

中国农业碳排放经验分解与峰值预测 ——基于动态政策情景视角

褚力其¹ 姜志德^{1*} 任天驰²

(1. 西北农林科技大学 经济管理学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国农业大学 经济管理学院, 北京 100101)

摘要 运用广义迪式指数分解(GDIM)考察了1985—2017年中国农业碳排放驱动因素,并根据因素贡献差异设置动态政策情景对2018—2030年的全国农业碳排放量进行模拟与预测。研究发现:财政支出规模是引致碳排放增长的首要因素,而财政支出强度与产出强度为促进碳排放减少的关键因素;从时间段来看,1985—2010年我国碳排放增长表现为“产值规模带动”到“生产支出带动”,2010年后呈现“政策规制效应”下的年际间交替增减变化态势;在动态情景预测中,政策规制情景和绿色低碳情景分别在2025和2020年达到峰值,高速发展情景和绿色低碳情景在2030年的碳排放总量相差近10亿t。由此可见,出台“奖补”与“规制”并行的政策手段、借助市场作用优化农业生产投入结构、提高农资消耗品使用率是促进低碳生产的长久之计。

关键词 农业碳排放; 农业政策; 广义迪式指数分解; 动态政策情景; 峰值预测

中图分类号 F323.21

文章编号 1007-4333(2020)10-0187-15

文献标志码 A

Empirical decomposition and peak prediction of agricultural carbon emissions in China: From the perspective of dynamic policy scenarios

CHU Liqi¹, JIANG Zhide^{1*}, REN Tianchi²

(1. School of Economics and Management, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. College of Economics and Management, China Agricultural University, Beijing 100101, China)

Abstract The generalized Dig index exponential decomposition (GDIM) was used to examine the driving factors of agricultural carbon emissions in China from 1985 to 2017, and a dynamic policy scenario was set up to simulate and predict the national agricultural carbon emissions from 2018 to 2030 based on factor contribution differences. The study found that: The scale of fiscal expenditure was the primary factor leading to the growth of carbon emissions, the intensity of fiscal expenditure and output strength were the key factors contributing to the decline; In terms of time period, the growth of China's carbon emissions from 1985 to 2010 was expressed as "Driven by the scale of output value" to "Produced by production expenditure". After 2010, an alternate inter-annual increase and decrease under the "Policy regulation effect"; In the dynamic scenario forecast, the policy regulation scenario and the green low-carbon scenario will reach peaks on 2025 and 2020, respectively. At the peak, the total carbon emissions in the high-speed development scenario and the green low-carbon scenario in 2030 will be close to 1 billion tons. Thus it can be seen that promulgating the policy measures of "reward and compensation" and "regulation", optimizing the structure of agricultural production input with the help of the market, and increasing the utilization rate of agricultural consumables are long-term measures to promote low-carbon production.

收稿日期: 2020-01-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71573212); 国家重点研发计划(2016YFC0503703)

第一作者: 褚力其, 博士研究生, E-mail: cnclq@foxmail.com

通讯作者: 姜志德, 教授, 主要从事农业资源与环境管理研究, E-mail: zhidej@sina.com

Keywords agricultural carbon emissions; agricultural fiscal expenditure; generalized dimorphic exponential decomposition; dynamic scenario simulation; peak prediction

农业低碳生产是乡村振兴战略的重要指示,也是建设美丽中国的内在需要。然而,我国农业生产方式仍是粗放的,存在着诸如地力破坏、面源污染和生态系统退化等的一系列问题,特别是生产要素浪费等原因引发碳排放量的提升,严重影响了农业经济增长质量^[1]。一方面,农户无论是在低碳生产还是生活上都是最广泛参与主体,农业源碳排放总量巨大,几乎占据人类活动碳排放总和的30%,农业部门的减排难度较大^[2];另一方面,温室气体是导致气候复杂多变的根源,极端天气给我国农业的发展转型带来了巨大压力,2016年我国农地受到气候灾害面积高达2 620万hm²,占到农地总面积的21.1%^[3]。2015年,《巴黎协定》的签署将全球应对气候变化治理引入了新阶段,在国家自主贡献目标(NDC)的框架下,中国农业部印发了《农业绿色发展技术导则(2018—2030年)》^①,明确提出在2030年前,单位农业增加值对应的碳排放降低30%以上的减排目标。可以看出,新一轮国家政策实施目的在于对达成农业碳排放的减排目标提供保障,并对农业低碳生产方式转变进行战略性指导^[4]。因此,准确判断农业政策何以驱动农业碳排放是中国减排道路上不可忽视的一环,也是农业发展方式转变的必要条件。

