

引用格式：

洪宇, 陈秧分, 刘坚. 中国不同区域的农业现代化路径选择——基于技术诱导理论与发达国家经验 [J]. 农业现代化研究, 2024, 45(3): 355-365.

Hong Y, Chen Y F, Liu J. Pathway for regional agricultural modernization in China: Based on the induced innovation theory and the experience of developed countries[J]. Research of Agricultural Modernization, 2024, 45(3): 355-365.

DOI: 10.13872/j.1000-0275.2024.0027



中国不同区域的农业现代化路径选择 ——基于技术诱导理论与发达国家经验

洪宇¹, 陈秧分^{1*}, 刘坚²

(1. 中国农业科学院农业经济与发展研究所, 北京 100081; 2. 德国莱布尼兹转型经济农业发展研究所 (IAMO), 德国 哈勒 06120)

摘要：农业现代化是加快建设农业强国、实现乡村全面振兴的关键基础。本研究基于技术诱导理论，系统阐释了农业现代化路径选择的理论逻辑，分析了发达国家农业现代化的经验路径，并利用 2000—2021 年我国 31 个省（区、市）（不包含港澳台地区）的面板数据和超越对数生产函数模型，实证分析了中国不同区域的要素产出弹性变化特征，提出了区域农业现代化的适宜路径。研究结果表明，立足要素禀赋的技术创新路径，决定了农业现代化的模式方向。美国、日本、德国、以色列等典型发达国家的农业现代化路径，遵循了技术诱导的理论逻辑。2000 年以来中国劳动力要素产出弹性为负，整体呈现“先减后增”的变化趋势。化肥要素产出弹性逐步减小且仅东部地区仍为正值，机械要素和土地要素产出弹性不断增长，二者优势最为明显的地区分别是东北和中部，也基本遵循技术诱导的内在逻辑。因而，在区域层面上，中国东部、中部、西部和东北分别适宜日本精耕细作集约型路径、德国生产集约与机械技术复合型路径、以色列环境优先与科技创新相结合的精准型路径和美国规模经营型农业现代化路径。

关键词：农业现代化；发展路径；技术诱导；资源禀赋；区域农业

中图分类号：F320.1

文献标识码：A

文章编号：1000-0275 (2024) 03-0355-11

Pathway for regional agricultural modernization in China: Based on the induced innovation theory and the experience of developed countries

HONG Yu¹, CHEN Yang-fen¹, LIU Jian²

(1. Institute of Agricultural Economics and Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Leibniz Institute of Agricultural Development in Transition Economies (IAMO), Halle 06120, Germany)

Abstract : Agricultural modernization is the cornerstone for developing an agricultural powerhouse and accomplishing comprehensive rural revitalization in China. In contrast to previous research that often focused either on case studies or empirical analyses lacking feasible implications, this study based on induced innovation theory and systematically elucidates the theoretical rationale behind selecting pathways for agricultural modernization. It also discusses and concludes the experiences of agricultural modernization in developed nations. Then, using the panel data collected from 2000 to 2021 in 31 provinces (regions, cities) and employing translog production function to estimate the elasticities of agricultural inputs, it discusses the feasible pathways of agricultural modernization in different regions of China. The findings indicate that the paradigm of agricultural modernization is fundamentally shaped by technological innovation rooted in factor endowments. Notably, countries such as the United States, Japan, Germany, and Israel have followed a technological induction logic in their agricultural modernization pathways. Results show that the labor force has

基金项目：国家社会科学基金重大项目 (21&ZD093)；农业农村部发展规划司委托课题 (B020101)；中国农业科学院科技创新工程项目 (10-IAED-04-2024)。

作者简介：洪宇 (1986—)，男，湖北天门人，博士，助理研究员，主要研究方向为粮食生产、农业技术推广与服务、国际农业发展，E-mail: hongyu@caas.cn；通信作者：陈秧分 (1983—)，男，湖南湘乡人，博士，研究员，主要研究方向为乡村产业经济、国际农业经济，E-mail: chenyangfen@caas.cn。

收稿日期：2023-12-13；**接受日期：**2024-04-08

Foundation item: Key Project of National Social Science Foundation of China (21&ZD093); Department of Development Planning, Ministry of Agriculture and Rural Affairs (B020101), The Agricultural Science and Technology Innovation Project of the Chinese Academy of Agricultural Sciences (10-IAED-04-2024).

Corresponding author: CHEN Yang-fen, E-mail: chenyangfen@caas.cn.

Received 13 December, 2023; **Accepted** 8 April, 2024

witnessed a trend of “U” shape since the 2000s. The elasticity of fertilizer has been decreasing in China while it remains positive in eastern region. The elasticities of machinery and land have been increasing during the surveyed period, with the biggest growth in northeast and central regions. And these trends basically follow the internal logic of technology induction. It is suggested that the agricultural mode of Japan, Germany, Israel and the United States are suitable for agri-modernization pathways of eastern, central, western and north-eastern China, respectively.

Key words : agricultural modernization; development pathway; induced innovation; resource endowment; regional agriculture

党的十九届五中全会提出,中国要在 2035 年“基本实现新型工业化、信息化、城镇化、农业现代化,建成现代化经济体系”。党的二十大进一步要求“加快农业强国建设”,并深入阐述了中国式现代化,为农业农村现代化提供了理论遵循和行动指南^[1-2]。农业现代化是中国式现代化的重要内容和战略基点^[3],其实现不仅关乎农业自身,更直接影响到中国能否顺利跨越“中等收入陷阱”。当前和今后一个时期,立足全局、着眼长远,探索走出一条中国特色的农业现代化道路,仍然是我国农业发展的重要方向^[4]。

国内外学者围绕农业现代化目标、演变历程、影响因素和发展路径开展了大量研究^[5-8]。农业现代化发展理论,可追溯到 1964 年美国经济学家舒尔茨的《改造传统农业》,其中提出传统农业对经济增长贡献有限,必须转变为高生产率的现代农业。改造方式包括建立制度保障体系、市场刺激农民以及通过农产品和生产要素价格变动激发农业活力等。此后,许多学者从理论上进一步解释了差异化农业现代化的发展进程,例如“刘易斯-费景汉-拉尼斯模型”。该模型是一种解释传统农业剩余劳动力向产业部门转移的条件和路径的经济理论模型^[9];路径依赖理论认为,由于大量资源集中到某种农业技术或生产方式,这会增强其在该方向上的依赖性,从而形成特定的发展模式。而农业技术诱导理论则解释了农业资源要素禀赋变化对农业技术路径选择的影响^[10-11]。现有文献认为,每个国家的农业现代化都有一个主导性的实现路径和模式。当前农业现代化模式主要包括以美国、澳大利亚为代表的劳动节约型模式^[12-13],以日本、韩国为代表的土地节约型模式^[14-15],以德国为代表的两者结合的中间模式^[16]。此外,还存在一些依靠资本和科技形成的独具特色的农业现代化代表,例如荷兰和以色列^[17]。

农业现代化是一个动态过程,其内涵和外延随着社会经济发展而不断演变。很多研究关注理论政策归纳和国外先进经验借鉴。在理论政策方面,学术界总结中国农业现代化发展主要经历了三次理论政策变革^[18-20]。第一次变革为 20 世纪 50 到 70 年代,该时期为学习苏联模式的农业现代化建设初期,确

