

低碳农业联合生产的绩效评估及其影响因素分析

陈 儒,姜志德,姚顺波

(西北农林科技大学 经济管理学院,陕西 杨凌 712100)



摘 要 低碳农业生产过程严格遵循联合生产原则,最终目标在于实现期望农产品与期望碳汇产品、非期望碳排放产品之间的耦合关系分别得以加强、脱钩,在实际生产过程中已逐步形成六种低碳农业发展模式。农业碳计量测算结果显示,不同模式的总碳产量、单位碳产量存在一定差异,但最终均实现了净碳汇量的盈余。其中,免耕、秸秆还田和粪肥配施有助于提升耕地的固碳能力,而标准化的技术集成则更有利于农业生产实现良好的固碳减排效果;DEA-RAM 模型测算得出技术集成固碳减排模式表现出较高的联合生产效率水平,在经济效益和生态效益两个方面实现联合生产绩效最优,而导致联合生产非效率的因素在于农业生产要素投入的冗余;农户的行为选择对低碳农业联合生产的资本、劳动力和技术等生产要素投入产生重要影响,各因素在不同模式中影响的显著性和重要程度存在一定差异。

关键词 联合生产理论;低碳农业模式;碳计量;绩效评估;农户行为

中图分类号:F 323.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-3456(2018)03-0044-12

DOI 编码:10.13300/j.cnki.hnwkxb.2018.03.006

发展低碳农业已成为农业领域应对全球气候变化,减少温室气体排放的重要途径。在实践中,各地区围绕低碳农业技术转化与扩散的目标,已成功探索和推广了一些低碳农业生产模式,如围绕测土配方施肥和节水灌溉技术开展的精准农业投入模式^[1],围绕粪便管理、秸秆还田等措施开展的农业废弃物循环利用模式^[2],以碳捕获为目的的农业固碳模式^[3]等。随着低碳农业发展的不断深入,学者从不同角度对低碳农业实施的成效进行了评价和分析,田伟等、吴贤荣等、陈儒等基于农业产业层面,运用数据包络、空间指数等模型分析了中国农业碳排放绩效的时空变化^[4-6];骆旭添等、谢淑娟等通过构建综合评价指标体系,以此分析低碳农业发展的生态效益、社会效益和经济效益等^[7-8]。研究所得结论殊途同归——中国低碳农业发展虽然取得了良好的成效,但部分地区仍然存在着生产要素投入冗余、发展绩效不高的现象。究其原因可知,当前低碳农业发展除了推广局部的低碳技术措施外,尚未形成系统的低碳农业行动方案或可具推广的成功模式,进而导致微观农户层面缺乏严格按照技术标准实施低碳生产的主动性,除了缺乏一套良好的工作机制进行推动外,其根本原因还可能在于学界和实际工作部门对低碳农业性质缺乏深入理解^[9]。

对于低碳农业的性质,已经有学者进行了深入思考并提出了有价值的观点。许广月认为农业向低碳化发展的微观基础是通过技术创新和制度创新激励改变农户主体的行为决策,打破或减弱碳排放与农业生产之间的耦合关系,逐步实现“碳脱钩”^[2];王青等认为低碳农业是以低能耗、低污染、低排放、碳汇转化为基础的农业经济模式,发展低碳农业必须把效益和减排结合起来^[10];刘星辰等认为低碳农业最大的特征在于其“可标度性”,将农业发展的生态后果以温室气体排放量或抵消量来加以衡

收稿日期:2017-09-01

基金项目:国家自然科学基金面上项目“低碳农业的联合生产绩效与行为机制研究”(71573212)。

作者简介:陈 儒(1991-),男,博士研究生;研究方向:生态农业、低碳经济。

通讯作者:姜志德(1964-),男,教授,博士;研究方向:农业资源经济与环境管理。

量,避免了其他可持续农业发展模式共同存在的计量难题^[11]。总体来讲,有关低碳农业性质研究的观点虽显零散,却不乏触及低碳农业本质特征的真知灼见,较为缺乏的是未能将它们置于适当的概念框架和理论体系中加以归纳、演绎、整理和深化,如果不加深对低碳农业内在本质的认识,尤其是从学术上理清低碳农业的生产性质和产业定位,那既不能准确把握农业产业的低碳发展绩效,又难以深入理解微观农户主体的行为机制,终究无益于有效推动低碳农业的健康发展。

基于此,本研究试图引入联合生产的理论视角和概念框架,突破传统单一产品生产的经济学分析方法,改用考虑经济、生态联合的多投入多产出范式,分析、归纳低碳农业联合生产的碳产品形态、可操作模式及可行的技术形式。在此基础之上,通过进行农户实地调研,提炼出可用于分析联合生产的“现实原型”,并结合获取到的农户数据,运用农业碳计量对不同模式的碳效应进行定量评估,基于“经济效益和生态效益双赢”的低碳生产原则,将碳产品和农产品纳入生产效率的分析框架,以此测算不同低碳农业联合生产模式的绩效水平,并进一步深入剖析导致低碳联合生产绩效差异的影响因素。最后,立足于分析结论与观点展开讨论。

一、理论基础与概念界定

1. 低碳农业的联合生产过程

联合生产是指相同属性的生产过程产生两种或两种以上不同属性的“产品”,产出形式上可以多种多样,包括具体产品、抽象特征以及相关服务功能等,大致归类于经济产出(期望产品)和非经济产出(非期望产品)的某种组合,整个生产过程严格服从能量守恒定律和熵定律的约束^[12-13]。在农业生产过程中,为了帮助绿色植物有效汲取太阳能并利用好其他自然条件,需要多种要素的投入,大致可以分为能量投入(电能、机械能及劳动者体能等)和物质投入(种子、化肥、农药、农膜等)两大类,生产过程则意味着熵值增加,且高熵原料只有和低熵能量共同投入时才能实现生产过程,产出方面包括作为期望产品的经济产品(有使用价值的动植物产品和副产品)和非期望产品的废弃物(植物枯枝落叶,动物粪便和其他固态、液态和气态物质)两大类,对于低碳农业问题的研究则是将有机碳和温室气体分别从低熵农产品和高熵废物中单独显示出来,具体表现为碳汇和碳排放两种形式,如图 1 所示(线条粗细表示熵值大小)。

