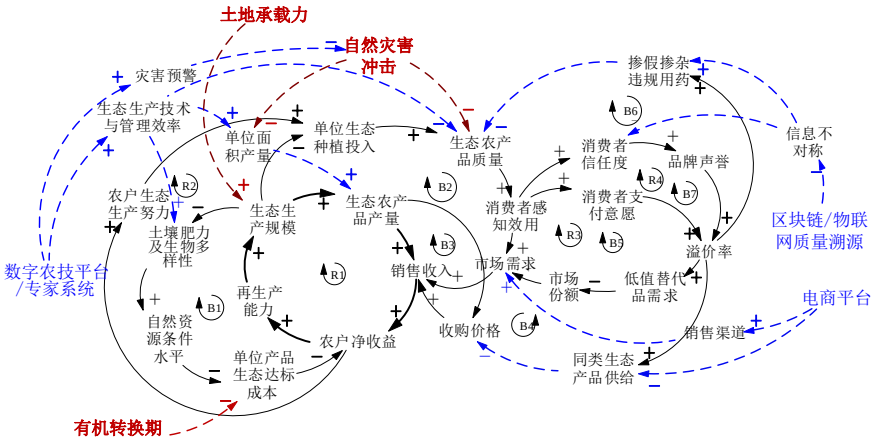


图5 数字技术赋能对生态农产品产业链脆弱性的成长上限基模的影响路径

Fig. 5 The impact pathway of digital technology empowerment on the limits to growth archetype of the vulnerability in the ecological agricultural product industry chain

平台通过技术普及、灾害预警与管理知识系统化传递，作用于规模扩张成长上限中的成本侵蚀（B1）与品质离散（B2）两条回路，并对外生性自然灾害冲击形成缓冲。

图5中因果链“数字农技平台→+生态生产技术与管理效率→+土壤肥力及生物多样性→+自然资源条件水平→—单位产品生态达标成本→—农户净收益→+再生产能力→+生态生产规模→—土壤肥力及生物多样性”，刻画了数字农技平台通过精准种养技术及提升管理方式，从而提高土壤肥力和生物多样性，缓解自然资源的衰退，降低了单位产品生态达标成本，从而削弱成本侵蚀（B1）对规模扩张的制约。赣南“橙信通”平台即为典型例证，其专家问诊服务降低了农户违规用药风险，农户通过手机端还可以获取病虫害图谱，实施病虫害自主预警申报，这些功能显著保护了土壤肥力和生物多样性，使农业生产维持较高的自然资源条件水平，进而降低了农户为达到单位农产品生态标准所需的生态成本。

因果链“数字农技平台→+生态生产技术与管理效率→+生态农产品质量→+消费者感知效用→+市场需求→+销售收入→+农户净收益→+再生产能力→+生态生产规模→—单位生态种植投入→+生态农产品质量”，刻画了针对因分散经营导致品质离散（B2）的规模扩张收益成长上限，数字农技平台通过将生态种植经验标准化传递给中小农户，缩小分散经营下的品质差异，使规模扩张不再以牺牲品质稳定性为代价。同时，平台对生产过程的持续记录与反馈，形成了对农户机会主义行为的隐性约束，进一步巩固了品质一致性。

此外，数字农技平台的气象预报、病虫害暴发预警等灾害预警功能，可延长生产者的响应窗口期，使其提前采取覆膜、排水、抢收等防灾减灾措施，从而削弱自然灾害对单位产能与产品质量的负向冲击强度，间接缓解B1与B2回路对规模扩张的制约。

结论5：生产端数字技术赋能降低了规模扩张引起的单位生态边际成本增加与品质离散，缓冲了自然灾害冲击，从而提高了规模扩张的成长上限阈值。

3.2 需求端数字技术赋能对产业链成长上限的调节效应

需求端数字技术赋能主要依托质量溯源技术与电商平台，通过销售渠道拓展、质量信号传递与消费者信任构建，作用于B3、B4、B5、B6、B7等多条回路。

图5中因果链“电商平台→+销售渠道→+市场需求→+销售收入→+农户净收益→+再生产能力→+生态生产规模→+生态农产品产量→—市场价格→+收购价格→+销售收入”刻画电商渠道扩大销售半径，新增的市场需求削弱了市场饱和回路（B3）对规模扩张的抑制。因果链“电商平台→—同类生态产品供给→—收购价格→+销售收入→+农户净收益→+农户生态生产努力→+生态农产品质量→+消费者感知效用→+消费者支付意愿→+溢价率→+同类生态产品供给”刻画电商平台的多维度展示与用户评价，帮助生产者建立差异化定位，使竞争焦点从价格转向产地故事、产品特色等非价格维度，从而缓解同质化竞争（B4）对溢价提升的抑制。