立了农业机械化、化学化、水利化和电气化等“四化”的中心地位。1978 年改革开放后实施的家庭联产承包责任制极大地提高了农业生产力,1992 年市场经济体制改革和 2001 年加入世界贸易组织也对农业现代化提出新的要求。在此期间,中国逐步形成农业市场化、装备化、企业化、专业化、社会化、生态化和规模化等“多化并举”的特色农业现代化路径。从 2003 年开始,中央试点减免农业税,实现了工业反哺农业战略转变。网络计算机技术和信息技术也逐步和农业发展深度融合。中国的农业政策逐步转向工业化、城镇化、信息化和农业现代化“四化”协调的发展路径。在国外经验借鉴方面,从不同视角讨论了我国农业现代化模式现状和发展方向。例如,从区域优势视角将我国农业现代化模式分为沿海地区外向型创汇农业模式、大中城市郊区都市农业模式,以及地方优势农产品产业带模式^[19];东部应借助海外市场走“外向主导型”农业现代化模式,而西部应结合复杂的地理特征实施“特色农业带动型”农业现代化模式^[21]。从资源禀赋视角将美日法等发达国家农业现代化模式归纳为地多人少型、人多地少型和人地适中型三种,并提出优化布局、发展特色效益农业等政策建议^[10];从“互联网+”视角,对比分析美国和西欧在施肥、喷药、除草等农业生产过程的全程网络化精准农业模式,认为我国可通过技术、业态和模式创新驱动“互联网+”现代农业发展^[16]。在当前加快建设农业强国、全面推进乡村振兴的背景下,农业现代化路径及模式的讨论尤显必要。

以往的农业现代化路径、模式讨论为本研究提供了有益经验和基础,但仍存在进一步完善的空间。从研究内容来看,现有文献强调了我国自然环境复杂、地形种类繁多、经济发展水平不平衡等问题,认为我国农业现代化发展必然呈现差异化的发展路径^[21-24],但研究对象往往局限于特定区域,少见针对我国不同地区农业现代化模式的系统性差异性分析。从研究方法来看,现有文献侧重政策归纳与定性分析,理论和实证相结合的研究尚待加强。鉴于此,本研究旨在:1)应用技术诱导理论,从资源禀赋差异视角分析了不同国家农业现代化模式形成

的路径机制,讨论和分析了资源禀赋会随着要素的流动而产生动态变化,一定程度上解释和深化了农业现代化的理论逻辑。2)估算中国不同区域间劳动、土地、化肥和机械四种投入要素产出弹性,将不同区域的农业现代化模式建立在立足技术诱导的实证分析基础之上。3)将中国不同区域情况同四种最具代表性的发达农业现代化模式进行比较分析,为因地制宜推进中国农业现代化建设提供科学依据。

1 研究方法

1.1 农业现代化模式选择的理论阐释

农业发展经济学家 Hayami Yujiro 和 Vernon Ruttan 于 20 世纪 70 年代提出农业技术诱导理论。该理论认为一个国家应基于该国的资源禀赋状况,选择相应技术进步路径,进而促进农业生产率和农业产出的迅速增长,实现农业现代化(图 1)。

劳动节约型的农业技术创新推动形成机械动力替代体力劳动的农业现代化模式。如图 1b 所示,假设 M 国劳动力增速小于经济增速,该国劳动力稀缺将导致劳动力相对价格上升,则农民会渴求替代劳动的技术创新,因此 M 国等产量曲线与较低的等成本曲线相交于 K^3 。土地节约型的农业技术创新造就依赖生物化学技术创新的农业现代化模式。假设 R 国因人口增速过快出现大量的廉价劳动力,此时土地要素价格快速增长,则需通过生物化学技术创新来节省相对稀缺并缺乏弹性的土地资源投入,以此提高单产与土地生产效率。而中性的农业技术创新,将推动形成农业机械化与生物技术并重的农业现代化模式。假设 H 国的劳动增速同步于经济发展,各农业投入要素间相对价格并没有明显的波动,因此 H 国农业现代化过程中可能是机械技术与生物技术并进的结果,最终 H 国等产量曲线与较低的等成本曲线相交于 K^2 。

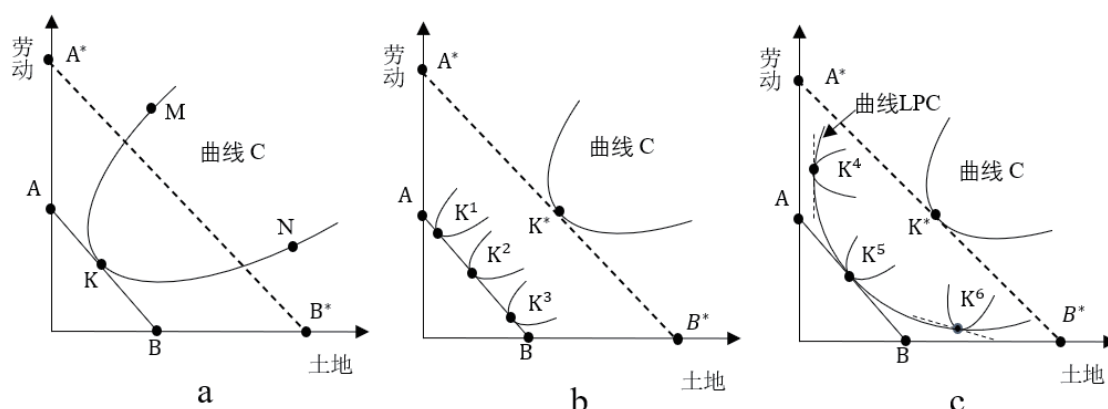


图 1 农业现代化模式形成路径机制分析图 - 基于技术诱导理论

Fig. 1 Pathway and mechanism for the agricultural modernization based on induced innovation theory

注: 曲线 C 为等产量曲线, M、K 和 N 表示不同农业要素投入组合, 相等产出的三点组合。AB 和 A^*B^* 表示两条等成本曲线, 等产量曲线 C 和等成本曲线在图 1a 相交于点 K, 该点代表此等产量线产量水平下的最低成本。

当要素价格在不同地区的变化幅度不同时, H 国的等产量曲线将与新的等成本曲线相交于 K^4 。M 国和 R 国分别与新的等成本曲线相交于 K^5 和 K^6 , 此时农民对农业生产的技术需求会诱导出和图 1c 中类似的农业现代化模式。假设有无数个不同类型的地区, 各个地区的生产技术也不尽相同。各地区技术在等产量水平下最低成本点的切线的斜率就是对应地区的要素价格比率。把各项技术的上述切点连接起来, 就可以得到农业技术诱导曲线 (LPC)。需要注意, 区域间的异质性也会影响农业技术诱导路径, 比如存在 Y 国, 尽管其土地资源丰富但大面积土地处于干旱地区, 另外脆弱的生态威胁着农业的可持续发展, 在此条件下, Y 国可能并不会像 M

国一样, 诱导出规模型农业技术。相反, Y 国的土地资源是稀缺的, 所以 Y 国农户希望将土地资源更多利用, 该动机会诱导作物抗旱技术的改良和土壤环境保护技术。脆弱的生态环境要求 Y 国必须以生态保护作为首要目的, 从而使得 Y 国走上节水农业和作物抗旱技术创新的精准型农业现代化道路。