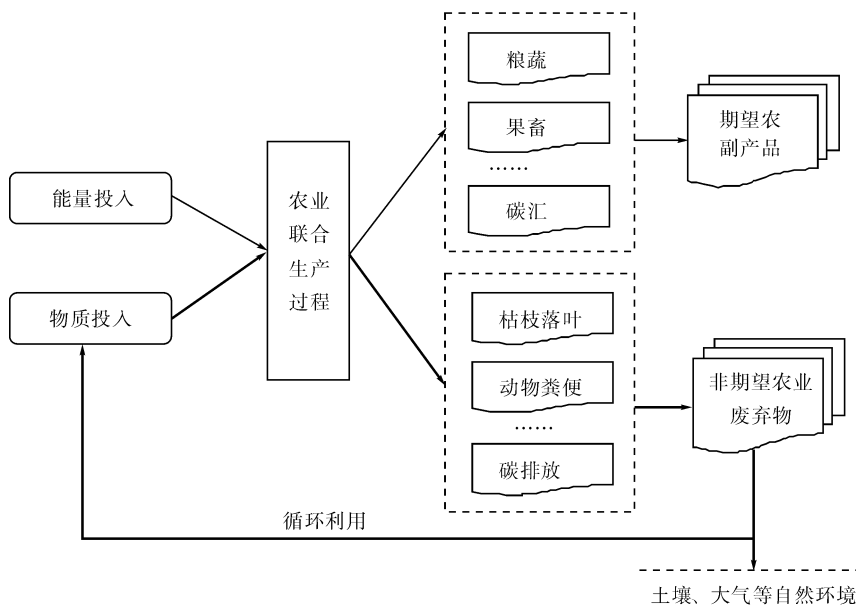


图 1 低碳农业联合生产的基础概念框架

在联合生产的理论框架下,低碳农业生产的产品种类和期望边界被清晰地界定出来,将碳汇和碳

排放从复杂的生物化学反应结果中“剥离”出来,并结合碳计量的方法更有利于理解和把握低碳农业生产的实际目标。在现阶段,碳产品并不能像农产品那样通过价格机制实现其市场价值,难以纳入农业生产者的决策范畴,政府期望依托低碳生产机制得以实现碳排放减少或碳汇增加的目标,而农户经营所产出的碳产品则是与农业生产密不可分的无意后果,由此便产生了不同层面决策目标的偏差性。因此,考虑如何将碳产品生产纳入农业经营者的决策过程,促使其通过控制农业生产经营过程,进而在农产品和碳产品产出之间进行权衡,便成为低碳农业发展的根本问题。联合生产理论的宗旨在于实现减少非期望产出的同时,获取更多的期望产出,这便与低碳农业生产的目标不谋而合;在尽可能多地获取农产品的同时,促使农产品和碳排放之间的耦合关系得以脱钩,或与碳汇之间的耦合关系得以加强,实现经济效益和生态效益双赢的局面。

2. 低碳农业的联合生产模式

在明确了低碳农业联合生产的目标之上,假设不论政府,还是低碳农业生产的实施者,均在农产品产量最大化的生产目标上是一致的,那么低碳农业生产的关键问题则落脚于如何在取得农产品的同时,控制另一种联合产品——碳产品。在现实当中,各地政府实现农业生产减源增汇目标的措施和方法,大都依托于不断落实、推广低碳农业技术体系,本研究在区分农业技术体系对不同生产环节农业碳汇、碳排放能力影响强弱的基础之上发现,农业实际生产过程中逐渐显现出 6 种低碳农业联合生产模式:①精准投入减排模式。该模式主要以测土配方施肥、节水灌溉(微喷、滴灌等)、水肥一体化、绿色防控等作为基础技术支撑,在物质投入环节上实现化肥、农药、农膜等农业生产要素的精准投放,有效减少原料的输入,以此降低温室气体排放水平。②农牧循环减排模式。该模式以沼气技术、秸秆处理技术、地膜回收利用等为基础支撑,将农业生产过程中的废弃物质进行低成本处理后,代替其他原料而被循环利用,减少对土壤和环境的危害程度,降低温室气体排放水平。③制度调整减排模式。该模式在农业的联合生产过程中,通过调整农作物种植制度,构建合理的轮作、间(套)作,提升原料的转化利用率;通过调整水分管理制度,控制灌溉时间、频率,降低稻田水淹温室气体排放水平,减少废弃物的输出。④农林碳汇生产模式。该模式以荒地开垦、退耕还林(草)、荒山造林等建设工程为依托,通过引导农户参与到生态建设上来,不断提升农林植被覆盖率,强化生态系统自我修复、净化能力,从而实现整个农业系统碳汇量的增加。⑤土壤保育固碳减排模式。该模式在农业的联合生产过程中,通过采取免耕覆膜栽培、秸秆还田、增施有机肥等措施,以期实现土壤质量(有机质)的改善。然而,该种措施具有碳源、碳汇双重效应^[14],只有通过技术之间合理地搭配使用,方可实现良好的固碳减排效果。⑥技术集成固碳减排模式。该模式基于农业生产的全过程,在各个生产环节采用相关技术,集成一套农业技术体系,实现标准化、一体化的生产方式,不仅提升了原料的转化利用率,减少了废弃物的产出,还实现了农业联合产出碳汇量的增加,较多依托农业示范园区、农业试点等标准化生产项目。

目前,随着温室气体排放核算方法学的成熟运用,每项农业活动的碳排放量或碳汇量均可得以较为精确地计量,若将其实物量或者价值量以联合产品的形式纳入到经济学分析框架当中,那么在联合生产的目标约束下,不同农业生产模式碳产出效益如何?农产品和碳产品之间联合生产效率有什么差异?哪种生产方式经济和生态联合产出效益更优?基于这些疑问,本研究将构建计量模型,进一步进行实证分析。

二、研究方法、研究区域与数据来源

1. 计量模型构建

(1)农业碳计量。碳产品产量主要通过测算农业碳汇量和碳排放量所得,为保证测算的精确性,本研究基于陈儒等^[14]、田云等^[15]研究成果,结合农田生态系统碳、氮循环模型^[16-17],在联合生产框架下对碳计量模型进一步修正和完善,确定碳汇产品源于农业系统中植被碳库、土壤碳库;确定碳排放产品源于农业联合生产过程中以 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 为主的温室气体排放,具体如表 1 所示。

表 1 农业联合生产碳产品测算框架

碳产品类型	产出途径	备注
CO ₂ ^[14,18]	农用化学品消耗	化肥、农药、农膜生命周期隐含碳排放
	能源消耗	柴油、汽油、电、人工消耗碳排放
	化肥施用氮排放	输入到农用地的氮就地转化为 N ₂ O 并直接释放到大气中
	粪肥施用氮排放	
N ₂ O ^[17]	秸秆和根茬残留氮排放	农田施肥、秸秆燃烧的氮挥发和氮氧化物排放引起 N ₂ O 间接排放
	大气沉降氮转化	
	淋溶/径流损失氮转化	
	农业废弃物焚烧排放	秸秆、薪柴燃烧引起的 N ₂ O 直接排放
	动物粪便管理排放	
	粪肥施用排放	
CH ₄ ^[17]	农业废弃物焚烧排放	秸秆、薪柴燃烧引起的 CH ₄ 直接排放
	动物肠道发酵排放	
	动物粪便管理排放	畜禽粪便施入到土壤之前在贮存和处理过程中产生的 CH ₄ 直接排放
	粪肥施用排放	
植被碳库 ^[14,17]	农作物碳固定	主要指粮食作物、经济草本作物经济产出部分和秸秆饲料化部分生物量的碳转化,以及经济林木较上期生物量增长值的碳转化
	生态林草碳固定	主要指当期生态林草在乔木层、灌木层、草本层和凋落物层(地上部分)较上期生物量增长值的碳转化
	腐殖质层碳输入	
土壤碳库 ^[14,19]	农田施肥碳输入	通过测定当期土壤 SOC 较上期增长值所得,并纳入收割后的秸秆还田和根茬残留碳,同时考虑翻耕、旋耕、灌溉等种植制度对土壤碳库的扰动
	秸秆还田和根茬残留碳输入	

