编者按：“锚定建设农业强国目标，把推进乡村全面振兴作为新时代新征程‘三农’工作的总抓手”“强国必先强农，农强方能国”。《中共中央 国务院关于学习运用“千村示范、万村整治”工程经验有力有效推进乡村全面振兴的意见》（2024年中央一号文件）也再次强化了重农强农，同时为推进乡村全面振兴、加快建设农业强国指明了奋斗方向和实践道路。为深度践行科技期刊使命，本刊开辟了特色栏目——“专稿”。该栏目采取定向组稿约稿模式，旨在瞄准世界农业科技前沿，聚焦农业基础研究和实践应用，关注“三农”关键核心技术，以推进“农业信息流”在产学研用中的高效贯通。

农业数字化转型与农业碳减排耦合协调发展测度及影响因素分析

李　平[1,2]　汪　果[1,2]

1.湖北工业大学经济与管理学院，湖北 武汉 430068

2.湖北农业装备制造产业发展研究中心，湖北 武汉 430068

摘要：探讨农业数字化转型与农业碳减排协调发展机理并构建评价指标体系，应用熵权－TOPSIS法与耦合协调度模型，测度我国2010－2021年各省份农业数字化转型与农业碳减排综合发展水平及两者耦合协调度，进而采用Tobit回归模型分析耦合协调度的影响因素。结果表明：各省份农业数字化转型与农业碳减排综合评价值和耦合协调度均呈稳定上升趋势，区域差异均呈东、中、东北、西部地区依次递减的趋势，且仅有东部地区处于协调状态；大部分省份仍处于失调状态，区域之间耦合协调的阶段差距持续稳定；经济发展水平、能源利用效率、居民收入水平、农业支出、人才资源和专利产出对耦合协调度有正向促进作用，绿色发展水平对耦合协调度有负向抑制作用。

关键词：农业数字化转型；农业碳减排；耦合协调度模型

中图分类号：F320.1　　DOI：10.3969/j.issn.2097－065X.2024.06.001

0　引言

数字化和绿色化是农业发展新格局下的两大时代主题。促进农业数字化转型与农业碳减排耦合协调发展，是稳步推进农业实现高质量发展的主要动力，更是全面实施乡村振兴战略的重点任务与重要保障。当前，我国农业正处于传统农业向现代农业转型时期，存在化肥农药等农用物资投入比重过大且利用率不高、污染日益严重、现有耕地数量减少和耕地质量降低等问题，导致农业碳排放总量大，农业绿色低碳发展亟需新动力来助推农业碳减排目标的实现。而数字经济作为人类社会迈向数字革命时代的一种新经济形态，迅速成为经济增长的新动能和新引擎，数字经济的高速发展加快了农业数字化转型步伐。然而，在农业数字化转型与碳减排发展存在基础不匹配、阶段不同步、路径取向不明等情况下，农业数字化转型与碳减排目标结合呈片面和割裂状。因此，有必要探索农业数字化转型与农业碳减排的协调发展机制，为破解农业数字化与低碳化“两化”融合发展难题提供解决思路。

国内外学者针对农业数字化转型与农业碳减排已展开广泛深入研究。对农业数字化转型的研究报道涉及现实表征、效能分析、运营管理、福利分配和实施路径等方面[1-5]。对农业碳减排的研究主要包含碳减排成效评估、碳减排路径、区域协同减排等[6-8]。在农业数字化转型与碳减排水平测算方面，关于农业数字化转型的测度，目前尚缺乏被广泛认可的评价方式，多数文献通过构建农业数字化转型指标体系来测度农业数字化转型水平[9-11]；而针对农业碳减排的测算方法比较多样，有依托确立碳源和对应的碳排放系数的方式来计算农业碳排放总量[12]，有使用被普遍接受的数据包络分析方法来测算农业碳排放效率[13]，有通过构建碳减排、碳补偿潜力指数来测度农业碳减排潜力或碳补偿潜力[14-15]，亦有通过构建农业碳减排评价指标体系来测算农业碳减排水平[16]。此外，在影响因素分析方面，耕地、劳动力、资本、科学技术、数据等生产要素

基金项目：2022年湖北省教育厅科学技术研究计划重点项目“数字经济核心产业集聚与绿色全要素生产率提升研究”（D20221407）；2023年武汉市科创局知识创新专项基础研究项目“数字经济集聚赋能长江经济带产业绿色高质量发展：作用机理、效应及空间异质性研究”（2023010201010120）

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

因素被认为对农业数字化转型的影响较大[17-18]；农业经济发展水平、农业机械化水平、农业生产效率、农村人口、环境规制水平和农业公共投资等因素被认为对农业碳减排的影响较大[19-22]。在农业数字化转型与农业碳减排二者联系方面，有学者发现数字化在实现农业净零排放方面发挥着重要作用[23]，有研究认为数字化水平可以显著降低农业生产的碳强度[24]，还有研究认为数字化转型和信息技术促进了农业高质量发展和绿色增长[25]；另外，部分学者则认为数字化将增加碳排放，数字技术的高能耗会加剧能源消耗和碳排放[26]，数字经济中的核心产业 ICT 行业的发展显著刺激了二氧化碳的排放[27]；还有学者认为数字经济与碳排放之间存在倒 U 型关系[28-29]。

综上所述，目前针对农业数字化与农业碳减排的研究侧重于前者对后者的单向关联研究，较少有文献对二者耦合关系以及融合发展的影响因素进行专门研究。本文基于系统耦合视角，构建农业数字化转型与农业碳减排耦合协调度模型，通过对二者系统耦合协调度的定量测度，刻画出二者的双向互动关系和动态变化，进一步探究影响农业数字化与农业碳减排二者协同推进的制约因素，进而提出相应的政策建议。