1.2 超越对数生产函数

为实证检验我国农业现代化模式, 本研究建立超越对数生产函数产出方程, 用以估计 2000—2021 年中国西部、东北、中部和东部的劳动要素产出弹性, 为各区域遴选合适的农业现代化模式提供科学依据。考虑到要素弹性固定的 C-D 形式生产函数可能并不符合农业生产实际, 本研究采用更加灵活的

超越对数 (translog) 生产函数, 具体方程如下:

$$\begin{aligned} \ln Y_{it} = & \alpha_0 + \alpha_1 \ln L_{it} + \alpha_2 \ln N_{it} + \alpha_3 \ln F_{it} + \alpha_4 \ln M_{it} \\ & + 0.5 \times \alpha_5 (\ln L_{it})^2 + 0.5 \times \alpha_6 (\ln N_{it})^2 \\ & + 0.5 \times \alpha_7 (\ln F_{it})^2 + 0.5 \times \alpha_8 (\ln M_{it})^2 \\ & + \alpha_9 \ln L_{it} \ln N_{it} + \alpha_{10} \ln L_{it} \times \ln F_{it} \\ & + \alpha_{11} \ln L_{it} \times \ln M_{it} + \alpha_{12} \ln N_{it} \times \ln F_{it} \\ & + \alpha_{13} \ln N_{it} \times \ln M_{it} + \alpha_{14} \ln F_{it} \times \ln M_{it} \end{aligned} \quad (1)$$

$$LE_{it} = \alpha_1 + \alpha_5 \ln L_{it} + \alpha_9 \ln N_{it} + \alpha_{10} \ln F_{it} + \alpha_{11} \ln M_{it} \quad (2)$$

$$NE_{it} = \alpha_2 + \alpha_6 \ln N_{it} + \alpha_9 \ln L_{it} + \alpha_{12} \ln F_{it} + \alpha_{13} \ln M_{it} \quad (3)$$

$$FE_{it} = \alpha_3 + \alpha_7 \ln F_{it} + \alpha_{10} \ln L_{it} + \alpha_{12} \ln N_{it} + \alpha_{14} \ln M_{it} \quad (4)$$

$$ME_{it} = \alpha_4 + \alpha_8 \ln M_{it} + \alpha_{11} \ln L_{it} + \alpha_{13} \ln N_{it} + \alpha_{14} \ln F_{it} \quad (5)$$

式中: $\ln Y_{it}$ 表示第 i 省第 t 年的农业生产总值的对数形式, $\ln L_{it}$ 、 $\ln N_{it}$ 、 $\ln F_{it}$ 和 $\ln M_{it}$ 分别表示劳动、土地、化肥和机械投入要素的对数形式; LE_{it} 、 NE_{it} 、 FE_{it} 和 ME_{it} 分别表示劳动产出弹性、土地产出弹性、化肥产出弹性和机械产出弹性。本研究用农村人口作为农业劳动投入要素, 用农作物播种总面积表示农业土地投入要素, 用化肥施用折纯量表示化肥投入, 用农业机械总动力表示机械投入; α_0 为常数项系数, $\alpha_1 \sim \alpha_{14}$ 为投入要素及其平方项和二次项的系数。考虑到长时序面板数据可能存在组内异方差的问题, 采用广义最小二乘法 (GLS) 进行修正。以上研究数据均来自中国国家统计局和中国统计年鉴 2001—2022 年, 部分缺失数据由各省级统计年鉴进行补充。

2 发达国家农业现代化的经验路径

20 世纪 30 年代开始, 主要发达国家基于本国农业发展国情相继对传统农业进行改造, 逐步实现了从传统农业到现代农业的转变。不同国家选择的

道路不同, 农业现代化模式也存在较大差异, 大体都遵循了技术诱导的理论逻辑。

2.1 以美国为代表的规模经营型农业现代化模式

美国农业资源丰富、人少地多、劳动力短缺, 是规模经营型农业现代化发展模式的先决条件和物质基础。如图 2 所示, 1961 年美国人均耕地面积为 0.983 hm^2 , 约为中国的 6.26 倍、德国的 5.89 倍、日本的 16.38 倍; 2020 年美国人均耕地面积为 0.476 hm^2 , 约为中国的 5.60 倍、德国的 3.40 倍、日本的 14.24 倍。美国土地资源丰富, 土地相对价格低廉, 但劳动力相对价格则居高不下。2022 年美国月工资 (4 616 美元/人) 约为中国月工资 (833 美元/人) 的 5.5 倍。另外, 美国机械制造业极为发达, 为其农业机械化的普及奠定了坚实基础^[24]。在此背景下, 农民为了充分利用成本既定的劳动力资源, 会尽可能通过开发、购买新的土地资源, 增加自身可耕地面积, 进而通过大型机械设备进行规模化农业生产经营, 以获取农业生产的规模经济效益。凭借发达的现代工业优势, 美国大力发展农用机械取代人力、扩大单位农场种植面积和经营规模来提高劳动生产效率, 逐步实现了规模经营型农业现代化。

制度设计和政策支持是美国实现农业规模经营型的重要保障。19 世纪中期, 美国人口保持快速增长, 导致人均耕地减少。同时, 经济危机的爆发导致大量失业人口。这些因素影响了美国规模农业发展。为此, 政府通过《霍姆斯法案》和《土地法案》政策的实施等, 鼓励百姓移居西部, 并允许农民免费获得不超过 64.75 hm^2 的开荒土地, 农民享有土地的使用权和交易权^[25]。通过西部拓荒运动, 美国不但解决了失业问题, 也为规模农业的发展开拓了更多土地。此后, 随着城市化的快速发展, 大量青壮年劳动力进入城市, 农业规模化得到进一步发展。

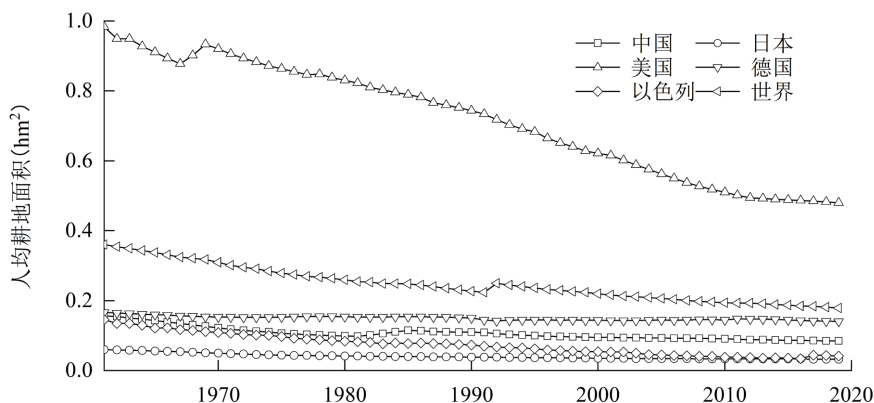


图 2 各国人均耕地面积变化图

Fig. 2 Arable land for countries and the world (per capita)