农业碳排放的问题已开展大量研究,但专门以农业政策作为驱动因素的研究仍然较少,且看法不尽相同。关于政策与碳排放的争论聚焦在其影响路径上:其一,部分研究运用分解方法进行人口规模、GDP等要素的时间序列分析^[5-6],不同实证得出“技术进步效应”、“规模效应”和“结构效应”等分别为碳排放增长的关键因素^[7-9];而政策因素的分析多基于减排效应,并未对政策如何驱动碳排放增长给出合理的解释^[10]。其二,也有文献将农业政策引申为不同低碳政策的激励或规制效用^[11],例如农业废弃物回收补贴抑或是秸秆焚烧处罚。由于我国农业低碳政策通常以试点工程和地方政策的方式推行,所以专门的低碳政策研究难以对全国农业政策进行概括。其三,更多学者通过构建农业政策视域下的子路径进行论证,吴贤荣等^[12]研究发现,政策扶持下

的农机使用是促使农业碳排放增加的重要途径;胡川等^[7]通过实证得出,政策规制有利于技术创新,并显著传递于碳减排作用。通过上述结论不难发现,如果财政支出更多被用于低碳工程或减排技术,集约生产所带来的效率改善会使碳减排优化;如果是以增加轮作次数和扩大投入规模(如化学品和能源再投资)为导向,粗放生产所带来的投入边际产出递减将引致碳减排恶化^[13-14]。

政策因素分析有助于对农业碳排放演进历程进行解释,更利于设置不同政策情景预测碳排放走势。国内外对于碳排放预测的研究结论丰富,无论是从变量设置、情景描述和达峰预测均趋于完善^[15-17],但农业部门碳排放预测以趋势演进为主^[18-19],预测方法通常借用各影响因素不同变化率的设定展开,未考虑是否与政策情景相匹配。在离散值及概率选择上均来自于经验判断,使得研究成果难以为减排决策提供行之有效的信息,并存在变量设置主观或预测结果偏差的可能^[20]。若借助合理预测方法和政策情景搭配,则可以较好弥补上述问题。

综上所述,本研究采用广义迪氏指数分解法(Generalized divisia index method, GDIM)考察1985—2017年中国农业碳排放演变的驱动因素,分析了农业政策直接减排效应以及间接效应,并在筛选驱动因素后对2018—2030年的农业碳总量进行预测,旨在为农业碳减排提供量化参考并为低碳政策的合理安排提供理论依据。

1 理论分析框架

本研究通过识别农业政策的技术进步、农产品价格调整和要素替代来构建政策支出对农业碳排放的理论框架。系统分析如下:

首先,农业低碳生产核心是低碳技术的采纳和推广,技术进步对于提高要素使用率、抑制农业碳排放增长有着直接的影响,但在政策推广的过程中,技术应用往往是缓慢的、不可持续的。一方面,政府先以低碳项目的形式在少部分经营主体内部进行技术示范,继而采用政策资金扶持等手段激励农户应用低碳生产技术,然而,农户难以成为现代农业技术变

① 引自农业农村部于2018年7月6日印发的《农业绿色发展技术导则(2018—2030年)》

革的主体^[21-22]，农业技术变革面临着耕地细碎化和家庭生产单位构成的零碎生产模式，加之农户自身缺乏创新意识，政策支持对农户能否产生长时间激励仍是未知。另一方面，尽管政府应该承担创新主体的责任，但不少研究认为农业政策带动技术创新的方式收效甚微，“撒胡椒面”不解决根本问题。通过财政支出项目中可以看出，农业科技费用一直占据较低比重（2008—2016 年均 3.3%），绿色低碳生产转变的程度远不能满足当前需求，此外，科技费用的主要目的在于重大科研创新，而改造传统农业需要一线生产设施投入和教育培训的跟进与支持，农户缺乏基层生产技术的引导与支持，农业生产“高能耗、高污染、低效率”的情况难以改观^[23-24]。

