中国农业绿色发展水平与农业科技创新能力耦合协调度及时空演变研究*

鹿永华，王连群，周泽锟

（青岛农业大学经济管理学院（合作社学院），山东 青岛 266109）

摘 要：绿色发展是生态文明建设的必然要求，而科技创新则是破解绿色发展难题的关键所在，为了实现农业高质量发展，提高农业绿色发展水平，本构建农业绿色发展水平与农业科技创新能力评价指标体系，运用熵值法测算农业绿色发展水平和农业科技创新能力综合水平，并通过耦合协调度模型对农业绿色发展水平和农业科技创新能力综合水平进行耦合协调度测算，并运用核密度估计法、标准差椭圆、空间马尔科夫链等方法，分析农业绿色发展水平与农业科技创新能力综合水平耦合协调度的时空演变特征。研究表明：中国农业绿色发展与科技创新的耦合协调水平持续提升，尽管地区间存在差异，但整体上各省份在农业绿色发展与科技创新的融合方面取得了积极进展。耦合协调度在空间分布上大体呈梯形分布，反映了经济发展水平、科技创新能力与农业绿色技术推广和应用之间紧密联系。同时，耦合协调度的空间状态转移具有较高的稳定性。因此要加大对农业绿色发展的科技支撑力度，着力突破农业科技成果转化难题，建立跨区域、跨部门的农业科技创新协同发展机制。

关键词：农业绿色发展水平；农业科技创新能力；熵值法；时空演变

中图分类号：F323.22 **文献标志码**：A **文章编号**：1674-9189（2024）04-0090-15

一、引 言

党的十八大以来，粮食生产取得了阶段性成就。截至2023年已实现“二十连丰”，缓解了粮食安全问题，给予了供给端活力，但在实现高丰收的同时，石油农业、化肥、农药等的过量使用，导致农业碳排放量过高，面源污染严重，阻碍了乡村振兴和农业高质量发展（田云等，2022；石凯含等，2021）。我国农业要实现数量型到质量型的转变，农业绿色发展是关键（金欣鹏等，2020）。2017年9月，中共中央办公厅、国务院办公厅印发《关于创新体制机制推进农业绿色发展的意见》，这标志着在实现我国农业现代化的道路上，农业绿色发展正式发挥作用（金书秦等，2021）。2021年9月，中共中央、国务院发布《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》，提出要加快农业绿色发展，促进农业固碳增效，使农业绿色发展迈入新的历史阶段（姜涛等，2021）。2023年中央一号文件再次强调推动农业绿色发展。我国作为世界上最大化肥、农药生产和消费国家，在“十四五”时期，坚持农业绿色发展，是农业发展方式转向高质量发展的重要路径（Sun et al，2019）。

要实现农业绿色发展，不能一味地调整要素结构，应从根本上解决问题，本质上要靠农业科技创新。2016年，习近平同志在全国科技创新大会、两院院士大会、中国科协第九次全国代表大会上多次提出绿色发展是生态文明建设的必然要求，而科技创新则是破解绿色发展难题的关键所在（梁俊芬

*项目来源：山东省现代农业产业技术体系小麦产业技术体系产业经济岗位专家（SDAIT-01-13）。

作者简介：鹿永华，男，博士，教授，研究方向：农林经济管理。

等，2020）。党的十九大报告进一步提出要推进绿色发展，构建市场导向的农业技术创新体系。如何通过农业科技创新助推农业绿色发展，成为实现我国农业高质量发展的重要课题。

当前学术界对于农业绿色发展和农业科技创新的研究，聚焦于对单一系统进行指标评价并分析其影响因素，并围绕农业科技创新对农业绿色发展的促进作用这一单一机制进行展开研究：刘涛等（2021）、杜思梦等（2021）认为，在农业高质量发展过程中，应寻求农业科技创新与农业绿色发展的有机结合，相互吸收借鉴，走可持续的农业绿色发展道路，贡献农业高质量发展成果。徐光平等（2021）提出实现农业高质量发展就是要通过农业科技创新践行生态保护和绿色发展理念，走可持续发展道路。杨义武等（2018）认为通过农业科技创新可以降低农业生产成本，推进技术革新，提高农民收入，走可持续发展道路。梁俊芬等（2020）提出要从绿色发展的视角重视我国农业绿色发展的科技支撑，提高优质成果产出，助推农业高质量发展。徐晓莉等（2019）、赵俊亚等（2017）认为，我国农业应走高质量绿色发展的路径，实现生态效益、经济效益和社会效益的统一，农业绿色发展应是农业社会现代化与农业生态现代化的融合。刘畅等（2021）基于绿色发展的视角，构建农业科技创新能力评价和农业高质量发展指标体系，通过熵权法以及耦合协调度模型对我国省域层面农业科技创新能力和农业高质量发展的耦合协调性进行了测度研究。上述文献强调了农业高质量发展与农业科技创新、绿色发展和可持续发展之间的密切关系，即通过科技创新和绿色发展，助推农业实现高质量发展，提高效益，保护生态环境，并且这种发展应该是可持续的。这些研究对于指导农业发展政策、推动农业转型升级具有重要借鉴意义。但通过文献梳理发现，大多数研究集中在农业科技创新及农业绿色发展的测度评价方面，缺少对农业绿色发展水平与科技创新能力的耦合研究。将两者进行耦合协调研究，对于推动农业高质量发展、保护生态环境、促进资源可持续利用以及实现农民增收和乡村振兴具有重要意义。鉴于此，本文将农业绿色发展水平与农业科技创新能力进行耦合研究，探究其时空演变规律，分析时空差异，为推动农业高质量发展、贯彻落实可持续发展理念提出政策建议。

二、农业绿色发展水平与农业科技创新能力的耦合机理

农业绿色发展水平和农业科技创新能力存在着既相互促进又相互制约的耦合关系，一方面农业绿色发展水平是实现农业科技创新能力的驱动力，通过贯彻绿色发展理念，不断引领农业科技创新方向，加之政策的倾斜，农业绿色发展水平为农业科技创新提供坚实的经济研发基础。另一方面通过提高农业科技创新能力，研发新技术、新设备、新成果，能够从本质上提高农业绿色发展水平，最终促进农业高质量发展。两者之间互为基础和条件，可以进一步作耦合研究，农业绿色发展水平和农业科技创新能力耦合机理见图1。

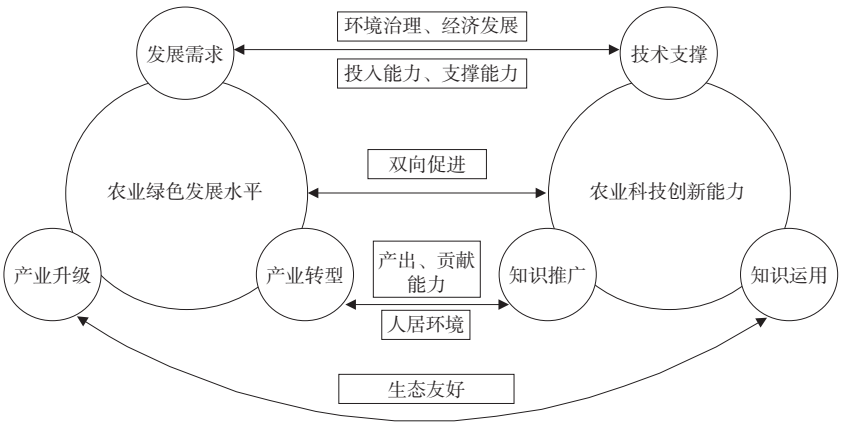


图1　农业绿色发展水平与农业科技创新能力耦合机理

绿色发展需求推动科技创新：农业绿色发展对农业科技提出了更高的要求。在追求资源高效利用、生态环境保护的过程中，农业需要更先进、更环保的科技手段。这种需求引领了科技创新的方向，促使科研机构和企业致力于开发绿色、可持续的农业技术，推动了政府对农业科技研发的经费倾斜，加强投入能力和支撑能力。