注: 图片数据来源于世界银行

也有部分农户因为土地兼并的原因,土地规模反而下降,使其在市场竞争中面临不利地位。为此,美国政府积极发挥宏观调控作用,通过农户补贴等方式缓解“小农户”与“大市场”的矛盾,通过合作社等方式稳固规模经营。当前,美国合作社会员人数已达747万人,且合作社会员数量最多的是销售额超过10亿美元的大型合作社^[11]。

技术是规模型农业现代化模式的实现基础。19世纪中期,为了提高劳动生产效率,美国率先开启农业机械化发展。1835年美国人Hiram Moore发明联合收割机并注册专利;1889年,美国芝加哥的查达发动机公司制造出了首台使用汽油内燃机的农用拖拉机。当前,美国是全世界农业机械化率最高的国家之一。农业机械化的大规模应用进一步推动了规模化农业现代化模式的发展。为推动农业科技的持续创新,美国政府还对国家农业研究机构,如美国农业部(USDA)、农业研究服务(ARS)以及研究型大学提供研究便利,增加资金支持,推动美国涌现了大量高产品种和化肥农业技术。此外,美国的农业生物技术和农业数字化水平都居于世界领先地位,不但是全球最大的农业机械制造国,还是全球最大的转基因作物种植国。

2.2 以日本为代表的集约型农业现代化模式

日本人口密集、土地有限,适合发展集约型农业现代化模式。日本耕地面积约454.9万 hm^2 ,人

均耕地约0.033 hm^2 ,土地资源稀缺。一方面,资本家因土地成本过高不愿投资农业;另一方面,农民受制于传统思想的束缚,不愿出让自己的土地。因此,通过增加耕地面积,实现规模效应的农业现代化模式并不适用于日本。但是,日本又迫切希望通过提高作物的生产效率来提高总产量,增加农业收入^[22,26]。在此背景下,日本通过农业生物技术创新,不断提高种子、化肥和农药等投入要素质量和使用效率,从而增加单位面积产量,最终逐渐形成了以发展生物技术为核心的集约型农业现代化模式。如图3所示,1997年以来,日本单位面积农业产值和人均农业产值始终保持高位,日本2020年人均农业产值约为德国的3倍、美国的2倍;2020年单位面积农业总产值约为德国的6倍、美国的20倍。

坚持生物技术的应用和研发是日本发展集约型农业现代化模式的关键。二战结束后,日本面临着严重的粮食短缺和农村贫困问题。对此,日本政府通过引入高产、抗病虫害的新品种、化肥和农药,以及改进农业管理等方法来提高农业生产效益,以此推动日本农业现代化发展。20世纪后半叶开始,日本设立研究基金和科研项目,投资兴建了多个生命科学基地和研究中心,支持生物技术和基因工程等新兴领域的研究,进一步推动了生物技术的崛起。日本政府还积极推动产学研合作模式,鼓励大学、研究机构和产业界之间的合作。这种模式促进了科

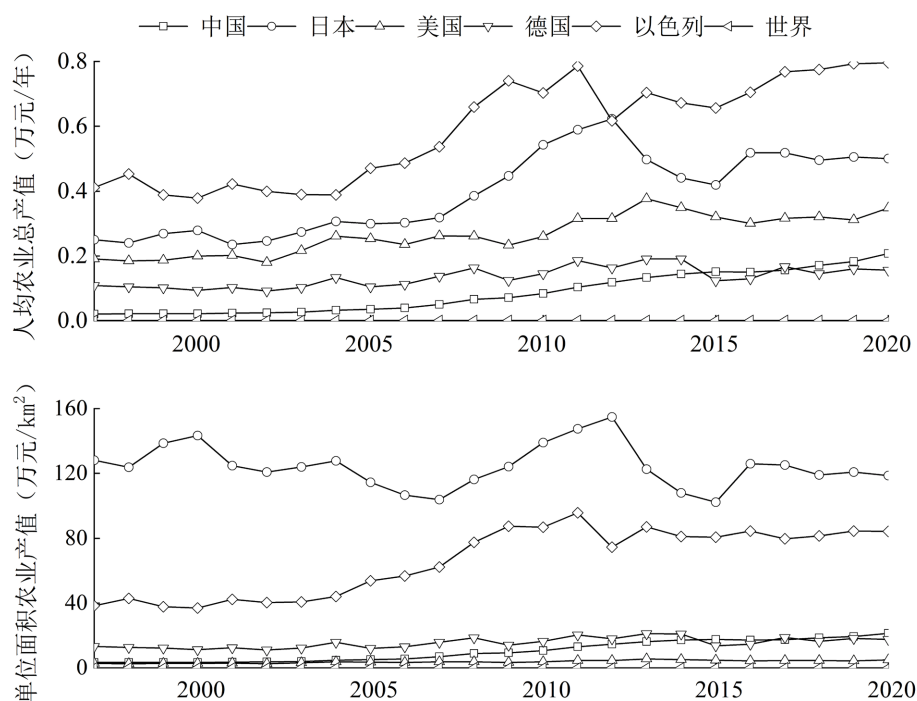


图3 各国劳动生产率和土地生产率变化图

Fig. 3 Labor and land productivity for countries and the world

注: 图片数据来源于世界银行; 产值金额单位: 美元。

研成果的转化和商业化,加速了产业领域的生物技术应用。在此背景下,日本培育了如改良小麦和改良水稻等一系列高产、抗病虫害的作物品种;研发了抗虫、耐盐碱,能够适应不同环境条件的转基因作物品种;研发了大量生物农药和肥料,用于替代化学品的使用,减少对环境的污染,保护生态平衡。

在农业现代化进程中,日本以“六次产业理论”为基础,推动一二三产业融合发展,提升农业产业的附加值。三产融合发展极大地推动了农业产业链延伸、产业范围拓展和农业功能转型,提高了农业生产效率和农民收入,为日本精耕细作集约型农业现代化模式发展注入了新的内生动力。

2.3 以德国为代表的生产集约加机械技术的复合型农业现代化模式

德国人口和土地资源均介于美日之间,适合发展生产集约加机械技术的复合型农业现代化模式。如图 2 所示,2020 年德国人均耕地面积为 0.164 hm^2 ,约为美国的 1/12、日本的 2.78 倍。德国是最早开始工业革命的国家之一,具备比较完善的工业体系。并且德国较大部分地区为平原地带,适宜农业机械化的发展,因此,德国农业机械化水平相对较高。早在 19 世纪末至 20 世纪初,德国的农业机械在耕作、播种、施肥、收割等各个环节得以应用。德国比日本更适宜规模经营,但由于土地资源限制,很难获得同美国一样巨大的规模效益。并且农业的边际收入长期低于工业形成了收入“剪刀差”,因此政府主张推动以工养农和城市反哺农村的政策。在此情境下,德国大规模采用机械的同时也更加希望以生物技术手段来提升单位面积产量。20 世纪中叶,德国绿色革命开始兴起,生物技术改进培育出更具抗病虫害、适应性强、产量高的作物品种,提高产