其次，农业政策可能间接影响农业碳排放总量。在产品市场，政府以不同手段调控农产品市场价格，通过价格机制稳定农户收益预期，实现农产品数量有效供给。但农产品价格利润空间有限，农户作为理性经济人难以获取预期利润，这无疑刺激生产者增加廉价的要素投入（农用物资和农业能源等消耗品，本研究统称为农业生产支出^①）来攫取超额利润。具体而言，农产品补贴、限价收购和粮食托市等激励政策强化了农户收益预期，也达成降低生产风险、确保粮食安全的政策初衷，但同时模糊了市场价格调节作用，在稳定低价的市场环境下，扭曲价格信号刺激农户“以量持价”心理，引致生产支出过量投

入^[10]。此外，改革开放以来，各地政府大打“土地财政”牌来缓解财政压力，加之水土流失、荒漠化等生态退化问题，农地面积不断遭到挤占。持续恶化的生产条件，造成农业效率亏损和高额碳排放产生。

最后，在要素市场，惠农政策通过财政手段调节农资价格，农户增加农资的购买和储备。农业生产的人力资本要素缺位、技术支持缺失，导致要素使用率低、使用结构扭曲，促使农用物资过度替代了其他要素投入。具体而言，我国改革开放前实行的赶超战略导致了要素市场不健全，滞后于产品市场发展的惯性持续至今。2004 年以来，农企、合作社等农资供给方享受水电、税收等优惠政策照顾，间接激活了要素市场供给，但农用物资无法弥补其他要素发挥的效用，合理比例的要素投入平衡被打破。以人力资本为例，后工业时代的农户倾向于“兼业化、副业化”，大量劳动力流出导致农业生产主体由妇孺老人构成，劳动者文化素质和身体素质均不利于胜任技术变革，农户倾向于提高农用物资使用来替代人力资本投入。如图 1 所示，除 2015 年外，物质与服务费用^②占据了投入成本最大比重，且在人工成本不断升高的情况下，有替代其作用的趋势。

综上所述，本研究以农业财政支出为立足点，依据政策功能进行作用路径讨论，考察各因素影响机理，最终落脚于农业碳排放（图 2）。

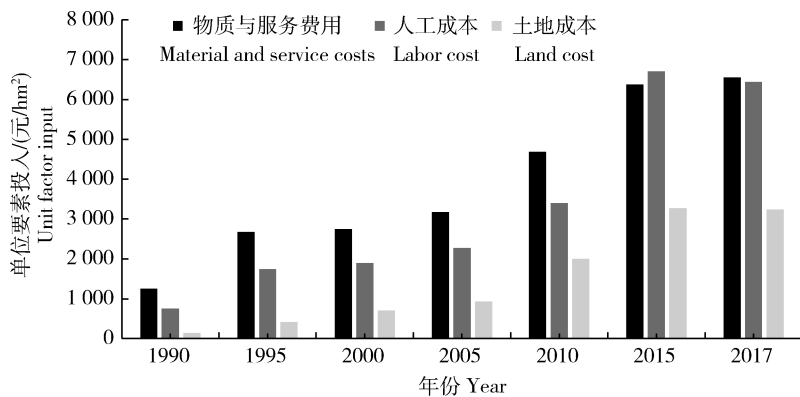


图 1 三种主要粮食生产支出情况

Fig. 1 Expenditure of three main grain production

① 部分资料命名为“农村居民家庭生产经营费用”、“农村居民生产费用支出”即包含土地、人工、服务与物质、期间等生产成本支出，本研究只考虑其中非投资类支出（即化肥、农药、用电等支出），为方便表达统称为农业生产支出。