1 农业数字化转型与农业碳减排协调发展机理

农业数字化转型与农业碳减排之间存在密切的动态相互作用关系，其机理见图 1。

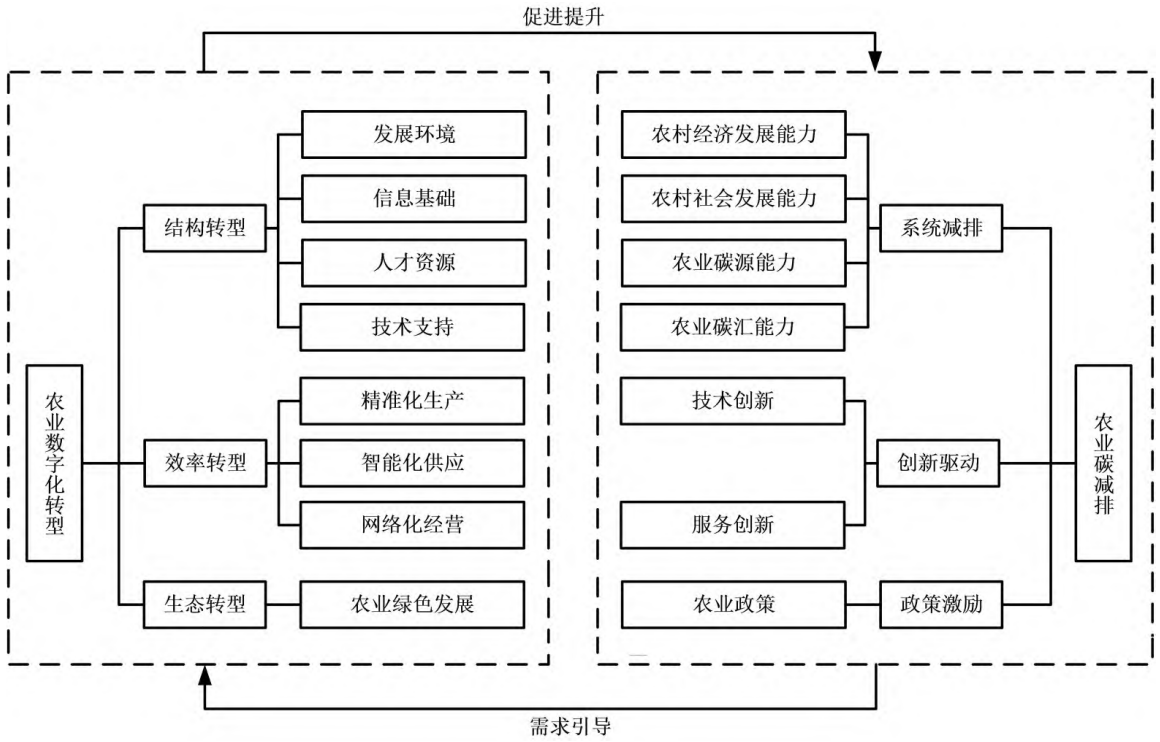

图 1 农业数字化转型与碳减排融合发展机理

农业数字化转型由农业各要素的数字化和以数字化的手段管理农业各要素[2]，主要是通过引导农业传统资源禀赋依赖型向高端数字化要素依赖型转变，包括农业结构的变迁、发展效率的提升和农业绿色转型。农业碳减排主要依靠内在的系统减排能力和外在的创新驱动与政策激励。本文从系统耦合视角展开研究，农业数字化转型与农业碳减排之间耦合协调度的大小反映了二者相互依赖、相互促进的影响程度，也反映了二者变化速度和方向的一致性状态和程度。当数字化被应用于农业生产、流通、经营等环节，农业的系统减排能力和减排的创新驱动对数字化转型的需求也进一步加快农业数字化转型，使得二者之间呈现高度耦合状态。

农业数字化转型会促进农业碳减排能力提升。当前我国农业绿色生产方式转型尚未完成，农业碳减排形势依然严峻，制约着农业绿色高质量发展。而数字技术嵌入农业要素配置体系，改变了农业发展环境和信息基础，促成农业结构转型，且数字技术被应用于农业精准化生产、智能化供应和网络化经营促成农业效率转型，有利于助推农业绿色发展，从而提升农业碳减排能力。农业碳减排的目标需求引导农业数字化转型。推进农业减排固碳不仅是农业生态文明建设的重要内容，而且是农业现代化建设的重要方向。要实现 2030 年前碳达峰、2060 年前

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

碳中和的“双碳”战略目标，农业碳减排既是重要举措，也是潜力所在。但农业低碳发展存在诸如农业现代化水平低、农民的低碳意识薄弱、农业基础设施建设进程缓慢、粗放式农业生产方式较普遍等问题[30]，亟需发展数字农业，实现农业数字化转型，依托农业基础设施的数字化和农业投入产出控制的精准化，实现农业对环境负面影响的最小化[3]，解决农业低碳发展难题。农业绿色高质量发展需要农业数字化转型与农业碳减排的有序协同，也只有二者的耦合协同、相互促进，才能实现农业绿色高质量发展。

2　分析方法

2.1　指标体系的建立与数据来源

2.1.1　评价指标体系构建

本文借鉴相关学者研究成果[8,11,16,31-35]，分别构建农业数字化转型与农业碳减排的耦合协调评价指标体系。农业数字化转型系统中，选择 6 个方面、23 个指标总体反映农业数字化转型发展水平；农业碳减排系统中，选择 6 个方面、17 个指标来总体反映农业碳减排发展水平。具体评价指标体系见表 1。