注:a.植物生长通过光合作用吸收 CO₂,粮食作物、经济草本作物秸秆燃烧产生的 CO₂再次释放到大气中予以抵消,故不予测算;
 b.经济林木草本层、凋落物层生物量由于长期受到翻耕、锄草等农业活动的干扰,不利于碳固定,故不予测算;c.作物分类参照陈儒等^[14]研究成果;d.1 千克 CH₄的温室效应相当于 25 千克 CO₂(6.818 2 千克 C),1 千克 N₂O 的温室效应相当于 298 千克 CO₂(81.272 7 千克 C),1 千克 CO₂的碳当量为 0.272 7 千克 C。

依据表 1 碳产品测算框架和相关学者研究成果,最终构建农业碳计量如下:

$$E = \sum E_i = \sum (D_{ci} + D_{ei}) \times \varphi_{ci} + \sum [(D_{Ni} + B_i + L_i) \times \varphi_{ni} + (D_m + B_i + L_i) \times \varphi_{mi}] \times GWP \quad (1)$$

$$C_{cv} = \sum C_{cvi} = \sum c_i \times Y_i \times (1 - r_i) \quad (2)$$

$$C_{lg} = \sum C_{lg-i} = \sum \sigma_i \times A_i \quad (3)$$

$$C_{land} = \sum \delta_u \times A_u + \sum c_i \times \omega_i \times [Y_i \times (1 - r_i) \times (1/H_i - 1) \times f_r + Y_i \times (1 - r_i) / H_i \times R_s + D_m] \quad (4)$$

式(1)中 E 为农业碳排放总量, E_i 为各种碳排放源的排放量, i 为表示类型, D_{ci} 、 D_{ei} 为不同农用化学品和能源的消耗量, φ_{ci} 为相应碳排放系数, D_{Ni} 为不同产出途径下的氮投入量, B_i 为农业废弃物焚烧量, L_i 不同品种牲畜的饲养量, φ_{ni} 为相应氧化亚氮排放系数, D_m 农家肥消耗量, φ_{mi} 为相应甲烷排放系数, GWP 为所排放温室气体的增温潜势;式(2)中 C_{cv} 为农作物碳汇总量(不包含经济林木), C_{cvi} 为各类农作物的碳吸收量, i 为农作物类型, c_i 为碳转化系数, Y_i 为农作物产量, r_i 为相应农作物经济产品部分的含水量;式(3)中 C_{lg} 为林草年均固碳量(含经济林木), C_{lg-i} 为各类林草的年均碳吸收量, i 为林草类型, σ_i 为林草不同层落的平均固碳速率, A_i 为林草的栽植面积;式(4)中 C_{land} 为土壤固碳量, u 为土地利用方式(翻耕、翻耕并施化肥、免耕等), δ_u 为不同土地利用方式下的土壤平均固碳速率, A_u 为土地面积, ω_i 为分解残留率, H_i 为农作物经济系数, f_r 为秸秆还田率, R_s 为根冠比。 φ_{ci} 、 φ_{ni} 、 φ_{mi} 、 c_i 、 r_i 、 σ_i 、 δ_u 、 ω_i 、 H_i 、 R_s 参考值来自相关研究成果^[14,15,17-19],排放系数使用中注意 CO₂ 当量与 C 当量的区别。

(2)DEA-RAM 模型。为了将碳产品与农产品纳入生产效率分析的框架,本研究引入 DEA 拓展模型——RAM 来构造最优边界,凭借其非径向、非角度、加性结构特性,对低碳农业联合生产的经济

效益与生态效益展开探讨。RAM 模型不同于传统 DEA 模型,它在核算技术效率时将松弛变量直接放入目标函数中,基于投入与产出相对效率前沿投影的松弛程度来表征技术效率,并且投入产出要素可自由变动,不仅解决了投入产出松弛的问题,还解决了非期望产出存在下的效率评价问题。此外,RAM 模型具有加性结构特征,可以建立只核算期望产出效率的模型和只核算非期望产出效率的模型,也可以将期望产出和非期望产出统一到同一框架内对两种效率采取联合测算(即联合效率),解决了联合生产绩效的评价问题。本研究基于传统 RAM 模型,将期望碳汇产品引入测算方程进行了修正,假设某个决策单元(DMU)有 N 种普通投入要素 x 和 I 中能源投入要素 e ,得到 M 种期望农产品 y 、 L 种期望碳产品 c 和 J 种非期望碳产品 u ,则 K 个 DMU 投入产出向量为 $(x_k, e_k, y_k, c_k, u_k)$,其中 $k = 1, \dots, K$,RAM 经济效率模型(RAM_{econ-e})、RAM 环境效率模型(RAM_{eco-e})、RAM 联合效率模型(RAM_{lc-ce})具体表达式参见李涛^[20]相关研究成果。由于线性规划将非效率程度最大化的目标函数值满足 $max\{\cdot\} \in [0, 1]$,那么第 t 时期决策单元 k 的 RAM 模型效率指标可以转化为:

$$\begin{aligned}
 0 \leq \theta_{econ-e} &= 1 - \left(\sum_{n=1}^N R_n^x s_n^{x*} + \sum_{m=1}^M R_m^y s_m^{y*} \right) \leq 1 \\
 0 \leq \theta_{eco-e} &= 1 - \left[\sum_{n=1}^N R_n^x s_n^{x*} + \sum_{i=1}^I R_i^e (s_i^{e+*} - s_i^{e-*}) + \sum_{l=1}^L R_l^c s_l^{c*} + \sum_{j=1}^J R_j^u s_j^{u*} \right] \leq 1 \\
 0 \leq \theta_{lc-ce} &= 1 - \left[\sum_{n=1}^N R_n^x s_n^{x*} + \sum_{i=1}^I R_i^e (s_i^{e+*} - s_i^{e-*}) + \right. \\
 &\quad \left. \sum_{m=1}^M R_m^y s_m^{y*} + \sum_{l=1}^L R_l^c s_l^{c*} + \sum_{j=1}^J R_j^u s_j^{u*} \right] \leq 1 \quad (5)
 \end{aligned}$$