因果链“区块链/物联网质量溯源→—信息不对称→—消费者信任→+品牌声誉→+溢价率→+低值替代品需求→—市场份额→+市场需求→+销售收入→+农户净收益→+农户生态生产努力→+单位生态种植投入→+生态农产品质量→+消费者感知效用→+消费者支付意愿→+溢价率”刻画基于区块链与物联网的质量溯源技术，通过扫码展示产地、施肥记录、检测报告等信息，增强消费者对产品生态价值的感知，提升其相对于普通农产品的竞争优势，减少低质替代品竞争（B5）对溢价的抑制。因果链“区块链/物联网质量溯源→—信息不对称→+掺假掺杂违规用药→—生态农产品质量→+消费者感知效用→+消费者支付意愿→+溢价率→+掺假掺杂违规用药”和“区块链/物联网质量溯源→—信息不对称→—消费者信任度→+品牌声誉→+溢价率→+掺假掺杂违规用药→—生态农产品质量→+消费者感知效用→+消费者信任度”同时从源头遏制机会主义行为导致的质量下降，削弱信任侵蚀（B6）与声誉折损（B7）对溢价提升的制约。

结论6：需求端数字技术赋能，通过拓展市场空间、实现差异化竞争、构建消费者信任与质量保障，系统性地缓解了规模扩张与生态溢价提升的抑制因素。

3.3 数字技术赋能对产业链脆弱性的综合影响

结论1、结论4与结论5表明，数字技术赋能增强了驱动产业链增长的正反馈回路运行效率，也削弱了制约其成长的负反馈回路强度，但这并不意味着产业链脆弱性的简单减弱或消失。

3.3.1　系统脆弱性内生根源的不可消除性

系统脆弱性的内生根源具有不可消除性。成本侵蚀（B1）源于要素稀缺性与边际收益递减规律，即便数字技术降低了单位产品生态达标成本，当规模逼近资源环境承载极限时，边际成本仍将不可逆转地上升。品质离散（B2）源于分散经营下个体能力的异质性，标准化技术传递可以缩小品质差异，但无法消除农户间的禀赋差异与管理水平差距。市场饱和（B3）源于需求有限性与竞争替代规律，数字平台虽能拓宽销售市场，但消费者的生态产品支付意愿与市场规模终究存在客观上限。同质化竞争（B4）与低价替代品分流（B5）源于产品差异化空间的有限性，即便借助多维展示与溯源信息，生态农产品与普通农产品在基础功能上仍具可替代性。信任侵蚀（B6）与声誉折损（B7）则源于信息不对称与机会主义行为的人性基础，区块链与物联网虽能提高违规成本，却无法根除道德风险。

因此，数字技术可以在一定程度上缓解上述约束的强度，但无法从根本上消除其存在。只要规模扩张持续推进，成本与市场的物理边界终将显现；只要存在信息不对称与个体异质性，品质离散、信任侵蚀与声誉折损便不会彻底消失。

3.3.2　数字技术介入下新抑制回路的激活与强化

图5呈现了数字技术对B1～B7七条既有平衡回路的调节效应，但数字技术介入的影响并非仅止于既有反馈结构的缓解或强化，其本身亦可能催生新的反馈回路，分别作用于增强回路（R1～R4）的关键节点，生成数字技术赋能情境下的新脆弱性。以下识别的B8、B9和B10三条新抑制回路，属于数字技术介入后才被激活的附加反馈结构，其因果逻辑与图5中B1～B7的既有回路不同，故单独予以辨识。