科技创新推动绿色发展：农业科技创新为农业绿色发展提供技术支撑。通过研发和应用新的农业科技成果，提高农药化肥利用水平，助力提高粮食单位产量，提高农户收入，缩小城乡收入差距。

循环往复的促进关系：农业绿色发展与农业科技创新之间形成了一个循环往复的促进关系。绿色发展需要科技创新的支撑，而科技创新又为绿色发展提供新的技术手段和解决方案。随着绿色发展的不断深入，农业面临的新问题和新挑战也推动了科技创新的不断发展。

产业升级与转型：农业绿色发展需要农业产业的升级与转型，而农业科技创新为产业升级与转型提供了重要动力。通过引入先进技术和管理理念，农业生产方式得以优化和改进，从而实现农业产业的绿色化、智能化、现代化升级，从而提高农村人居环境水平。通过产业结构的调整与升级，农业生产方式的转变，生态环境会得到进一步优化，生态友好型社会逐渐形成。

知识推广与应用：农业科技创新的成果需要通过知识推广和应用才能真正发挥作用，而绿色发展为科技成果的应用提供了广阔的空间和需求。农业科技的专利数量和论文数量与农业绿色发展需求更加契合，提高了农业科技创新的贡献能力水平。

综上所述，农业绿色发展与农业科技创新能力的耦合协调机理体现在绿色发展对科技创新的需求和导向，科技创新对绿色发展的支撑和推动，两者之间相互促进、相互推动，共同推进农业向着更加可持续、高效、环保的方向发展。这种耦合协调机理是实现农业可持续发展的重要保障和动力。

三、指标与数据选取及研究方法

（一）指标及数据

1. 指标体系的构建

在农业绿色发展水平的评价体系方面，借鉴王连群等（2023）所创建的农业绿色发展水平的评价指标体系，以及贾宁宁（2022）、李菲菲等（2023）和《中国农业绿色发展报告2021》提出的资源节约保育、生态环境安全、绿色产品供给和生活富裕美好4个维度16项指标组成的绿色发展评价指标体系，创建了本文的农业绿色发展水平评价指标体系。在农业科技创新能力评价体系方面，考虑到数据的可得性，借鉴了杜旭等（2020）、王丹等（2021）、赵丽娟等（2020）的研究，构建了本文的农业科技创新能力评价指标体系（见表1）。

2. 数据来源

本文以2010~2021年中国30个省份（因数据缺失较多，不包括西藏及港澳台地区）为研究对象，运用熵值法、耦合协调度模型测算农业绿色发展水平与农业科技创新能力综合水平及其耦合度，并运用核密度探究耦合协调度的时序变化特征，通过标准差椭圆探究耦合协调度空间重心迁移找出发展重心，利用空间马尔科夫理论研究两个水平耦合度的时空演进趋势。本文研究数据来自于历年《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》及各省份《统计年鉴》。

（二）研究方法

1. 熵值法

本文选用熵值法来测算中国农业绿色发展水平以及农业科技创新能力，这是因为通过专家赋权具有一定主观性，造成结果失真，而熵值法具有赋权的客观性，能够保证测算的准确性。本文评价指标

体系比较复杂，单位较多，在进行熵值法测算前对所有数据进行标准化处理，以进行后续测算，具体测算步骤如下：

第一步，选取n个评价对象，m个评价指标，$X_{i,j}$为在第i个评价对象时的j指标所测量的数值(i=1，2，…，n；j=1，2，…，m)。

第二步，对原始数据进行无量纲化即标准化处理，同时在选取指标方面，有正向和负向指标，对于正向指标，通过：

$$Z_{i,j}=\frac{X_{i,j}-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{1}$$

对于负向指标，通过：

$$Z_{i,j}=\frac{X_{\max}-X_{i,j}}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{2}$$

式中，$X_{\min}$、$X_{\max}$表示在该指标序列中的最小值和最大值，$Z_{i,j}$(i=1，2，…，n；j=1，2，…，m)表示X_{ij}经过无量纲化处理后的数值。

第三步，计算第j个指标下，第i个样本在该指标中所占的权重，公式为：

$$\beta_{i,j}=\frac{Z_{i,j}}{\sum_{i=1}^{n}Z_{i,j}} \tag{3}$$

第四步，计算第j项的熵值，公式为：

$$M_j=-k\times\sum_{i=1}^{n}\beta_{i,j}\times\ln\left(\beta_{i,j}\right)$$
$$k=\frac{1}{\ln(n)}>0 \tag{4}$$

式中，M_j取值(0，1)之间，M_j与$\beta_{i,j}$成反比，$\beta_{i,j}$的差异越小，M_j的值就越大，则j所反映的信息越小，该指标对于整个指标的体系影响就越小，反之亦然。

第五步，计算j指标的信息效用价值，公式为：

$$e_j=1-M_j \tag{5}$$

第六步，计算指标权重，公式为：

$$W_j=\frac{e_j}{\sum_{j=1}^{m}e_j} \tag{6}$$

第七步，在计算各个得分项后，得出综合得分，即农业绿色发展水平的综合指数，公式为：

$$U_i=\sum_{j=1}^{m}W_j\times Z_{i,j} \tag{7}$$

2. 耦合度模型

运用耦合度模型可以准确度量农业绿色发展水平与农业科技创新能力之间的协同作用，具体公式为：

$$C=\frac{2\sqrt{U_1U_2}}{U_1+U_2} \tag{8}$$

在上述公式中，耦合度C值区间为[0, 1]，C值越大，表示农业绿色发展水平U_1与农业科技创新能力U_2之间离散程度越小，耦合度越高，协同效果越好。

3. 耦合协调度模型

当前学术研究发现，对于两个综合水平相似的指标，如果单纯使用耦合度模型容易出现高程度耦合，因此为使测度结果准确，本文采用耦合协调度模型，科学反映农业绿色发展水平与农业科技创新能力的耦合情况。