② “物质与服务费用”还包含“工具材料费”、“技术服务费”等，因占比极小，可近似为农业生产支出。

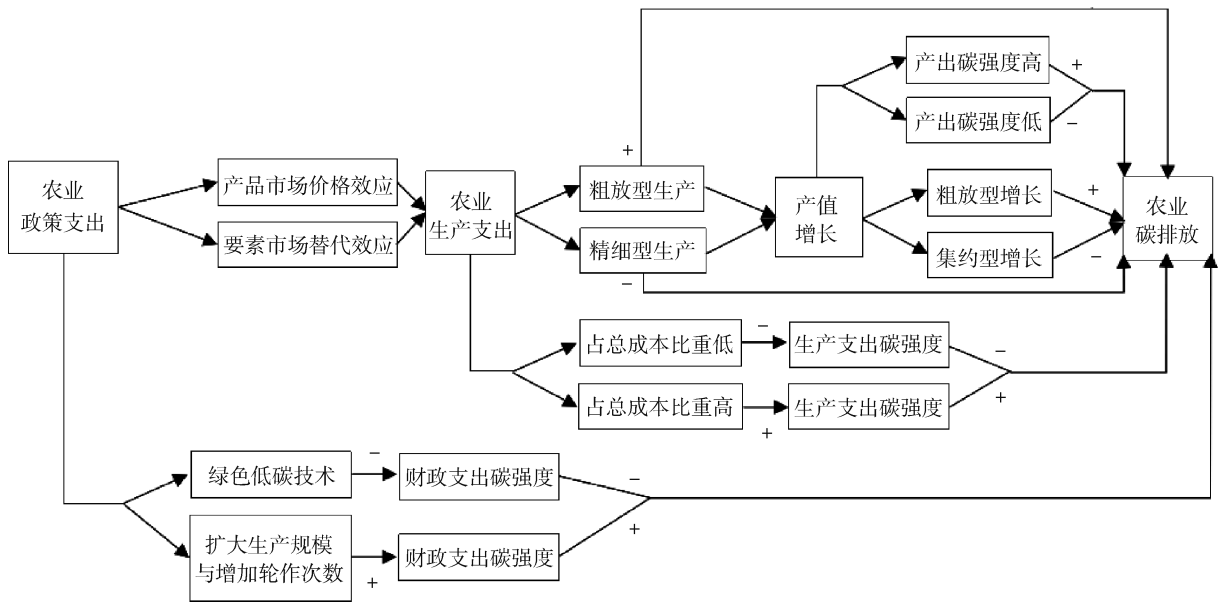


图2 农业财政支出与农业碳排放间的作用路径

Fig. 2 Path between agricultural fiscal expenditure and agricultural carbon emissions

2 研究方法 with 数据来源

2.1 模型设计

1) 农业碳排放核算。本研究使用 Intergovernmental panel on climate change-2006 (IPCC) 在测算农业碳排放过程中使用的全生命周期评价法 (LCA), 将 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 列为碳排放测度中主要排放温室气体。依据农户生产生命周期, 可以界定农业活动的碳足迹主要来自以下两方面: 一方面来自种养殖自然源、农地利用以及农业能源消耗所产生的直接排放; 另一方面来自农用物资生产和农产品运输等过程中的间接排放。本研究中引入两条路径作为 N_2O 间接排放源作为对碳排放核算的修正: 一是在农业活动中产生氨挥发和氮氧化物排放导致的大气沉降氮转化; 二是通过淋溶或径流汇入水源后发生硝化与反硝化作用^[25], 该路径会通过大气循环将含氮气体全部沉降回地面, 因而也参与碳排放计算。

在厘清农业生产活动全生命周期中的主要碳足迹后, 只需搜集相关排放系数即可进行碳排放的估算, 如表 1。具体计算碳排放计算模型如式(1), 式中 Z_{CO_2} 为农业碳排放量, D_{ai} 为第 i 类农资投入 ($i=1, 2, 3$), D_{ei} 为第 i 类农业能源投入 ($i=1, 2, \dots, 5$), S 为三大类粮食作物秸秆焚烧量, D_{Ni} 为氮肥施用量、大气沉降氮转化、淋溶/径流损失氮转化 ($i=1, 2, 3$), L_i 为不同品种牲畜饲养量 ($i=1, 2, \dots, 8$), R

为水稻种植面积; φ_{ci} 、 φ_{mi} 和 φ_{ni} 为不同排放源对应 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 的排放系数, GWP 为温室气体的增温潜室。

$$Z_{\text{CO}_2} = \sum (D_{ci} + D_{ei} + S) \times \varphi_{ci} + \sum [(D_{Ni} + L_i) \times \varphi_{ni} + (R + L_i + S) \times \varphi_{mi}] \times \text{GWP} \quad (1)$$