（1）B8回路（资质与数字门槛下小农户挤出）。数字技术赋能要求参与者投入智能设备、网络与技能，当数字技能与设备门槛提高时，无法满足要求的小农户被迫退出生态生产，形成“智能设备与技能要求提高→小农户退出生产”的抑制回路。同时，有机/绿色认证本身对土地规模、生产环境、管理规范设置了较高门槛，使分散经营的小农户在进入产业链之初即面临结构性准入障碍。数字技术的引入若未能配套组织化与认证支持，将进一步强化这一准入门槛，加速小农户的产业链边缘化。

广西横州推行的“数字茉莉”平台，要求交易双方通过扫码完成实名认证，这一案例为B8回路的因果机制提供了证据。实际运行中发现，传统现金交易模式下平均每分钟可以完成6～8笔交易，而扫码交易后单笔耗时增至38 s至3 min，花商日均收货量从5 000 kg降至2 000 kg，34万花农中的大量60岁以上花农因不熟悉智能手机操作而无法完成授权，被迫退出数字交易体系，平台推行首季交易参与率显著下降[25]。这些退出者多为种植规模小、缺乏组织化支持的花农。这意味着，数字技能不足与有机认证的规模门槛形成了双重制约：花农既无法跨越平台的数字化操作要求，也难以达到生态生产所需的资质标准，最终被挤出产业链。这一过程恰好对应了B8回路中所描述的“技能门槛与资质门槛共同导致小农户挤出”的因果路径。

张永奇和单德朋[26]基于中国县域数据的实证分析指出，数字技术推动农业社会化服务向市场化模式发展，服务主体更倾向于对接大规模经营主体，导致小农户在市场竞争中处于相对劣势，产生挤出效应。小农户的退出导致生态生产主体减少、产品供应量下降，进而削弱“规模-收益”正反馈（R1）的运行基础，形成“智能设备与技能要求提高→小农户退出生产→生产规模缩减→产业收益下降→智能设备与技能要求进一步提高”的抑制回路，构成新的上限制约。

（2）B9回路（成本转嫁与利润挤压）。数字技术赋能推动农产品销售向电商平台集中，平台凭借规则制定权与流量分配权主导利益分配。当平台将数字化运营成本、营销推广费用及价格竞争压力向下游转嫁时，生产者的实际利润空间被持续挤压。利润空间的收缩迫使生产者减少生态生产投入，导致产品品质下降、声誉受损，溢价能力弱化，进而削弱“溢价-收益”与“声誉-溢价”正反馈（R3与R4）的运行基础，形成“成本转嫁→利润挤压→农户生态生产努力下降→产品质量下滑→溢价收缩→成本进一步转嫁”的抑制回路，构成新的上限制约。

上海“盒马村”合作社与电商平台合作的案例为B9回路的因果机制提供了另一类证据。为满足电商平台的标准化分级要求，合作社需购置电子测糖仪、农残检测仪等高精度设备，前期投入明显增加。同时，因分级供应导致损耗率高达80%，早期合作连续数月亏损，利润空间被严重挤压[27]。平台将数字化运营成本和价格竞争压力向下游转嫁，合作社的利润空间被严重挤压，无力继续追加生态生产投入，产品品质和品牌溢价能力随之下降。这与B9回路所刻画的成本转嫁导致利润挤压进而削弱品质与溢价的传导反馈结构一致。

（3）B10回路（同质化竞争与特性丧失）。为适应线上大规模销售，电商平台推行产品分级、包装规格、品质检测等标准化体系。当生产者被迫按统一的外观指标（如果径、色泽）而非风味品质进行生产时，基于本地生态知识的差异化实践被削弱，产品趋于同质化。罗俊霞等[32]在对农业标准体系的研究中发现，现行标准“内容同质化现象严重”；经济日报的报道也指出，生态产品区域公用品牌建设面临“品牌同质化明显”“独特卖点不足”等瓶颈[33]。产品同质化导致消费者感知效用下降、支付意愿降低，溢价空间收窄，进而削弱“质量-需求”正反馈（R2）的差异化基础，形成“标准化程度提高→产品差异化下降→消费者支付意愿降低→溢价空间收窄→标准化进一步强化”的抑制回路，构成新的上限制约。

