徐州市农业碳排放时空特征与脱钩效应

徐 玥[1]，王 辉[1,2,3]，韩秋凤[4]

（1.中国矿业大学 公共管理学院，江苏 徐州 221116；2.中国资源型城市转型发展与乡村振兴研究中心，江苏 徐州 221116；3.中国矿业大学 矿区土地利用与生态安全治理研究中心，江苏 徐州 221116；4.中国矿业大学 环境与测绘学院，江苏 徐州 221116）

摘　要：［目的］分析徐州市时空尺度下农业碳排放时空特征与脱钩效应，为江苏省徐州市及其周边资源型城市未来农业的绿色高质可持续发展以及农业经济的良性增长提供理论与数据参考。［方法］采用排放系数法测算 2000—2020 年时空尺度下徐州市农业碳排放总量、强度和结构，而后基于 Tapio 脱钩模型分析其与农业经济发展间的脱钩关系。［结果］①徐州市农业碳排放变化趋势总体呈“快速上升—波动上升—快速下降”3 阶段，从 2000 年的 1.61×10^6 t 先增后减至 2020 年的 1.69×10^6 t，形象地表现为“M”形。对农业碳排放贡献率大小依次是耕地利用（46.44%）、作物种植（31.90%）和牲畜养殖（21.66%），化肥是最主要碳源。②徐州市各区（县、市）农业碳排放量差异明显，经历了由升到降的长期演化进程，空间层面上总体呈现出“中部高，周边低”的分布格局，邳州市最为突出；③徐州市农业碳排放与农业经济发展总体经历了“弱脱钩—强负脱钩—扩张负脱钩—强脱钩”的变化历程，且“十三五”以来主要表现为强脱钩。［结论］徐州市农业碳排放随着低碳减排理念的不断深入而日趋合理，农业经济发展也取得了一定成效。

关键词：农业碳排放；时空特征；脱钩效应；农业经济发展；江苏省徐州市

文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X(2023)05-0395-09　　**中图分类号：**F327，S157.4

文献参数：徐玥，王辉，韩秋凤.徐州市农业碳排放时空特征与脱钩效应[J].水土保持通报，2023，43(5)：395-403.DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20230526.004；Xu Yue，Wang Hui，Han Qiufeng. Spatial-temporal characteristics and decoupling effects of agricultural carbon emissions at Xuzhou City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2023，43(5)：395-403.

Spatial-Temporal Characteristics and Decoupling Effects of Agricultural Carbon Emissions at Xuzhou City

Xu Yue[1]，Wang Hui[1,2,3]，Han Qiufeng[4]

(1.*School of Public Policy and Management*，*China University of Mining and Technology*，*Xuzhou*，*Jiangsu* 221116，*China*；2.*China Resource-based City Transformation Development and Rural Revitalization Research Center*，*Xuzhou*，*Jiangsu* 221116，*China*；3.*Research Center for Land Use and Ecological Security Governance in Mining Area*，*China University of Mining and Technology*，*Xuzhou*，*Jiangsu* 221116，*China*；4.*School of Environment and Spatial Informatics*，*China University of Mining and Technology*，*Xuzhou*，*Jiangsu* 221116，*China*)

Abstract：[Objective] The spatial-temporal characteristics and decoupling effects of agricultural carbon emissions at Xuzhou City，Jiangsu Province were analyzed in order to provide a theoretical basis and data reference for green，high-quality sustainable development of agriculture and the benign growth of the agricultural economy in Xuzhou City，and its surrounding resource-based cities in the future. [Methods] The total amount，intensity，and structure of agricultural carbon emissions at Xuzhou City from 2000 to 2020 were measured using the emission coefficient method，and their decoupling relationship with agricultural economic development was determine based on the Tapio decoupling model. [Results] ① The overall trend of agricultural carbon emissions at Xuzhou City could be described as M-shaped (rapid rise-fluctuating rise-rapid decline) from

收稿日期：2022-11-05　　**修回日期：**2023-04-03

资助项目：中国矿业大学公共管理学院（应急管理学院）高水平成果培育项目“农业碳减排与生态补偿实现路径与策略”（XY202127）；矿业学科群提升自主创新能力项目（2022ZZCX02K4）；中国资源型城市转型发展与乡村振兴研究中心（高端智库）（2021WHCC03）

第一作者：徐玥（1998—），男（汉族），安徽省六安市人，硕士研究生，主要研究方向为农业碳源碳汇。Email：2196673429@qq.com。

通信作者：王辉（1976—），男（汉族），江苏省徐州市人，博士，副教授，主要从事土地利用与生态安全治理研究。Email：wanghuei@cumt.edu.cn。

1.61×10^6 t in 2000 to 1.69×10^6 t in 2020. The contributions of factors affecting agricultural carbon emissions followed the order of arable land use (46.44%), crop cultivation (31.90%) and livestock breeding (21.66%), with chemical fertilizers being the most important carbon source; ② Agricultural carbon emission at Xuzhou City varied significantly among districts (counties and cities) and had undergone a long-term evolutionary process from rising to falling, with a spatial distribution pattern of "higher in the middle and lower in the surrounding areas", with Pizhou City being the most prominent; ③ Xuzhou City's agricultural carbon emissions and agricultural economic development have generally undergone a process of "weak decoupling—strong negative decoupling—expansion of negative decoupling—strong decoupling", and has mainly manifested as strong decoupling since the 13th Five-Year Plan. [Conclusion] Xuzhou City's agricultural carbon emissions are becoming more and more reasonable as the concept of low-carbon emission reduction continues to deepen. Agricultural economic development has also achieved clear and convincing effects.