式(5)中 R_n^x 、 R_m^y 为决策单元普通投入要素和期望农产品的极差, s_n^x 、 s_m^y 为普通投入要素和期望农产品相对于生产前沿面投影的松弛量,“*”表示模型取得最优解状态, R_i^e 、 R_l^c 、 R_j^u 为被决策单元能源投入要素、期望碳产品和非期望碳产品的极差, s_i^{e+} 、 s_i^{e-} 表示针对能源设定的两个松弛变量, s_l^c 、 s_j^u 分别表示期望碳产品、非期望碳产品的松弛量。各效率值 $\theta(\cdot)$ 均满足有界性和单调可排序性。当且仅当所有投入松弛与产出松弛均等于零时,目标函数值等于零,此时决策单元 k 效率值位于最优边界上,达到技术有效的 Pareto 最优。

2. 研究区域概况

为了挖掘、提炼出可用于分析联合生产的现实低碳农业生产模式,并尽可能避免由自然环境条件的差异带来碳计量误差,课题组于 2017 年 3—4 月对陕西泾阳县 28 个村域 350 个农户进行了实地问卷调查。泾阳县地处陕西关中平原腹地($108^{\circ}29'40'' \sim 108^{\circ}58'23''E$, $34^{\circ}26'37'' \sim 34^{\circ}44'57''N$),黄河二级支流泾河下游,总面积 780 平方千米,耕地 68 万亩,地势西北高、东南低,属暖温带大陆性季风气候,四季冷暖、干湿分明,年均降水量 548.7 毫米,日照时数年平均为 2 195.2 小时,是西北地区最大蔬菜生产基地、华夏灌溉农业的发祥地。近年来,泾阳县不断转变农业发展方式,突出发展以日光温室为主的保护地栽培和无公害蔬菜生产,探索和推广了诸多低碳农业技术,如测土配方施肥技术、节水灌溉技术、秸秆资源化技术等,比较有利于本研究的开展。

3. 数据来源与说明

本次调研对 2016 年泾阳县农户家庭基本情况、农业生产经营情况、技术采用情况等进行了全面了解,涵盖粮食作物、草本经济作物、木本经济作物、畜禽养殖四类农业生产项目,共发放 370 份问卷,最终确定有效问卷 350 份,有效率 94.59%,涉及 613 个农业生产项目,总规模 195.79 公顷。基于前文理论分析,在区分低碳生产类型和技术形式的基础上,结合走访调研的实际情况发现,随着测土配方施肥补助政策、粮食绿色增产模式攻关支持政策、化肥农药零增长支持政策、耕地保护与质量提升补助政策、菜果茶标准化创建支持政策等多项农业补贴的落实,泾阳县农户已基本形成精准投入减排、土壤保育固碳减排、技术集成固碳减排三种低碳农业发展模式,具体如表 2 所示。

表 2 低碳农业生产模式概况

低碳农业模式(定义)	农业项目类型(定义)	主要低碳措施/技术	项目规模/公顷
精准投入 减排模式(M_1)	经济草本作物(M_{11})	测土配方施肥、冲施肥、单覆地膜	13.46
	经济木本作物(M_{12})	测土配方施肥、绿色防控技术	18.50
土壤保育固碳 减排模式(M_2)	经济草本作物(M_{21})	少耕、单覆地膜、有机肥单/配施	15.68
	粮食作物(M_{22})	免耕、有机肥单/配施、秸秆还田	37.14
	非示范区经济木本作物(M_{31})	免耕、测土配方施肥、有机肥单/配施、绿色防控技术	10.00
	非示范区经济草本作物(M_{32})	覆地 & 棚膜、测土配方施肥、冲施肥、有机肥单/配施、绿色防控技术	37.20
技术集成固碳 减排模式(M_3)	非示范区粮食作物(M_{33})	免耕、有机肥单/配施、节水灌溉(喷灌)、水肥一体化技术、秸秆还田	45.71
	示范区经济草本作物(M_{34})	少耕、覆地 & 棚膜、测土配方施肥、有机肥单/配施、节水灌溉(喷/滴灌)、水肥一体化技术、绿色防控技术、其他标准化栽培技术	18.10

注:在本次调研实际中,存在单个农户经营多个农业项目,粮食作物包括小麦、玉米、大豆,经济草本作物包括蔬菜、瓜果,经济木本作物包括桃、杏,作物分类、低碳措施参照陈儒等^[14]研究成果。

三、低碳农业联合生产的碳产品产量

依据前文构建的碳计量模型,结合实地调研获取的农户数据,测算了不同低碳农业模式联合产出的碳产品总产量,以此分析模式的生态效益,为了保证模式之间碳产出效益的可比性,进一步核算了单位耕地面积上的碳产品产量(碳密度),测算结果如图 2 所示。

从碳产品总量来分析,不同低碳农业联合生产模式的碳产品产量存在较大差异,如图 2d 所示,技术集成固碳减排模式(M_3)的碳排放、碳汇和净碳汇产出总量均为最大,土壤保育固碳减排模式(M_2)次之,精准投入减排模式(M_1)最少。若区分农业项目类型,那么模式 M_{32} 碳排放产出量最大,高达 278.635 吨碳,比产量最低的 M_{31} 高出 241.458 吨碳;模式 M_{32} 碳汇产品产出量也位列第一,产出 430.7 吨碳, M_{11} 碳汇产品产出量最少,为 59.724 吨碳;若从期望碳汇产品中扣除非期望碳排放产品,那么 M_{33} 净碳汇盈余量最高为 295.427 吨碳, M_{22} 、 M_{12} 、 M_{34} 紧随其后,原先碳汇、碳排放产出量均为最高的 M_{32} 净碳汇盈余 152.066 吨碳,滑落至第 5 位。由于不同模式之间农业项目类型和生产规模存在较大差异,若从碳产品总量对不同模式进行对比分析则缺乏一定的合理性,所以核算单位耕地面积上的碳产量有助于对不同模式碳产出的差异进行更深层次地分析,结果如图 2a、2b、2c 所示。

从碳密度分析发现,不同低碳农业联合生产模式的单位碳产量差异也较为明显。如图 2a 所示,在区分农业项目类型,并控制项目生产规模的基础之上,经济草本作物生产项目中 M_{34} 生产模式的碳排放密度最大为每公顷 10.74 吨碳, M_{11} 最小为每公顷 3.599 吨碳,主要原因在于设施种植“高投入、高产”的特点使得 M_{34} 农用品消耗较多,导致 CO_2 和 N_2O 产出较大,碳排放密度处于较高的水平上。 M_{21} 和 M_{32} 碳排放密度相差不大,其中 M_{32} 源于农用品消耗产出 CO_2 量较大, M_{21} 源于过量粪肥施用产生较多的 CH_4 和 N_2O 排放;经济木本作物生产项目中 M_{31} 碳排放密度比 M_{12} 每公顷高出 1.4 吨碳,主要差异也来源于 M_{31} 中粪肥施用产生较多的 CH_4 和 N_2O 排放;粮食作物生产项目中 M_{22} 碳排放密度较高为每公顷 1.906 吨碳, M_{33} 生产模式中由于采用的低碳技术更为全面,使其农用品消耗大幅减少,碳排放密度也随之降低。