表 1　农业数字化转型与碳减排耦合协调评价指标体系

系统层	准则层	指标层	权重	指标属性
农业数字化转型系统	农业数字化转型发展环境	科学研究和技术服务业固定资产投资（亿元）	0.040 6	+
		信息传输、软件和信息技术服务业固定资产投资（亿元）	0.025 8	+
		交通运输、仓储和邮政业固定资产投资（亿元）	0.022 7	+
		农业机械总动力（万 kW）	0.038 0	+
		农村用电量（亿 kW·h）	0.073 2	+
	农业数字化转型信息基础	农村宽带接入用户（万户）	0.057 9	+
		光缆线路长度（万 km）	0.036 7	+
		移动电话交换机容量（万户）	0.025 2	+
		农村有线广播电视用户数（万户）	0.046 5	+
	农业数字化转型人才资源	地方财政教育支出（亿元）	0.022 0	+
		信息传输、软件和信息技术服务业从业人员（万人）	0.063 7	+
		研究与试验发展（R&D）人员（万人）	0.057 4	+
	农业数字化转型技术支持	电信业务总量（亿元）	0.031 9	+
		有 R&D 活动的企业数量（个）	0.097 5	+
	农业数字化转型产业效益	有电子商务交易活动企业数（个）	0.062 8	+
		电子商务销售额（亿元）	0.073 9	+
		邮政业网点（个）	0.038 4	+
		邮政业务总量（亿元）	0.053 3	+
		快递业务收入（亿元）	0.084 6	+
	农业数字化转型绿色发展	单位面积农药投用量（kg/hm²）	0.002 8	−
		单位面积化肥施用量（kg/hm²）	0.006 7	−
		单位面积塑料薄膜使用量（kg/hm²）	0.003 3	−
		有效灌溉面积（khm²）	0.035 3	+
农业碳减排系统	农村经济发展能力	农业总产值（亿元）	0.069 6	+
		农业劳动生产率（元/人）	0.069 8	+
		土地产出率（万元/hm²）	0.088 6	+
		人均粮食产量（kg/人）	0.068 4	+
		第一产业增加值比重（%）	0.036 6	+
	农村社会发展能力	农村居民人均可支配收入（元）	0.041 3	+
		农村居民消费水平（元）	0.119 5	+
		城镇化率（%）	0.026 3	+
		乡村恩格尔系数（%）	0.015 3	−
	农业碳源能力	柴油使用强度（kg/hm²）	0.006 8	−
		农业碳排放密度（kg/hm²）	0.014 2	−
	农业碳汇能力	农业能源利用效率（吨标准煤/万元）	0.167 6	+
		森林覆盖率（%）	0.044 7	+
		人均公园绿地面积（m²/人）	0.024 6	+
		造林面积（khm²）	0.067 5	+
	农业技术创新	农业发明授权、外观设计和实用新型专利产出总和（项）	0.099 0	+
	农业政策激励	农业支出（亿元）	0.040 1	+

注：经济指标统一以 2010 年为基期，剔除通货膨胀率。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.1.2 数据来源

本文所用数据为 2010－2021 年全国 30 个省份（因数据可得性原因，研究未涉及西藏自治区）的面板数据，各指标基础数据来源于《中国统计年鉴》（2011－2022 年）、《中国农村统计年鉴》（2011－2022 年）、《中国科技统计年鉴》（2011－2022 年）、《中国能源统计年鉴》（2011－2022 年）、《中国社会统计年鉴》（2011－2022 年）、《中国固定资产投资统计年鉴》（2011－2022 年）、《中国投资领域统计年鉴》（2011－2022 年）以及各省份统计年鉴（2011－2022 年）。农业碳排放数据系作者借鉴田云等[36]采用的 IPCC 碳排放系数法，即根据柴油、化肥、农药、农膜、灌溉及翻耕六类碳源投入量乘以其碳排放系数进行测算所得。农业专利数据来源于国家知识产权局。对于部分缺失数据值，本文采用线性插值法予以补齐。

2.2 熵权－TOPSIS 评价模型

本文采用熵权－TOPSIS 法对农业数字化转型与农业碳减排水平进行测度，具体计算步骤如下：

第一步，为消除不同测度指标在数量级和量纲方面的不一致性，首先运用极差法对表 1 中各测度指标作标准化处理：

$$\text{正向指标：}X'_{ij}=\frac{X_{ij}-\min(X_{ij})}{\max(X_{ij})-\min(X_{ij})} \tag{1}$$

$$\text{负向指标：}X'_{ij}=\frac{\max(X_{ij})-X_{ij}}{\max(X_{ij})-\min(X_{ij})} \tag{2}$$

式中，i 表示省份；j 表示测度指标；X_{ij} 和 X'_{ij} 分别为原始的和标准化后的测度指标值；$\max(X_{ij})$ 和 $\min(X_{ij})$ 分别为 X_{ij} 的最大值与最小值。

第二步，计算第 i 个省份占第 j 项指标的比重 P 值：

$$P_{ij}=\frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}X'_{ij}} \tag{3}$$

第三步，计算第 j 项指标的熵值和差异系数：

$$e_j=-1/\ln n\sum_{i=1}^{n}P_{ij}\ln P_{ij}\qquad 0\leqslant e_j\leqslant 1 \tag{4}$$

$$g_j=1-e_j\qquad 0\leqslant g_j\leqslant 1 \tag{5}$$

第四步，计算第 j 项指标占所有指标的权重：

$$w_j=\frac{g_j}{\sum_{j=1}^{m}g_j} \tag{6}$$

第五步，构建农业数字化转型与碳减排水平测度指标的加权决策矩阵 $\boldsymbol{R}$：

$$\boldsymbol{R}=[r_{ij}]_{m\times n} \tag{7}$$

式中，$r_{ij}=w_jX'_{ij}$。

第六步，根据加权矩阵 $\boldsymbol{R}$ 确定最优方案 Q_j^+ 与最劣方案 Q_j^-：

$$Q_j^+=\max(r_{i1},r_{i2},\cdots,r_{im}) \tag{8}$$

$$Q_j^-=\min(r_{i1},r_{i2},\cdots,r_{im}) \tag{9}$$

第七步，计算各测度方案与最优方案 Q_j^+ 及最劣方案 Q_j^- 的欧氏距离 d_i^+ 和 d_i^-：

$$d_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(Q_j^+-r_{ij})^2} \tag{10}$$

$$d_i^-=\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(Q_j^--r_{ij})^2} \tag{11}$$