表1 农业绿色发展水平与农业科技创新能力评价指标体系

目标层	一级指标	二级指标	指标描述	数据来源	正负向
农业绿色发展水平	环境治理	污染治理	农业排污总量/农业总产值(%)	统计年鉴	负向
		化肥使用强度	化肥总量/总播种面积(%)	统计年鉴	适度
		农药施用强度	农药使用总量/总播种面积(%)	统计年鉴	负向
		农膜使用强度	农膜使用总量/总播种面积(%)	统计年鉴	负向
		农村卫生厕所普及率	%	乡村振兴报告	负向
	生态友好	森林植被面积	森林覆盖率(%)	中国环境统计年鉴	正向
		湿地覆盖面积	湿地覆盖率(%)	中国环境统计年鉴	正向
		自然保护区面积	自然保护区覆盖率(%)	中国环境统计年鉴	正向
	经济发展	城乡人均收入比	农民人均纯收入/城市居民人均纯收入(%)	统计年鉴	正向
		粮食单位产量	粮食总产量/粮食播种面积(千克/公顷)	统计年鉴	正向
		绿色食品获证数量	(个)	统计年鉴	正向
	人居环境	农村生活水平	农村家庭恩格尔系数(%)	乡村振兴报告	负向
		农村交通状况	公路密度(千米/万人)	统计年鉴	正向
		农村教育状况	农村人口平均教育年限(年)	统计年鉴	正向
		医疗设施状况	农村合作医疗参保率(%)及乡镇人均医生(人)、病床数量(万张)	统计年鉴	正向
农业科技创新能力	支撑能力	地区生产总值	当地GDP总和(万元)	统计年鉴	正向
		教育水平	普通高等院校在校人数(万人)	统计年鉴	正向
		农作物总播种面积	(千公顷)	统计年鉴	正向
	投入能力	研发人员	R&D人员数量(万人)	统计年鉴	正向
		科研经费	R&D经费支出(万元)	统计年鉴	正向
		教育经费	国家财政用于教育支出(万元)	统计年鉴	正向
		农业固定资产投资	(万元)	统计年鉴	正向
	产出能力	农民收入	农村人均可支配收入(万元)	统计年鉴	正向
		国内外发表科技类论文总数	(千篇)	统计年鉴	正向
		专利授权量	(个)	统计年鉴	正向
		技术性收入	技术类合同成交额(万元)		正向
	贡献能力	化肥使用强度	化肥总量/总播种面积(%)	统计年鉴	适度
		农药施用强度	农药使用总量/总播种面积(%)	统计年鉴	负向
		土地生产率	粮食总产量/总播种面积(%)	统计年鉴	正向

$$T=\alpha U_1+\beta U_2$$
$$D=(C\times T)^{1/2} \quad (9)$$

综合协调指数T体现的是农业绿色发展水平与农业科技创新能力综合发展水平指数对其耦合协调度D的作用程度大小。α、β分别表示农业绿色发展水平与农业科技创新能力对其耦合的贡献程度。借鉴刘畅等(2021)的研究，认为α、β两者同等重要，因此，拟定α=β=0.5。耦合协调度T值区间为[0, 1]，D值越大，表示二者协调发展越高，相互促进的效果越好。

借鉴刘畅等(2021)对于耦合协调度D值的分类方法，耦合协调度D值一般分为10级，但由于农业绿色发展水平和农业科技创新能力耦合系统的特殊性，将耦合协调等级分为四个等级：当$0\leqslant D<0.3$时，为初级协调耦合阶段(1级)；当$0.3\leqslant D<0.5$时，为中级协调耦合阶段(2级)；当$0.5\leqslant D<0.8$时，为良好协调耦合阶段(3级)；当$0.8\leqslant D\leqslant 1$时，为优质协调耦合阶段(4级)。

4. 核密度估计法

由于核密度估计法不考虑具体函数的形式，而是着眼于数据本身，摆脱了主观因素的影响，其应用范围逐渐扩大(卢奕亨等，2023)。核密度估计的函数表达式如下：

$$f(x)=\frac{1}{nh}\sum_{i=1}^{n}k\left(\frac{x_i-\bar{x}}{h}\right) \tag{10}$$

式中，n代表省份总数，i代表各省份，h为带宽，$\bar{x}$为均值，$k(\ )$代表随机核函数。

5. 标准差椭圆

标准差椭圆是基于全局空间统计研究，描述研究对象的空间分布与演变趋势。主要计算农业绿色发展水平与农业科技创新能力耦合度空间，统计椭圆的中心、面积、转移轨迹以及转移距离等。其计算公式参见白冰等(2021)的研究。

6. 空间马尔科夫理论

马尔科夫链由俄国科学家安德雷·马尔科夫提出，是一组离散的时间和状态随机变量的马尔科夫过程。传统的马尔科夫链中随机变量的个体空间转变概率是具有无后效性的，将农业绿色发展水平划分为M种类型，则可以得到一个$M\times M$的概率转移矩阵，向上表示农业绿色发展水平提高，向下表示农业绿色发展水平降低，以此来表示转移方向。空间马尔科夫链是将空间滞后的概念引入概率转移矩阵，利用空间权重矩阵乘以各省份农业绿色发展水平的初始值，得到各省份邻近省份的农业绿色发展水平，同样将其划分为M种类型，得到$(M\times M)\times M$的概率转移矩阵。相关理论概念及公式参照梁耀文等(2023)、蒲英霞等(2005)的研究。

四、测算及时序分析

(一) 农业绿色发展水平评价分析

通过熵值法对中国农业绿色发展水平进行测算，并进行时序研究发现，中国农业绿色发展水平整体呈上升趋势，从2010年的0.391上升到2021年的0.619，增长幅度较大。2010—2015年增长速度较慢，2016年后增长速度加快，这得益于《关于创新体制机制推进农业绿色发展的意见》《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》等相关政策的颁布，促进了中国农业绿色发展水平的提高，推动了农业从数量型向质量型转变。但从数值来看，中国农业绿色发展水平还有很大上升空间。中国农业绿色发展水平见图2。

(二) 农业科技创新能力评价分析

对指标体系进行单位统一并加以换算归一化处理后，通过熵值法对中国农业科技创新能力进行测算，并进行时序研究发现，中国农业科技创新能力整体呈上升趋势，但上升幅度不大，从2010年的0.2542上升到2021年的0.2734，原因在于农业科技创新涵盖面较广，随着创新驱动发展战略的实施，虽然助推了农业科技成果的产出，但存在广而不精现象，缺乏核心技术，农业科技成果缺乏核心竞争力，农业创新时滞长，成果见效慢，随着研发的推进，研发的难度加大，我国农业科技创新能力呈现出增速较慢的稳态增长模式。