如图 2b 所示,经济草本作物生产项目中 M_{34} 生产模式的碳汇密度最大为每公顷 21.093 吨碳,与同为设施种植的 M_{32} 相比,处于示范区的 M_{34} 碳汇密度比其每公顷高出 9.515 吨碳。非设施种植 M_{21} 模式由于施用大量粪肥促使土壤有机碳含量不断增加,碳汇密度也处于较高的水平上,每公顷超出设施种植 M_{32} 模式 1.133 吨碳、非设施种植 M_{11} 模式 8.274 吨碳;经济木本作物生产项目中 M_{31} 碳汇密度较高,每公顷为 16.715 吨碳,主要由于 M_{31} 模式中采用了免耕、粪肥配施等措施有效提升了土壤有机碳含量,与同项目类型的 M_{12} 相比, M_{31} 土壤碳汇密度每公顷比其高出 4.268 吨碳;粮食作物生产项目中 M_{22} 与 M_{33} 碳汇密度相差不大,主要原因在于免耕和秸秆还田措施的采用均使其土壤碳库保持

了良好的固碳效果。

净碳汇量指在农业生产经营过程中碳汇量的盈余,常用碳汇量与碳排放量之间的差值来衡量,是反映低碳农业生态产出水平的重要指标^[14]。如图 2c 所示,经济草本作物生产项目中 M_{34} 生产模式的净碳汇盈余量最大,每公顷为 10.353 吨碳,同类项目下不同模式的净碳汇盈余由大到小以此为 M_{34} 、 M_{21} 、 M_{32} 、 M_{11} ,标准化的技术集成有利于农业生产实现固碳减排效果;经济木本作物生产项目中 M_{31} 净碳汇密度在所有模式中最高,每公顷达到 12.998 吨碳,植被固碳是净碳汇盈余的主要贡献来源, M_{12} 净碳汇密度位列第二,高于其他生产项目,所以生产经营经济木本作物有利于农业碳汇量的累积;粮食作物生产项目中 M_{33} 净碳汇密度为每公顷 6.463 吨碳,略高于 M_{22} ,但总体高于非设施经济草本作物生产项目。

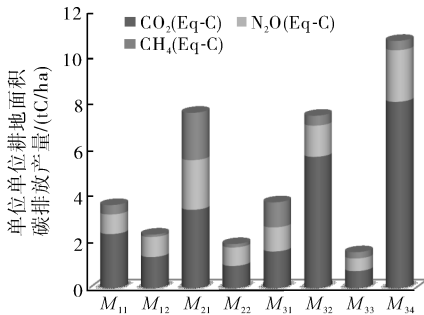


图2a 单位耕地面积碳排放产量

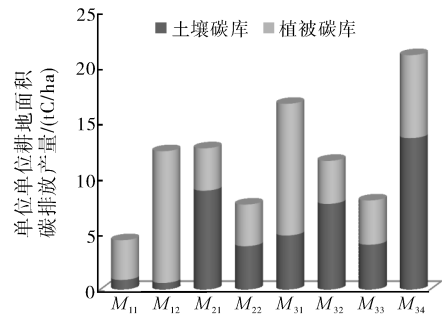


图2b 单位耕地面积碳汇产量

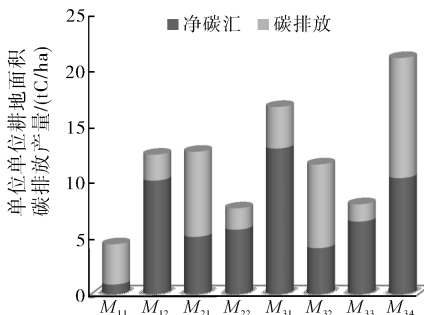


图2c 单位耕地面积净碳汇产量 tC/ha

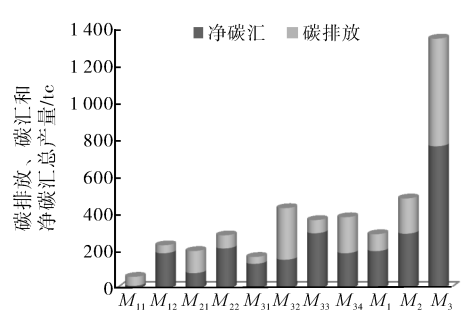


图2d 碳排放、碳汇和净碳汇总产量 tC

图 2 不同低碳农业发展模式的碳产量情况

四、低碳农业联合生产的效率测算与分析

实现经济效益和生态效益双赢是低碳农业发展的关键所在^[6],基于前文对低碳农业联合生产模式碳产出效益分析,再次将农业生产的经济效益引入到研究框架,并通过测算不同低碳农业联合生产模式的经济效率、环境效率、联合效率,以此来分析低碳农业模式的经济绩效、环境绩效和联合绩效水平。

基于柯布-道格拉斯生产函数可知,资本和劳动力是重要的生产要素,本文在结合相关研究成果基础之上^[5-7],选取化肥施用量(x_1)、粪肥施用量(x_2)、农药施用量(x_3)、农膜施用量(x_4)、农业劳动力投入量(x_5)、农业固定资产投资额(x_6)、耕地投入面积(x_7)、能源消耗量(e ,柴油、汽油、电,统一折算为标准煤)8个农业投入指标;选取农产品产值、碳汇产量作为期望产出指标;选取碳排放产量作为非期望产出指标。依据 DEA-RAM 模型,运用 MaxDEA Ultra 7.1 软件测算了 613 个农业生产项目的联合生产效率,包括 RAM_{econ-e} 、 RAM_{eco-e} 、 RAM_{lc-cc} ,并在此基础上计算出不同低碳农业模式的联合生产效率平均值,测算结果如表 3 所示。

从表 3 中可以看出,不同低碳农业模式的经济效率、环境效率、联合效率均存在一定差异,其中 M_{34} 的经济绩效水平最高,比最低的 M_{12} 效率值高出 0.315,若区分农业项目类型发现,处于 M_3 模式