赣南脐橙产区部分果农为适应电商平台标准的转型过程，为B10回路的因果机制提供了强有力的链式证据。当地部分果农放弃传统种植中利用不同海拔、土质与微气候培育风味的差异化实践，转而追求果径统一、外观一致的“标准果”[31]。当产品的外观标准化取代了风味的多样性，消费者难以在众多产品中识别独特价值，支付意愿下降，溢价空间随之收窄。这正好印证了B10回路的逻辑：标准化导向由此削弱了产品差异化，进而抑制溢价能力。

4 结论与启示

4.1 主要结论

生态农产品产业链系统的脆弱性，根植于其内部反馈结构的动态演变。内生成长上限结构决定了产业增长必然面临多重负反馈约束，当调节回路的抑制作用超过增强回路的增长动力时，系统主导回路发生转移，构成产业链脆弱性的核心结构性根源。

数字技术的介入可在一定程度上削弱原有负反馈回路的抑制强度，但无法根除产业链内在的结构性矛盾。小农户分散经营与高标准生产要求之间的结构性矛盾、产业链协同不足，以及掺假掺杂等机会主义行为仍未根本改变，不同经营主体在数字技术赋能中的受益分化态势值得关注。同时，数字技术赋能可能因数字鸿沟、高昂的运营成本，以及标准化导向而激活新的抑制回路，使脆弱性形态发生转移。因此，数字技术赋能仅能缓解系统脆弱性，而无法从根本上重构产业内部因果结构。

4.2 生态农产品产业链韧性治理路径

前文对B8、B9、B10回路的分析表明，数字技术赋能对不同经营主体的影响显著分化。龙头企业与合作社具备规模和技术优势，较易从中受益；而小农户受限于资金、技能与议价能力，面临更高的合规成本与双重门槛挤出风险。同时，针对农业生产的特殊性，韧性治理还需充分考虑有机转换期的政策支持、自然灾害的风险分散机制，以及小农户组织化参与数字平台的路径设计。因此，韧性治理需针对不同主体采取差异化策略。

（1）针对规模扩张、质量提升与溢价增长三类成长上限（B1～B7），建立差异化的监测与干预机制，识别当前制约增长的主导抑制回路是成本侵蚀、市场饱和还是信任折损，据此采取针对性措施，从源头解除成长上限的约束。

（2）针对资质与数字双重门槛下的小农户挤出回路（B8），降低技术准入门槛。防止小农户被数字鸿沟挤出。提供普惠性数字技能培训，设立小农户专项补贴，在数字平台中保留语音、人工代办等适老化通道，避免因数字门槛过高而迫使小农户退出生态生产，维护产业链源头主体的多样性。同时，支持小农户通过合作社等组织形式联合进入数字平台，以集体议价能力缓解个体弱势。横州“数字茉莉”案例中60岁以上花农因数字鸿沟被排挤的事实，充分说明了这一措施的必要性。

（3）针对成本转嫁与利润挤压回路（B9），建立利益共享机制。规范平台收费行为，推广“保底收购+溢价分成”等利益联结模式，促使数字化改造成本在平台与生产者之间合理分担，缓解平台对农户利润的挤压。上海“盒马村”案例中合作社因高损耗、高成本而早期亏损的事实，验证了平台规则对农户利润的挤压效应。

（4）针对同质化竞争与特性丧失回路（B10），强化差异化认证与地理标志保护，抵御同质化竞争。支持基于本地自然禀赋的特色生产，通过地理标志、有机认证等方式维持产品多样性，避免因追求满足电商产品标准化收购标准而丧失溢价能力。赣南脐橙案例中果农放弃风味差异化实践、转向“标准果”的事实，警示了标准化过度带来的同质化风险。

（5）构建动态监测机制（跨回路综合）。建立对数字系统本身的常态化评估机制，监测小农户参与率、单位利润变化、产品多样性等非传统指标，及时识别新出现的抑制回路，动态调整政策工具，实现从被动应对向主动治理的转变。

本研究从系统动力学视角揭示了生态农产品产业脆弱性的生成与加剧机制，探讨了数字技术赋能的缓解路径，但仍存在一定局限性：尚未量化成长上限基模的耦合强度与灾害冲击的传导阈值。后续研究可通过系统动力学仿真、典型区域案例分析等方法，量化关键变量阈值与政策干预效果，为产业链脆弱性治理提供实践依据。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献：

[1] 宾幕容. 农户生态农业技术采纳行为机理研究进展与展望[J]. 农业展望, 2024, 20 (1): 110-116.
BIN M R. Research progress and prospects on the mechanism of Farmers'Adoption of ecological agricultural technologies[J]. Agricultural Outlook, 2024, 20(1): 110-116.