Keywords: agricultural carbon emissions; spatial-temporal characteristics; decoupling effect; agricultural economic development; Xuzhou City, Jiangsu Province

农业作为国民经济的最基础和最根本产业,在发挥助农助工保民增收的同时,也对全球气候变化产生了复杂的双向影响[1]。一方面农业生产资料的高化学化、机械化模式以及牲畜养殖所产生的甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)温室气体导致农业碳排放增长显著,极大地破坏了区域乃至全球碳平衡。尽管目前二、三产业仍然是碳排放的最主要来源,但农业的体量化快速化发展无疑是加速全球气候变暖的重要诱因[2]。另一方面全球气候变化所带来的增温效应使得诸如冰川消融、极端天气、疾病传播、生物多样性减少等灾害问题日益加剧,进而直接影响粮食生产、人民生活、国家安全[3-4]。中国作为一个负责任有担当的农业大国,在应对和缓和气候变化方面做出了积极且有力的贡献。自政府创造性地提出碳达峰、碳中和的"双碳"目标后,在党的二十大报告中更是首次提出加快建设农业强国,中央农村工作会议也着重强调强国必先强农、发展生态低碳农业。因此,如何针对种植业和畜牧业尽可能丰富完整地构建可供核查的农业碳排放测算体系以厘清其时空演化特征及其与农业经济发展的脱钩弹性关系便成了首要和基础问题。

由于碳达峰阶段针对的主要是化石能源,学术界对碳排放的研究多倾向于能源活动、工业生产、交通运输等领域,但农业领域的碳排放问题亦不可小觑。不同学者根据自身学术背景和研究视角已开展了广泛且深刻的研究,主要包括以下几个方面:①农业碳排放测算及其时空差异[5-6]。例如田云等[7]基于农业能源利用、农用物资投入、水稻种植和畜禽养殖对中国农业碳排放进行再测算,最终得出中国农业碳排放总量处于下降态势且存在年际波动,各省份碳排放强度表现为西高东低态势。②农业碳排放测算及其影响因素[8-10]。例如刘杨等[11]基于农资投入、农田利用和畜禽养殖测算山东省农业碳排放量,采用 LMDI 模型开展影响因素分析,最终得出地区经济发展水平和城镇化率是农业碳排放增加的最主要因素。③农业碳排放与农业经济或粮食生产脱钩效应研究[12-13]。例如丁宝根等[14]基于碳排放系数法探究了中国耕地资源利用的碳排放时空差异,而后基于脱钩分析法揭示耕地碳排放与农业经济增长间的脱钩关系,最终得出前期以弱脱钩为主,后期各省份存在脱钩差异。吴昊玥等[15]在构建中国粮食主产区耕地碳排放测算框架的基础上分析其与粮食生产间的长期脱钩关系,最终得出前期脱钩状态存在波动,后期主要表现为弱脱钩。

综上所述,对农业碳排放的测算多聚焦于中国全境、粮食主产区等大尺度空间,不仅指标测算体系不尽完善,对脱钩类型的背后成因亦探讨不深,且鲜有研究关注能源资源型城市尤其是在最可能被忽视的农业领域。江苏省徐州市不仅是全国闻名的煤炭、电力等资源型大市,同时也是苏北地区乃至整个江苏省最重要的"隐形"农业大市,对周边相邻资源型城市的低碳转型和减排固碳具有重要的正向带动作用。2020 年农作物总播种面积 1.18×10^4 km^2,占全省农作物总播种面积 7.48×10^4 km^2 的 15.78%;粮食产量 5.02×10^6 t,占全省粮食总产量 3.73×10^7 t 的 13.46%;农业总产值 7.49×10^{10} 元,占全省农业总产值 4.10×10^{11} 元的 18.27%。农业体量之大、投入之高无疑使得农业碳排放问题日益严峻,对整个苏北地区乃致江苏省碳排放格局影响重大,也在一定程度上对"双碳"目标的如期实现产生影响。基于此,本文在针对种植业和畜牧业构建农业碳排放指标测算体系的基础上,对 2000—2020 年徐州市时空尺度下农业碳排放总量、强度和结构进行全面测算和系统分析,而后采用 Tapio 脱钩模型来明确农业碳排放与农业经济发展间的动态响应关系并对其背后可能存在的自然和政策成因进行深度挖掘,以期为徐州市及其周

边资源型城市未来农业的绿色高质可持续发展以及农业经济的良性增长提供理论与数据参考。

1　材料与方法

1.1　数据来源

徐州市耕地利用、作物种植、牲畜养殖所需数据以及农业产值、耕地面积和人口数据均来自 2000—2021 年《徐州统计年鉴》和《江苏省农村统计年鉴》。其中,化肥、农药、农用薄膜、农用柴油以当年徐州市实际使用数量为准;农业灌溉以当年徐州市实际有效灌溉面积为准;粮经作物播种面积以当年徐州市实际播种面积为准;而对牲畜养殖数据进行搜集处理时,出栏率大于 1 的猪、兔、家禽的年均饲养量按照(平均生命周期 * 年末出栏量)/365 计算,其中猪、兔、家禽的平均生命周期分别为 200,105,55 d;出栏率小于 1 的牛、马、驴、骡、羊的年均饲养量按照(上年年末存栏量+本年年末存栏量)/2 计算。

本文所指农业产值为贴合研究实际的广义农业产值,即种植业和畜牧业的总产值,为排除价格因素干扰,农业产值取 1990 年不变价格。由于数据所限,耕地面积截至 2018 年数据,其中作图空间数据基于自然资源部标准地图服务系统。

1.2　农业碳排放测算方法

本文综合参考前人学者对农业碳排放的相关研究,同时考虑徐州市农业生产实际,最终选取耕地利用、作物种植和牲畜养殖 3 大类碳源,以此构建徐州市农业碳排放指标测算体系。采用碳排放系数法,通过合理确定各类碳源的碳排放系数,从而测算各类碳源的碳排放量并汇总分析。农业碳排放测算公式具体如下:

$$C=\sum C_i=\sum T_i\cdot\delta_i \tag{1}$$

式中:C 表示农业碳排放总量(10^4 t);C_i 表示各碳源类别碳排放总量(10^4 t);T_i 表示各碳源因子实际物质投入量〔10^4 t/(hm^2·头)〕;δ_i 表示各碳源因子对应的碳排放系数。