第八步，计算各测度方案与理想方案的相对贴进度 S_i：

$$S_i=\frac{d_i^-}{d_i^++d_i^-} \tag{12}$$

其中，相对贴进度 S_i 介于 $0\sim1$，S_i 值越大，表明省份 i 的农业数字化转型与碳减排水平越优；反之，省份 i 的农业数字化转型与碳减排水平越差。

2.3 耦合协调度模型

耦合协调度模型主要用于评价两个及以上系统彼此影响的现象，反映系统间相互依赖、促进的动态关联关系。本文对农业数字化转型和农业碳减排两大系统间耦合协调度的分析可以反映两者之间长期以来的互动关系与动态变化。耦合度表达式为

$$C=\sqrt{\frac{S_1S_2}{\left(\frac{S_1+S_2}{2}\right)^2}} \tag{13}$$

式中，S_1 和 S_2 分别为农业数字化转型和农业碳减排发展水平；C 为系统耦合度，$C\in[0,1]$，C 越大说明农业数字化转型与农业碳减排子系统相互关系的匹配程度越高。

耦合度只能说明系统间的耦合紧密水平，无法反映协调发展水平的高低，因此，需引入耦合协调度来反映农业数字化转型与农业碳减排间的协调程度。耦合协调度表达式为

$$D=\sqrt{CT} \tag{14}$$

$$T=\alpha S_1+\beta S_2 \tag{15}$$

式中，D 为耦合协调度；T 为农业数字化转型与农业碳减排两个系统的综合评价指数，用于反映二者的整体状况；α、β 为待定系数，用于衡量农业数字化转型与农业碳减排的相对重要程度，且 $\alpha+\beta=1$，本文认为二者同等重要，所以 α、β 均取 0.5。

为直观反映农业数字化转型与农业碳减排的耦合协调程度，本文借鉴廖重斌[37]、肖华堂等[38]的分类方式，将耦合协调度划分为多个发展阶段，见表 2。

2.4 农业数字化转型与碳减排耦合协调度的影响因素分析

耦合协调发展受自身及众多外部驱动因素的影响，本文在已有研究的基础上[39]，结合实际情况、遵循数据可得性原则，选取耦合协调度作为被解释变量，选取经济发展水平、能源利用效率、绿色发展水平、居民收入水平、农业支出、人才资源、专利产出等作为解释变量，见表 3。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　耦合协调度分类

协调等级	耦合协调度	协调程度	协调等级	耦合协调度	协调程度
1	[0,0.099 9)	极度失调	6	[0.499 9,0.599 9)	勉强协调
2	[0.099 9,0.199 9)	严重失调	7	[0.599 9,0.699 9)	初级协调
3	[0.199 9,0.299 9)	中度失调	8	[0.699 9,0.799 9)	中级协调
4	[0.299 9,0.399 9)	轻度失调	9	[0.799 9,0.899 9)	良好协调
5	[0.399 9,0.499 9)	濒临失调	10	[0.899 9,1.000 0]	优质协调

表 3　耦合协调影响因素

变量类型	变量名称	变量符号	变量说明	单位
被解释变量	耦合协调度	D	经耦合协调模型计算得出	
解释变量	经济发展水平	Eco	土地产出率	万元/hm^2
	能源利用效率	Ene	农业能源利用效率	t 标准煤/万元
	绿色发展水平	Gre	单位面积农药投用量	kg/hm^2
	居民收入水平	Inc	农村居民人均可支配收入	元
	农业支出	Agr	地方财政农林水事务支出	亿元
	人才资源	Per	地方财政教育支出	亿元
	专利产出	Pat	农业发明授权、外观设计和实用新型专利产出总和	项

农业数字化转型与农业碳减排耦合协调度 D 的取值范围为 0～1，所以被解释变量属于受限因变量，符合 Tobit 回归模型的设定条件[40]，因此选择 Tobit 模型对二者耦合协调度的驱动力做进一步探索，将误差降到最小，模型如下：

$$D_{it}=\alpha+\beta_1 Eco_{it}+\beta_2 Ene_{it}+\beta_3 Gre_{it}+\beta_4 Inc_{it}+\beta_5 Agr_{it}+\beta_6 Per_{it}+\beta_7 Pat_{it}+\varepsilon_{it} \quad (16)$$

式中，D_{it} 为第 i 省区第 t 年的耦合协调度；α 为常数项；β_1 ～β_7 为各变量的待估参数；ε_{it} 为第 i 省区第 t 年的随机误差项。

