

# 碳减排约束下区域农业生产投入及其环境效应

## ——基于价格内生局部均衡模型的模拟

马永喜<sup>a,b</sup>, 孙亚丽<sup>a</sup>

(浙江理工大学 a.经济管理学院, b.浙江省生态文明研究院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**“双碳”目标下农业碳减排将会对区域农业生产要素投入和环境效益带来多方面的影响。构建农业部门价格内生局部均衡模型,以江苏省和浙江省为例,模拟分析碳排放强度变化对主要农作物种植面积、能源消耗和碳排放等方面的综合影响。分析结果表明,在生产技术和外在需求等保持不变的情况下,碳排放强度约束增强,将促使区域内总种植面积和能源总消耗趋于下降,并进一步导致社会总福利和碳排放总量下降;但是碳排放强度约束增强将使得农业生产内部不同品种农作物的种植面积、能源消耗和碳排放出现不同方向的变化调整。相对于大豆、花生和油菜,小麦、水稻和玉米的种植面积、能源消耗和碳排放将出现较大幅度的下降。

**关键词:**碳排放强度;农业生产;能源消耗

中图分类号: F323; F326

文献标志码: A

文章编号: 1009-2013(2021)05-0015-09

### Regional production inputs and their environmental effects under carbon emission reduction constraint: simulation based on price endogenous partial equilibrium model

MA Yongxi<sup>a,b</sup>, SUN Yali<sup>a</sup>

(a. School of Economics and Management, b. Zhejiang Academy of Ecological Civilization, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Agricultural carbon emission reduction under the “double carbon” target will have various impacts on the regional agricultural factor inputs and environmental benefits. A price endogenous partial equilibrium model for the agricultural sector has been constructed. Taking Jiangsu and Zhejiang provinces for examples, the combined effects of changes in carbon emission intensity on the regional planting area, energy consumption and the carbon emission of major crops have been simulated and analyzed. The results show that when production technology and external demand remain unchanged, the enhanced constraint of carbon emission reduction will lead to the decrease of the total planting area and the energy consumption, and further lead to the decrease of the total social welfare and the total carbon emission. However, for different varieties of crops, the enhanced constraint of carbon emission reduction will lead to different adjustment in the planting area, energy consumption and carbon emission. Compared with soybean, peanut and rape, the planting area, energy consumption and carbon emission of wheat, rice and maize have declined to a greater extent.

**Keywords:** carbon emission intensity; agricultural production; energy consumption

## 一、问题的提出

农业生产是全球温室气体重要排放源。据联合国粮食及农业组织(FAO)统计,2018年全球农业

活动排放的温室气体为7.1亿吨二氧化碳当量,比1990年增加了18%;农业食物系统的温室气体排放占人为温室气体排放总量的1/3,中国占世界农业温室气体排放总量的比重约为11%~12%<sup>[1]</sup>。中国是农业大国,也是碳排放大国<sup>[2]</sup>,积极推进农业领域碳减排,是实现碳达峰、碳中和“双碳”目标的重要举措。农业是稳定社会经济的“压舱石”,保障中国粮食安全是国家长期重要战略。农业碳减排措施将会对区域农业生产和碳排放总量带来怎样的

收稿日期: 2021-08-01

基金项目: 国家自然科学基金国际合作项目(41961124004)

作者简介: 马永喜(1977—),男,河南信阳人,教授,博士,主要研究方向为资源环境管理。

影响,“双碳”目标背景下区域农业生产应做出怎样的适应和调整,这些已经成为当前亟待研究和解决的现实问题。

近年来,农业发展与农业碳排放问题已经引起国内外学者较多的关注。李国志等<sup>[3]</sup>估算了1981—2008年中国农业碳排放量,发现碳排放量与农业经济增长呈现N型关系。Zafeiriou和Azam<sup>[4]</sup>研究了1992—2014年法国、葡萄牙和西班牙农业二氧化碳排放与农业增加值之间的关系,结果表明法国和西班牙的环境库兹涅茨曲线(EKC)假设在长期和短期均是有效的,而葡萄牙的EKC假设仅在短期有效。Long和Li<sup>[5]</sup>在估算中国1991—2018年农业碳排放量的基础上,采用EKC模型分析了农业经济增长和农业碳排放量之间的关系,结果表明农业投入和农业经济增长是农业二氧化碳排放的主要驱动因素,农业经济增长与化肥、农药、农膜、柴油等碳源造成的碳排放之间存在协整关系。这些研究从宏观上解释了农业发展与碳排放之间的动态关系,为人们认识农业经济发展的环境影响提供了理论指引。

由于现代农业的发展是建立在化肥、柴油等大量投入的“高耗能高排放”发展模式上,学者们也很重视农业能源消耗和碳排放内在关系的探讨。Zhang et al.<sup>[6]</sup>利用中国主要粮食产区1996年至2015年的时间序列数据,研究农业部门的碳排放、能源消耗和经济增长之间的关系,结果显示农业能源消费对农业碳排放有短期和长期的消极影响。而Xu et al.<sup>[7]</sup>基于阈值回归模型,对中国2001—2017年30个省份农业碳排放和农业能源消耗强度之间关系进行分析,发现能消耗源强度对农业碳排放增长的影响有明显的门槛效应。着眼于应对气候变化和实现现代农业的低碳化转型,农业碳减排政策工具及其政策效应逐渐成为当前研究的热点。McCarl和Schneider等<sup>[8]</sup>利用一般均衡模型(CGE)模拟分析了农业与非农业部门之间不同的碳排放交易价格对减排量的影响,研究表明农业碳交易及碳税和补贴的科学设计可以在提高农户福利的同时减少农业碳排放。刘亦文和胡宗义<sup>[9]</sup>利用CGE模型仿真分析了在农业生产环节开征碳税对中国农村经济的影响,研究结果表明在农业生产环节开征碳税能够在一定程度上降低单位GDP能耗并减少碳排放。