1.2.1　*耕地利用碳排放测算方法*　从耕地利用方面看,长期以来为了使农作物有更好的生长条件和产量优势,人们在农业劳作过程中会大量投入和消耗包括化肥、农药、农用薄膜、农业柴油、农业灌溉等化学制品、机械、电力等,由此产生的间接碳排放会极大地影响区域气候环境。耕地利用碳排放源及其系数如表 1 所示。

表 1　耕地利用碳排放源及其系数

Table 1　Carbon emission sources and their coefficients for cultivated land use

碳源类别	碳源因子	碳排放系数(以 C 计)	文献来源
耕地利用	化肥	0.896 kg/kg	美国橡树岭国家实验室
	农药	4.934 kg/kg	美国橡树岭国家实验室
	农用薄膜	5.18 kg/kg	南京农业大学农业资源与生态环境研究所
	农业柴油	0.593 kg/kg	政府间气候变化专门委员会
	农业灌溉	266.48 kg/hm^2	段华平等[16]

1.2.2　*作物种植碳排放测算方法*　从作物种植方面看,土壤碳库作为陆地生态系统最重要的碳库,对其进行稻谷、小麦、玉米、油菜籽等粮经作物的耕种会破坏土壤表层从而造成 CH_4 和 N_2O 温室气体的产生和流失,由此产生的直接碳排放也会极大地影响区域气候变化。为保持数据单位一致性便于进行横向碳源对比,根据 IPCC 第四次评估报告,本文将按照1 t(CH_4)=6.818 t(C)和 1 t(N_2O)=81.273 t(C)的折算比例计算。作物种植碳排放源及其系数如表 2 所示。

1.2.3　*牲畜养殖碳排放测算方法*　从牲畜养殖方面看,北方地区自古以来便有饲养牲畜的传统,而养殖牛、马、驴、猪、家禽等牲畜会通过肠道发酵和牲畜粪便产生大量 CH_4 和 N_2O 温室气体,由此产生的直接碳排放亦会极大地影响区域气候状态。牲畜养殖碳排放源及其系数如表 3 所示。

表 2　作物种植碳排放源及其系数

Table 2　Carbon emission sources and their coefficients from crop cultivation

碳源类别	碳源因子	碳排放系数	文献来源
作物种植	稻谷	32.41 g/m^2(以 CH_4 计)	闵继胜等[17]、田云等[18]
		0.24 kg/hm^2(以 N_2O 计)	
	小麦	1.75 kg/hm^2(以 N_2O 计)	
	玉米	2.532 kg/hm^2(以 N_2O 计)	
	大豆	2.29 kg/hm^2(以 N_2O 计)	
	薯类	0.95 kg/hm^2(以 N_2O 计)	
	花生	0.95 kg/hm^2(以 N_2O 计)	
	棉花	0.95 kg/hm^2(以 N_2O 计)	
	油菜籽	0.95 kg/hm^2(以 N_2O 计)	
	蔬菜	4.944 kg/hm^2(以 N_2O 计)	

表 3 牲畜养殖碳排放源及其系数

Table 3 Carbon emission sources and their coefficients from livestock breeding

碳源类别	碳源因子	碳排放系数			文献来源
		肠道发酵/〔kg·(head·a)$^{-1}$〕(以 CH_4 计)	牲畜粪便/〔kg·(head·a)$^{-1}$〕(以 CH_4 计)	牲畜粪便/〔kg·(head·a)$^{-1}$〕(以 N_2O 计)	
牲畜养殖	牛	47.8	1	1.39	闵继胜等[17]、张丽琼等[19]
	马	18	1.64	1.39	
	驴	10	0.9	1.39	
	骡	10	0.9	1.39	
	猪	1	3.5	0.53	
	羊	5	0.16	0.33	
	兔	0.254	0.08	0.02	
	家禽	—	0.02	0.02	

1.3 脱钩理论及其模型

脱钩理论最早来自于物理学领域,主要用于分析联系密切的两个变量从最初的逐渐分离直至完全脱离的动态变化过程,后被广泛用于研究资源与经济间的动态变化关系。Tapio 脱钩模型用弹性系数来动态反映两个对象变化的脱钩关系,即本文中农业碳排放量的变化与农业经济发展间的关系。若农业碳排放量增速小于 0 或小于农业经济发展增速,则达到一定程度的脱钩,随着脱钩弹性的不同,可以细分为连接、脱钩和负脱钩,而农业碳排放量的变化与农业经济增速的不同又会影响脱钩类别,具体类别划分如表 4 所示。脱钩弹性系数测算公式具体如下:

$$e=\frac{\Delta C/C}{\Delta CG/CG} \tag{2}$$

式中:e 表示脱钩弹性;ΔC 表示农业碳排放变化量(10^4 t);C 表示农业碳排放基期总量(10^4 t);ΔCG 表示农业产值变化量(10^4 元);CG 表示农业基期产值(10^4 元)。

表 4 Tapio 脱钩类别及其状态

Table 4 Tapio decoupling categories and their states

脱钩类别	脱钩状态	环境压力($\Delta C/C$)	经济发展($\Delta CG/CG$)	脱钩弹性(e)
负脱钩	扩张负脱钩	+	+	$e>1.2$
	强负脱钩	+	−	$e<0$
	弱负脱钩	−	−	$0\leqslant e<0.8$
脱钩	弱脱钩	+	+	$0\leqslant e<0.8$
	强脱钩	−	+	$e<0$
	衰退脱钩	−	−	$e>1.2$
连接	扩张连接	+	+	$0.8\leqslant e\leqslant 1.2$
	衰退连接	−	−	$0.8\leqslant e\leqslant 1.2$