量的同时也减少了农药化肥的使用,降低了生产成本。如图 3 和图 4 可知,德国单位面积化肥使用量和土地生产效率低于日本,但高于美国。

德国致力于推进综合性农工综合体和产销一体化发展。农业机械化和生物技术协同发展的农业现代化模式,要求德国农业从生产到加工再到销售的不同环节紧密整合,优化资源利用,提高农业效率的同时使农产品更加符合市场需求,增加产品的附加值,提升农业竞争力。早在 19 世纪末 20 世纪初,德国农业合作社开始兴起,以合作的方式解决了农民面临的一些共同问题,如农产品加工、包装和市场销售等环节。这种整合为农村地区提供了更多的就业机会,也帮助农民将农产品直接送入市场,减少了中间环节,提高了农产品的附加值^[27]。在 20 世纪后半叶,随着科技和管理方法的进步,农工综合体逐渐形成,农业物联网、智能农机和精准农业等技术的引入,整合了市场资源、提高了生产效率、促进创新和可持续发展的同时也催生了严格的农产品质量和认证标准^[28]。最终促使农业更高效、更市场导向、更环保和更可持续地发展,适应了现代社会对农业的需求和挑战。

德国具有世界先进水平的农业教育培训和技术推广体系,通过教育立法推进培训工作的实施。德国的农业培训种类多样,通过教育和培训,德国农民实现了专业化和职业化,是农业企业化经营的全才^[29]。在职业化农民的经营下,德国农业生产多功能化特征明显,种粮农民除了可提供粮食外,还利用各种条件发展生物能源、再生原料等产业。这既为农业机械化和生物技术协同发展的农业现代化模式提供了高素质人才队伍保障,也确保了农民可以获得体面的工作收入。

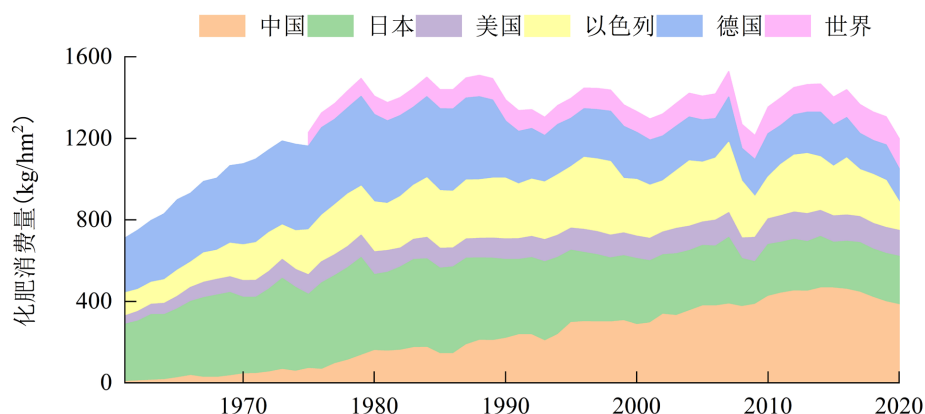


图 4 各国化肥消费变化趋势图

Fig. 4 Fertilizer use for countries and the world

注：图片数据来源于世界银行。

2.4 以以色列为代表的环境优先与科技创新相结合的精准型农业现代化模式

以色列地理环境恶劣，全国将近 60% 的土地为干旱、缺水的沙漠地区。这种脆弱的生态条件要求以色列在为居民提供充足、健康、安全的农产品的同时，必须兼顾生态环境的保护，这促使了以色列精准农业的发展。截至 2015 年，以色列的农业生产效率已经大幅提升，一个农民可以提供约 400 人的农产品需求，而在 1995 年和 2000 年，一个农民分别只能养活 15 人和 90 人。以色列不仅可以自给自足，还能向 60 多个国家出口农产品、农资装备以及农业生产技术，是联合国粮农组织指定的向发展中国家技术推广的国家之一^[30]。如图 3 所示，以色列的农业劳动生产率最高，约为美国的 2 倍、德国的 5 倍。

以色列注重发展先进的节水和灌溉技术。以色列气候干旱，是淡水资源最缺乏的国家之一，其有效水资源约为 15 亿~17 亿 m^3 ，人均占有量不到 300 m^3 ，仅为世界人均水平的 1/33^[30-31]。为此，以色列积极发展海水淡化技术、废水循环利用技术、雨水收集技术等水资源综合利用技术，不再依赖于天然湖泊的水源，并通过水循环利用和海水淡化技术实现了“淡水自由”。该国建设了 5 个海水淡化厂，平均每年可淡化约 6 亿 m^3 的海水。如今，以色列 80% 的饮用水来自海水淡化。此外，以色列的水利设备公司在全球市场占有率有近 30% 的份额，世界各地的灌溉系统超过 80% 采用以色列产品。

以色列还实现了育种开发技术及水肥一体化技术的精确化。该国致力于分子育种和基因编辑技术研发，并培育了大批适应病虫害、耐盐碱和耐旱等特点的新品种，推动农作物抗逆性和产量的提升。以色列的水肥一体化技术，在节约水资源的情况下实现了高效的农业生产。通过先进的传感器技术，精准监测土壤湿度和作物需水量，实现精准灌溉，同时将肥料和水一体化，提高肥料利用效率。这些技术的成功应用，不仅为以色列的农业注入了活力，也为全球干旱地区提供了有益经验，促进了农业的可持续发展。

3 中国农业现代化的差异化路径

中国的农业生产受气候和自然条件的差异较大，因此不同地区的发展策略也存在差异。同时，一系列局域性的发展政策，如优先发展城市和工业、设立沿海经济开放区等，进一步加剧了区域经济和资源要素的不均衡。改革开放以来，中国农村劳动

力持续向非农部门转移，呈现出从北向南、由西到东的区域间转移趋势。因此，中国农业现代化模式必须考虑到各地区的特性，并与区域发展目标相一致。根据国家统计局的区域划分惯例，本研究将从东部、中部、西部和东北四大区域探索不同的发展路径。

3.1 中国不同区域的要素产出弹性变化特征

2000—2021 年，中国劳动力产出弹性均为负值（表 1），这与已有研究结论一致^[32-34]，说明中国农业劳动力过剩严重，农业劳动力投入的增加，不能促进农业产值的增长，甚至会产生抑制效应。土地和机械产出弹性均为正值，表明现阶段土地和机械要素对中国农业增长发挥主要作用。事实上，自 2004 年财政部、农业农村部启动实施了农机购置补贴政策以来，农业机械补贴资金和规模一直处于增长状态^[16]。这些政策极大推动了农业机械化发展，提升了机械要素对农业生产和农业现代化进程的效用。此外，我国政府也十分重视土地政策改革，2002 年颁布了《农村土地承包法》，2009 年开始在试点地区开展农村承包地确权登记颁证试点，为农村土地承包经营权确权登记提供了法律依据^[27-28]。土地要素一直对我国农业增长发挥着正向作用，部分得益于相关政策的支持。

化肥产出弹性呈现出“倒 U”形变化趋势，先增加后减少甚至转为负数。这表明化肥在过去一段时间内为我国农业产出增长作出了重要贡献。2004 年国家对化肥市场价格进行调控，提高国产化肥产能，一定程度上提高了化肥对农业增长的效用^[15]。然而，长期来看，这种增长方式并不可持续。2015 年以来，农业农村部组织开展“化肥农药使用量零增长”行动，但当前中国仍普遍存在化肥过量使用情况。因此，中国农业的发展必须谨慎对待化肥过量使用所带来的后果。