综上,现有研究对农业经济发展、农业能源消耗与农业碳排放之间关系进行了计量分析,探讨了农业碳排放变化的内在机理和形成机制,但对农业经济发展、农业能源消耗与农业碳排放之间关系的模拟和预测分析不多。个别学者利用CGE方法模拟分析了碳价和碳税等低碳政策设计对于农业碳排放量的影响,但是由于CGE模型本身的复杂性以及对数据完备性的要求等原因,对碳减排管理措施如何影响农业内部生产投入,进而如何影响碳排放的规范性、系统性模拟分析尚显不足。尤其在当前“双碳”目标背景下,现有研究缺乏对碳排放约束变化如何影响区域农业生产中土地和能源等投入以及相应碳排放的分析。基于此,本文将构建农业部门局部均衡模型,对土地利用、能源消耗和碳排放管理之间的互动关系进行系统性整合,以模拟分析碳排放约束变化对区域农业生产投入和碳排放等方面的综合性影响。

## 二、农业部门局部模型构建与碳排放核算

### 1. 价格内生局部均衡模型

价格内生的局部均衡模型(Price Endogenous Partial Equilibrium Model,简称PEM)已被广泛用于农业资源利用与环境影响及农业环境政策的研究<sup>[10-12]</sup>。与一般均衡模型相比,局部均衡模型只考虑单个市场的出清,求解的方程数量减少,模型的操作性和灵活性较高,模拟结果的准确性较高;仅需要产业层面的数据,就能够针对特定产业部门进行分析,模拟分析外部冲击对部门生产和消费的影响<sup>[13]</sup>。在商品供需平衡和各种物质平衡的约束和技术约束下,价格内生的局部均衡模型旨在寻求消费者和生产者的剩余最大化<sup>[10]</sup>。该模型能够实现在一个完整的框架中整合分析资源利用、产出、消费及政策之间的互动关系。因而,价格内生的局部均衡模型能够为研究外在碳减排政策冲击对区域内农业生产部门生产及能源消耗等方面的影响提供科学可靠的分析工具。

基于农业部门生产与市场特征,本文在模型设定上做出以下几点基本假设:1)国内农产品市场一体化。农产品在完全竞争市场下进行交易,有充足的国内市场供给。2)农业生产技术水平不变。在现有的技术水平下,农业生产投入产出关系基本

稳定。3) 生产者完全理性。在现有资源和技术下, 农业生产者通过农业资源配置调整, 实现社会总福利最大化。本研究采用非线性数学规划方法, 构建区域农业部门价格内生局部均衡模型。

(1) 目标函数。目标函数是区域农业部门生产和消费的社会总福利最大化。

$$\text{Max}\Omega = \sum_k \left[ \int_0^{x_k^d} P_k^d(x_k^d) dx_k^d - (P_k^{\text{nit}} Q_k^{\text{nit}} + P_k^{\text{die}} Q_k^{\text{die}} + P_k^{\text{ele}} Q_k^{\text{ele}} + C_k^{\text{oth}}) A_k - x_k^{\text{im}} C_k^{\text{im}} + x_k^{\text{ex}} C_k^{\text{ex}} \right] \quad (1)$$

式中,  $\Omega$  是农业部门 (所选各类作物) 中的生产与消费的社会总福利总和;  $P_k^d(x_k^d)$  为反需求函数,  $k$  表示农作物种类。  $x_k^d$  为  $k$  作物的产品需求;  $P_k^{\text{nit}}$  为氮肥价格,  $Q_k^{\text{nit}}$  为氮肥用量;  $P_k^{\text{die}}$  为柴油价格,  $Q_k^{\text{die}}$  为柴油用量;  $P_k^{\text{ele}}$  为电力价格,  $Q_k^{\text{ele}}$  为电力消耗量;  $C_k^{\text{oth}}$  为其他成本;  $x_k^{\text{im}}$  为  $k$  作物产品的区域外输入量,  $C_k^{\text{im}}$  为输入成本 (价格);  $x_k^{\text{ex}}$  为向区域外输出  $k$  作物产品数量,  $C_k^{\text{ex}}$  为输出成本 (价格);  $A_k$  为  $k$  作物种植面积。