2 结果与分析

2.1 徐州市农业碳排放时序特征

2.1.1 徐州市农业碳排放总量特征 农业碳排放总量方面,根据式(1)测算,徐州市 2000—2020 年农业碳排放具体情况如表 5 和图 1 所示。徐州市农业碳排放总体呈“快速上升—波动上升—快速下降”3 阶段变化趋势,从 2000 年的 1.61×10^6 t 逐渐递增至最高峰 2014 年的 2.08×10^6 t,而后快速下降至 2020 年的1.69×10^6 t,形象地表现为“M”形,年均递增率为 0.26%,环比增速总体呈波动下降态势。具体阶段如下:①2000—2007 年为第一阶段,处于快速上升期,年均增幅为 4.77×10^4 t,年均递增率为 2.73%。由于早期还未有清晰明了的低碳农业意识,政府的关注点主要在粮食产量的提升和农业经济的发展,伴随着 2005 年全面免征农业税政策的出台,农业碳排放总量在火热建设下呈快速上升态势。②2007—2014 年为第二阶段,处于波动上升期,年均增幅为 1.95×10^4 t,年均递增率为 0.98%。考虑到当时仍处于全面建设小康社会的中坚发力期,徐州市“十一五”“十二五”期间推进种养规模化以稳定粮食生产确保粮食安全,推进布局区域化以发展高效经济作物和特色养殖业,农业碳排放总量在一定控制下呈波动上升态势。③2014—2020 年为第三阶段,处于快速下降期,年均增幅为 -6.38×10^4 t,年均递增率为 −3.34%。2014 年中央一号文件提出促进生态友好型农业发展、开展农业资源修生养息试点和加大生态保护建设力度三大要点,2015 年“绿色”的新发展理念更是奠定了中国今后发展的总基调,农业碳排放总量在有力控制下呈快速下降态势。

表 5　徐州市 2000—2020 年农业碳排放情况

Table 5　Agricultural carbon emissions at Xuzhou City from 2000 to 2020

年份	耕地利用		作物种植		牲畜养殖		农业碳排放总量	
	碳排放量/10^4 t	比例/%	碳排放量/10^4 t	比例/%	碳排放量/10^4 t	比例/%	碳排放总量/10^4 t	环比增速/%
2000	79.84	49.69	52.48	32.66	28.35	17.65	160.67	—
2001	81.08	50.14	50.44	31.19	30.20	18.68	161.72	0.65
2002	82.48	49.77	49.85	30.08	33.40	20.15	165.72	2.47
2003	86.19	51.05	45.86	27.16	36.78	21.78	168.83	1.87
2004	87.56	48.59	54.92	30.48	37.71	20.92	180.19	6.73
2005	89.18	47.37	59.15	31.42	39.92	21.21	188.26	4.47
2006	89.39	47.25	60.21	31.83	39.57	20.92	189.16	0.48
2007	92.23	47.53	60.48	31.17	41.34	21.30	194.05	2.58
2008	90.72	47.82	59.91	31.58	39.09	20.61	189.72	−2.23
2009	92.00	47.25	61.30	31.48	41.41	21.27	194.70	2.63
2010	93.55	45.85	62.04	30.41	48.45	23.74	204.03	4.79
2011	92.44	44.86	63.19	30.67	50.41	24.47	206.04	0.99
2012	91.02	43.84	63.75	30.71	52.84	25.45	207.61	0.76
2013	89.16	43.02	64.00	30.88	54.09	26.10	207.25	−0.18
2014	88.71	42.71	63.94	30.79	55.04	26.50	207.69	0.21
2015	86.50	41.96	64.77	31.42	54.87	26.62	206.14	−0.74
2016	85.12	43.09	63.55	32.17	48.87	24.74	197.55	−4.17
2017	83.63	44.38	63.33	33.60	41.50	22.02	188.46	−4.60
2018	81.34	45.01	63.61	35.20	35.76	19.79	180.71	−4.11
2019	80.55	47.34	63.53	37.33	26.09	15.33	170.16	−5.84
2020	78.98	46.63	63.77	37.65	26.64	15.73	169.39	−0.45
年增率/%	−0.05	—	0.98	—	−0.31	—	0.26	—

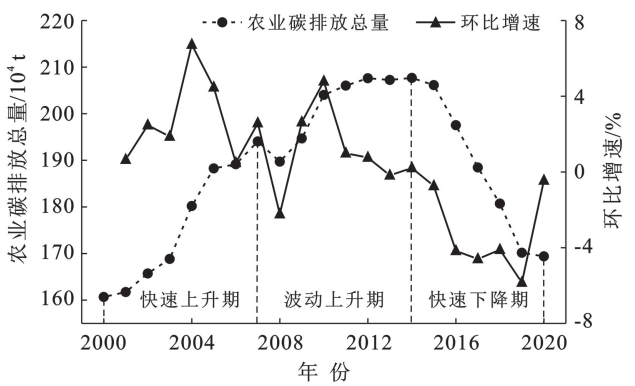

图 1　徐州市 2000—2020 年农业碳排放总量及其环比增速变化情况

Fig.1　Total agricultural carbon emission and its change in month-on-month growth rate at Xuzhou City from 2000 to 2020

2.1.2　徐州市农业碳排放强度特征　农业碳排放强度方面,本文选取单位农业产值碳排放强度、单位耕地面积碳排放强度和单位农业人口碳排放强度 3 方面指标全方位反映 21 a 来徐州市农业低碳化进程,具体情况见表 6。总体而言,除单位农业产值碳排放强度呈现出明显的下降趋势外,其余二者均表现出一定程度的正增长态势,但“十三五”以来有明显好转之势,体现出徐州市在农业生产、耕地保护和人口吸引方面的良好成效。