[2] 张贵祥, 李繁繁, 叶田阳. 生态产品的"新质"内涵、价值实现区域模式及发展方向[J]. 世界林业研究, 2025, 38(1): 1-8.
ZHANG G X, LI F F, YE T Y. "New-quality" connotation, regional value realization models and development directions of ecological products[J]. World Forestry Research, 2025, 38(1): 1-8.

[3] 沈兴兴, 段晋苑, 彭超. 乡村生态产品价值实现的理论基础与实践逻辑[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2026, 26 (5): 104-115.
SHEN X X, DUAN J Y, PENG C. Theoretical foundation and practical logic of the value realization of rural ecological products[J]. Journal of Northwest A&F University (Social Science Edition), 2026, 26(5): 104-115.

[4] 王星宇, 张卓敏, 张勇. 基于生态产品清单的生态农产品价值实现路径——以上海市崇明区为例[J]. 生态学报, 2026, 46(1): 201-210.
WANG X Y, ZHANG Z M, ZHANG Y. Research on the pathways for realizing the value of ecological agricultural products based on an ecological product inventory: A case study of Chongming District, Shanghai[J]. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(1): 201-210.

[5] 吴园,周蕊,虞豹,等. 智慧农业科技创新发展现状及"十五五"展望[J]. 农业展望, 2025, 21 (4): 110-118.
WU Y, ZHOU R, YU B, et al. Current development status of smart agricultural science and technology innovation and prospects for the "15th Five-Year Plan" period[J]. Agricultural Outlook, 2025, 21(4): 110-118.

[6] 代辛, 韩睿, 姜小鱼, 等. 数字技术驱动农业经济韧性提升的多元路径[J]. 智慧农业(中英文), 2026, 8(3): 190-202.
DAI X, HAN R, JIANG X Y, et al. Multiple pathways of digital technology driving the enhancement of agricultural economic resilience[J]. Smart Agriculture, 2026, 8(3): 190-202.

[7] 张小允, 许世卫, 王晓伟. 数字经济背景下提高中国农产品质量安全保障水平探究[J]. 农业现代化研究, 2025, 46(2): 205-214.
ZHANG X Y, XU S W, WANG X W. Strategies to enhance the quality and safety assurance of Chinese agricultural products in the digital economy[J]. Research of Agricultural Modernization, 2025, 46(2): 205-214.

[8] LIU Z L, YU X L, LIU N, et al. Integrating AI with detection methods, IoT, and blockchain to achieve food authenticity and traceability from farm-to-table[J]. Trends in Food Science & Technology, 2025, 158: 104925.

[9] 董玉婷, 李文立, 刘念. 农产品质量信号叠加会促进在线消费者购买吗?——基于离散选择实验的研究[J]. 管理工程学报, 2026, 40(4): 77-93.
DONG Y T, LI W L, LIU N. Can the superimposed quality signals of agricultural products promote online consumers purchase? Analysis based on discrete choice experiment[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2026, 40(4): 77-93.

[10] 何磊磊, 蒋淑吉, 杨军. 数智技术赋能农业高质量发展:现状、挑战及路径探索[J]. 智慧农业(中英文), 2026, 8(3): 13-25.
HE L L, JIANG S J, YANG J. Digital-intelligent technologies empowering high-quality agricultural development: Current status, challenges, and pathways[J]. Smart Agriculture, 2026, 8(3): 13-25.

[11] 王晶静, 孔令博, 林巧, 等. 绿色农产品数字化标识与品牌战略协同研究[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(2): 35-42.
WANG J J, KONG L B, LIN Q, et al. Research on the collaboration of digital identification and brand strategy of green agricultural products[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(2): 35-42.