总体而言，劳动力产出弹性呈现增长趋势，其中东部劳动力弹性最小，而东北劳动力弹性最大。中部和西部的土地产出弹性相对较大，而东部土地产出弹性最小。东部化肥产出弹性最大，东北最小，而中部和西部化肥产出弹性都已经转为负数。东北地区的机械产出弹性最高，而东部最低。这些农业要素产出弹性反映了各区域资源禀赋的相对优势以及对农业增长的贡献，表明可以根据不同区域的资源禀赋、农业要素产出弹性和社会经济情况，探索中国农业现代化的具体路径。

超越对数生产函数估计结果如表 2 所示，结果显示大部分回归系数都显著不为 0，仅有土地和机

表 1 中国不同区域农业产出弹性和土地产出弹性估计结果

Table 1 Estimation results of agricultural output elasticity and land elasticity for regions in China

产出弹性	年份	全国	东部	中部	西部	东北
劳动产出弹性	2000—2004	-0.437	-0.470	-0.892	-0.217	-0.275
	2005—2009	-0.506	-0.456	-1.003	-0.345	-0.331
	2010—2014	-0.556	-0.509	-1.026	-0.408	-0.374
	2015—2019	-0.512	-0.486	-0.921	-0.373	-0.347
	2020—2021	-0.440	-0.430	-0.842	-0.307	-0.232
土地产出弹性	2000—2004	0.678	0.626	0.952	0.584	0.654
	2005—2009	0.819	0.597	1.261	0.792	0.787
	2010—2014	0.983	0.752	1.427	0.980	0.906
	2015—2019	0.991	0.741	1.334	1.042	0.965
	2020—2021	1.127	0.854	1.449	1.219	1.077
化肥产出弹性	2000—2004	0.235	0.638	0.079	0.095	-0.155
	2005—2009	0.294	0.805	0.009	0.138	-0.125
	2010—2014	0.251	0.758	-0.070	0.106	-0.136
	2015—2019	0.218	0.795	-0.077	0.013	-0.218
	2020—2021	-0.012	0.601	-0.283	-0.279	-0.402
机械产出弹性	2000—2004	0.652	0.249	0.775	0.760	1.179
	2005—2009	0.567	0.126	0.737	0.656	1.167
	2010—2014	0.567	0.091	0.781	0.654	1.200
	2015—2019	0.604	0.029	0.850	0.743	1.294
	2020—2021	0.764	0.144	1.004	0.943	1.463

注：东部地区包括北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东和海南；中部地区包括山西、安徽、江西、河南、湖北和湖南；西部地区包括内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆；东北地区包括辽宁、吉林和黑龙江。

表 2 生产函数估计结果（OLS 和 GLS）

Table 2 Estimation results of production functions (OLS and GLS)

变量名称	OLS 估计结果		GLS 估计结果	
	系数	标准误	系数	标准误
$\ln L_{it}$	3.844***	0.808	3.844***	0.820
$\ln N_{it}$	-6.203***	0.978	-6.203***	0.818
$\ln F_{it}$	7.919***	1.192	7.919***	1.158
$\ln M_{it}$	-3.941***	0.657	-3.941***	0.587
$\ln L_{it}^2$	-0.319***	0.094	-0.319***	0.094
$\ln N_{it}^2$	-0.074	0.135	-0.074	0.123
$\ln F_{it}^2$	0.769***	0.128	0.769***	0.127
$\ln M_{it}^2$	0.064	0.059	0.064	0.066
$\ln L_{it} \times \ln N_{it}$	0.411***	0.193	0.411***	0.146
$\ln L_{it} \times \ln F_{it}$	0.072	0.194	0.072	0.186
$\ln L_{it} \times \ln M_{it}$	-0.406***	0.131	-0.406***	0.141
$\ln N_{it} \times \ln F_{it}$	-1.126***	0.191	-1.126***	0.185
$\ln N_{it} \times \ln M_{it}$	1.251***	0.157	1.251***	0.158
$\ln F_{it} \times \ln M_{it}$	-0.768***	0.126	-0.768***	0.132
常数项	11.818***	3.251	11.818***	2.844
观测值	682		682	

注：*** 表示 1% 的显著性水平。

械二次项系数以及劳动和化肥的交叉系数不显著，说明选择超越对数生产函数是适合的。此外，OLS 和 GLS 的估计结果基本一致，说明本研究的结果是稳健的。另外，需要说明的是，表 1 的结果是依据 GLS 估计结果计算得出。

3.2 中国不同区域的农业现代化路径选择

由于不同区域间不平衡的自然资源分布和经济发展水平，导致中国农业现代化发展必然呈现差异化发展路径。研究表明，2000 年以来劳动力要素产出弹性为负，整体变化呈现“先减后增”的变化趋

势。化肥要素产出弹性逐年减小且仅东部地区仍为正值，机械要素和土地要素产出弹性不断增长，二者优势最为明显的地区分别是东北和中部。中国不同区域间农业要素禀赋变化也基本遵循技术诱导的内在逻辑。因此，在区域层面上，东部、中部、西部和东北分别适宜日本精耕细作集约型、德国生产集约与机械技术复合型、以色列环境优先与科技创新相结合的精准型和美国规模经营型农业现代化路径。具体路径选择如下：

3.2.1 东部地区 东部地区可以更多借鉴日本集约型发展模式。据国家统计局 2021 年第七次人口普查数据显示，中国东部地区占总人口的 39.93%，中部占 25.83%，西部占 27.12%，东北仅占 6.98%。中国东部经济最为发达，工业技术基础好，因此吸纳了中国大部分的转移劳动力。这一定程度上缓解了农业劳动力老龄化带来的负面影响，但也加剧了“人多地少”的矛盾。中国东部地区土地产出弹性最低，化肥产出弹性最高，非常契合用生物技术创新缓解土地资源的不足、增加产量的日本集约型农业现代化模式。此外，东部地区大学、科研机构众多，科技企业强大，能为生物技术的发展提供有力支持。因此，东部地区可以更多学习日本经验：加强抗虫、耐盐碱，能够适应不同的环境条件的转基因作物开发；开展生物农药和肥料生产；推动产学研合作模式并鼓励大学、研究机构和产业界之间的合作，加速科研成果的转化和商业化，实现生态与经济的双赢。相对于日本，中国的农业体量更大，新作物不但可以用于东部，还可以迅速辐射到其他区域；中国拥有世界上最大的农产品消费市场，相比日本，中国东部发展集约型农业现代化模式，具备更加广阔的前景。

3.2.2 东北地区 东北地区可以更多借鉴美国模式。2022 年中国东北地区人均耕地面积 0.309 hm^2 ，是全国人均耕地面积的 3 倍，具备规模型农业现代化模式基础，且东北地区为中国主要人口流出地区，其人均耕地面积存在进一步上升空间。东北地区劳动产出弹性为负但数值最大，表明该地区劳动力目前还比较充足，但是相比于中国东部、中部和西部，其农业劳动力较为稀缺，可能出现如美国一样的农村劳动力价格较高的情况。与美国类似，东北以小麦、玉米等传统粮食作物为主，且土地相对平整，适合农业机械化和规模化发展。东北一直是中国重工业生产基地，具备良好的农业机械生产条件。因此，东北可以更多学习美国农业现代化经验：加大农业机械研发和生产投入，满足农民对性能好、类