(2) 约束条件。约束条件包括外生需求、供需平衡、播种面积、用水和碳排放强度等约束。外生需求约束是指模型内各种农作物产品需求要大于等于目标需求, 外生给定的目标需求取决于当期的社会经济发展和人口及生活水平等因素。

$$x_k^d \geq TD_k^d \quad (2)$$

供需平衡约束是指区域内农作物产品供给和输入大于等于其需求和输出量。

$$x_k^d + x_k^{\text{im}} \geq x_k^d + x_k^{\text{ex}} \quad (3)$$

本研究采用 Chen 和 Onal<sup>[14]</sup> 的方法, 利用历史播种面积组合和合成作物组合 (synthetic crop mix, 也可以可行最大播种面积组合表示) 相结合的方法来生成作物轮作播种面积的约束条件。

$$A_k = \sum_m \tau_m \cdot h_{km} + \sum_n \gamma_n \cdot s_{kn} \quad (4)$$

$$\sum_m \tau_m + \sum_n \gamma_n \leq 1 \quad (5)$$

式中,  $h_{km}$  和  $s_{kn}$  分别是历史播种面积和合成化 (可行最大) 播种面积;  $\tau_m$  和  $\gamma_n$  内生决定的作物播种面积组合权重, 权重组合之和小于等于 1。

用水约束是指各种作物的灌溉用水不得大于当期水资源农业用水供给量。

$$\sum_s A_k W_{kt} \leq W_{tt} \quad (6)$$

式中,  $W_{kt}$  为  $k$  作物在  $t$  时期的灌溉用水量;  $t$  时期有  $s$  种作物需要进行灌溉;  $W_{tt}$  为  $t$  时期水资源农业用水供给总量。

## 2. 碳排放核算与碳排放强度约束

农业碳排放一般指农业生产过程中能源等资源的投入使用和农业生产生长过程及各类废弃物处理所产生的有机碳流失<sup>[15,16]</sup>。本文主要考虑农业活动中引起的 6 类排放, 包括农业机械使用、化肥、农药、农膜等化学制品生产使用及农业灌溉和翻耕引起的碳流失和排放<sup>[2,17]</sup>。农业生产碳排放总量由柴油、化肥、农药等碳源引起的碳排放量汇总得到, 其计算公式如下:

$$\sum C_i = \sum T_i \delta_i \quad (7)$$

其中  $C_i$  为第  $i$  种排放源 (柴油消耗、化肥施用、农药使用、农膜使用、灌溉、翻耕) 的碳排放量,  $T_i$  为第  $i$  种碳排放源的使用量, 灌溉和翻耕面积分别以当年播种面积和灌溉面积为准,  $\delta_i$  为第  $i$  种排放源的碳排放系数。

农业碳排放强度是指农业部门每单位生产总值所带来的二氧化碳排放量, 用来衡量国家或地区碳排放量与农业经济之间的比例关系<sup>[18]</sup>, 其计算公式如下:

$$CI_k = \sum_k C_k / P_k X_k^S \quad (8)$$

其中,  $CI_k$  为  $k$  作物碳排放强度,  $C_k$  为  $k$  作物碳排放量,  $P_k$  为  $k$  作物的产品价格,  $X_k^S$  为  $k$  作物的产品产量。

本研究着重关注碳排放政策和碳减排目标要求对农业生产及其能源消耗的影响, 因而本研究在上节所构建的农业部门价格内生的局部均衡模型中引入碳排放强度约束, 考察碳排放约束变化下农业生产及其能源消耗的变化, 前提是农业生产碳排放强度不得大于目标碳排放强度。

$$\sum_k C_k / P_k X_k^S \leq CI_r \quad (9)$$

式中,  $CI_r$  为不同的情景  $r$  下的目标碳排放强度。

## 三、研究区域、数据来源与模型校准

### 1. 研究区域

本研究选取江苏省和浙江省作为研究区域。江苏省和浙江省作为经济大省, 也都是人口大省, 一直以来都重视农业农村发展, 在农业现代化发展和

农业碳减排工作上都走在全国前列。江苏省历来重视农业领域的碳减排工作,江苏省早在2009年就制定了《江苏省应对气候变化方案》,提出要“优化种植结构,推进农业产业结构调整”,减缓温室气体排放。2021年江苏省在《2021年推动碳达峰、碳中和工作计划》中将农业农村碳减排列为“双碳”目标的重点领域,并提出化肥减量增效、农药零增长的低碳农业发展方案。浙江省在2021年发布的《浙江省应对气候变化“十四五”规划》中同样将农业农村作为碳减排六大重点领域之一,并专门制定了“农业气候适应重点工作”,提出要“优化现代种植业生产力布局”,“继续实施化肥农药减量增效,加快推进有机环保农药替代”。

江苏省和浙江省地理位置相邻、自然条件相近,两省主要农作物种类也基本一致,水稻、小麦、玉米、大豆、花生和油菜在两省均大量种植。但由于土地等自然资源相差较大,两省农作物种植面积相差较大。2018年江苏省农作物播种面积7520.23千公顷,其中粮食作物5475.93千公顷,是粮食的主产省。而浙江省2018年农作物种植面积仅1978.68千公顷,其中粮食作物975.73千公顷,是粮食的主销省。选取江苏省和浙江省作为研究比较对象,研究其碳排放约束下区域农业生产和碳排放情况,有一定的典型意义,将会对其他省区优化农业生产布局和生产投入、推进农业碳减排具有一定启示作用。

## 2. 数据来源

水稻、小麦、玉米、大豆、花生和油菜是两省的主要农作物。2018年,江苏省和浙江省的水稻、小麦、玉米、大豆、花生和油菜的播种面积分别达到总播种面积的74.28%和46.40%。这六种农作物在两省农作物播种面积排名中均处于前列,消耗了