单位农业产值碳排放强度从 2000 年的 1.42 t/10^4 元平缓递减至 2020 年的 0.32 t/10^4 元,年均增幅为−0.06 t/10^4 元,年均递增率为−7.20%。农业碳排放0.26%的年增率远小于农业产值 8.04%的年增率,这得益于徐州市在农业现代化和农村经济发展方面的实干与努力。值得注意的是,2003 年因暴雨冰雹等自然灾害和全国范围内非典疫情影响,全市调减粮食作物面积 3.70×10^5 hm^2,导致农业产值突然下滑,单位农业产值碳排放强度因此异常升高[20]。单位耕地面积碳排放强度从 2000 年的 2.63 t/hm^2 逐渐递增至最高峰 2014 年的 3.41 t/hm^2,随后快速下降至 2018 年的 2.96 t/hm^2,年均递增率为 0.66%。这与徐州市将耕地保护工作纳入市对县重点经济工作目标考核、建立最严格的耕地保护体系和实施最健全的补偿激励机制密不可分。单位农业人口碳排放强度从 2000 年的 0.24 t/人逐渐递增至最高峰 2014 年的 0.73 t/人,而后平缓下降至 2020 年的0.43 t/人,年均递增率为 2.96%。这源于徐州市淮海经济区核心位置所引发的高频次人口流动,与时代的变迁和乡村振兴战略密切相关。

表 6 徐州市 2000—2020 年农业碳排放强度情况

Table 6 Agricultural carbon emission intensity at Xuzhou City from 2000 to 2020

年份	单位农业产值碳排放强度（t/10^4 元）	单位耕地面积碳排放强度（t·hm^{-2}）	单位农业人口碳排放强度（t/人）
2000	1.42	2.63	0.24
2001	1.34	2.65	0.24
2002	1.29	2.72	0.25
2003	1.42	2.77	0.27
2004	1.35	2.97	0.29
2005	1.37	3.14	0.31
2006	1.34	3.17	0.31
2007	1.30	3.26	0.31
2008	1.16	3.19	0.31
2009	1.09	3.18	0.34
2010	1.01	3.34	0.39
2011	0.84	3.37	0.59
2012	0.73	3.41	0.64
2013	0.65	3.40	0.72
2014	0.58	3.41	0.73
2015	0.53	3.38	0.48
2016	0.48	3.25	0.46
2017	0.42	3.10	0.45
2018	0.38	2.96	0.44
2019	0.34	—	0.42
2020	0.32	—	0.43
年增率/%	−7.20	0.66	2.96

2.1.3 徐州市农业碳排放结构特征 农业碳排放结构方面，为更好地厘清农业内部碳排放现状，将稻谷、小麦、玉米、大豆、薯类归为粮食作物，花生、棉花、油菜籽、蔬菜归为经济作物；将猪、兔、家禽归为日常牲畜，牛、马、驴、骡、羊归为大型牲畜。总体来看，研究期内除化肥、农药和大型牲畜年均递增率为负值外，其余均保持一定程度的正增长。

化肥作为占比最大的碳源，从 2000 年的 5.08×10^5 t 先增后减至 2020 年的 4.85×10^5 t，贡献率从 31.61%先增后减至 28.64%，年均递增率为−0.23%；农药作为年均递增率下降最多的碳源，从 2000 年的 7.42×10^4 t 逐渐递减至 2020 年的 4.12×10^4 t，贡献率从 4.62%下降至 2.43%，年均递增率为−2.91%，预计二者未来将继续减少。农用柴油和农业灌溉作为外在间接碳排放的代表，随着机械化和产业化的提升而愈发重要，从 2000 年的 1.72×10^5 t 逐渐递增至 2020 年的 1.97×10^5 t，贡献率从 10.70%上升至 11.62%，预计未来将继续增加。粮食作物和经济作物均呈上升态势，且前者比例远高于后者，2000 年分别为 4.18×10^5 t 和 1.06×10^5 t，贡献率为 26.04%和 6.62%，2020 年则分别增至 4.97×10^5 t 和 1.41×10^5 t，贡献率升至 29.34%和 8.31%，预计二者未来将保持相对稳定。日常牲畜因日常肉食性需求量大呈先增后减态势，从 2000 年的 1.25×10^5 t 波动递增至 2020 年的 1.91×10^5 t，年均递增率为 2.13%，预计未来会因疫情放开下人民对肉食品的需求而有所增加；大型牲畜因畜牧业供给侧的结构性调整和禁养区的规模性关闭，从 2000 年的 1.58×10^5 t 波动递减至 2020 年的 7.57×10^4 t，年均递增率为−3.63%，预计未来将继续减少。

2.2 徐州市农业碳排放空间特征

空间特征方面，分别取 2000，2010，2020 年即前中后 3 个时间节点，借助 ArcGIS 软件，按照 1.50×10^5，3.00×10^5，4.50×10^5 t 的农业碳排放节点将徐州市划分为农业低碳排放区、农业中碳排放区和农业高碳排放区，具体情况见图 2。总的来看，徐州市各区（县、市）农业碳排放量差异较为明显，经历了由升到降的长期演化进程，空间层面上总体呈现出“中部高，周边低”的分布格局。