2) 广义迪氏指数分解法。为考察农业政策对于农业碳排放的影响路径, 并考虑对数平均迪氏分解法 (Logarithmic mean divisia index, LMDI) 的局限性, 本研究拟采用广义迪氏指数分解法 (GDIM)。运用于 LMDI 的碳排放路径分解一直是国内外学界效仿的范式, 但经实证研究表明, LMDI 中存在两个明显缺陷。以式(2)中碳排放 LMDI 分解为例。在此框架内人口规模 P 为绝对变量, 相对于其他变量的改变方式并不对等。式(2)中人口规模 P 呈现绝对量变动方式, 而能源 E 变化同时引起碳排放强度 (Z_{CO_2}/E) 和投入产出比 (E/GDP) 的变动, 在分析框架中碳排放强度 (Z_{CO_2}/E) 和投入产出比 (E/GDP) 实质上存在较强依赖性; 再者, LMDI 的逐级乘积关系, 可能导致部分变量难以用理论进行解释^[32-33]。针对 LMDI 方法的缺陷, Vaninsky^[34] 提出了一个新的指数分解框架, 即广义迪氏指数分解法 (GDIM), 克服了现有指数分解法的缺陷, 能够更加全面准确地量化不同因素对碳排放演变的实际贡献, 将政策下的异质性因素纳入同一框架予以考察, 且不会出现变量不对等计算。

表 1 农业生产活动排放源与排放系数

Table 1 Emission sources and emission coefficients of agricultural production activities

排放环节 Emission link	排放源 Emission source	排放系数 Emission factor	系数来源 Factor source
第一类 种养殖直接排放 The first category Direct emissions from breeding	水稻种植	CH ₄ :338 kg/hm ²	王效科等 ^[26]
	牲畜肠道发酵	CH ₄ :奶牛 61 kg/头,水牛 55 kg/头,黄牛 47 kg/头,马 18 kg/匹,驴和骡 8 kg/头,骆驼 46 kg/峰,猪 1 kg/头,山羊和绵羊 5 kg/只	IPCC 清单 ^[27]
第二类 农田土壤直接排放 The second category Farmland soil direct discharge	氮肥施用	N ₂ O:0.012 5 kg/kg	IPCC 清单 ^[27]
	大气沉降氮转化*	N ₂ O:旱地 0.165 0 kg/hm ² ,水旱轮作 0.223 0 kg/hm ² ,水田 0.064 0 kg/hm ²	IPCC 清单 ^[27]
	淋溶/径流损失氮转化	N ₂ O:0.075 0 kg/hm ²	IPCC 清单 ^[27]
第三类 减排固碳措施 The third category Carbon reduction and fixation measures	免耕固碳	CH ₄ :338 kg/hm ²	王效科等 ^[26]
	秸秆还田固碳	CO ₂ :1.390 40 kg/kg,CH ₄ :0.002 19 kg/kg	李飞跃等 ^[28]
第四类 农业能源直接排放 The fourth category Agricultural energy indirect emissions	农业用电消耗能源	CO ₂ :0.80 kg/kW·h	IPCC 清单 ^[27]
	农业化石类燃料消耗	CO ₂ :柴油 3.16 kg/kg,汽油 3.01 kg/kg,煤炭 2.01 kg/kg,焦炭 3.04 kg/kg	IPCC 清单 ^[27]
第五类 农用化学品间接排放 The fifth category Indirect emissions from agricultural chemicals	化肥生命周期隐含碳	CO ₂ :氮肥 3.39 kg/kg,磷肥 0.64 kg/kg,钾肥 0.18 kg/kg	陈舜等 ^[29]
	农药生命周期隐含碳	CO ₂ :18.10 kg/kg	李波等 ^[30]
	农膜生命周期隐含碳	CO ₂ :19.00 kg/kg	李波等 ^[30]
第六类 农业废弃物处理 The sixth category Agricultural waste treatment	秸秆燃烧**	CO ₂ :1.390 40 kg/kg, CH ₄ :0.002 19 kg/kg	李飞跃等 ^[28]
	牲畜粪便管理***	CH ₄ :奶牛 13 kg/头,水牛 2 kg/头,黄牛 1 kg/头,马 1.64 kg/匹,驴和骡 0.90 kg/头,骆驼 1.92 kg/峰,猪 3 kg/头,山羊 0.17 kg/只,绵羊 0.15 kg/只 N ₂ O:奶牛 1.00 kg/头,水牛 1.34 kg/头,黄牛 1.39 kg/头,马 1.39 kg/匹,驴和骡 1.39 kg/头,骆驼 1.39 kg/峰,猪 0.53 kg/头,山羊和绵羊 0.33 kg/只	IPCC 清单 ^[27]