3　农业数字化转型与碳减排协调发展的实证分析

3.1　农业数字化转型与碳减排综合发展水平

运用熵权-TOPSIS 法对中国 30 个省份 2010—2021 年农业数字化转型与农业碳减排发展水平进行测度，对各地区历年测算值取均值，具体见表 4。

表 4　农业数字化转型与碳减排的时空特征

区域	省份	数字化转型	碳减排	区域	省份	数字化转型	碳减排
东部地区	北京	0.267 5	0.252 0	东北地区	黑龙江	0.153 6	0.268 9
	天津	0.065 3	0.140 6		吉林	0.086 6	0.183 8
	河北	0.227 5	0.197 6		辽宁	0.151 3	0.163 9
	上海	0.255 8	0.150 9		均值	0.130 5	0.205 5
	江苏	0.517 5	0.221 9	西部地区	内蒙古	0.110 4	0.30 95
	浙江	0.403 8	0.227 7		广西	0.118 0	0.184 6
	福建	0.181 1	0.217 2		重庆	0.091 8	0.227 7
	山东	0.345 8	0.244 0		四川	0.219 3	0.204 8
	广东	0.540 5	0.228 0		贵州	0.088 8	0.223 6
	海南	0.023 2	0.412 3		云南	0.110 3	0.335 2
	均值	0.282 8	0.229 2		陕西	0.122 9	0.167 0
中部地区	山西	0.089 3	0.223 4		甘肃	0.068 2	0.146 5
	安徽	0.198 3	0.169 5		青海	0.032 0	0.105 5
	江西	0.132 8	0.185 7		宁夏	0.029 7	0.121 1
	河南	0.240 2	0.208 0		新疆	0.122 1	0.160 9
	湖北	0.177 0	0.198 0		均值	0.101 2	0.198 8
	湖南	0.179 9	0.249 9	全国	均值	0.178 4	0.211 0
	均值	0.169 6	0.205 7				

从农业数字化转型发展水平来看，中国农业数字化转型发展水平整体偏低，且存在明显的省际差

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

异与两极分化现象。农业数字化转型发展水平整体均值为0.178 4，说明农业数字化转型仍有较大提升空间。可以发现，头部省份（广东、江苏、浙江、山东）存在明显的领先优势，其中，广东省（0.540 5）农业数字化转型发展水平最高，而海南省（0.023 2）农业数字化转型发展水平最低，均值极差达到0.517 3，表明中国农业数字化转型发展存在两极分化式的不均衡空间分布特征。而农业数字化转型发展水平呈东、中、东北、西部地区依次递减的趋势，且仅有东部地区农业数字化转型发展水平均值高于全国水平均值，表明中国农业数字化转型发展存在明显的省际区域差异。

从农业碳减排发展水平来看，2010—2021年中国各省份农业碳减排发展水平整体均值为0.211，均值极差达到0.306 8。虽然农业碳减排发展水平同样呈东、中、东北、西部地区依次递减的趋势，且仅有东部地区农业碳减排发展水平均值高于全国水平均值，但地区间的均值极差为0.030 4，各地区农业碳减排发展水平相对均衡。总体来说，各地区农业碳减排发展程度和所处阶段要优于农业数字化转型的发展，东部地区借助地理优势在农业高质量总体发展水平上处于领先地位，相较于其他省份而言，头部省份具有较好的经济基础，且在技术、人才等方面具有较强的集聚效应，加之近年来人民对于生态文明以及美好生活的追求，外加生态文明理念与“双碳”战略目标的持续推进，使得这些地区农业碳减排的发展领先于其他省份。

3.2 农业数字化转型与碳减排耦合协调分析

依据耦合协调度模型对各省份农业数字化转型与农业碳减排的耦合协调度进行测度，分析中国各省份2010—2021年农业数字化转型与农业碳减排的耦合协调关系，结果见表5。

表5 农业数字化转型与碳减排耦合协调情况

省份	2010年			2016年			2021年		
	耦合度	耦合协调度	评价	耦合度	耦合协调度	评价	耦合度	耦合协调度	评价
北京	0.982 8	0.458 2	濒临失调	0.996 8	0.501 8	勉强协调	0.992 3	0.564 2	勉强协调
天津	0.853 1	0.260 3	中度失调	0.942 9	0.322 1	轻度失调	0.961 0	0.335 6	轻度失调
河北	0.993 3	0.403 8	濒临失调	1.000 0	0.468 7	濒临失调	0.992 2	0.499 9	勉强协调
山西	0.798 9	0.368 8	轻度失调	0.877 7	0.379 5	轻度失调	0.982 2	0.377 6	轻度失调
内蒙古	0.841 7	0.404 0	濒临失调	0.867 7	0.437 0	濒临失调	0.965 6	0.418 4	濒临失调
辽宁	0.994 1	0.359 0	轻度失调	1.000 0	0.399 2	轻度失调	0.999 8	0.422 3	濒临失调
吉林	0.922 5	0.318 9	轻度失调	0.921 6	0.362 3	轻度失调	0.949 0	0.386 2	轻度失调
黑龙江	0.965 2	0.381 9	轻度失调	0.958 2	0.464 5	濒临失调	0.962 6	0.486 4	濒临失调
上海	0.988 1	0.363 5	轻度失调	0.955 4	0.452 6	濒临失调	0.976 6	0.505 3	勉强协调
江苏	0.903 7	0.456 7	濒临失调	0.907 3	0.596 3	勉强协调	0.934 8	0.660 6	初级协调
浙江	0.979 3	0.439 3	濒临失调	0.962 6	0.561 1	勉强协调	0.946 8	0.625 3	初级协调
安徽	1.000 0	0.346 6	轻度失调	0.996 0	0.431 6	濒临失调	0.989 2	0.502 1	勉强协调
福建	0.96 57	0.355 7	轻度失调	0.993 5	0.457 6	濒临失调	0.999 9	0.508 9	勉强协调
江西	0.941 5	0.337 3	轻度失调	0.982 0	0.395 4	轻度失调	0.999 2	0.457 1	濒临失调
山东	0.976 0	0.446 4	濒临失调	0.984 9	0.543 7	勉强协调	0.986 0	0.637 3	初级协调
河南	0.996 3	0.406 7	濒临失调	0.996 6	0.472 6	濒临失调	0.995 3	0.534 4	勉强协调
湖北	0.984 5	0.362 2	轻度失调	0.999 5	0.435 0	濒临失调	0.997 3	0.493 3	濒临失调
湖南	0.941 0	0.388 1	轻度失调	0.984 5	0.460 9	濒临失调	0.996 1	0.507 0	勉强协调
广东	0.929 1	0.472 4	濒临失调	0.913 5	0.595 3	勉强协调	0.909 8	0.686 0	初级协调
广西	0.920 8	0.324 3	轻度失调	0.966 3	0.378 4	轻度失调	0.998 8	0.450 8	濒临失调
海南	0.373 4	0.285 2	中度失调	0.422 3	0.317 9	轻度失调	0.575 4	0.344 6	轻度失调
重庆	0.648 5	0.383 4	轻度失调	0.956 6	0.352 9	轻度失调	0.995 3	0.400 2	濒临失调
四川	0.996 0	0.386 3	轻度失调	0.999 6	0.475 2	濒临失调	0.990 9	0.530 7	勉强协调
贵州	0.754 5	0.334 8	轻度失调	0.865 9	0.378 1	轻度失调	0.990 6	0.407 7	濒临失调
云南	0.779 2	0.384 7	轻度失调	0.853 2	0.434 9	濒临失调	0.917 6	0.503 9	勉强协调
陕西	0.942 7	0.326 7	轻度失调	0.991 3	0.378 4	轻度失调	0.999 6	0.427 1	濒临失调
甘肃	0.867 9	0.288 3	中度失调	0.915 8	0.312 7	轻度失调	0.976 2	0.347 6	轻度失调
青海	0.864 2	0.228 1	中度失调	0.844 0	0.238 4	中度失调	0.857 4	0.257 6	中度失调
宁夏	0.807 2	0.233 0	中度失调	0.784 1	0.242 3	中度失调	0.806 4	0.264 6	中度失调
新疆	0.963 0	0.343 7	轻度失调	0.985 5	0.389 2	轻度失调	0.997 7	0.399 9	濒临失调