较多的土地、灌溉水以及能源和化肥等物质投入。因而,本文选择水稻、小麦、玉米、大豆、花生和油菜作为农作物研究对象。

本研究数据主要包括农作物种植面积和农产品产量、产品价格和要素投入成本、农产品需求和碳排放四大部分。农作物种植(播种)面积、总产量、亩产量等农业产出数据来自《江苏统计年鉴2019》《浙江统计年鉴2019》。农作物需求估计数据来源于《江苏统计年鉴2019》《浙江统计年鉴2019》《中国统计年鉴2019》和布瑞克农业数据库。各类农作物的产品需求分为口粮需求、饲料用粮、种子用粮、工业用粮和损耗,根据薛平平和张为付<sup>[19]</sup>的研究方法分别进行估计并加总得到。农产品价格、氮肥价格及使用量、水费、燃料动力费、机械作业费和排灌费等数据来源于《全国农产品成本收益资料汇编2019》。柴油费用根据徐健辉<sup>[20]</sup>研究由燃料动力费和机械作业费加总折算。各种农产品的需求弹性来自王钢、苗珊珊、范少玲等研究<sup>[21-24]</sup>。碳排放核算数据包括农业能源消耗量和农业生产碳排放量。柴油碳排放系数、化肥和农药碳排放系数、农膜碳排放系数和灌溉和翻耕碳排放系数分别来自IPCC(政府间气候变化小组)、美国橡树岭国家实验室、南京农业大学农业资源与生态环境研究所和Dubey<sup>[25-28]</sup>等研究。

## 3. 模型校准

为检验所构建的价格内生局部均衡模型的可信性,本研究将2018年设为模拟基期,利用2018年农业生产投入产出及需求等数据进行模拟校准,模拟得出江苏省和浙江省水稻、小麦、玉米、大豆、花生和油菜的种植面积和能源消耗。模拟结果如表1所示。

表1 2018年江苏省和浙江省主要农作物种植面积和能源消耗实际观测值和模型模拟值

农作物	种植面积			能源消耗		
	实际种植面积 (千公顷)	模拟种植面积 (千公顷)	偏差 (%)	实际能源消耗 (万吨标准煤)	模拟能源消耗 (万吨标准煤)	偏差 (%)
江苏:						
水稻	2214.72	2212.32	-0.11	113.73	113.69	-0.04
小麦	2403.96	2403.06	-0.04	114.95	114.94	-0.01
玉米	515.77	510.41	-1.04	19.80	19.74	-0.31
大豆	193.75	193.80	0.03	2.98	2.98	0.16
花生	98.38	102.74	4.43	3.09	3.15	1.96
油菜	159.08	160.13	0.66	3.81	3.82	0.17

表 1 (续)

农作物	种植面积			能源消耗		
	实际种植面积 (千公顷)	模拟种植面积 (千公顷)	偏差 (%)	实际能源消耗 (万吨标准煤)	模拟能源消耗 (万吨标准煤)	偏差 (%)
浙江:						
水稻	651.07	651.55	-0.07	37.13	37.14	0.03
小麦	85.36	83.92	-1.69	3.46	3.44	-0.58
玉米	49.34	44.91	-8.97	1.49	1.43	-4.26
大豆	85.21	89.70	5.27	0.90	0.91	1.60
花生	15.84	16.83	6.27	0.42	0.44	4.02
油菜	104.87	107.26	2.28	2.99	3.00	0.48

模拟校准结果显示,模型模拟所得两省各种农作物生产能源消耗与其实际观测值偏差均不超过 5%,种植面积与其实际观测值偏差基本不超过 5%,浙江省的玉米和花生因其种植面积较小,且其近年来种植面积波动较大,模拟结果偏差略大,但其偏差未超过 10%,模拟结果均在近十年来实际种植面积波动范围之内。因此,有理由相信本研究所构建的价格内生局部均衡模型能够比较准确地模拟江苏省和浙江省农业生产实际情况,模拟结果具有相当程度的可信性,可以利用该模型开展进一步模拟分析。

#### 四、模拟分析

##### 1. 情景方案

2015 年,中国政府承诺二氧化碳排放 2030 年左右达到峰值并争取尽早达峰,单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%~65%。2019 年 11 月国务院发布《中国应对气候变化的政策与行动 2019 年度报告》,报告指出 2018 年中国单位国内生产总值(GDP)二氧化碳排放下降 4.0%,比 2005 年累计下降 45.8%。根据《2021 中国与全球食物政策报告》的估计,2018 年中国农业食物系统相关行业的能源消耗强度为 0.24 万吨/亿元,低于全行业平均水平的 0.83 万吨/亿元。能源消耗是农业碳排放的主要来源,故推测农业碳排放强度低于全行业平均水平<sup>[29]</sup>。考虑到 2018 年中国农业部门二氧化碳排放已相对于 2005 年累计下降了 45.8%,在 2018 年碳减排的基础上,农业部门碳排放强度再下降 15%即可完成“二氧化碳排放比 2005 年下降 60%”的减碳目标。同时,由于农业碳排放实际基础和预期目标具有明显的区域差异性,一些省区将单位 GDP 碳排放降速控制在 6%左右的水平即可达到减排目