考察前期即 2000 年时邳州市就已是市内唯一的农业高碳排放区，农业碳排放量达 3.17×10^5 t，占全市农业碳排放总量的 19.81%，是最低的徐州市辖区 9.36×10^4 t 的 3.39 倍。究其原因，无论是前期 1.21×10^5 hm^2 的耕地面积还是 6.46×10^5 t 的粮食产量，二者背后所消耗的化肥、农药、农用柴油等高碳农业生产资料均使邳州市农业碳排放量居高不下，并且一直持续到后期。除农业低碳排放区徐州市辖区外，其余 5 县市均处于农业中碳排放区，占全市农业碳排放总量的 74.35%。随着前期农业化学化、机械化和规模化的不断投入推进，考察中期即 2010 年时整体农业碳排放量均有所提高，其中睢宁县和铜山县因农业碳排放量涨幅较大从原先的农业中碳排放区跃升至农业高碳排放区。2010 年两县农业碳排放量分别为 3.24×10^5 t 和 3.17×10^5 t，较 2000 年的 2.36×10^5 t 和 2.80×10^5 t 分别提升了 37.44%和 13.02%，此时农业高碳排放区占全市农业碳排放总量的 53.13%，由此形成农业高碳排放区和农业中低碳排放区分庭抗礼的局面。源于“绿色”新发展理念的提出以及一系列减肥减药控污政策的施行，考察后期即 2020 年时整体农业碳排放量在多方控制下降幅明显，虽未降至 2000 年基期状态，但成效已然可观。邳州市以 3.39×10^5 t 的农业碳排放量再次成为市内唯一的农业高碳排放区，较 2010 年下降了 22.16%，占全市农业碳排放总量的 20.04%，是最低的徐州市辖区 1.09×10^5 t 的 3.10 倍，区域首尾差距有一定程度缩小。

考察中期涨幅较高的睢宁县和铜山县在农业生产资料的合理减量投入和牲畜养殖数量的规范有序减少而回落至农业中碳排放区,预计未来仍将继续减少。研究期内,农业高碳排放区由 2000 年的 1 个增加至 2010 年的 3 个又回落至 2020 年的 1 个;农业中碳排放区由 2000 年的 5 个缩减至 2010 年的 3 个又回升至 2020 年的 5 个;农业低碳排放区自始至终都仅有徐州市辖区 1 个。

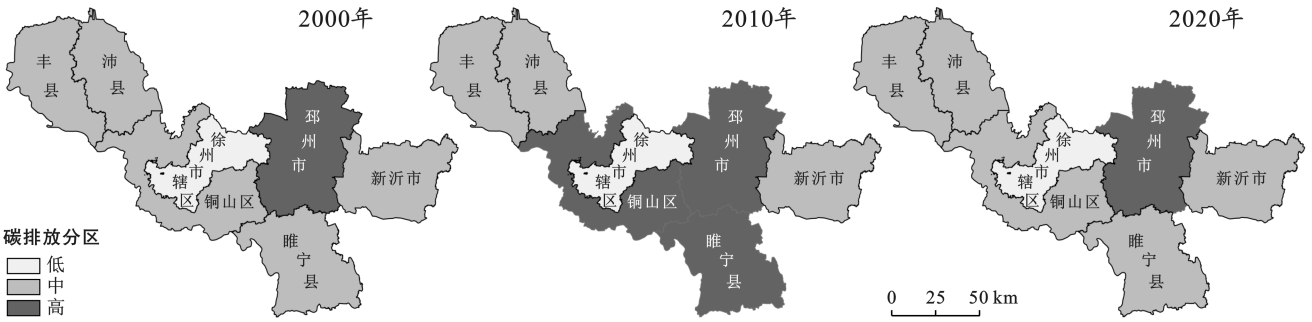

图 2　徐州市 2000—2020 年农业碳排放空间演化情况

Fig.2　Spatial evolution of agricultural carbon emissions at Xuzhou City from 2000 to 2020

2.3　徐州市农业碳排放与农业经济发展脱钩效应

脱钩效应方面,根据公式(2)测算,徐州市 2000—2020 年农业碳排放与农业经济发展脱钩情况见表 7。总的来说,徐州市农业碳排放与农业经济发展总体经历了“弱脱钩—强负脱钩—扩张负脱钩—强脱钩”的变化历程,且“十三五”以来主要表现为强脱钩,有力地表明了农业产值增速远高于农业碳排放增速,低碳农业理念得到了真正落实和有效体现。

表 7　徐州市 2000—2020 年农业碳排放与农业经济发展脱钩情况

Table 7　Decoupling of agricultural carbon emission and agricultural economic development at Xuzhou City from 2000 to 2020

年份	农业碳排放总量/10^4 t	环境压力($\Delta C/C$)	农业产值/10^4 元	经济发展($\Delta CG/CG$)	脱钩弹性(e)	脱钩状态
2000	160.67	—	1 133 643	—	—	—
2001	161.72	0.006 5	1 210 582	0.067 9	0.096 5	弱脱钩
2002	165.72	0.024 7	1 285 444	0.061 8	0.399 7	弱脱钩
2003	168.83	0.018 7	1 186 145	−0.077 2	−0.242 6	强负脱钩
2004	180.19	0.067 3	1 336 273	0.126 6	0.532 1	弱脱钩
2005	188.26	0.044 7	1 378 327	0.031 5	1.421 5	扩张负脱钩
2006	189.16	0.004 8	1 414 297	0.026 1	0.184 6	弱脱钩
2007	194.05	0.025 8	1 487 249	0.051 6	0.500 6	弱脱钩
2008	189.72	−0.022 3	1 633 750	0.098 5	−0.226 6	强脱钩
2009	194.70	0.026 3	1 785 868	0.093 1	0.282 2	弱脱钩
2010	204.03	0.047 9	2 024 238	0.133 5	0.359 1	弱脱钩
2011	206.04	0.009 9	2 458 770	0.214 7	0.045 9	弱脱钩
2012	207.61	0.007 6	2 839 025	0.154 7	0.049 3	弱脱钩
2013	207.25	−0.001 8	3 188 801	0.1232	−0.014 2	强脱钩
2014	207.69	0.002 1	3 606 055	0.130 8	0.016 2	弱脱钩
2015	206.14	−0.007 4	3 873 124	0.074 1	−0.100 4	强脱钩
2016	197.55	−0.041 7	4 132 137	0.066 9	−0.623 3	强脱钩
2017	188.46	−0.046 0	4 526 749	0.095 5	−0.481 8	强脱钩
2018	180.71	−0.041 1	4 751 962	0.049 8	−0.827 0	强脱钩
2019	170.16	−0.058 4	5 039 965	0.060 6	−0.962 9	强脱钩
2020	169.39	−0.004 5	5 326 806	0.056 9	−0.079 6	强脱钩