耦合度数据可以反映农业数字化转型与农业碳减排的总体匹配程度，从表5可以看出，大多数省份

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

都达到高度匹配（$C > 0.8$）的程度，说明中国大多数省份的农业数字化转型与农业碳减排之间关系密切。耦合协调度数据可以反映农业数字化转型与农业碳减排协调发展水平的高低，总体来看，我国农业数字化转型与农业碳减排的协同效应呈平稳增强态势，表明我国农业绿色发展的内生动力在不断加强，已经初步形成良性协调互动的农业绿色发展协同机制，不断推动农业加速实现绿色转型的进程。此外，中国大部分省份农业数字化转型与农业碳减排的协调发展态势仍处于失调状态，位于东部地区的省份，其农业数字化转型与农业碳减排的耦合协调情况明显优于其他地区省份，呈现出两极分化现象。从耦合协调排名来看，广东、江苏、山东、浙江、北京五个省市历年排名始终靠前，而宁夏、青海、海南等地的排名始终相对靠后，且二者农业数字化转型与农业碳减排耦合协调水平差距较大，说明中国各省份农业数字化转型与农业碳减排的协调发展呈现空间分布不平衡的特征，各地区农业数字化转型与碳减排协同推进仍有较大提升空间。从协调发展的类型来看，达到协调状态的省份属东部省份居多，广东、江苏、浙江、山东的农业数字化转型与农业碳减排发展现在已基本达到初级协调状态，北京、上海、福建也已达到勉强协调状态。值得注意的是，山西、内蒙古、重庆等地的农业数字化转型与农业碳减排耦合协调情况历年波动较为明显，且协调水平出现了明显的下降趋势；而安徽、福建、广西等地农业数字化转型与农业碳减排耦合协调水平上升趋势较明显。另外，上海、江苏、浙江、安徽、福建、山东、湖南、广东、四川、云南等地的农业数字化转型与农业碳减排耦合协调情况由 2010 年的失调状态到 2021 年的协调状态，跨越了 3 个不同的协调程度等级。除此之外，各地区历年农业数字化转型与农业碳减排大多处于轻度或濒临失调状态，说明中国各地区农业数字化转型与碳减排之间的协同适配仍有待提高，依旧要注意筑牢和发挥好二者在农业发展中的耦合协调作用。

3.3　农业数字化转型与碳减排耦合协调度的影响因素分析

因 LR 检验结果强烈拒绝原假设，故认为存在个体效应，本文使用随机效应的面板 Tobit 回归。研究中运用 Stata17.0 软件对影响 2010－2021 年农业数字化转型与农业碳减排耦合协调发展的因素进行 Tobit 回归分析（表 6）。结果表明，经济发展水平（Eco）、能源利用效率（Ene）、绿色发展水平（Gre）、居民收入水平（Inc）、农业支出（Agr）、人才资源（Per）、专利产出（Pat）和常数项均在 1%水平显著。

表 6　耦合协调发展影响因素的 Tobit 回归结果

变量	系数	标准差	Z 值	P 值
经济发展水平	0.001 260 0***	0.000 138 1	9.10	0
能源利用效率	0.360 000 0***	0.015 059 0	23.91	0
绿色发展水平	－0.000 549 0***	0.000 153 0	－3.59	0
居民收入水平	0.000 004 2***	0.000 000 5	9.16	0
农业支出	0.000 067 6***	0.000 014 3	4.73	0
人才资源	0.000 069 4***	0.000 012 5	5.55	0
专利产出	0.000 006 2***	0.000 000 7	9.06	0
常数项	0.267 000 0***	0.009 499 5	28.06	0

注：*、**、***分别代表在 10%、5%、1%统计水平上显著。

（1）经济发展水平在 1%水平上显著，且系数为正，与农业数字化转型和农业碳减排协调呈正相关，这表明农业土地产出率的不断提升对促进农业数字化转型与农业碳减排协调发展具有显著的正向作用。较高的土地产出率能够推动农业的数字化转型与农业碳排放的减少，这与实际相符合。