标<sup>[30]</sup>。因而,为着重考察碳减排约束变化对农业生产结构、能源消耗和碳排放的影响,本研究假设农作物生产单位面积产量和除能源外其他要素投入保持不变,并以 2018 年为基期,分别设置农业生产系统碳排放强度下降 6%(情景一)、9%(情景二)、12%(情景三)和 15%(情景四)四种模拟情景。

##### 2. 模拟结果

农业生产系统碳排放强度约束的变化将对农业生产决策、种植结构调整和能源消耗带来一系列的变化以适应碳减排目标要求。基于上文构建的价格内生局部均衡模型,本研究采用 GAMS (General Algebraic Modeling System) 软件系统,模拟分析碳排放强度约束变化对农作物生产能源消耗、碳排放量、种植结构、生产成本、社会总福利的综合影响。基于 2018 年实际数据,利用价格内生局部均衡模型,模拟得出江苏省和浙江省农业生产情况,并将此作为基准情景,作为与其他各模拟情景方案对比的基础。在此基础上,分别对情景一至情景四下的区域农业生产系统变化进行模拟。由于外生变量碳减排目标约束调整将直接引起系统内生变量(生产投入)的变化,并进而影响农业生产社会总福利和环境效应(碳排放)的变化,而生产投入(种植面积、能源消耗)是系统的主要内生变量也是直接影响碳排放的主要内生变量,因而模拟结果将主要展示种植面积、能源消耗、社会总福利和环境效应的变化。

(1) 种植面积。表 2 展示了江苏省和浙江省在不同情境下主要农作物种植面积及其变化率。表 2 最后两行列出了两省的主要农作物总种植面积及其变化率。

表2 不同情景下主要农作物种植面积变化

农作物	区域	基准	情景一		情景二		情景三		情景四	
		面积(千公顷)	面积(千公顷)	变化率(%)	面积(千公顷)	变化率(%)	面积(千公顷)	变化率(%)	面积(千公顷)	变化率(%)
水稻	江苏	2212.32	1994.78	-9.83	1994.78	-9.83	1880.01	-15.02	1345.92	-39.16
	浙江	651.55	627.50	-3.69	573.45	-11.99	523.68	-19.63	459.47	-29.48
小麦	江苏	2403.06	2002.26	-16.68	1278.19	-46.81	800.60	-66.68	800.60	-66.68
	浙江	83.92	22.72	-72.93	22.72	-72.93	22.72	-72.93	22.72	-72.93
玉米	江苏	510.41	185.10	-63.74	185.10	-63.74	185.10	-63.74	185.10	-63.74
	浙江	44.91	11.02	-75.46	11.02	-75.46	11.02	-75.46	11.02	-75.46
大豆	江苏	193.80	483.40	149.43	483.40	149.43	483.40	149.43	483.40	149.43
	浙江	89.70	144.88	61.52	188.05	109.64	230.06	156.48	259.48	189.28
花生	江苏	102.74	314.52	206.13	314.52	206.13	359.02	249.45	437.20	325.54
	浙江	16.83	19.61	16.52	30.48	81.11	38.24	127.21	38.24	127.21
油菜	江苏	160.13	278.39	73.85	492.05	207.28	632.98	295.29	756.00	372.12
	浙江	107.26	143.93	34.19	143.93	34.19	143.93	34.19	143.93	34.19
总面积	江苏	5582.46	5258.45	-5.80	4748.04	-14.95	4341.11	-22.24	4008.22	-28.20
	浙江	994.18	969.65	-2.47	969.65	-2.47	969.65	-2.47	934.85	-5.97

模拟结果显示,随着碳排放强度下降比例的增加,即碳减排约束的增强,江苏省和浙江省的主要农作物总种植面积均呈现下降趋势。江苏省主要农作物总种植面积下降比例大于浙江省,其原因可能是江苏省农业种植面积和产量均大于浙江省,因而受碳排放约束的影响更大。分作物品种来看,随着碳减排约束增强,江苏省和浙江省两省主要作物种植面积变化趋势完全一致,两省水稻、小麦和玉米的种植面积将会下降,而大豆、花生和油菜的种植面积将会提升。在种植面积下降的作物中,玉米的种植面积下降幅度最大,两省在碳排放强度下降6%的情景下,玉米种植面积迅速下降到最小值(历年

最小种植面积)。在种植面积上升的作物中,江苏省花生种植面积上升幅度最大,浙江省大豆种植面积上升幅度最大。

(2) 能源消耗。由于农业生产不仅消耗柴油和电力等直接能源,还会消耗化肥、农药和农膜等物质,这些物质的生产会间接消耗大量能源,因而农业生产中的能源消耗一般分为直接能源消耗和间接能源消耗<sup>[19]</sup>。本研究将直接能源(柴油和电力)和间接能源(化肥、农药和农膜)消耗转换成统一的计量单位(标准煤)来整合计算其能源消耗总量。在基准情景和模拟情景下,江苏省和浙江省主要农作物生产能源消耗及其变化情况如表3所示。