[12] 郑景露, 张应良. 数字技术应用对农业产业链韧性的影响效应[J/OL]. 西北农林科技大学学报(社会科学版). (2026-04-13)

[2026-04-13]. https://link.cnki.net/urlid/61.1376.c.20260410.1525.002.
[13] 宋洪远, 唐文苏. "两山" 理念实践20年: 中国生态农业政策的演变过程、实施效果与调整优化[J]. 世界农业, 2025(8): 5-16.
SONG H Y, TANG W S. Two decades of "two mountains" theory in practice: The evolution, implementation effectiveness, adjustments and optimizations of China's eco-agricultural policies[J]. World Agriculture, 2025(8): 5-16.
[14] MA D Q, WU X P, LI K F, et al. Can blockchain implementation combat food fraud: Considering consumers' delayed quality perceptions[J]. European Journal of Operational Research, 2025, 324(3): 908-924.
[15] SENGE P M. The fifth discipline[J]. Measuring Business Excellence, 1997, 1(3): 46-51.
[16] STERMAN J. Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world[J]. Journal of the Operational Research Society, 2022, 53(4): 472-473.
[17] BRZEZINA N, KOPAINSKY B, MATHIJS E. Can organic farming reduce vulnerabilities and enhance the resilience of the European food system? A critical assessment using system dynamics structural thinking tools[J]. Sustainability, 2016, 8(10): 971.
[18] 赣南脐橙迎丰年,收购价每斤一元多,果农“愁卖”,当地:价格比往年低,但在正常范围 [EB/OL]. (2025-11-06)[2026-06-18]. https://baijiahao.baidu.com/s? id=1848035504439051048.
[19] 楠楠直播间涉嫌售卖假冒五常大米 或构成犯罪|稻花香_网易订阅[EB/OL]. (2025-07-01)[2026-06-18].https://www.163.com/dy/article/K3CCPC250514CIOC.html.
[20] 江苏省生态环境厅 省内新闻 六五环境日 | 从"老顾客退单"到"登上国家舞台",苏州阳澄湖的十年重生路[EB/OL]. (2026-06-08) [2026-06-18]. http://sthjt. jiangsu. gov. cn/art/2026/6/8/art_84025_11782423.html.
[21] 李保勇, 马德青, 戴更新, 等. 考虑参考质量效应的 "农超对接" 供应链动态质量改进策略[J]. 运筹与管理, 2021, 30(5): 52-59.
LI B Y, MA D Q, DAI G X, et al. Dynamic quality improvement strategy of "connecting agriculture with supermarkets" supply chain considering reference quality effect[J]. Operations Research and Management Science, 2021, 30(5): 52-59.
[22] 王翠霞, 李雅琴, 陈艳. 参考质量效应下品牌农产品质量、保鲜和营销策略的动态绩效仿真[J]. 系统工程理论与实践, 2025, 45(2): 635-650.
WANG C X, LI Y Q, CHEN Y. Dynamic performance simulation of brand agricultural product quality, preservation, and brand marketing strategies under reference quality effects[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2025, 45(2): 635-650.
[23] 曾贤刚, 罗卉轩. 农业生态产品的消费者支付意愿影响因素与改进策略研究——以安徽省山茶油生态产品为例[J]. 生态经济, 2026, 42(2): 47-54.