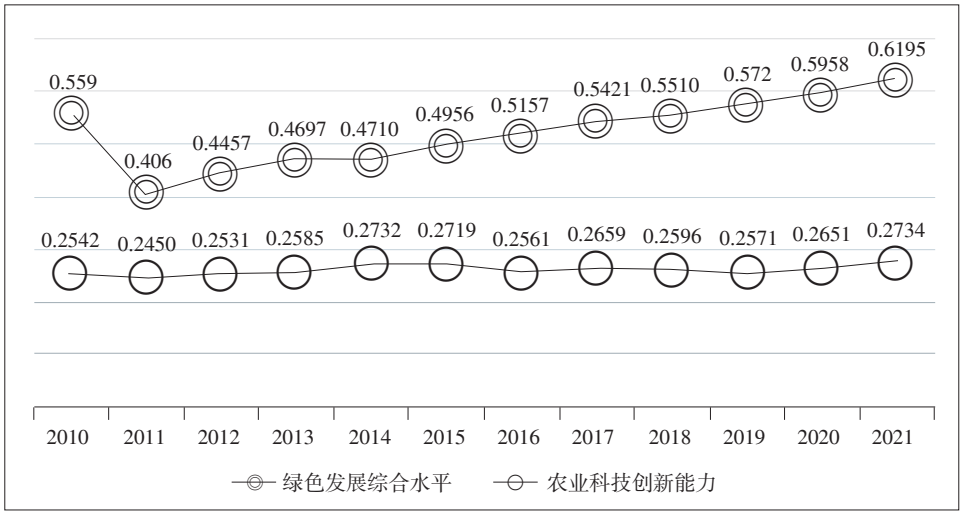


图2 中国农业绿色发展水平与农业科技创新能力评价指数

（三）农业绿色发展水平与农业科技创新能力耦合协调分析

运用耦合协调度模型对农业绿色发展水平与农业科技创新能力进行评价分析，囿于篇幅，根据四分法原则，选取四个有代表性的年份（2010、2014、2018、2021）进行数据列举及耦合协调分析。同时在借鉴相关文献的基础上，考虑到结果的对比差异性及区域发展的协同性，将广西、内蒙古、重庆归到中部地区进行研究分析。结果如表2所示，在选取的四个研究期间内，二者耦合协调度全国均值由2010年的0.395上升到2021年的0.652，整体呈上升趋势，达到了良好协调耦合阶段。从地区平均值增长速度来看，东中西部三个地区的增长趋势较为一致，但由于东部地区多沿海，教育资源与科研资源丰富，且农业发展水平较高，其增长速度相较于其他两个地区更为明显。西部地区耦合协调度水平最低，到2021年大部分省份还处于中间协调耦合阶段，各地区之间发展差异较大。同时三个地区中经济发展基础较好的省份其耦合协调度均优于相对落后地区，说明经济的推动作用十分显著。

（四）核密度分析

为了更直观地分析中国农业绿色发展水平和农业科技创新能力综合水平耦合协调度即两个耦合系统（下文简称“双系统”）的时间分布，本文基于Matlab绘制2010—2021年双系统耦合协调度的*Kernel*密度图，同时为了进行区域比较，分别对东中西部地区绘制了*Kernel*密度图（见图3）。中国总体的耦合协调度整体处于波动上升趋势，双系统耦合协调度呈现出从左往右的“双峰”分布特征，并由双峰逐渐演变为“单峰”，通过分析得出，双系统的耦合协调度既存在高水平发展区域也存在低水平发展区域，两者并存且呈现两极化的发展趋势。核密度主峰宽度逐渐变窄，高度逐渐升高，而侧峰宽度也逐渐变窄，且高度逐渐升高。这说明中国双系统耦合协调度高水平区域与低水平区域的差距逐渐缩小，呈现出“高高聚集、低低聚集”的格局演变。东部地区双系统耦合协调度“双峰”分布特征不明显，主峰高度呈逐渐升高趋势但又逐渐下降，侧峰高度先降低后增加，但增加趋势并不明显，这说明东部地区耦合协调水平较高，呈现出“高低聚集”的格局演变。中部地区曲线分布特征呈现出明显的“双峰”特征，主峰宽度逐渐变窄且高度越来越高，侧峰高度呈现出先降低后增高的趋势，侧峰高度不明显，这表明中部地区耦合协调水平逐渐演变为“高高聚集”和“低低聚集”的空间格局。西部地区曲线分布由“多峰”逐渐演变为“单峰”特征，西部地区耦合协调度分布差异不明显，且山峰高度呈逐渐升高趋势。

表2　农业绿色发展水平与农业科技创新能力耦合协调度评价

类别		2010年				2014年				2018年				2021年			
		C值	T值	D值	D等级	C值	T值	D值	D等级	C值	T值	D值	D等级	C值	T值	D值	D等级
省域	均值	0.806	0.227	0.395	2	0.880	0.343	0.534	3	0.885	0.425	0.595	3	0.894	0.502	0.652	3
东部	北京	0.291	0.231	0.449	2	0.992	0.701	0.834	4	1	0.876	0.936	4	1	0.990	0.995	4
	天津	0.932	0.430	0.633	3	0.960	0.521	0.707	3	0.917	0.591	0.736	3	0.908	0.641	0.763	3
	河北	0.893	0.292	0.511	3	0.965	0.414	0.632	3	0.927	0.485	0.670	3	0.936	0.531	0.705	3
	辽宁	0.818	0.276	0.475	2	0.948	0.391	0.609	3	0.934	0.476	0.667	3	0.926	0.504	0.683	3
	吉林	0.820	0.288	0.486	2	0.892	0.364	0.570	3	0.927	0.466	0.657	3	0.948	0.536	0.713	3
	黑龙江	0.863	0.296	0.405	2	0.965	0.409	0.628	3	0.958	0.484	0.681	3	0.962	0.534	0.717	3
	上海	0.627	0.219	0.572	3	0.491	0.467	0.612	3	0.545	0.481	0.672	3	0.563	0.542	0.692	3
	江苏	0.904	0.078	0.667	3	0.714	0.155	0.692	3	0.768	0.188	0.712	3	0.725	0.242	0.802	4
	浙江	0.786	0.612	0.694	3	0.693	0.193	0.712	3	0.680	0.254	0.746	3	0.686	0.278	0.824	4
	福建	0.698	0.072	0.587	3	0.626	0.123	0.672	3	0.659	0.195	0.792	3	0.812	0.148	0.815	4
	山东	0.777	0.100	0.512	3	0.720	0.139	0.627	3	0.785	0.158	0.702	3	0.787	0.189	0.802	4
	广东	0.969	0.461	0.669	3	0.979	0.575	0.750	3	0.960	0.724	0.833	4	0.969	0.785	0.872	4
	海南	0.992	0.430	0.653	3	0.999	0.542	0.736	3	0.996	0.696	0.830	4	0.908	0.102	0.815	4
	均值	0.798	0.291	0.563	3	0.842	0.384	0.657	3	0.850	0.467	0.717	4	0.856	0.463	0.756	4
中部	山西	0.331	0.202	0.251	1	0.844	0.323	0.522	3	0.777	0.387	0.548	3	0.811	0.423	0.586	3
	内蒙古	0.941	0.227	0.462	2	1	0.412	0.642	3	0.999	0.489	0.699	3	0.999	0.594	0.770	3
	安徽	0.958	0.336	0.567	3	0.704	0.088	0.249	1	0.749	0.124	0.305	2	0.977	0.433	0.651	3
	江西	1	0.010	0.101	1	0.823	0.054	0.211	1	0.824	0.099	0.286	1	0.817	0.137	0.334	2
	河南	0.989	0.031	0.174	1	0.833	0.095	0.281	1	0.796	0.155	0.351	2	0.786	0.192	0.388	2
	湖北	0.960	0.377	0.602	3	0.963	0.505	0.697	3	0.941	0.654	0.784	3	0.963	0.738	0.843	4
	湖南	0.966	0.393	0.616	3	0.979	0.512	0.708	3	0.973	0.685	0.816	4	0.966	0.773	0.864	4
	广西	0.537	0.064	0.185	1	0.958	0.229	0.468	2	1	0.417	0.646	3	0.999	0.515	0.717	3
	重庆	0.817	0.293	0.489	2	0.902	0.414	0.611	3	0.902	0.584	0.726	3	0.891	0.681	0.779	3
	均值	0.833	0.215	0.383	2	0.890	0.292	0.488	2	0.885	0.399	0.573	3	0.912	0.498	0.659	3
西部	四川	0.944	0.214	0.449	2	0.938	0.396	0.512	3	0.930	0.530	0.702	3	0.919	0.625	0.758	3
	贵州	0.626	0.045	0.169	1	0.964	0.210	0.232	1	0.965	0.364	0.312	2	0.988	0.192	0.435	2
	云南	0.457	0.111	0.226	1	0.892	0.258	0.272	1	0.847	0.368	0.315	2	0.793	0.481	0.372	2
	陕西	0.562	0.307	0.415	2	0.849	0.471	0.452	2	0.852	0.538	0.470	2	0.840	0.642	0.512	3
	甘肃	0.961	0.082	0.281	1	1	0.365	0.292	1	0.996	0.491	0.372	2	0.991	0.610	0.418	2
	青海	1	0.010	0.100	1	0.975	0.217	0.261	1	0.998	0.446	0.315	2	0.999	0.645	0.352	2
	宁夏	0.998	0.099	0.114	1	0.978	0.298	0.136	1	0.987	0.130	0.172	1	0.994	0.633	0.302	2
	新疆	0.756	0.230	0.217	1	0.839	0.451	0.232	1	0.996	0.195	0.272	1	0.985	0.754	0.321	2
	均值	0.788	0.137	0.296	1	0.929	0.333	0.349	1	0.946	0.382	0.412	2	0.939	0.573	0.472	2