（2）能源利用效率在 1%水平上显著，与农业数字化转型和农业碳减排的协调发展呈正相关，说明农业能源利用效率的持续提高对促进二者协调发展具有显著的正向作用。提高农业能源利用效率一方面是农业不断向数字化转型的体现，另一方面也是农业减少碳排放的方向。提高农业能源利用效率，有利于农业绿色发展和数字化转型，从而推动农业数字化转型与农业碳减排的协调发展。

（3）绿色发展水平在 1%水平上显著，且与农业数字化转型和农业碳减排的协调发展呈负相关，表明农药施用强度对二者协调发展产生了显著的负向作用。单位面积农药投用量的增加与农业绿色发展相悖，不利于农业碳排放的减少，阻碍了农业数字化转型与农业碳减排的协调发展。本文选取的农药施用强度为代表农业绿色发展水平的负向指标，与农业数字化转型和农业碳减排的协调发展呈负相关，

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

这与实际相符合。

(4)居民收入水平在1%水平上显著,与农业数字化转型和农业碳减排的协调发展呈正相关,说明农村居民人均可支配收入的提高对促进二者协调发展具有显著的正向作用。这可能是因为农村居民收入水平的提高会促进居民环保意识的提升,进而间接影响了农业碳减排的减少,推动农业数字化转型与农业碳减排的协调发展。

(5)农业支出在1%水平上显著,与农业数字化转型和农业碳减排的协调发展呈正相关,说明地方财政农业支出的增加对促进二者协调发展具有显著的正向作用。地方财政农业支出用于支援农业生产或农业公共品开支,直接与农业数字化转型程度和农业碳减排进程挂钩,对农业绿色发展和数字化发展影响较大。

(6)人才资源在1%水平上显著,与农业数字化转型和农业碳减排的协调发展呈正相关,这表明地方财政教育支出的增加会对促进二者协调发展具有显著的正向作用。地方财政教育支出的不断增加,会在数字技术和减碳技术的研发、推广和应用等方面发挥重要作用,为农业数字化转型与农业碳减排的发展提供一定的人才储备,有利于二者协调发展。

(7)专利产出在1%水平上显著,与农业数字化转型和农业碳减排的协调发展呈正相关,表明农业专利产出的增加对促进二者协调发展具有显著的正向作用。农业发明授权、外观设计和实用新型专利产出数量体现了农业技术创新水平,农业技术创新一方面反映了农业数字化转型程度,另一方面是减少农业碳排放的有效手段。农业专利产出的增加推动农业数字化转型与农业碳减排的协调发展。

4 结论与建议

(1)中国农业数字化转型发展水平和农业碳减排发展水平整体偏低,且农业数字化转型发展滞后于农业碳减排发展。农业数字化转型发展水平存在明显的省际差异与两极分化现象,而农业碳减排发展水平的省际差异较为均衡。中国农业数字化转型发展水平和农业碳减排发展水平均呈东、中、东北、西部地区依次递减的趋势,且仅有东部地区水平均值高于全国水平均值。

(2)2010—2021年,我国农业数字化转型与农业碳减排耦合协调度总体呈稳定增长趋势,区域之间耦合协调的阶段差距持续稳定,但大部分省份仍处于失调状态,且东部地区省份的耦合协调情况要优于其他地区省份。

(3)经济发展水平、能源利用效率、居民收入水平、农业支出、人才资源和专利产出对耦合协调度有显著正向促进效果,其中能源利用效率的影响最大。绿色发展水平因为是负向指标,对耦合协调度呈显著负向抑制作用。

基于上述结论,本文提出以下建议:一是推动数字技术在农业领域的应用。发展精准农业、智慧农业、推动5G、人工智能、区块链、遥感等技术在农业领域的普及,提高农业能源利用效率,促进农业绿色高质量发展。二是加强农业农村数字基础设施建设。推动农村电子商务的发展,农村电子商务的发展不仅具有显著的经济产业效益,而且具有相当大的环境效益。因此,政府应继续保持或加大对农业互联网基础设施的投入。三是重视数字化人才培育。农业数字化和低碳化发展都需要大量的专业技术人才,人才队伍的建设会带来技术创新和专利产出。所以要不断提高数字人才的专业技能,提升自主创新和研发能力,引导数字专业人才投身于农业建设。四是实施差异化农业数字化低碳化发展战略。要构建区域间协同发展和优势互补的机制,形成区域农业数字化转型与农业碳减排协调发展的格局。在巩固数字红利优势的同时,东部地区应继续发挥其在规模、经济、基础设施等方面的优势。中西部地区和东北地区要加快弥补不足,不断完善数字基础设施建设,推进农业转型发展。

参考文献:

[1] 殷浩栋,霍鹏,汪三贵.农业农村数字化转型:现实表征、影响机理与推进策略[J].改革,2020(12):48-56.

[2] 刘元胜.农业数字化转型的效能分析及应对策略[J].经济纵横,2020(7):106-113.

[3] 阮俊虎,刘天军,冯晓春,等.数字农业运营管理:关键问题、理论方法与示范工程[J].管理世界,2020,36(8):222-233.

[4] 马述忠,贺歌,郭继文.数字农业的福利效应:基于价值再创造与再分配视角的解构[J].农业经济问题,2022(5):10-26.

[5] 文丰安.农业数字化转型发展:意义、问题及实施路径[J].中国高校社会科学,2023(3):111-120,159-160.

[6] 田云,陈池波.中国碳减排成效评估、后进地区识别与路径优化[J].经济管理,2019,41(6):22-37.