ZENG X G, LUO H X. Research on influencing factors and improvement strategies of Consumers'Willingness to pay for agro-ecological products: A case study of *Camellia* oil in Anhui Province[J]. Ecological Economy, 2026, 42(2): 47-54.
[24] 张俊妍, 周一帆, 陈政婕, 等. 基于选择实验法的消费者对不同地膜回收利用标识玉米偏好及支付意愿研究[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(6): 1573-1580.
ZHANG J Y, ZHOU Y F, CHEN Z J, et al. Research on consumers'preference and willingness to pay for corn with different plastic film recycling and utilization labels based on choice experiment method[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2025, 42(6): 1573-1580.
[25] 谣言、忧虑、质疑、牢骚……扫个码咋就这么难?直击茉莉花名城"数字交易变革"的阵痛与棋局 [EB/OL]. (2025-09-04)[2026-04-18]. https://static. cdsb. com/micropub/Articles/202509/bb6c9160ef3947fd8e61ef37162c6737.html.
[26] 张永奇, 单德朋. 县域数字经济、农业社会化服务与小农户受益——基于宏微观数据的经验考察[J]. 上海财经大学学报(哲学社会科学版), 2024, 26(1): 94-107.
ZHANG Y Q, SHAN D P. County digital economy, agricultural socialized services, and benefits for small farmers: Based on macro and micro data[J]. Journal of Shanghai University of Finance and Economics, 2024, 26(1): 94-107.
[27] 拼品质拼培育新品上海农业"精品化"愈加清晰[EB/OL]. (2023-03-30) [2026-04-18]. http://sh. people. com. cn/n2/2023/0330/c176738-40358264.html.
[28] 万琳, 李祖佩. 电商平台主导下农产品流通主体的权力重构与利益分配——基于陕西省周县S镇的案例研究[J]. 农业经济问题, 2025(12): 41-57.
WAN L, LI Z P. Power reconfiguration and benefit distribution of E-commerce platform-led agricultural product circulation actors: A case study of town S, Zhou county, Shaanxi province[J]. Issues in Agricultural Economy, 2025(12): 41-57.
[29] 京东京喜自营携手江西产业带 力推正宗赣南脐橙 同品质价低10%[EB/OL]. (2026-02-11) [2026-4-18]. https://baijiahao. baidu.com/s?id=1856818412568385315&wfr=spider&for=pc.
[30] CHUNG B. System dynamics modelling and simulation of the Malaysian rice value chain: Effects of the removal of price controls and an import monopoly on rice prices and selfâ€ sufficiency levels in Malaysia[J]. Systems Research and Behavioral Science, 2018, 35(3): 248-264.
[31] 橙信通赣南脐橙大数据平台-江西数乡科技有限公司官网[EB/OL]. (2018-08-21) [2026-04-18]. http://www. jiangxishuxiang.com/list_72/22.html.
[32] 罗俊霞, 申战宾, 段鹿梅, 等. 我国葱产业高质量发展全产业链标准体系构建[J]. 农产品质量与安全, 2025(4): 92-101.
LUO J X, SHEN Z B, DUAN L M, et al. Construction of a complete industry chain standard system for high-quality development of China's scal-lion industry[J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2025(4): 92-101.
[33] 打造更具生态红利的公用品牌 [EB/OL]. (2026-01-22) [2026-04-18]. https://ylrb.com/2/2xw/pl/956414.shtml.