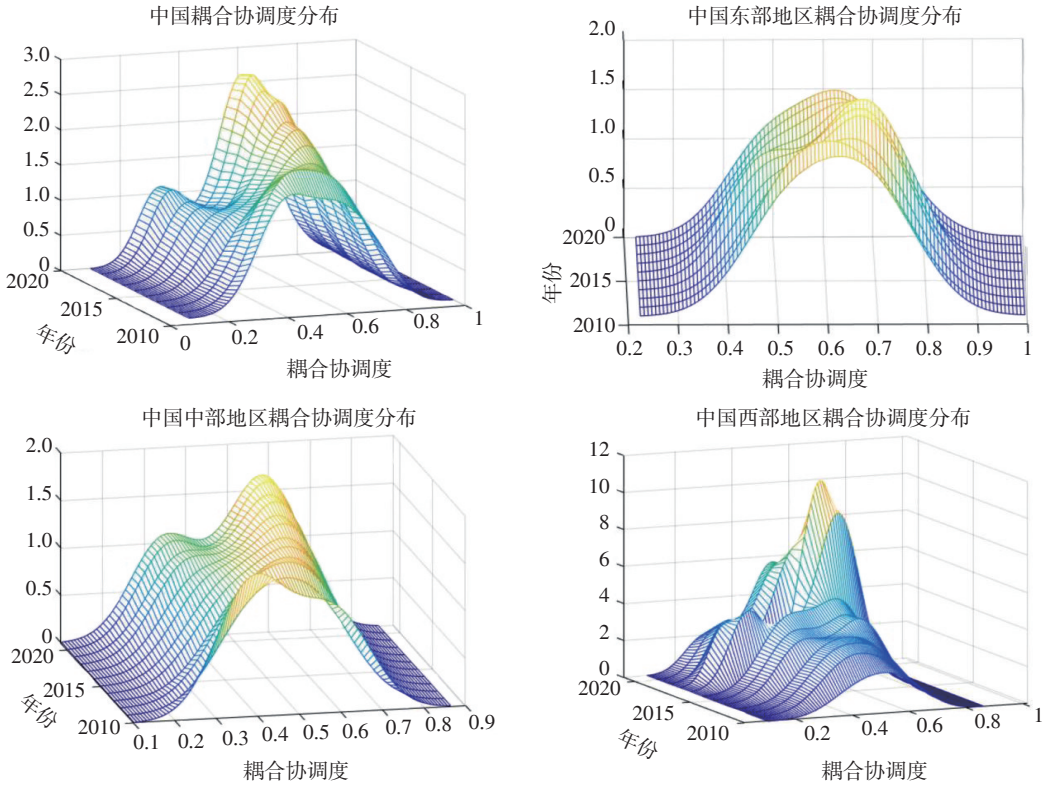


图3 中国双系统耦合协调度核密度估计图

五、中国农业绿色发展水平和农业科技创新能力耦合协调度空间特征分析

（一）空间相关性分析

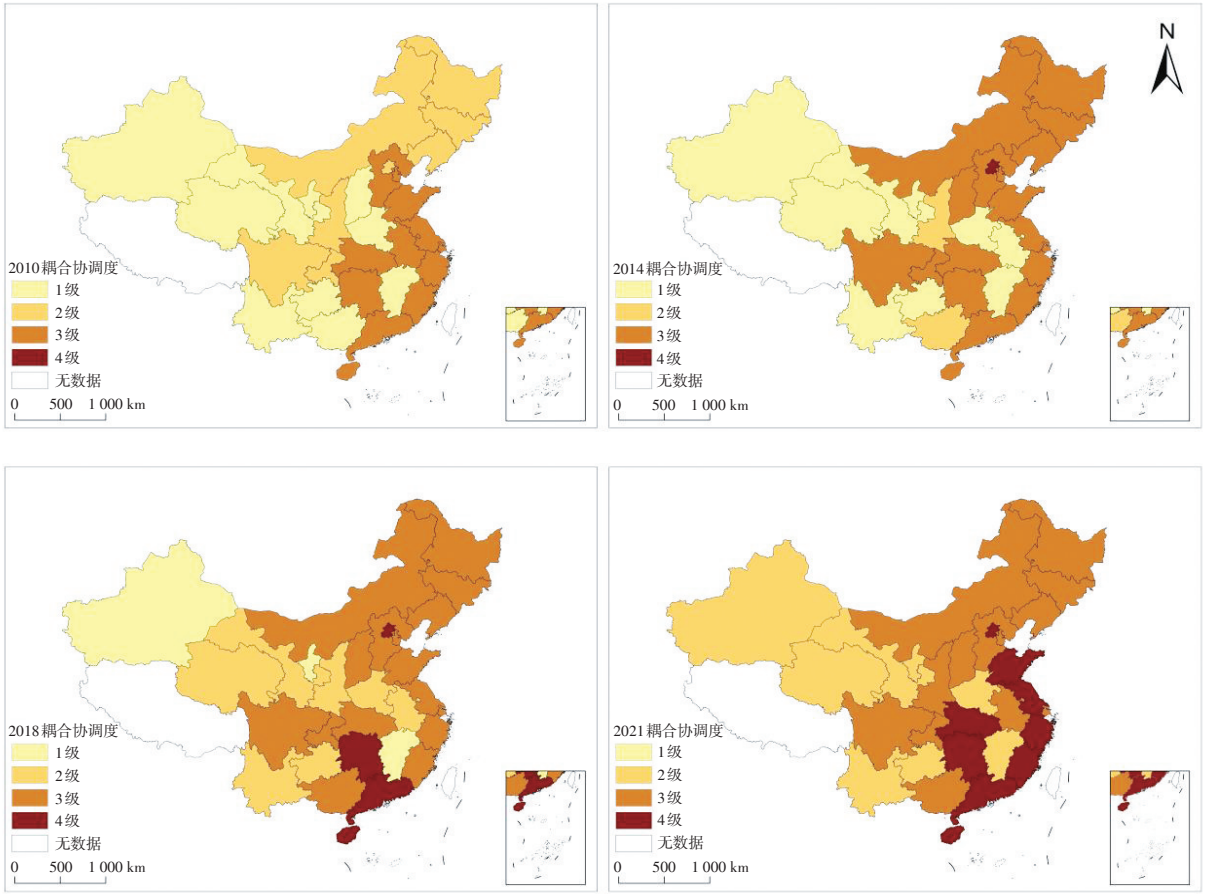
根据上述核密度估计图分析，从时序状态分布来看，双系统的耦合协调水平向“高高聚集”和“低低聚集”的格局演变，推测双系统耦合协调水平存在空间关联特征，本文运用全局自相关分析中的莫兰指数，分析中国双系统耦合协调水平的空间关联特征（见表3）。由表3中可知，空间邻接矩阵和地理距离矩阵中，*Moran'I*均在1%下显著，这表明中国双系统耦合协调水平存在明显的“高高聚集”和“低低聚集”空间集聚特征。整体来看，中国双系统耦合协调度空间集聚程度存在波动，有增强有减弱，但波动不明显，整体呈上升趋势，且越来越高。通过莫兰指数的趋势，证明耦合协调度存在空间关联性，为后续的马尔科夫链等空间演变研究提供实证依据。