注：* 大气沉降中的氨和氮氧化物挥发率默认 10% 和 20%，淋溶或径流氮流失率默认 30%；** 秸秆焚烧占秸秆总量比例在现有资料中相差很大，参考曹国良等^[31]估算方法约占总量 19%。由于 2008 年，国家发布《关于进一步加强秸秆禁烧工作的通知》后，各地焚烧火点明显减少，到 2016 年，秸秆焚烧量减少 85%。综合考虑，将增减率平均至 2008—2016 年；*** 在规模化养殖、放牧圈养、自家散养不同养殖模式下，将牲畜粪便排泄率进行加权平均。

Note: *, the default volatilization rates of ammonia and nitrogen oxides in atmospheric sedimentation are 10% and 20%, and the leaching or runoff nitrogen loss rate defaults to 30%; **, the ratio of straw burning to total straw is very different in the available data. Referring to Cao etc^[31]. it accounts for about 19% of the total. Because in 2008, after the State issued the "Notice on Further Strengthening the Work on Banning Straw Burning", the number of fire point incinerators in various places has decreased significantly. By 2016, the amount of straw burning decreased by 85%. Taken together, the reduction rate will be averaged to 2008—2016; ***, under different breeding modes of large-scale farming, grazing in captivity, and home-based free-range breeding, the excretion rate of livestock manure is weighted average.

$$Z_{CO_2} = (Z_{CO_2}/E) \times (E/GDP) \times (GDP/P) \times P \quad (2)$$

本研究依照 Vaninsky^[34]做法,构造如下关于未知数 X 的方程 $Z, Z(X)$ 中的 $X_i (i=1, 2, \dots, 8)$ 可以看做是时间 t 的连续可微函数式(3)和(4),通过对 X_i 取偏导再取不同时间段的定积分,可得其各因素贡献加总的形式,例如 t_0-t_1 内对 Z 变化的贡献率式(5),可将式(5)进行矩阵形势变化,改写为式(6):

$$Z = f(X) = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3)$$

$$X_i = X_i(t) \quad (4)$$

$$\Delta Z[X_i] = \int_L f'_i dX_i = \int_{t_0}^{t_1} f'_i X'_i dt \quad (5)$$

$$\Delta Z = \int_L \nabla Z^T dZ \quad (6)$$

在驱动因素选择方面,基于第一部分理论推导分析,我们先考虑纳入农业财政支出作为碳排放驱动因素。其次,财政支出对农业碳排放存在直接和间接的作用,如果财政支出更多被用于低碳项目或减排技术,集约生产所带来的效率改善会使碳减排优化,而如果是以增加轮作次数和扩大投入规模(如化学品和能源再投资)为导向,粗放生产所带来的投入边际产出递减将引致碳减排恶化。依据上述逻辑,农业生产总值与生产支出是说明农用化学品、农业能源等使用效率的最有力因素,且农业生产支出

$$\Phi_X = \begin{pmatrix} X_2 & X_1 & -X_4 & -X_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_2 & X_1 & 0 & 0 & -X_6 & -X_5 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -X_7 & 0 & -X_5 & 0 \\ -X_8 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_1 \end{pmatrix}^T \quad (10)$$