表3 不同情景下主要农作物生产能源消耗总量及其变化

农作物	区域	基准	情景一		情景二		情景三		情景四	
		能耗(万吨标准煤)	能耗(万吨标准煤)	变化率(%)	能耗(万吨标准煤)	变化率(%)	能耗(万吨标准煤)	变化率(%)	能耗(万吨标准煤)	变化率(%)
水稻	江苏	113.69	102.51	-9.83	102.51	-9.83	96.61	-15.02	69.16	-39.16
	浙江	37.14	35.76	-3.69	32.68	-11.99	29.85	-19.63	26.19	-29.48
小麦	江苏	114.94	95.77	-16.68	61.14	-46.81	38.29	-66.68	38.29	-66.68
	浙江	3.44	0.93	-72.93	0.93	-72.93	0.93	-72.93	0.93	-72.93
玉米	江苏	19.74	7.16	-63.74	7.16	-63.74	7.16	-63.74	7.16	-63.74
	浙江	1.43	0.35	-75.47	0.35	-75.47	0.35	-75.47	0.35	-75.47
大豆	江苏	2.98	7.42	149.43	7.42	149.43	7.42	149.43	7.42	149.43
	浙江	0.91	1.47	61.51	1.90	109.64	2.33	156.47	2.63	189.27
花生	江苏	3.15	9.66	206.13	9.66	206.13	11.02	249.44	13.42	325.54
	浙江	0.44	0.51	16.50	0.79	81.09	0.99	127.16	0.99	127.16
油菜	江苏	3.82	6.65	73.86	11.75	207.29	15.11	295.30	18.05	372.13
	浙江	3.00	4.03	34.19	4.03	34.19	4.03	34.19	4.03	34.19
总能耗	江苏	258.32	229.16	-11.29	199.63	-22.72	175.62	-32.01	153.51	-40.57
	浙江	46.35	43.05	-7.12	40.69	-12.22	38.48	-16.98	35.12	-24.24

模拟结果显示,随着碳减排约束增强,江苏省和浙江省主要农作物生产能源消耗总量均呈现下降趋势。江苏省总能耗下降比例大于浙江省,其原因可能是江苏省农业生产规模大于浙江省,因而受碳排放约束的影响更大。从分作物品种来看,两省的水稻、小麦和玉米的能源消耗量均逐渐下降,其中小麦和玉米的能源消耗量下降幅度较大;而大豆、花生和油菜的能源消耗量均逐渐上升,其中油菜和花生的能源消耗量上升幅度较大。由于本研究假设种植农作物的单位面积要素投入量不变,各主要农作物的能源消耗量与其种植面积的变化趋势基本

一致。

(3) 社会总福利。基准情景和模拟情境下的江苏省与浙江省主要农作物社会总福利(生产者剩余与消费者剩余之和)及其变化情况如表 4 所示。从社会总福利角度来看,随着碳排放强度的下降,江苏省和浙江省农业部门的社会总福利均呈现下降趋势,江苏省农业部门的社会总福利下降幅度更大。其原因可能在于,在农产品需求基本稳定的情况下,本区域农业生产产量下降(同时输出减少或输入增加),导致本地农业部门生产者收益减少,社会总福利下降。

表 4 不同情景下区域主要农作物社会总福利变化

农作物	区域	基准	情景一		情景二		情景三		情景四	
		福利(亿元)	福利(亿元)	变化率(%)	福利(亿元)	变化率(%)	福利(亿元)	变化率(%)	福利(亿元)	变化率(%)
水稻	江苏	1026.11	995.34	-3.00	995.34	-3.00	979.11	-4.58	903.58	-11.94
	浙江	10812.17	10782.41	-0.28	10715.55	-0.89	10653.98	-1.46	10574.54	-2.20
小麦	江苏	278.42	260.34	-6.49	227.68	-18.22	206.13	-25.96	206.13	-25.96
	浙江	1298.61	1281.92	-1.29	1281.92	-1.29	1281.92	-1.29	1281.92	-1.29
玉米	江苏	691.45	663.78	-4.00	663.78	-4.00	663.78	-4.00	663.78	-4.00
	浙江	1719.33	1708.49	-0.63	1708.49	-0.63	1708.49	-0.63	1708.49	-0.63
大豆	江苏	1190.33	1208.32	1.51	1208.32	1.51	1208.32	1.51	1208.32	1.51
	浙江	9268.26	9309.39	0.44	9341.58	0.79	9372.89	1.13	9394.83	1.37
花生	江苏	53.02	87.25	64.55	87.25	64.55	94.44	78.12	107.08	101.95
	浙江	18.86	21.55	14.31	32.12	70.36	39.66	110.33	39.66	110.33
油菜	江苏	223.17	230.83	3.43	244.67	9.63	253.80	13.73	261.77	17.30
	浙江	253.37	293.01	15.65	293.01	15.65	293.01	15.65	293.01	15.65
总福利	江苏	3462.50	3445.86	-0.48	3427.04	-1.02	3405.59	-1.64	3350.66	-3.23
	浙江	23370.60	23396.78	0.11	23372.67	0.01	23349.96	-0.09	23292.45	-0.33