下的农业项目均实现了经济绩效改善,如 M_{31} 相比同类项目的 M_{12} 模式效率值提高 0.08, M_{33} 相比同类项目的 M_{22} 模式效率值提高 0.081; M_{31} 的环境绩效水平最高,环境效率值为 0.496,基于前文分析可知,由于 M_{31} 生产模式植被固碳效果较好,因而净碳汇密度在所有模式中最高,所以该模式环境效率值最大,而 M_{11} 由于对化肥、农膜等农用品依赖性较强,导致其环境绩效水平最低。同样地,若区分农业项目类型,处于 M_3 模式下的农业项目也实现了环境绩效改善,其中 M_{34} 相比 M_{11} 效率值提升了 0.223,改善幅度最大; M_{34} 的联合绩效水平最高,联合效率值为 0.528,说明该模式较于其他模式实现了经济效益和生态效益两方面的生产绩效最优,农业项目实现有效生产的比重也为最大,不同低碳农业模式的联合绩效水平由大到小依次为 M_{34} 、 M_{31} 、 M_{33} 、 M_{32} 、 M_{12} 、 M_{22} 、 M_{21} 、 M_{11} 。整体来看,无论是否区分项目类型, M_3 模式较于 M_2 、 M_1 均表现出较高的联合生产效率水平,处于 M_3 模式下的农业生产项目在经济效率、环境效率、联合效率均实现了绩效水平改善,主要原因在于技术集成固碳减排模式(M_3)基于农业生产的全过程,在各个生产环节采用相关技术,不仅实现了 M_1 模式在物质投入环节农业生产要素的精准投放(减少高熵值原料的输入),还实现了 M_2 模式中土壤质量的改善,其通过技术之间合理地搭配使用,在提升经济效益的同时实现了良好的固碳减排效果,尤其 M_{34} 标准化、一体化的生产方式,不仅有效提升了原料的转化利用率、减少了废弃物的产出,还实现了农业联合产出碳汇量的增加,最终得以在经济效益和生态效益两方面实现生产绩效最优。

表 3 低碳农业模式的联合生产效率平均值

模式	RAM_{econ-e} 平均值	有效项目占比	RAM_{econ-e} 平均值	有效项目占比	RAM_{lc-ce} 平均值	有效项目占比
M_{11}	0.426	0.255	0.189	0.121	0.317	0.215
M_{12}	0.352	0.205	0.408	0.332	0.382	0.241
M_{21}	0.464	0.261	0.264	0.248	0.358	0.260
M_{22}	0.402	0.148	0.286	0.259	0.362	0.239
M_{31}	0.432	0.368	0.496	0.398	0.451	0.408
M_{32}	0.515	0.350	0.231	0.237	0.398	0.346
M_{33}	0.483	0.310	0.332	0.292	0.406	0.328
M_{34}	0.667	0.427	0.412	0.385	0.528	0.429
M_1	0.399	0.225	0.305	0.248	0.358	0.240
M_2	0.423	0.183	0.277	0.255	0.363	0.257
M_3	0.544	0.362	0.410	0.321	0.467	0.368

当联合生产效率值等于 1 时,表明投入产出位于效率前沿上,不存在投入的冗余和产出的改进,然而从整体来看,低碳农业模式的联合生产效率水平并不高,较多仅处于 0.2~0.6 水平区间内,实现有效生产的农业项目占比也较低,均处于 10%~50% 区间内。因此,本研究进一步对低碳农业模式联合效率 RAM_{lc-ce} 进行非效率分解,以此挖掘不同农业模式低碳生产绩效不高的内生影响因素,测算结果如表 4 所示。

表 4 低碳农业模式联合效率(RAM_{lc-ce})的非效率分解

模式	NE_{x1}	NE_{x2}	NE_{x3}	NE_{x4}	NE_{x5}	NE_{x6}	NE_{x7}	NE_e
M_{11}	0.214	0.000	0.329	0.334	0.177	0.403	0.143	0.272
M_{12}	0.221	0.000	0.256	0.000	0.187	0.478	0.210	0.171
M_{21}	0.384	0.432	0.382	0.346	0.102	0.432	0.195	0.229
M_{22}	0.319	0.446	0.107	0.000	0.207	0.497	0.263	0.292
M_{31}	0.208	0.380	0.181	0.000	0.127	0.390	0.121	0.137
M_{32}	0.205	0.291	0.148	0.147	0.085	0.369	0.129	0.408
M_{33}	0.236	0.295	0.094	0.000	0.160	0.440	0.236	0.269
M_{34}	0.106	0.269	0.110	0.106	0.072	0.342	0.074	0.412

表 4 显示,化肥过量施用对 M_{21} 、 M_{22} 模式非效率的贡献度较高,分别达到 38.4%、31.9%,其他模式由于采用了测土配方施肥技术,使得化肥施用冗余量降低,但整体上仍具有减量空间; M_2 、 M_3 模式在粪肥投入上存在过量施用的现象,在走访调研中发现,农户对于粪肥施用量难以把握,较多根据拥粪量或自身经验施用,从而对低碳联合生产绩效非效率的贡献度较高,所以引导农户合理恰当地施用

粪肥,才能保证土壤良好的固碳减排效果; M_{11} 、 M_{21} 由于生产经济草本作物项目,对化学农用品具有较高的依赖度,所以在农药、农膜施用上非效率的贡献度较高,而生产同类项目的 M_{32} 、 M_{34} 模式由于采用了绿色防控技术、温室作业技术,有效减少了在农药、农膜施用上的冗余量,但从整体上来看,农药、农膜对联合生产绩效的非效率仍占有一定比例的贡献;各个模式的农业劳动力投入量、耕地投入面积虽产生一定的冗余,但对非效率的贡献度较低,主要归结于近年来城镇化的快速发展,促进了农业劳动力的转移和土地的快速流转;农业固定资产投资额对各个模式低碳联合生产非效率的贡献度较高,较多处于 40% 左右,农业固定资产投资额的低效配置,制约着低碳农业的有效联合生产,引导农户合理配置农用资金使用方式、提升资金投资利用效率是实现农户低碳联合生产绩效改善的关键路径; M_{32} 、 M_{34} 模式由于是温室大棚作业,对能源投入具有较高的依存度,大量能源的消耗对其低碳联合生产非效率的贡献度较高。

因此,低碳农业联合生产模式均存在农业投入要素冗余现象,且不同生产要素的冗余程度存在一定差异。农业项目上生产要素或技术的投入实则是农户这一经营主体在综合因素制约下的行为选择或决策过程^[21],而要素或技术的投入量更是基于成本与收益之间的权衡比较,所以对于影响低碳农业联合生产绩效的资本、劳动力和技术这些生产要素,农户的行为选择显得至关重要。为此,本研究将进一步基于农户视角来分析不同低碳农业模式联合生产效率水平不高的外生影响因素。

五、低碳农业联合生产绩效的影响因素分析

农户对生产要素或技术投入的决策行为受到其基本生理限制以及由此而引起的认知限制、动机限制、环境限制及其相互影响的限制。生理限制和认知限制源于决策者的年龄、身体状况、受教育程度等主观特征,环境限制源于农户所处的客观环境,包括家庭环境、生产环境、政策环境等,动机限制源于农户主观的行为意向,包括行为态度、主观规范、知觉行为控制^[21]。本研究依据数据的可获得性,借鉴已有研究成果,综合考虑可能对资本、劳动力和技术要素投入产生影响的因素,最终确定解释变量如表 5 所示。