式(8)中:可以将农业碳排变化 ΔZ_{CO_2} 分解为 8 类因素变化之和包括: ΔY 为产出规模变化; ΔFE 为财政支出规模变化; ΔAE 为农业生产支出规模变化分别对碳排放变化的影响,上述 3 类变化称为绝对量因素的变化。 ΔYCI 为单位 GDP 碳强度对碳排放的影响; ΔFCI 为各类财政支出低碳程度对碳排放的影响; ΔACI 为各类非固定投资类农业生产费用低碳程度对碳排放的影响; ΔEFF 为单位农业生产支出对 GDP 贡献对碳排放的影响; ΔFI 为 GDP 增长依赖财政支出依赖程度对碳排放的影响,后续 5 类变化称为相对量因素的变化。

规模是衡量要素市场农业政策变化的核心变量,因此我们选择农业生产支出和农业生产总值作为另外两个驱动因素。

将农业总产出、财政政策支出、农业生产支出及农业碳排放等变量带入,令 $X_1=Y$ 为农业生产总值, $X_3=FE$ 为财政支出, $X_5=AE$ 为农业生产支出; $X_2=YCI=(Z_{CO_2}/Y)$ 为产出碳强度, $X_4=FCI=(Z_{CO_2}/FE)$ 为财政支出碳强度, $X_6=ACI=(Z_{CO_2}/AE)$ 为生产支出碳强度; $X_7=EFF=(Y/AE)$ 为生产支出效率, $X_8=FI=(FE/Y)$ 为财政支出强度。

$$\begin{aligned} Z_{CO_2} &= Y(Z_{CO_2}/Y) = FE(Z_{CO_2}/FE) = \\ &AE(Z_{CO_2}/AE) \\ EFF &= (Z_{CO_2}/AE)/(Z_{CO_2}/Y), \\ FI &= (Z_{CO_2}/Y)/(Z_{CO_2}/FE) \end{aligned} \quad (7)$$

由此可见,上述变量可以分解为 3 个绝对自变量和 5 个乘积后的相对自变量,通过 8 个自变量构建不同的单变数函数关系:

$$\begin{aligned} Z &= X_1 X_2, X_1 X_2 - X_3 X_4 = 0, X_1 X_2 - X_5 X_6 = 0, \\ X_1 - X_5 X_7 &= 0, X_3 - X_1 X_8 = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

依照设定的变量 X_i ,进行 $Z(X)$ 的矢量微分计算和雅可比矩阵 Φ_X 的构造,如下所示:

$$\nabla Z = (X_2 \quad X_1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T \quad (9)$$

2.2 数据来源

基于数据的最大可得性,我们选择 1985—2017 年中国农业各年数据作为研究样本,其中农业财政支出^①来自于《中国财政统计年鉴》^[35];农业总产值、作物种植面积、农业用电(以灌溉消耗量为准)、化肥、农药、农膜数据来自于《中国农村统计年鉴》^[36]、EPS 数据库;农业生产支出通过《全国农产品成本收益资料汇编》^[37]中各年份给出比例进行估算得出;柴油、汽油、煤炭和焦油等能源消耗数据来自于《中国能源统计年鉴》^[38];牲畜饲养量来自于《新中国 60 年农业统计资料》^[39]和《中国统计年鉴》^[40]。为保证各年度数据估算的可比性,将农业生产总值、

① 由于“财政用于农业支出”与“农林水支出”变更科目名称后规模相差不大,为寻求统一将两者统称为“农业财政支出”

农业财政支出均平减至 2000 年不变价格。

3 农业碳排放经验分解结果分析

本研究通过 R 语言进行农业碳排放的广义迪式指数分解,为清晰识别各驱动因素对农业碳排放的贡献率,以 1985 年为基期,将每年各驱动因素额贡献值累加计算。从图 3 可以看出,农业生产总值(Y)、农业财政支出(FE)和农业生产支出(AE)等三者均对农业碳排放增长呈显著的促进效应;产出碳强度(YCI)、财政支出碳强度(FCI)和农业生产支出碳强度(ACI)则对农业碳排放增长呈现抑制效应;农业生产支出效率(EFF)和财政支出效率(FI)对碳排放变化的影响有限。也就是说,农业生产碳排放的增长呈现出显著的“规模效应”,规模的扩张意味着更多的农资投入和能源消耗,而“强度效应”和“效率效应”抑制了碳排放增长,意味着更多绿色减排技术和更高效的农资使用方式被推广到农业生产中。