(4) 环境效应。本研究以农业主要作物碳排放总量的变化来反映碳减排约束变化的环境效应。基准情景和模拟情境下的江苏省和浙江省农作物

生产碳排放量及其变化情况如表 5 所示。随着碳排放强度的下降,两省的农作物总碳排放量均呈下降趋势,但其变化率略有差别。江苏省在四种情景方

表 5 不同情景下区域主要农作物生产的碳排放量变化

产品种类	区域	基准	情景一		情景二		情景三		情景四	
		碳排放(万吨)	碳排放(万吨)	变化率(%)	碳排放(万吨)	变化率(%)	碳排放(万吨)	变化率(%)	碳排放(万吨)	变化率(%)
水稻	江苏	182.91	164.92	-9.84	164.92	-9.84	155.43	-15.02	111.28	-39.16
	浙江	53.72	51.74	-3.69	47.28	-11.99	43.18	-19.62	37.88	-29.49
小麦	江苏	124.28	103.55	-16.68	66.10	-46.81	41.41	-66.68	41.41	-66.68
	浙江	4.16	1.13	-72.84	1.13	-72.84	1.13	-72.84	1.13	-72.84
玉米	江苏	22.64	8.21	-63.74	8.21	-63.74	8.21	-63.74	8.21	-63.74
	浙江	1.77	0.44	-75.14	0.44	-75.14	0.44	-75.14	0.44	-75.14
大豆	江苏	3.59	8.96	149.58	8.96	149.58	8.96	149.58	8.96	149.58
	浙江	0.71	1.14	60.56	1.48	108.45	1.81	154.93	2.04	187.32
花生	江苏	4.59	14.06	206.32	14.06	206.32	16.05	249.67	19.55	325.93
	浙江	0.72	0.84	16.67	1.31	81.94	1.64	127.78	1.64	127.78
油菜	江苏	5.36	9.32	73.88	16.47	207.28	21.18	295.15	25.30	372.01
	浙江	3.47	4.66	34.29	4.66	34.29	4.66	34.29	4.66	34.29
碳排放总量	江苏	343.37	309.02	-10.00	278.72	-18.83	251.24	-26.83	214.70	-37.47
	浙江	64.55	59.94	-7.14	56.29	-12.80	52.85	-18.13	47.79	-25.96

案下的碳排放量比基准方案低 10%~37.47%，而浙江省四种方情景案的碳排放量比基准方案低 7.14%~25.96%。分作物品种来看，各主要作物碳排放量表现出不同类型的变化趋势，小麦、水稻和玉米的碳排放量逐渐下降，而大豆、花生和油菜的碳排放量呈上升趋势。两省农作物分品种的碳排放及其总碳排放量与其能耗变化趋势基本一致。

### 3. 讨论

从以上模拟结果可以看出，碳排放约束的变化对不同省区的种植结构、能源消耗和碳排放的总体影响方向是一致的。但是，由于种植规模等因素的不同，种植面积、成本及能耗调整幅度不一致，种植规模较大的省份受到的冲击可能更大。碳排放约束变化对区域社会总福利的影响亦有所差别，江苏省作为农业生产大省其受到的影响更大，碳排放强度约束增强对其农业部门社会总福利有较大的影响。

从模拟结果还可以看到，碳减排约束的增强使得农业生产中能源总消耗和相应的碳排放总量减少。碳排放总量的减少，要求在其他生产条件和生产技术保持不变的前提下，农业总种植面积下降，但是不同作物种植面积出现此消彼长的变化。在农业生产中水稻、小麦和花生的单位面积碳排放略高于玉米、油菜和大豆。而在碳减排约束下，两省的小麦、水稻和玉米的种植面积均下降，大豆、花生和油菜的种植面积提升。这说明不同品种农作物种植面积变化并非基于碳排放强度的大小而相应变化，而是碳排放约束和经济利益最优化导向综合作用的结果。不同省份的作物种植结构和规模（面积）不同，同时不同作物的碳排放强度和成本收益结构亦存在差别；碳排放约束的变化，将导致农业生产系统在追求农业部门社会总福利最大化情景下，依据各种作物自身碳排放强度和成本收益结构等方面因素调整其内生的生产投入（种植面积和能耗等），并进而影响其环境效应（碳排放）。

## 五、结论与启示

本文构建了区域农业部门价格内生的局部均衡模型，以江苏省和浙江省的水稻、小麦、玉米、大豆、花生和油菜种植生产为例，对碳减排约束下的区域农业生产投入和碳排放变化进行了模拟分析。研究结果表明：1）随着碳排放强度约束增强，

在农业生产技术方式和农产品需求基本稳定的前提下，区域内总种植面积将趋于下降；同时农业生产内部不同品种农作物种植结构出现调整，三大主粮（小麦、水稻、玉米）的种植面积减少，而大豆、花生和油菜的种植面积增加。2）随着碳减排目标的提升，农业能源总消耗和生产总成本将会下降，但是由于种植结构的调整，不同品种能耗结构相应变化，小麦、水稻、玉米的能耗下降较多，而大豆、花生和油菜的能耗有所增加。3）碳排放强度的下降，使得区域农业生产碳排放总量降低，同时区域农业生产社会总福利趋于下降，区域农业发展经济效益与环境效益之间存在此消彼长的关系。

基于以上研究结论，可得到以下几点政策启示：

1）单纯的碳减排将会降低三大主粮作物的种植面积和产量，影响国家粮食安全，因而需要转变农业发展模式，制定鼓励低碳农业和循环农业发展的政策和优惠措施，合理引导农户在保证粮食生产前提下减少能源消耗和碳排放。2）碳减排目标约束对不同区域的影响不尽相同，需要各个地方因地制宜，根据实际情况确定合理的区域农业碳排放强度目标，分别有重点地发展低碳农业和生态农业。3）单纯通过种植结构调整和减少能源使用难以实现农业经济发展和碳减排的双重目标，需要综合采取措施提高能源和化肥等要素利用效率，发展新型现代化农业，调整农业结构等，来逐步推进农业产业与生态环境的协调可持续发展。