2000—2005 年为第一阶段,整体表现为弱脱钩、强负脱钩、扩张负脱钩的交替演化状态,处于波动期。农业产值以 3.99%的年增率轻微领先于农业碳排放 3.22%的年增率,除 2003 年和 2005 年表现为强负脱钩和扩张负脱钩外,其余均表现为弱脱钩,这与“十五”期间的政策效应和自然灾害有关。前期因生产建

设发展需要，虽然农业生产资料的投入和大型牲畜的养殖对环境压力造成一定影响，但农业产值却因此得到更为有效的提升，二者间以弱脱钩为主。2003年农业经济发展突然出现滑坡，这与徐州市遭受涝灾及全国性非典疫情的影响有关，粮棉油等主要农产品总产量下降。2005年则由于全面免征农业税政策效应的缘故，农民生产积极性提高使得当年农业碳排放增速高于农业产值增速。

2006—2014年为第二阶段，除2008年和2013年表现为强脱钩外，其余均表现为弱脱钩，整体脱钩状态较为平稳和良好，处于过渡期。农业产值以12.41%的年增率大幅领先于农业碳排放1.17%的年增率，农业碳排放在有效控制中低速增长，在个别年份甚至稳中有降，而农业产值却提升迅速，这与“十一五”“十二五”期间的减排惠农政策相关。在“推动跨越发展，建设美好徐州”的战略目标下，优质、高产、高效、安全、生态的现代农业理念成为新要求。着力加强粮食主产区生产能力建设，在科学减量化学性物质投入的同时提升粮食单产、品质和效益；引导设施农业规模化经营，推进畜禽养殖标准化和减污化，对种植业和畜牧业的多措并举助力农业产值再上新台阶。

2015—2020年为第三阶段，伴随着前中期低碳农业举措的施行以及经济累积效应的不断凸显，整体表现为强脱钩，处于稳定期。农业碳排放以－3.85%的年增率远低于农业产值6.58%的年增率，二者出现反方向增长态势。“十三五”时期是推动“迈上新台阶，建设新徐州”的关键阶段，徐州市相继出台《徐州市“十三五”农业现代化和农村经济发展规划》《徐州市“十三五”循环经济发展规划》等促发文件，大力推进测土配方施肥和喷、微、滴灌技术，鼓励利用畜禽粪便发展农村沼气工程，以种养结合的一体化方式推动农村复合型循环经济发展，在有效减少农业污染的同时促进农业产值得到质的提升，由此保持并稳固二者间的强脱钩状态。

3 结论与建议

3.1 结论

本文以能源资源型城市徐州市为例，采用排放系数法和Tapio脱钩模型法，基于耕地利用、作物种植和牲畜养殖3大类碳源，系统科学地测算了徐州市2000—2020年农业碳排放时空演化特征，并完整详实地分析了农业碳排放与农业经济发展间的脱钩效应及其背后的自然和政策成因。

(1) 随着低碳减排理念的不断深入，徐州市2000—2020年农业碳排放总体呈“快速上升—波动上升—快速下降”3阶段变化趋势，形象地表现为“M”形。对农业碳排放贡献率大小依次是耕地利用(46.44%)、作物种植(31.90%)和牲畜养殖(21.66%)。除单位农业产值碳排放强度呈现出明显的下降趋势外，单位耕地面积碳排放强度和单位农业人口碳排放强度均表现出一定程度的增长态势，但“十三五”以来有明显好转之势。碳排放结构中除化肥、农药和大型牲畜年均递增率为负值外，其余均保持一定程度的正增长，但化肥占比依旧保持在27%以上。

(2) 由于地形、定位、资源等内外因素有别，21 a来徐州市各区(县、市)农业碳排放量差异较为明显，经历了由升到降的长期演化进程，空间层面上总体呈现出“中部高，周边低”的分布格局。邳州市在考察期内以始终高于3.00×10^5 t的农业碳排放量独占鳌头，成为农业高碳排放区的不变对象。睢宁县和铜山县在考察中期因农业碳排放量涨幅较大从原先的农业中碳排放区跃升至农业高碳排放区，由此形成农业高碳排放区(53.13%)和农业中低碳排放区(46.87%)分庭抗礼的局面。徐州市辖区在考察期内以始终低于1.50×10^5 t的农业碳排放量处于农业低碳排放区。

(3) 源于“绿色”新发展理念提纲挈领般地提出，徐州市2000—2020年农业碳排放与农业经济发展总体经历了“弱脱钩—强负脱钩—扩张负脱钩—强脱钩”的变化历程，且“十三五”以来主要表现为稳定的强脱钩，脱钩弹性介于－0.962 9～1.421 5之间，预计未来脱钩态势良好。其中2000—2005年为第一阶段，处于波动期；2006—2014年为第二阶段，处于过渡期；2015—2020年为第三阶段，处于稳定期。

3.2 建议

本文测算结果显示徐州市农业碳排放量或已于2014年达到峰值2.08×10^6 t，先于中国整体农业碳达峰节点2015年，但仍不可松懈大意[21-22]。为进一步控制并削减农业碳排放总量，降低农业碳排放强度，同时保持与农业经济发展间的良好脱钩状态，以期早日实现“双碳”目标，具体建议如下：