型多样的农业机械需求，推进农业机械化应用；积极推动合作社建设，进一步推动规模型农业发展，缓解“小农户”与“大市场”的矛盾；建立高度组织化的供应链体系，从生产到加工再到分销，实现高效的物流和市场流通确保农产品能够及时、稳定地送达市场。此外，中国东北地区肥沃的黑色土壤是其独有的优势，政府在推动农业机械化的同时也不能忽视黑土地立法保护工作，必须因地制宜完善保护性耕地发展政策。

3.2.3 中部地区 中部可以更多借鉴德国均衡发展模式。中部南北跨度大，地形复杂，其中河南以平原为主，适合农业机械化和规模农业的发展。湖南、湖北、江西和山西以丘陵和山地为主，更适宜通过科学技术增加单位面积产出，进而实现农业现代化转变的方式。由于中部人均耕地低于东北和西部，且无法向东部一样提供大规模的政策补贴，这使得中部小农占比远高于全国平均水平且土地细碎化严重。如表 1 所示，中部机械产出弹性低于东北但高于东部和西部，表明其农业机械化优势不如东北明显，但仍有较大发展空间。此外，中部的化肥弹性虽然为负数，但也是高于东北和西部。并且，中部地区毗邻东部，相互合作密切，为东部提供优质劳动力的同时，也承接了大量转移的技术企业，具备同东部合作研发生物技术的基础和条件。因此，中部可以更多学习德国农业机械技术和生物技术齐头并进的发展战略。如推进农业从生产到加工再到销售不同环节紧密整合，优化资源利用，提高农业效率的同时使农产品更加符合市场需求，增加产品的附加值，提升农业竞争力；建立世界先进水平的农业教育培训和技术推广体系，实现农民专业化和职业化，培养农业企业化经营的全才。

3.2.4 西部地区 西部可更多借鉴以色列精准农业现代化模式。西部生态环境相对脆弱，要求西部农业现代化必须兼顾生态环境的保护。广泛分布的高原、山地和沙漠地貌，干旱的气候、不稳定的降水分布、脆弱的生态系统以及人类活动的影响，共同构成了这片土地的生态脆弱性，土壤相对贫瘠、水源尤为匮乏、农作物的生长受限，干旱和土壤退化进一步加剧了这一问题。在这种条件下，西部农业现代化需要推广高效的节水灌溉技术，如滴灌、渗漏灌溉，改善水资源管理，最大限度地减少用水量，提高水资源的利用效率。政府还可以利用精准农业技术，如卫星遥感等，实现作物的精细化管理，根据土壤状况、气候变化等因素，科学决策农事活动。可积极推广有机农业和生态农业的模式，降低农业对生

态环境的负面影响,提升农业的附加值,最终实现经济增长和生态保护的共赢局面。

4 结论

1) 根据技术诱导理论,基于各地区的资源禀赋和模型估计,中国东部发展集约型农业现代化模式;东北地区发展以大型农业机械化为主导的规模型农业现代化模式;中部地区发展农业机械技术和生物技术并重的复合型农业现代化模式;西部发展环境优先与科技创新相结合的精准型农业现代化模式。

2) 将资源禀赋具有代表性的东北地区单独分开和传统的东中西区域划分并列有利于更好的细分农业现代化模式。另外,本研究认为部分特色型农业会加大对西部脆弱生态环境的破坏,再加上传统的特色农业产业技术相对落后不利于新技术的替代和更新,因此在西部地区例如重庆平原地区不建议大规模机械化,而应当发展以色列精准农业模式的路径,如精准灌溉技术和有机农业则更有利于提高资源利用效率和保护生态环境。

参考文献:

- [1] 叶兴庆,程郁,张璐,等.中国农业现代化与农村现代化协调发展战略研究[J].农业经济问题,2023,44(4):13-27.
Ye X Q, Cheng Y, Zhang X, et al. Promoting the coordinated development of agricultural modernization and rural modernization: Empirical analysis based on China's provincial panel data[J]. Issues in Agricultural Economy, 2023, 44(4): 13-27.
- [2] 蓝红星,王婷昱,施帝斌.中国农业农村现代化:生成逻辑、内涵特征与推进方略[J].改革,2023(7):105-115.
Lan H X, Wang T Y, Shi D B. Chinese path to agricultural and rural modernization: Generative logic, connotation characteristics and promotion strategies[J]. Reform, 2023(7): 105-115.
- [3] 罗必良.中国农业现代化:时代背景、目标定位与策略选择[J].国家现代化建设研究,2023,2(1):65-78.
Luo B L. Agricultural modernization in China: Development context, goal setting and strategic options[J]. Journal of Modernization Studies, 2023, 2(1): 65-78.
- [4] 张红宇,张海阳,李伟毅,等.中国特色农业现代化:目标定位与改革创新[J].中国农村经济,2015(1):4-13.
Zhang H Y, Zhang H Y, Li W Y, et al. Agricultural modernization with China characteristics: Target orientation and reform and innovation[J]. Chinese Rural Economy, 2015(1): 4-13.
- [5] Kansanga M, Andersen P, Atuoye K, et al. Contested commons: Agricultural modernization, tenure ambiguities and intra-familial land grabbing in Ghana[J]. Land Use Policy, 2018, 75: 215-224.
- [6] Tian Y Y, Jiang G, Zhou D Y, et al. Systematically addressing the heterogeneity in the response of ecosystem services to agricultural modernization, industrialization and urbanization in the Qinghai-Tibetan Plateau from 2000 to 2018[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 285: 125323.
- [7] 涂圣伟.中国式农业现代化的基本特征、动力机制与实现路径[J].经济纵横,2023(1):84-92.
Tu S W. The basic characteristics, dynamic mechanism and realization path of Chinese agricultural modernization[J]. Economic Review Journal, 2023(1): 84-92.
- [8] 毛飞,孔祥智.中国农业现代化总体态势和未来取向[J].改革,2012(10):9-21.
Mao F, Kong X Z. The general status and the trend in future of agriculture modernization in China[J]. Reform, 2012(10): 9-21.
- [9] 吴丹,王亚华,马超.北大荒农业现代化的绿色发展模式与进程评价[J].农业现代化研究,2017,38(3):367-374.
Wu D, Wang Y H, Ma C. The green development mode and the process evaluation of agricultural modernization in Beidahuang[J]. Research of Agricultural Modernization, 2017, 38(3): 367-374.
- [10] 黄庆华,姜松,吴卫红,等.发达国家农业现代化模式选择对重庆的启示——来自美日法三国的经验比较[J].农业经济问题,2013,34(4):102-109.
Huang Q H, Jiang S, Wu W H, et al. Enlightenment of agricultural modernization mode selection in developed countries to chongqing: A comparison of experiences from the United States, Japan and France[J]. Issues in Agricultural Economy, 2013, 34(4): 102-109.
- [11] Hornbeck R. Nature versus nurture: The environment's persistent influence through the modernization of American agriculture[J]. American Economic Review, 2012, 102(3): 245-249.
- [12] 马楠,陈若雪,沈体雁.中国市域农业现代化发展时空演进与空间溢出机制[J].经济地理,2023,43(6):156-165.
Ma N, Chen R X, Shen T Y. Spatio-temporal evolution and spatial spillover mechanism of agricultural modernization development in China[J]. Economic Geography, 2023, 43(6): 156-165.
- [13] 芦千文,韩馥冰.农业生产性服务业:世界历程、前景展望与中国选择[J].世界农业,2023(5):32-43.
Lu Q W, Han F B. Agricultural productive service industry: World progress, prospect and China's choice[J]. World Agriculture, 2023(5): 32-43.
- [14] 刘景章.农业现代化的“日本模式”与中国的农业发展[J].经济纵横,2002(9):40-44.
Liu J Z. Japanese model of modern agriculture and our agricultural development[J]. Economic Review, 2002(9): 40-44.
- [15] 韩杨,陈雨生,陈志敏.中国高标准农田建设进展与政策完善建议——对照中国农业现代化目标与对比美国、德国、日本经验教训[J].农村经济,2022(5):20-29.
Han Y, Chen Y S, Chen Z M. The process of China's high-standard farmland construction and policy suggestions for improvement[J]. Rural Economy, 2022(5): 20-29.
- [16] 李瑾,冯献,郭美荣,等.“互联网+”现代农业发展模式的国际比较与借鉴[J].农业现代化研究,2018,39(2):194-202.
Li J, Feng X, Guo M R, et al. The international comparison, tendency and reference of the development mode of “Internet+” modern agriculture[J]. Research of Agricultural Modernization, 2018, 39(2): 194-202.
- [17] 邓德胜,祝海波,杨丽华.国外农村现代化模式对我国实现农村全面小康的启示[J].经济问题,2007(2):90-92.
Deng D S, Zhu H B, Yang L H. Enlightenment of foreign rural