Vulnerability of the Ecological Agricultural Product Industry Chain under Digital Technology Empowerment: Archetype Analysis and Resilience Governance

WANG Cuixia[1], HU Tao[1*], LI Yaqin[1], DING Xiong[2]

(1. *School of Information Management and Mathematics*, *Jiangxi University of Finance and Economics*, *Nanchang* 330032, *China*; 2. *School of Software and Internet of Things Engineering*, *Jiangxi University of Finance and Economics*, *Nanchang* 330032, *China*)

Abstract: [Objective] The ecological agricultural product industry chain is subject to deep-seated vulnerabilities during scale expansion, quality improvement, and premium growth, yet its structural roots remain inadequately understood. Although digital technologies are expected to relieve these vulnerabilities, recent evidence suggests that digitalization may also induce new suppression loops,

resulting in smallholder exclusion, profit squeeze, and homogenized competition. Existing studies have largely addressed this subject from isolated perspectives such as brand governance, industrial chain resilience, or policy evaluation, without offering a systematic diagnosis of the evolutionary mechanism of vulnerability. The aim of this study is to identify the operational logic of growth ceiling archetypes under digital empowerment, exploring how digital technologies interact with feedback structures, and proposing resilience governance strategies that move beyond "technological fixes". **[Methods]** The Limits to Growth archetype was employed as the analytical framework. Variable selection followed a three-stage procedure integrating theoretical deduction, bibliometric analysis, and case validation. First, constraining factors were identified across multiple dimensions, including natural resource endowment, ecological carrying capacity, market saturation, and trust thresholds, grounded on the theoretical proposition that growth processes endogenously activate restraining forces. Second, a systematic literature search was conducted using search terms such as ecological agriculture, agricultural product industry chain, and system dynamics. Candidate variables that appeared with high frequency in relevant empirical studies were screened, yielding an initial pool of over 20 variables. Third, field investigations of typical cases such as Gannan navel orange, Wuchang rice, and Hengzhou digital jasmine were performed to test, consolidate, and refine the initial pool, ultimately producing 14 core variables. Causal linkages among these variables were established upon three forms of evidence, namely theoretical logic derived from established economic principles, literature evidence drawn from prior empirical findings, and case facts observed during field investigations. Loop polarities were determined by the parity of negative causal chains, where even numbers indicate reinforcing loops (R) and odd numbers indicating balancing loops (B). On this basis, and in combination with field data from the typical cases, four reinforcing loops that drive growth and seven balancing loops that constrain growth were identified. The moderating effects of three categories of digital tools, namely digital agricultural technology platforms, quality traceability systems, and e-commerce platforms, on these loops were then separately assessed. **[Results and Discussions]** The results indicated that the sustained growth of the ecological agricultural product industry chain was underpinned by four positive feedback loops: the scale-income loop, the quality-demand loop, the premium-income loop, and the quality-reputation loop. At the same time, however, the growth process activated seven negative feedback loops that imposed constraints from multiple directions, including cost erosion, quality dispersion, market saturation, homogenized competition, low-price substitute diversion, trust erosion, and reputation damage—thus locking the system into three types of Limits to Growth dilemmas relating to scale expansion, quality improvement, and premium growth. Digital technology empowerment enhanced the operational efficiency of the industrial chain by reinforcing the positive loops and weakening the negative ones, yet it failed to remove the structural roots of the growth ceiling. More importantly, digitalization unexpectedly triggered three new suppression loops, namely the smallholder exclusion loop, driven by digital and certification barriers, illustrated by the Hengzhou digital jasmine case where elderly flower farmers were marginalized due to the digital divide; the profit squeeze loop, driven by platform cost transference, as shown in the Shanghai Hema village cooperative case, where high equipment costs and loss rates eroded profit margins; and the homogenized competition loop, driven by standardization orientation, as evidenced in the Gannan navel orange case where farmers abandoned flavor-differentiated production practices to comply with platform specifications. These three loops respectively weakened the operational foundations of the scale-income, premium-income, and quality-reputation loops, thereby shifting the locus of vulnerability from traditional constraints to digitally-induced risks. These findings revealed a dual effect of digital technology empowerment, as mitigating certain existing constraints, digital technologies may simultaneously generate new vulnerabilities through digital divides, cost transference, and standardization pressures. The essential task for resilience governance, therefore, lay in identifying and intervening in the dominant balancing loops that constrains growth, rather than relying exclusively on technological inputs. **[Conclusions]** First, the three limits to growth archetypes, namely scale expansion, quality improvement, and premium growth, constitute the shared structural roots of vulnerability in the ecological agricultural product industry chain. Second, digital technology empowerment cannot eradicate these structural roots and may give rise to new vulnerabilities. Third, enhancing industrial chain resilience should be grounded in leverage point interventions derived from the system's feedback structure. Corresponding governance strategies for the three types of newly identified risks, namely smallholder exclusion, profit squeeze, and homogenized competition, should include lowering technological entry barriers, establishing benefit-sharing mechanisms, and strengthening differentiated certification and geographical indication protection. Overall, this study provides a system dynamics-based analytical tool and policy leverage points for resilience governance of the ecological agricultural product industry chain in the context of digital technology empowerment.

Keywords: ecological agricultural products; digital technology; vulnerability; limits to growth archetype; resilient governance; system dynamics; industry chain resilience

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (71961009, 72261013); Jiangxi Provincial Natural Science Foundation Project (20242BAB25011); The 20th Student Research Project of Jiangxi University of Finance and Economics (20251212163401413)

First author: WANG Cuixia, E-mail: wangcx1995@126.com
***Corresponding author:** HU Tao, E-mail: ceohutao@163.com