(1) 农业碳减排是重要抓手。针对耕地利用这一徐州市最重要且占比最大的碳源，对化肥、农药的减量化和零增长行动要持续有效进行。在以邳州市为主的农业高碳排放区要发展节约型精细型农业，尽可能推进测土配方施肥，根据地力水平科学平衡施肥，还可适当提高生物有机肥、生物农药的施用比例，同时注重回收再利用农用薄膜和农药包装物。农业中高碳排放区在提高农业机械化水平的同时要针对性地引进先进且污染力度小的实用机器，淘汰落后且

污染量大的老旧机器,以减少农用柴油和农业灌溉碳排放量的进一步上升。

(2) 农业现代化是有力手段。作物种植和牲畜养殖作为徐州市农业碳排放的重要来源同样不可忽视。在最初的育苗选苗方面就应高度重视农业科技投入,针对性地培育抗旱、抗涝、抗病虫害等粮经品种,减少因自然灾害而导致的大幅农业减产。将培育新型职业农民提上日程,注重农耕经营管理中专业知识的定期宣传培训,加强秸秆的肥料化综合化利用,做好牲畜粪便的管理与沼气资源的再利用,加快禁养区规模养殖场的转型升级与有序搬迁,控制并减少农业面源污染的进一步扩散。

(3) 农业减源增汇相适宜的区域性或国家级碳交易市场是可行之策。徐州市未来或可联合江苏省及淮海经济区内部城市共同建立并发布农业碳排放年度统计公报,以实际数据指标加深对农业碳排放领域的关注、重视和正向引导。具体可参考福建省厦门市设立的全国首个农业碳汇交易平台,对高碳排放区收取一定碳税以弥补对区域内空气和环境的污染,促进农业生产与碳交易产品的相互转化。如此不仅可以使区域内农业碳排放量在内部减排举措和外部碳税限制下不断减少,同时农业经济也可随着经营管理水平的不断优化而日益提高,二者的强脱钩程度也将不断稳固和加深,在实现生态产品经济化的同时促进“绿水青山”转化为“金山银山”,有力推动农业“碳票”变“钞票”。

[参 考 文 献]

[1] 周一凡,李彬,张润清.县域尺度下河北省农业碳排放时空演变与影响因素研究[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(4):570-581.

[2] 林斌,徐孟,汪笑溪.中国农业碳减排政策、研究现状及展望[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(4):500-515.

[3] Tian Shiqi, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, et al. Global patterns and changes of carbon emissions from land use during 1992—2015 [J]. Environmental Science and Ecotechnology, 2021,7:100108.

[4] 张俊飚,何可.“双碳”目标下的农业低碳发展研究:现状、误区与前瞻[J].农业经济问题,2022,43(9):35-46.

[5] 范紫月,齐晓波,曾麟岚,等.中国农业系统近 40 年温室气体排放核算[J].生态学报,2022,42(23):9470-9482.

[6] 常青,蔡为民,谷秀兰,等.河南省农业碳排放时空分异、影响因素及趋势预测[J].水土保持通报,2023,43(1):367-377.

[7] 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.

[8] 赵宇.江苏省农业碳排放动态变化影响因素分析及趋势预测[J].中国农业资源与区划,2018,39(5):97-102.

[9] 徐玥,王辉,韩秋凤,等.我国耕地碳排放时空特征与影响因素[J].江苏农业科学,2022,50(16):218-226.

[10] Cui Yu, Khan S U, Sauer J, et al. Exploring the spatio-temporal heterogeneity and influencing factors of agricultural carbon footprint and carbon footprint intensity: embodying carbon sink effect [J]. Science of the Total Environment, 2022,846:157507.

[11] 刘杨,刘鸿斌.山东省农业碳排放特征、影响因素及达峰分析[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(4):558-569.

[12] 陈胜涛,张开华,张岳武.农业碳排放绩效的测量与脱钩效应[J].统计与决策,2021,37(22):85-88.

[13] 丁宝根,赵玉,邓俊红.中国种植业碳排放的测度、脱钩特征及驱动因素研究[J].中国农业资源与区划,2022,43(5):1-11.

[14] 丁宝根,杨树旺,赵玉,等.中国耕地资源利用的碳排放时空特征及脱钩效应研究[J].中国土地科学,2019,33(12):45-54.

[15] 吴昊玥,黄瀚蛟,陈文宽.中国粮食主产区耕地利用碳排放与粮食生产脱钩效应研究[J].地理与地理信息科学,2021,37(6):85-91.

[16] 段华平,张悦,赵建波,等.中国农田生态系统的碳足迹分析[J].水土保持学报,2011,25(5):203-208.

[17] 闵继胜,胡浩.中国农业生产温室气体排放量的测算[J].中国人口·资源与环境,2012,22(7):21-27.

[18] 田云,吴海涛.产业结构视角下的中国粮食主产区农业碳排放公平性研究[J].农业技术经济,2020(1):45-55.

[19] 张丽琼,何婷婷.1997—2018 年中国农业碳排放的时空演进与脱钩效应:基于空间和分布动态法的实证研究[J].云南农业大学学报(社会科学),2022,16(1):78-90.

[20] 徐玥,王辉,韩秋凤.县级尺度下耕地碳收支区域差异与公平性:以江苏省为例[J].河北农业大学学报(社会科学版),2023,25(1):62-73.

[21] 吴昊玥,孟越,黄瀚蛟,等.中国耕地利用净碳汇与农业生产的时空耦合特征[J].水土保持学报,2022,36(5):360-368.

[22] 吴昊玥,周蕾,何艳秋,等.中国种植业碳排放达峰进程初判及脱钩分析[J/OL].中国生态农业学报(中英文),2023,31(0):1-12.http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1432.S.20230213.0846.001.html.