- modernization model to realize comprehensive well-off society in rural areas in China[J]. *On Economic Problems*, 2007(2): 90-92.
- [18] 曹俊杰. 新中国成立70年农业现代化理论政策和实践的演变[J]. *中州学刊*, 2019(7): 38-45.
- Cao J J. Research on the evolution of the theory, policy and practice of agricultural modernization in the seventy years since the founding of new China[J]. *Academic Journal of Zhongzhou*, 2019(7): 38-45.
- [19] 刘德定. 邓小平的“两个飞跃”思想与中国农业现代化的两种模式[J]. *社会主义研究*, 2014(4): 68-73.
- Liu D D. Deng xiaoping's "two-leaps" thoughts and the two patterns of China's agricultural modernization[J]. *Socialism Studies*, 2014(4): 68-73.
- [20] 卢嘉显, 陈秧分, 康永兴. 面向新发展格局的我国农业农村现代化探讨[J]. *农业现代化研究*, 2022, 43(2): 211-220.
- Lu Y J, Chen Y F, Kang Y X. Agricultural and rural modernization under the new development pattern in China[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2022, 43(2): 211-220.
- [21] 郑高强, 付静, 钟海国. 中国特色农业现代化道路模式的选择[J]. *农业现代化研究*, 2008, 29(4): 390-394.
- Zheng G Q, Fu J, Zhong H G. Patterns selection of modernization of agriculture with Chinese characteristics[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2008, 29(4): 390-394.
- [22] 孔祥智, 李圣军. 试论我国现代农业的发展模式[J]. *教学与研究*, 2007(10): 9-13.
- Kong X Z, Li S J. Discussion on the development model of modern agriculture in China[J]. *Teaching and Research*, 2007(10): 9-13.
- [23] 孔祥智, 谢东东. 中国式农业现代化: 探索历程、基本内涵与实施路径[J]. *浙江工商大学学报*, 2023(2): 82-91.
- Kong X Z, Xie D D. Chinese path to agricultural modernization: Exploration process, basic conception and implementation path[J]. *Journal of Zhejiang Gongshang University*, 2023(2): 82-91.
- [24] Emerick K, de Janvry A, Sadoulet E, et al. Technological innovations, downside risk, and the modernization of agriculture[J]. *American Economic Review*, 2016, 106(6): 1537-1561.
- [25] Holmes R A. The impact of state labor regulations on manufacturing input demand during the progressive era[J]. *The Journal of Economic History*, 2005, 65(2): 531-532.
- [26] 张晓颖, 王小林. 六次产业视角下我国农村产业融合的路径与发展——兼论日本六次产业化的启示[J]. *贵州社会科学*, 2023(1): 152-160.
- Zhang X Y, Wang X L. The path and development of China's rural industrial integration from the perspective of six industries: Also on the enlightenment of Japan's six industrialization[J]. *Guizhou Social Sciences*, 2023(1): 152-160.
- [27] 王太明, 王丹. 德国农业合作社的发展现状、特点及启示[J]. *农业经济*, 2022(4): 29-31.
- Wang T M, Wang D. The development status, characteristics and enlightenment of German agricultural cooperatives[J]. *Agricultural Economy*, 2022(4): 29-31.
- [28] 钟春艳, 张斌. 德国农业农村科研管理及创新政策[J]. *科学管理研究*, 2019, 37(6): 171-176.
- Zhong C Y, Zhang B. German agricultural science and technology research management and innovation policy[J]. *Scientific Management Research*, 2019, 37(6): 171-176.
- [29] 柳一桥. 德国农业职业教育对我国新型职业农民培育的启示[J]. *农业经济*, 2018(4): 64-66.
- Liu Y Q. The enlightenment of German agricultural vocational education on the cultivation of new professional farmers in China[J]. *Agricultural Economy*, 2018(4): 64-66.
- [30] 易小燕, 吴勇, 尹昌斌, 等. 以色列水土资源高效利用经验对我国农业绿色发展的启示[J]. *中国农业资源与区划*, 2018, 39(10): 37-42, 77.
- Yi X Y, Wu Y, Yin C B, et al. The enlightenment of Israel's efficient utilization of land and water resources to the green development of agriculture in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(10): 37-42, 77.
- [31] 慕慧娟, 崔光莲. 资源环境约束下的以色列农业发展对中国西北地区的启示[J]. *世界农业*, 2015(5): 56-59, 85.
- Mu H J, Cui G L. The enlightenment of Israel's agricultural development under the constraints of resources and environment to Northwest China[J]. *World Agriculture*, 2015(5): 56-59, 85.
- [32] 贺立, 吕光明. 中国省份要素替代弹性估计及增长效应研究[J]. *中国经济问题*, 2022(4): 109-124.
- He L, Lü G M. Research on estimating the elasticity of factor substitution and analyzing its growth effect in China[J]. *China Economic Studies*, 2022(4): 109-124.
- [33] 高道明, 王丽红, 田志宏. 我国小麦生产的要素替代关系研究[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(6): 169-176.
- Gao D M, Wang L H, Tian Z H. Research on the factor substitution relationships of wheat production[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(6): 169-176.
- [34] 陈芙蓉, 赵一夫. 中国玉米生产要素替代关系及技术进步路径分析——基于主产省2000—2016年数据[J]. *湖南农业大学学报(社会科学版)*, 2019, 20(1): 26-34.
- Chen F R, Zhao Y F. Analysis on substitution relation of corn production factor and path of technological progress in China: Based on the data of major producing provinces from 2000 to 2016[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Social Sciences)*, 2019, 20(1): 26-34.

(责任编辑: 孟岑)