（二）空间分布情况

运用ArcGIS10.2软件，对双系统耦合协调度进行空间可视化分析，可更直观地观察农业绿色发展水平与农业科技创新能力的耦合协调在空间上的分布情况（见图4）。由图4中可知，中国双系统耦合协调度大体呈梯形分布，东部地区高，西部地区低，沿海地区耦合协调度高于内陆地区，区域差异性明显。这与中国经济区域发展状况保持一致，东部及沿海地带经济发达，科技水平高，科研基础完善，科技成果转化较好，有利于农业绿色技术的推广及应用。随着农业现代化的推进，产业不断融合优化，农业基础设施愈发完善，为农业科技创新进一步推动农业绿色发展奠定了良好基础。从图中可知，北京、上海、浙江等东部发达省份，大部分处于良好协调耦合阶段，青海、新疆等西部内陆省份处于初级和中级协调耦合阶段，存在空间差异。

表3　不同空间矩阵下耦合协调水平Moran'I及相关检验

年份	空间邻接矩阵			地理距离矩阵		
	Moran'I	*Z*值	*P*值	Moran'I	*Z*值	*P*值
2010	0.367	3.278	0.001	0.325	3.379	0.002
2011	0.412	3.642	0	0.386	3.362	0.001
2012	0.525	4.563	0	0.427	3.045	0
2013	0.501	4.368	0	0.452	3.452	0.001
2014	0.518	4.506	0	0.439	3.854	0
2015	0.520	4.525	0	0.509	4.515	0.001
2016	0.503	4.383	0	0.534	4.621	0
2017	0.490	4.279	0	0.565	4.726	0.001
2018	0.515	4.483	0	0.572	4.855	0
2019	0.497	4.338	0	0.525	4.502	0
2020	0.525	4.568	0	0.599	4.923	0
2021	0.577	4.991	0	0.612	5.124	0



注：审图号GS(2022)1873号

图4　农业绿色发展水平与农业科技创新能力的耦合协调度空间分布

（三）空间格局演进特征

进一步采用重心—标准差椭圆分析双系统耦合协调度空间格局演进特征，通过ArcGIS10.2软件，计算双系统耦合协调度空间分布重心及标准差椭圆相关参数（见表4），该重心围绕省级层面，通过省级迁移轨迹，探究耦合协调度的空间迁移路线和发展重心。并绘制2010、2015、2021年中国双系统耦合协调度空间格局演进图（见图5）。

表4 中国双系统耦合协调度重心移动方向、距离和标准差椭圆参数

年份	重心经度	重心纬度	移动方向	移动距离（千米）	旋转角（度）	椭圆面积（万平方千米）
2010	113.452	33.571	东北		28.333	336.0946
2011	113.145	33.734	东北	34.069	–	–
2012	113.181	33.853	东北	3.971	–	–
2013	113.147	33.862	东北	3.775	–	–
2014	113.070	33.818	东北	8.588	–	–
2015	113.031	33.790	西北	4.300	28.354	337.2748
2016	113.070	33.758	东北	4.366	–	–
2017	113.006	33.714	东北	7.134	–	–
2018	112.976	33.680	东南	3.303	–	–
2019	112.956	33.634	西南	2.223	–	–
2020	112.900	33.617	东南	6.265	–	–
2021	112.848	33.606	东南	5.741	28.194	341.6234