表 5 解释变量定义

变量类型及名称		变量定义	均值	标准差
生理和认知 限制变量	生理特征	年龄	农户实际年龄	53.740
		身体状况	不健康=1;亚健康=2;健康=3	1.750
		是否兼业	否=0;是=1	1.740
	认知特征	受教育程度	文盲=1;小学=2;初中=3;高中=4;大专及以上=5	2.810
环境限制 变量	家庭环境	家庭收入	农户家庭年收入/元	104 437.108
		农业项目类型	粮食作物=1;经济木本作物=2;经济草本作物=3	2.070
	生产环境	耕地灌溉条件	最近水源到耕地距离/里	0.416
		化肥购买平均单价	农户购买化肥的实际平均单价/(元/千克)	3.953
政策环境	政策宣传教育	政府没有进行过环保、节约生产宣传教育=1;政府进行过环保、节约生产宣传教育=2	1.550	
动机限制 变量	实际行为	低碳技术/ 措施采用程度	低碳技术/措施投入数量	3.770
		化学农用品施用 量的确定方式	依据自身经验确定=1;咨询销售商或亲朋 好友确定=2;咨询专家或技术员确定=3	1.360
	主观态度	低碳技术/ 措施采用的必要程度	认为有必要采用的低碳技术/措施数量	4.890
		耕地土壤质量评价	不好=1;一般=2;好=3	2.310
主观规范	技术培训参加程度	未参加过=1;偶尔参加=2;经常参加=3	1.450	
知觉行为控制	种植经验沟通程度	次数较少,基本不与其他农户沟通=1;有疑问时才会沟通=2;经常互相交流沟通=3	2.590	

依据表 5 中定义的解释变量,以各个农业生产项目的低碳联合效率值(RAM_{lc-ce})作为被解释变量,运用最优尺度回归模型,依次对 M_1 、 M_2 、 M_3 模式的样本数据在 spss20.0 软件进行了最优尺度回归分析,各个模型 ANOVA 均通过显著性检验,具有统计学意义,模型各解释变量的容忍度在转换前后都大于 0.1,表明模型不存在共线性问题,回归结果中剔除了不显著的解释变量,具体如表 6 所示。

表 6 低碳联合生产绩效影响因素的最优尺度回归结果

解释变量	模型一			模型二			模型三		
	标准化系数		重要性	标准化系数		重要性	标准化系数		重要性
	Beta	S.E.		Beta	S.E.		Beta	S.E.	
年龄	0.101	0.309	0.074	-0.136	0.156	0.053	-0.159***	0.065	0.066
受教育程度	0.116*	0.128	0.108	0.195*	0.096	0.132	0.087***	0.077	0.128
家庭收入	0.294**	0.177	0.336	0.312***	0.105	0.362	0.257***	0.079	0.125
化肥购买平均单价	-0.072	0.210	0.064	-0.095	0.162	0.050	0.178***	0.065	0.114
低碳技术/措施采用程度	0.170*	0.282	0.105	0.087*	0.155	0.141	0.096**	0.111	0.159
化学农用品施用量的确定方式	0.309*	0.234	0.203	0.017	0.111	0.002	0.150***	0.056	0.048
低碳技术/措施采用的必要程度	0.158	0.24	0.046	0.270**	0.095	0.026	0.131***	0.058	0.119
技术培训参加程度	0.023	0.245	0.011	0.068	0.139	0.030	0.118*	0.081	0.108
种植经验沟通程度	0.053	0.219	0.006	0.128	0.102	0.067	0.144***	0.054	0.107
		<i>R</i>	0.502		<i>R</i>	0.481		<i>R</i>	0.453
		<i>R</i> ²	0.252		<i>R</i> ²	0.231		<i>R</i> ²	0.230
		调整后 <i>R</i> ²	0.172		调整后 <i>R</i> ²	0.180		调整后 <i>R</i> ²	0.205
		<i>Sig.</i>	0.035		<i>Sig.</i>	0.017		<i>Sig.</i>	0.008

注: *、**、*** 分别表示在 10%、5%、1% 的水平上显著性。

表 6 回归结果显示,生理限制变量中户主年龄对 M_3 模式的低碳联合效率产生显著影响,表明年轻劳动力在身体和意识方面受到生理限制较弱,容易接受新信息、敢于尝试新技术,符合该生产模式对经营主体的要求,所以低碳联合生产绩效较高。 M_1 结果输出符号与 M_2 、 M_3 相反,这是因为该模式主要特点是在投入环节上减少高熵值原料的输入,走访调研中发现,年龄越大的农户更具有优良的勤俭节约品质,降低了化肥、农药、农膜等农业生产要素投入的浪费,因而低碳联合生产绩效较高。

认知限制变量中户主受教育程度对各个模式低碳联合效率产生显著影响,并呈现正相关关系,且该变量影响程度具有较高的重要性,均在 0.1 以上。受教育程度较高的农户在接受新事物和新技术有关信息的认知限制较低,决策行为更加趋于理性化,有利于促进农业生产要素的合理配置,因而低碳联合生产绩效较优。

环境限制变量中农户的家庭收入对低碳联合生产绩效的影响十分显著,且该变量影响程度的重要性在 M_2 中高达 0.362,这表明家庭收入水平越高的农户,农用资金的宽裕度越高,突破了农业生产要素投入量的制约,较好地提升了农业生产效率。然而在低碳联合生产非效率分析中,农业固定资产投资非效率贡献度较高,这说明虽然农用资金较为宽裕,但并未得到恰当地配置,这一点从 M_1 、 M_2 农户购买化肥平均单价的回归结果输出值为负而得到验证,这也较好地解释了化肥施用对非效率贡献度较高的原因。 M_3 农户实际购买化肥平均单价的回归结果输出值为正,且较为显著,表明对农业生产进行全过程控制,可以较好地提升农用品利用率,有利于实现低碳联合生产的绩效改善,这一点从 M_3 模式农用品投入的非效率贡献水平较低得以验证。

动机限制变量即农户的行为意向对低碳农业联合生产绩效产生重要的影响,在三个模型中重要程度分别占到 0.371、0.266、0.541。回归结果显示,农户对于低碳技术或措施的采用程度越大,认为有必要采用的感知程度越高,则低碳农业联合生产绩效就越优。同时,采用测土配方施肥技术、绿色防控技术有助于提升低碳农业联合生产效率,这一点从 M_1 、 M_3 回归模型中变量“化学农用品施用量的确定方式”较为显著的回归系数得以验证,这也是未采用该技术的 M_2 模式化肥和农药施用对非效率贡献度较高的原因所在。从变量“技术培训参加程度”、“种植经验沟通程度”回归系数的输出符号

可知,参加技术培训和经验沟通频繁程度越高,农户可以充分获得或交换相关信息,从而对自身农业生产方式形成一定规范,农户低碳农业联合生产绩效得以改善。然而,由于 M_3 模式是基于农业生产的全过程集成一套农业技术体系进行生产,部分甚至依托标准化生产的农业试点或示范项目,走访调研中也发现,该类农户参与技术培训的积极性较高,农户之间会频繁交流经验、互相学习借鉴,所以这是 M_3 回归模型中变量“技术培训参加程度”、“种植经验沟通程度”回归系数较为显著的原因所在。