### 参考文献：

- [1] CRIPPA M, SOLAZZO E, GUIZZARDI D, et al. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions [J]. *Nature Food*, 2021, 2(3): 1-12.
- [2] 田云, 张俊飏, 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.
- [3] 李国志, 李宗植, 周明. 碳排放与农业经济增长关系实证分析[J]. *农业经济与管理*, 2011(4): 32-39.
- [4] ZAFEIRIOU E, AZAM M. CO<sub>2</sub> emissions and economic performance in EU agriculture: Some evidence from Mediterranean countries[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 81(10): 104-114.
- [5] LONG D J, LI T. The impact of socio-economic institutional change on agricultural carbon dioxide emission reduction in China[J]. *Plos One*, 2021, 16(5).



- [6] ZHANG L, PANG J, CHEN X, et al. Carbon emissions, energy consumption and economic growth: Evidence from the agricultural sector of China's main grain-producing areas[J]. *Science of the Total Environment*, 2019(665): 1017-1025.
- [7] XU X C, YANG H M, YANG H R. The threshold effect of agricultural energy consumption on agricultural carbon emissions: a comparison between relative poverty regions and other regions[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 12(6).
- [8] SCHNEIDER U A, MCCARL B A, SCHMID E. Agricultural sector analysis on greenhouse gas mitigation in US agriculture and forestry[J]. *Agricultural Systems*, 2007, 94(2):128-140.
- [9] 刘亦文, 胡宗义. 农业温室气体减排对中国农村经济影响研究——基于 CGE 模型的农业部门生产环节征收碳税的分析[J]. *中国软科学*, 2015(9): 41-54.
- [10] MCCARL B A, SPREEN T H. Price endogenous mathematical programming as a Tool for sector analysis[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 1980, 62(1): 87-102.
- [11] CHANG C C, CHEN C C, MCCARL B. Evaluating the economic impacts of crop yield change and sea level rise induced by climate change on Taiwan's agricultural sector[J]. *Agricultural Economics*, 2012, 43(2): 205-214.
- [12] YI F, MCCARL B, ZHOU X. Damages of surface ozone: evidence from agricultural sector in China[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(3).
- [13] 谭琳元, 李先德. 大麦进口关税政策调整对中国大麦产业的影响——基于局部均衡模型的模拟分析[J]. *农业技术经济*, 2020(7): 17-26.
- [14] CHEN X G, ONAL H. Modeling agricultural supply response using mathematical programming and crop mixes[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2012, 94(3): 241-257.
- [15] 李波, 张俊飏, 李海鹏. 中国农业碳排放与经济发展的实证研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(12): 8-13.
- [16] 王宝义. 中国农业碳排放的结构特征及时空差异研究[J]. *调研世界*, 2016(9): 3-10.
- [17] 张璐. 中国粮食主产区农业部门的经济增长、能源消耗与温室气体排放关系研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [18] 程叶青, 王哲野, 张守志, 等. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量[J]. *地理学报*, 2013, 68(10): 1418-1431.
- [19] 薛平平, 张为付. 江苏粮食消费变化及其对我国粮食安全的贡献度分析[J]. *农业现代化研究*, 2019, 40(2): 206-214.
- [20] 徐键辉. 粮食生产的能源消耗及其效率研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [21] 王钢, 石奇, 钱龙. 最低收购和价格补贴政策能提升农户福利效应吗?——基于小麦主产区 5 省份 1996—2016 年面板数据的测算[J]. *农业经济问题*, 2019(10): 63-73.
- [22] 苗珊珊, 陆迁. 我国大米的供需态势: 由库存与消费观察[J]. *改革*, 2011(7): 51-56.
- [23] 范少玲, 史建民. 基于 Nerlove 模型的山东省玉米供给反应研究[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(4): 1762-1764.
- [24] 廖翼, 姚屹浓. 中国大豆的供给反应——基于省际面板数据的实证分析[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2017(6): 50-53.
- [25] IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate change 2007: the physical science basis: contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 1-996.
- [26] WEST T O, MARLAND G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2002, 91(1-3): 217-232.
- [27] CHENG K, PAN G, SMITH P, et al. Carbon footprint of China's crop production—An estimation using agro-statistics data over 1993—2007[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 142(3-4): 231-237.
- [28] DUBEY A, LAL R. Carbon Footprint and Sustainability of Agricultural Production Systems in Punjab, India, and Ohio, USA[J]. *Journal of Crop Improvement*, 2009, 23(4):332-350.
- [29] 张玉梅, 樊胜根, 陈志钢, 等. 转型农业食物系统助力实现中国 2060 碳中和目标[C]//中国农业大学全球食物经济与政策研究院等. 2021 中国与全球食物政策报告.北京: 中国农业大学, 2021.
- [30] 田云, 张银岭. 中国农业碳排放减排成效评估, 目标重构与路径优化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 256(12): 3-9.

责任编辑: 李东辉