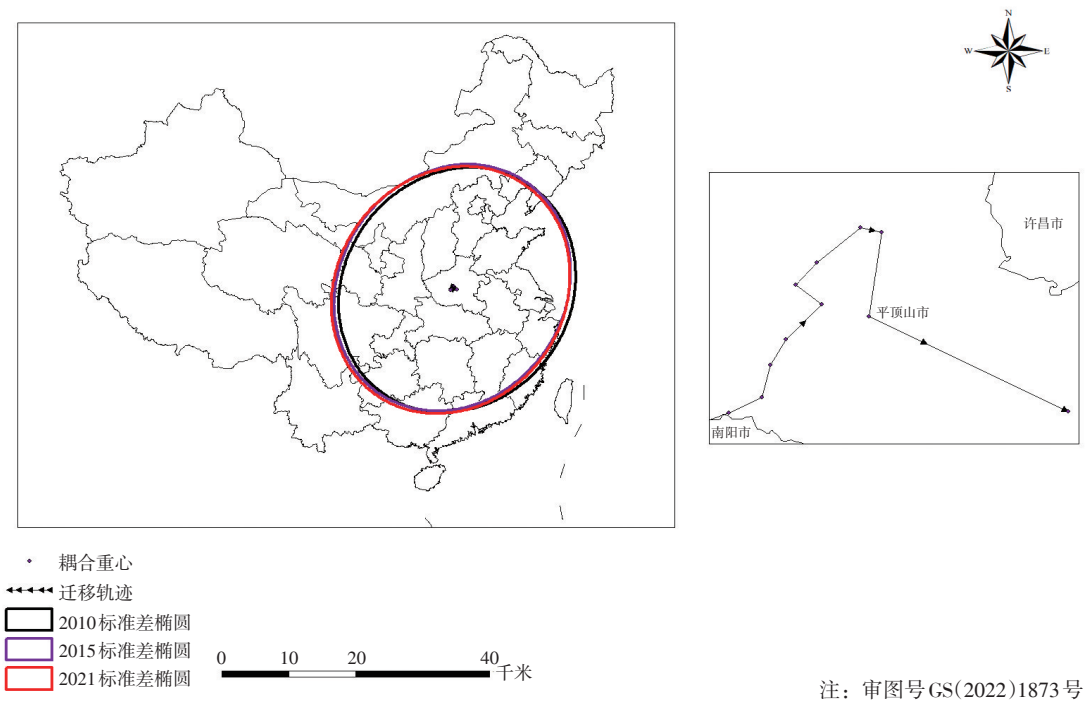


图5 中国双系统耦合协调度空间动态转移图

从重心的分布及移动方向分析，双系统耦合协调度重心移动范围为112.848°E~113.452°E，33.606°N~33.862°N，重心点坐落在平顶山市、南阳市附近，位于几何中心的偏东南方向，说明中国东部地区农业绿色发展水平与农业科技创新能力综合水平耦合协调度高于西部地区，南部地区高于北部地区，这与上述分析一致。从重心移动距离来看，总移动距离为95.89千米，该距离计算公式参考刘美娟等(2021)的研究方法为所有重心移动距离之和。从重心移动方向来看，2010—2014年重心向东北方向迁移，表明山东、河北等东部地区耦合协调度水平发展较高，2015年经历转折，向西北方向转移，2018年后重心迁移轨迹整体往东南方向迁移，说明浙江、福建等沿海省市耦合协调水平发展较高。从椭圆转角来看，由2010年的28.333°变到2021年的28.194°，整体转移程度不大。

（四）空间演变规律分析

空间自相关分析和空间分布图仅粗略地展现中国双系统耦合协调水平的关联特征和分布特征，标准差椭圆亦仅能分析其空间转移轨迹，为了进一步探究双系统耦合协调水平的空间演变规律，本文引入空间马尔科夫理论，对其空间变化规律及内在演变进行分析，以便进行更科学合理的判断。中国双系统耦合协调水平空间Markov转移概率矩阵见表5。

表5　中国双系统耦合协调水平空间Markov转移概率矩阵

邻近类型	n期类型	n+1期类型			
		初级协调耦合	中级协调耦合	良好协调耦合	优质协调耦合
初级协调耦合	初级协调耦合	0.9166	0.0833	0	0
	中级协调耦合	0	0.9655	0.0344	0
	良好协调耦合	0	0	0.8000	0.2000
	优质协调耦合	0	0	0	1.0000
中级协调耦合	初级协调耦合	0.9338	0.0661	0	0
	中级协调耦合	0	0.8807	0.1192	0
	良好协调耦合	0	0	0.9318	0.0681
	优质协调耦合	0	0	0.0769	0.9230
良好协调耦合	初级协调耦合	0.8529	0.1470	0	0
	中级协调耦合	0.0149	0.8208	0.1641	0
	良好协调耦合	0	0.0128	0.8589	0.1282
	优质协调耦合	0	0	0.0172	0.9827
优质协调耦合	初级协调耦合	1.0000	0	0	0
	中级协调耦合	0	0.4000	0.6000	0
	良好协调耦合	0	0.0285	0.8000	0.1714
	优质协调耦合	0	0	0	1.0000

从表5中可知，当邻近区域为初级协调耦合区域时，初级协调耦合区域维持原水平的概率为91.60%，向中级协调耦合区域的转移概率为8.33%。当邻近的区域为中级协调耦合区域时，初级协调耦合区域维持原水平的发展概率为93.38%，向中级协调耦合区域转移的概率为6.61%。当邻近区域为良好协调耦合区域时，初级协调耦合区域维持原水平的概率为85.29%，向良好协调耦合区域转移的概率为0，意味着初级协调耦合区域和中级协调耦合区域之间具有空间溢出效应。从中级协调耦合区域

来看，邻近初级协调耦合区域、中级协调耦合区域、良好协调耦合区域和优质协调耦合区域维持原水平的发展概率为96.55%、88.07%、82.08%、40%，向初级协调耦合区域转移的概率分别为0、0、1.49%、0，当邻近初级协调耦合区域时，优质协调耦合区域转化为初级协调耦合区域的概率较低。从良好协调耦合区域来看，邻近初级协调耦合区域、中级协调耦合区域、良好协调耦合区域和优质协调耦合区域维持原水平的发展概率为80%、93.18%、85.89%、80%，从邻近地域来看，当邻近区域为优质协调耦合区域时，良好协调耦合区域向上转移的概率最大为20%，意味着优质协调耦合区域有助于推动良好协调耦合区域的发展。从上述结果可知，对于大多数发展区域，维持原发展水平的概率要高于转移的概率，不论是向上转移还是向下转移，即对角线概率大于非对角线概率，均存在相对明显的马太效应(杨子涵等，2024)。当邻近区域为良好协调耦合区域或优质协调耦合区域时，本地区向上转移概率更高，说明中国双系统耦合协调水平存在空间效应。

六、结论与政策建议

（一）结论

本文对全国30个省份的农业绿色发展水平和农业科技创新能力进行耦合协调度测算，并探究其时空演变特征，得到如下结论：

(1)时序演变特征：研究发现中国农业绿色发展与农业科技创新能力的耦合协调水平持续提升，至2021年已达到良好耦合协调阶段，平均值为0.652。随着时间的推移，不同地区之间的耦合协调度差距逐渐缩小，呈现出较为明显的聚集态势。这表明，尽管地区间存在差异，但整体上各省份在农业绿色发展与农业科技创新的融合方面取得了积极进展。(2)空间特征与空间相关性：通过空间自相关分析，揭示了强烈的“高高聚集”和“低低聚集”的空间集聚特性。*Moran'I*指数的显著性表明，中国农业绿色发展与农业科技创新能力的耦合协调度在空间上存在正向的关联性，并且这种空间溢出效应对于理解区域间的发展差异和协同策略具有重要意义。(3)空间分布与格局演进：利用ArcGIS软件对耦合协调度进行空间可视化分析，发现耦合协调度在空间分布上大体呈梯形分布，东部沿海地区高于西部内陆地区。这一分布与中国经济发展的地域差异相吻合，反映了经济发展水平、科技创新能力与农业绿色技术推广和应用之间的紧密联系。(4)空间演变规律：通过引入空间马尔科夫理论，进一步探究了耦合协调度的空间演变规律。结果显示，耦合协调度的空间状态转移具有较高的稳定性，特别是优质和良好协调区域对邻近区域具有地区辐射作用，揭示了耦合协调度不仅受到本地区因素的影响，同时也受到邻近区域的空间效应影响。

（二）政策建议

第一，加强农业绿色发展的科技支撑。从测度结果来看，部分地区耦合协调度水平较低，因此强化科技赋能、创新赋能农业生产，着力推动农业绿色化转型。突出农业科技创新的绿色导向，实现农业农村碳达峰碳中和推进农业节本增效、转型升级和绿色低碳发展迫切需要；加快解决农业减排降碳、农业面源污染防控、农业废弃物资源化利用等现实问题，加强农业生物多样性保护，保护和恢复农田生态系统，维护农业生态平衡；加速农业绿色化、智能化、数字化发展和新材料应用。通过智能化、数字化技术，打造全方位、全链条科技支撑农业绿色低碳发展模式。第二，着力突破农业科技成果转化难题。从空间集聚特征来看，大部分地区存在“高高聚集”和“低低聚集”的分布特征，对于高水平地区要以各级农业科研教学推广单位为技术依托，充分发挥涉农科技型企业和新型经营主体作用，立足地方资源禀赋和比较优势，聚焦县域主导产业，围绕产业链各环节技术需求，通过共建平台、联合攻关、协同推广和品牌创建等方式，实现成果和服务精准供给，推动县域优势特色产业转型升级和提质增效，共建一批产业科技化、人才专业化、生态绿色化的农业科技现代化先行县。这些先行县将