六、结论与讨论

1. 结 论

本研究以联合生产理论为基础,结合调研获取到的农户数据,运用农业碳计量对不同联合生产模式的碳效应进行定量评估,同时运用DEA-RAM模型测算了不同低碳农业联合生产模式的经济效率、环境效率、联合效率,最后对可能导致低碳联合生产绩效差异的影响因素进行了最优尺度回归分析,得出以下结论:

(1)低碳农业联合生产产出的碳产品以期望碳汇量和非期望碳排放量两种形式呈现,最终目标在于尽可能多的获取农产品的同时,促使农产品和碳排放之间的耦合关系得以脱钩,或与碳汇之间的耦合关系得以加强,实现经济效益和生态效益的双赢。在区分农业技术形式之上,农业生产的实际过程中逐渐显现出精准投入减排模式、农牧循环减排模式、制度调整减排模式、农林碳汇生产模式、土壤保育固碳减排模式、技术集成固碳减排模式6种低碳农业联合生产模式。

(2)各个低碳农业联合生产模式均实现了净碳汇量的盈余。其中,经济草本作物生产项目“高投入、高产出”的经营特点导致其碳排放密度处于较高的水平上,生产经营经济木本作物更有利于农业碳汇产品的累积。此外,免耕、秸秆还田和粪肥配施措施有助于土壤碳库保持良好的固碳效果,且标准化的技术集成更有利于农业生产实现固碳减排。

(3)不同低碳农业模式的联合生产绩效虽有一定差异,但整体来看,技术集成固碳减排模式表现出较高的联合生产效率水平,且处于该模式下的所有农业生产项目均实现了绩效水平的改善,在经济效益和生态效益两个方面达到联合生产绩效最优。导致联合生产绩效非效率的因素在于农业生产要素投入的冗余,化学农用品过量施用、粪肥不合理配施、大量能源的消耗和农业固定资产投资额的低效配置均制约着低碳农业的有效联合生产。

(4)农户的行为选择对低碳农业联合生产的资本、劳动力和技术等生产要素投入产生重要影响,以至于低碳农业联合生产绩效受到户主年龄、受教育程度、家庭收入、化肥购买平均单价、低碳技术/措施采用程度、化学农用品施用量的确定方式、低碳技术/措施采用的必要程度、技术培训参加程度、种植经验沟通程度的显著影响,且在不同联合生产模式中影响的显著性和重要程度存在一定差异。

2. 讨 论

本研究在借鉴相关低碳农业性质研究成果的基础之上,引入联合生产的理论视角和概念框架,加深了对低碳农业内在本质的认识,归纳出低碳农业联合生产的产出形式和可操作模式等,同时改变以往在农业产业层面评价低碳农业发展绩效的方式方法,通过实地调研从微观农户经营主体入手,结合获取的农户数据进行绩效评价,所得研究结论更具有有一定的精确性,更有助于理解和分析微观农户主体的行为机制所产生的影响。基于研究结论可知,在农业联合生产的实际过程中,低碳农业技术作为固碳减排的重要手段,是促进低碳农业生产模式实现联合产出绩效最优的核心驱动力,在兼顾“经济效益和生态效益双赢”的低碳农业生产原则下,实现低碳农业发展的关键路径在于结合当地农业生产的实际情况,不断推动一系列低碳技术有序地集成,从而形成标准化的农业生产流程。除此之外,在村民间建立良好的沟通交流机制,加强农户与技术员、农户与种植能手之间频繁交流程度,促进技术

信息、成功经验不断分享,有助于实现农户对资本、劳动力和技术等生产要素更为有效地合理配置,从而改善低碳农业生产的绩效水平。

参 考 文 献

- [1] 郑恒,李跃.低碳农业发展模式探析[J].农业经济问题,2011,32(6):26-29.
- [2] 许广月.中国低碳农业发展研究[J].经济学家,2010(10):72-78.
- [3] 秦军.低碳农业发展的障碍、模式及对策[J].西北农林科技大学学报(社会科学版),2014,14(6):70-75.
- [4] 田伟,杨璐嘉,姜静.低碳视角下中国农业环境效率的测算与分析——基于非期望产出的SBM模型[J].中国农村观察,2014(5):59-71.
- [5] 吴贤荣,张俊飏,朱焯,等.中国省域低碳农业绩效评估及边际减排成本分析[J].中国人口·资源与环境,2014,24(10):57-63.
- [6] 陈儒,姜志德.中国低碳农业发展绩效与政策评价[J].华南农业大学学报(社会科学版),2017,16(5):28-40.
- [7] 骆旭添,吴则焰,陈婷,等.闽北地区低碳农业效益综合评价体系的构建与应用[J].中国生态农业学报,2011,19(6):1444-1447.
- [8] 谢淑娟,匡耀求,黄宁生,等.低碳农业评价指标体系的构建及对广东的评价[J].生态环境学报,2013,22(6):916-923.
- [9] 田云,张俊飏.中国农业碳排放研究回顾、评述与展望[J].华中农业大学学报(社会科学版),2014,33(2):23-27.
- [10] 王青,郑红勇,聂桢桢.低碳农业理论分析与中国低碳农业发展思路[J].西北农林科技大学学报(社会科学版),2012,12(3):1-7.
- [11] 刘星辰,杨振山.从传统农业到低碳农业——国外相关政策分析及启示[J].中国生态农业学报,2012,20(6):674-680.
- [12] OECD. Multifunctionality: towards an analytical framework [M]. Paris: OECD Publications, 2001.
- [13] BAUMGÄRTNER S. Heinrich von stackelberd on joint production [J]. The European journal of the history of economic thought, 2001, 8(4): 509-525.
- [14] 陈儒,邓悦,姜志德.农业生产项目的综合碳效应分析与核算研究——基于陕西安塞的农户调查数据[J].华中农业大学学报(社会科学版),2017(3):23-34.
- [15] 田云,张俊飏.中国农业生产净碳效应分异研究[J].自然资源学报,2013,28(8):1298-1309.
- [16] 刘昱,陈敏鹏,陈吉宁.农田生态系统碳循环模型研究进展和展望[J].农业工程学报,2015,31(3):1-9.
- [17] 国家发展改革委应对气候变化司. 2005 中国温室气体清单研究[M].北京:中国环境科学出版社,2014.
- [18] 张广胜,王珊珊.中国农业碳排放的结构、效率及其决定机制[J].农业经济问题,2014,35(7):18-26,110.
- [19] 金琳,李玉娥,高清竹,等.中国农田管理土壤碳汇估算[J].中国农业科学,2008,41(3):734-743.
- [20] 李涛.资源约束下中国碳减排与经济的双赢绩效研究——基于非径向DEA方法RAM模型的测度[J].经济学(季刊),2013,12(1):667-692.
- [21] 陈儒,邓悦,姜志德,等.中国退耕还林还草地区复耕可能性及其影响因素的比较分析[J].资源科学,2016,38(11):2013-2023.

(责任编辑:陈万红)