[7] 王火根,肖丽香,廖冰.基于系统动力学的中国碳减排路径模拟[J].自然资源学报,2022,37(5):1352-1369.

[8] 何艳秋,陈柔,朱思宇,等.策略互动和技术溢出视角下的农业碳减排区域关联[J].中国人口·资源与环境,2021,31(6):102-112.

[9] 韩海彬,张莉.农业信息化对农业全要素生产率增长的门槛效应分析[J].中国农村经济,2015(8):11-21.

[10] 沈剑波,王应宽.中国农业信息化水平评价指标体系研

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

究[J].农业工程学报,2019,35(24):162-172.
[11] 樊胜岳,李耀龙,马晓杰,等.数字化水平对农业绿色发展影响的实证研究:基于中国30个省份的面板数据[J].世界农业,2021(12):4-16.
[12] 李波,张俊飚,李海鹏.中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J].中国人口·资源与环境,2011,21(8):80-86.
[13] 郭四代,钱昱冰,赵锐.西部地区农业碳排放效率及收敛性分析:基于SBM-Undesirable模型[J].农村经济,2018(11):80-87.
[14] 吴贤荣,张俊飚,程琳琳,等.中国省域农业碳减排潜力及其空间关联特征:基于空间权重矩阵的空间Durbin模型[J].中国人口·资源与环境,2015,25(6):53-61.
[15] 伍国勇,刘金丹,杨丽莎.中国农业碳排放强度动态演进及碳补偿潜力[J].中国人口·资源与环境,2021,31(10):69-78.
[16] 吴正玉."双碳"背景下我国农业碳减排能力评价与时空演化的研究[J].浙江农业科学,2023,64(2):270-277.
[17] 刘翔峰,刘强.要素市场化配置改革研究[J].宏观经济研究,2019(12):34-47,166.
[18] 谢康,易法敏,古飞婷.大数据驱动的农业数字化转型与创新[J].农业经济问题,2022(5):37-48.
[19] 伍国勇,孙小钧,于福波,等.中国种植业碳生产率空间关联格局及影响因素分析[J].中国人口·资源与环境,2020,30(5):46-57.
[20] 徐清华,张广胜.农业机械化对农业碳排放强度影响的空间溢出效应:基于282个城市面板数据的实证[J].中国人口·资源与环境,2022,32(4):23-33.
[21] 胡婉玲,张金鑫,王红玲.中国农业碳排放特征及影响因素研究[J].统计与决策,2020,36(5):56-62.
[22] 田云,尹忞昊.中国农业碳排放再测算:基本现状、动态演进及空间溢出效应[J].中国农村经济,2022(3):104-127.
[23] Wu H,Wang B,Lu M,et al.The strategy to achieve zero-carbon in agricultural sector: does digitalization matter under the background of COP26 targets?[J].Energy Economics,2023,126:106916.
[24] Zhao L, Rao X, Lin Q. Study of the impact of digitization on the carbon emission intensity of agricultural production in China[J].Science of The Total Environment,2023,903:166544.
[25] Shen Z,Wang S,Boussemart J P,et al.Digital transition and green growth in Chinese agriculture[J].Technological Forecasting and Social Change,2022,181:121742.
[26] Horner N C, Shehabi A, Azevedo I L. Known unknowns: indirect energy effects of information and communication technology[J].Environmental Research Letters,2016,11(10):103001.
[27] Avom D,Nkengfack H,Fotio H K,et al.ICT and environmental quality in Sub-Saharan Africa: Effects and transmission channels[J]. Technological Forecasting and Social Change,2020,155:120028.
[28] 孙文远,周浩平.数字经济对中国城市碳排放的影响效应及其作用机制[J].环境经济研究,2022,7(3):25-42.
[29] Li X,Liu J,Ni P.The impact of the digital economy on CO_2 emissions:a theoretical and empiricalanalysis[J].Sustainability,2021,13(13): 7267.
[30] 邓水兰,温诒忠.我国发展低碳农业存在的问题及对策[J].南昌大学学报(人文社会科学版),2011,42(5):88-92.
[31] 张鸿,王浩然,李哲.乡村振兴背景下中国数字农业高质量发展水平测度:基于2015—2019年全国31个省市数据的分析[J].陕西师范大学学报(哲学社会科学版),2021,50(3):141-154.
[32] 雷泽奎,祁春节,王刘坤.数字乡村建设能驱动农业经济高质量增长吗?[J].华中农业大学学报(社会科学版),2023(3):54-66.
[33] 朱红根,陈晖.中国数字乡村发展的水平测度、时空演变及推进路径[J].农业经济问题,2023(3):21-33.
[34] 唐德才,张燕,王路霞.长江经济带碳减排能力综合评价研究[J].生态经济,2021,37(6):44-50.
[35] 胡川,韦院英,胡威.农业政策、技术创新与农业碳排放的关系研究[J].农业经济问题,2018(9):66-75.
[36] 田云,张俊飚,李波.中国农业碳排放研究:测算、时空比较及脱钩效应[J].资源科学,2012,34(11):2097-2105.
[37] 廖重斌.环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系:以珠江三角洲城市群为例[J].热带地理,1999(2):76-82.
[38] 肖华堂,薛蕾.我国农业绿色发展水平与效率耦合协调性研究[J].农村经济,2021(3):128-134.
[39] 焦帅涛,孙秋碧.我国数字经济发展测度及其影响因素研究[J].调研世界,2021(7):13-23.
[40] 陈强.高级计量经济学及Stata应用[M].北京:高等教育出版社,2010.

作者简介:李　平,男,1985年生,博士(后),副教授。研究方向为绿色发展、数字经济与农业经济。汪　果,男,1999年生,硕士研究生。研究方向为绿色发展、数字经济与农业经济。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net