发挥示范和引领作用，在先进的农业技术、设备和工艺推广方式方面；农业科研与经营管理人才孵化方面；绿色农业生产技术推广方面为其他地区提供可复制和可推广的经验和模式。第三，建立跨区域、跨部门的农业科技创新协同发展机制。从空间演进特征和分布特征来看，西部地区相对发展水平较低，在农业科技创新能力上，要根据省域实际，制定农业科技创新驱动策略。围绕区域性、行业性和基础性农业发展问题，聚焦重大产业问题和科技难题，整合全国优势科技资源，像涉农高校、农业科研单位、涉农龙头企业等，实现信息资源在各区域、各部门的充分流动与共享，多措并举、系统推进，加快推进农业传统生产力新质化，建设一批产业特色明显、发展方式绿色、各类要素集聚、机制创新鲜明、示范带动有力的国家农业科技创新联盟。此外，还要注重农业科技成果的转化和应用，将科技创新成果转化为实际生产力，推动农业产业升级。培养一批符合当前时代发展背景下的涉农专项人才，为农业高质量发展注入发展活力。

参考文献

[1] 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.

[2] 石凯含, 尚杰. 农业面源污染防治政策的演进轨迹、效应评价与优化建议[J]. 改革, 2021(5): 146-155.

[3] 金欣鹏, 马林, 张建杰, 等. 农业绿色发展系统研究思路与定量方法[J]. 中国生态农业学报, 2020(8): 1127-1140.

[4] 金书秦, 林煜, 牛坤玉. 以低碳带动农业绿色转型:中国农业碳排放特征及其减排路径[J]. 改革, 2021(5): 29-37.

[5] 姜涛, 刘瑞, 边卫军. “十四五”时期中国农业碳排放调控的运作困境与战略突围[J]. 宁夏社会科学, 2021(5): 66-73.

[6] 梁俊芬, 方伟, 万忠, 等. 中国省域农业科技创新能力评价——基于绿色发展视角[J]. 科技管理研究, 2020(9): 60-67.

[7] 刘涛, 杜思梦. 基于新发展理念的农业高质量发展评价指标体系构建[J]. 中国农业资源与区划, 2021(4): 1-9.

[8] 杜思梦, 刘涛. 基于新发展理念的农业高质量发展: 内涵、问题及举措[J]. 中国农业科技导报, 2021(3): 18-24.

[9] 徐光平, 曲海燕. “十四五”时期我国农业高质量发展的路径研究[J]. 经济问题, 2021(10): 104-110.

[10] 杨义武, 林万龙. 农业科技创新、空间关联与农民增收[J]. 财经科学, 2018(7): 70-82.

[11] 徐晓莉, 外力·依米提. 可持续发展视角下我国农业生态与农业经济的协调发展路径选择[J]. 农业经济, 2019(10): 9-11.

[12] 赵俊亚. 新常态下农业生态经济的可持续发展研究[J]. 农业经济, 2017(3): 25-26.

[13] 刘畅, 郭一迪, 马国巍. 黑龙江省农业高质量发展与农业科技创新能力的协同发展水平[J]. 科技管理研究, 2021(14): 81-88.

[14] 王连群, 鹿永华. 中国农业绿色发展水平测度及其时空演变研究[J]. 江西农业学报, 2023(7): 193-200.

[15] 贾宁宁. 我国农业绿色发展的时空差异与影响因素研究[D]. 西安: 西北大学, 2022.

[16] 李菲菲, 周玉玺, 周霞. 山东农业绿色发展水平时空差异与障碍因素分析[J]. 中国农业资源与区划, 2023(5): 111-121.

[17] 杜旭, 王丹, 郭翔宇, 等. 黑龙江省农业科技创新能力评价与比较分析[J]. 农业经济与管理, 2020(2): 37-44.

[18] 王丹, 杜旭, 郭翔宇. 中国省域农业科技创新能力评价与分析[J]. 科技管理研究, 2021(1): 1-8.

[19] 赵丽娟, 胡畔, 李杨薇. 农业科技创新能力动态综合评价——基于速度特征[J]. 科技管理研究, 2020(18): 72-79.

[20] 卢奕亨, 田云, 周丽丽. 四川省农业碳排放时空演变特征及其影响因素研究[J]. 中国农业资源与区划, 2023(11): 1-14.

[21] 白冰, 赵作权, 张佩. 中国南北区域经济空间融合发展的趋势与布局[J]. 经济地理, 2021(2): 1-10.

[22] 梁耀文, 王明利, 马晓萍, 等. 中国畜牧业生态效率时空特征及溢出效应研究[J]. 中国农业资源与区划, 2023(8): 189-201.

[23] 蒲英霞, 马荣华, 葛莹, 等. 基于空间马尔可夫链的江苏区域趋同时空演变[J]. 地理学报, 2005(5): 817-826.

[24] 杨子涵, 彭宝玉, 孙君. 京津冀地区产业链空间网络及其隐含碳排放研究[J]. 地理科学进展, 2024(2): 215-230.

[25] Sun Y, Hu R, Zhang C. Does the adoption of complex fertilizers contribute to fertilizer overuse? Evidence from rice production in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019(219): 677-685.

（**责任编辑**：胡英彬）

A Study on the Coupling Coordination Degree and Temporal and Spatial Evolution of China's Agricultural Green Development Level and Agricultural Science and Technology Innovation Capability

LU Yonghua, WANG Lianqun, ZHOU Zekun

(College of Economics and Management (Cooperative College), Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, Shandong, China)

Abstract: Green development is an inevitable requirement for the construction of an ecological civilisation, while scientific and technological innovation is the key to solving the problems of green development, in order to achieve high-quality development of agriculture and improve the level of green development of agriculture. An evaluation index system was developed the level of accessing green agricultural development and the capacity of agricultural science and technology innovation. The Entropy Method was used to determine the comprehensive level of the two systems. The coupling coordination degree of the dual system's comprehensive level was evaluated using the CCDM (coupling coordination degree model). KDE (kernel density estimation), Standard Deviational Ellipse, Spatial Markov Chain, and other methods were used to analyze the spatiotemporal evolution characteristics of the coupling coordination degree between agricultural green development level and agricultural innovation ability. The research findings indicated that the overall level of coupling coordination between China's dual systems was increase. Among them, the eastern region experienced the most significant increase, followed by the central region, and lastly the western region. The coordination degree of China's dual system coupling exhibited a pattern of 'high-high aggregation, low-low aggregation' evolution. The overall level of spatial agglomeration in China's dual system coupling coordination showed a rising tendency, with high-level development areas exerting spatial correlation effects on medium to low development areas. Therefore, it is necessary to strengthen the scientific and technological support for the green development of agriculture; endeavour to break through the difficulties in the transformation of agricultural scientific and technological achievements; and establish a cross-regional and cross-sectoral mechanism for the collaborative development of agricultural scientific and technological innovation.

Key words: green development level of agriculture; agricultural technology innovation capability; entropy method; spatiotemporal evolution