总的来看,2017 年的中国农业碳排放总量为 13.70 亿 t,相比 1985 年增长 72.03%。在 2009 年前,仅有两年的碳排放增量为负,其中,1996 年碳排放总量下降 0.28 亿 t。在各驱动因素中,产值规模、财政支出规模、生产支出规模和财政支出效率分别起到促进碳排放增长的效用,产值强度、财政支出强度、生产支出强度和农业生产支出效率起到促降效用。在促增因素中,财政支出规模显著促进农业碳排放增长,在 33 年间的总贡献率达到 39.28%。产值规模与生产支出规模的促增效应基本相同(29.65%与 30.79%),分别引致碳排放增长 1.69 亿 t 和 1.75 亿 t,说明两者的联动作用明显。在促降因素中,财政支出强度贡献率为 39.26%,产值强度与生产支出强度在 2012 年产生断点,生产支出强度的促降作用明显小于产值强度,说明单位生产支出的碳排放未起到与产值强度相当促降效果,呈现较低的利用率。

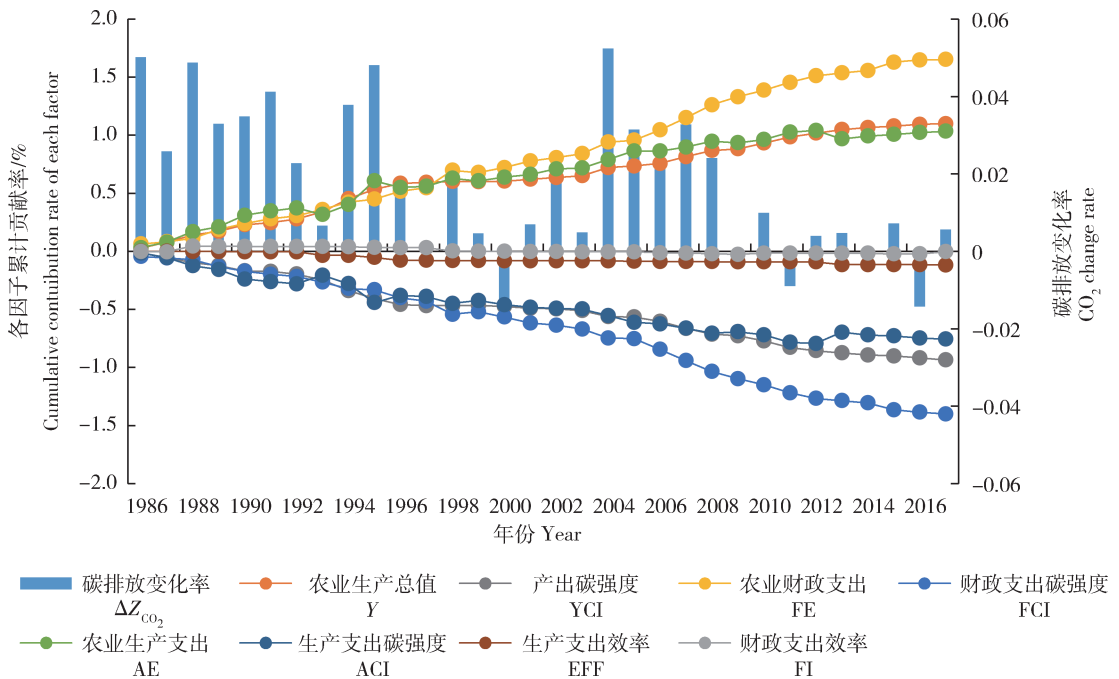


图 3 各驱动因子对农业碳排放变化的累计贡献

Fig. 3 Cumulative contribution of various driving factors to changes in agricultural carbon emissions

为方便对比不同时期驱动因素的贡献,本研究将碳排放变化划分为 4 个阶段(图 4)。该划分标准主要依据改革开放以来农业政策经历的 3 次方向性调整:1997 年前,农业政策主要为解放生产力进行家庭联产承包责任制改革;1998—2003 年,主要聚焦于对农业基础设施建设进行投资;2004 年至今,农业政策转向多予少取,有序疏解财政支出非增收

功能,粮食连续 12 年增产是政策决策前半段(2004—2015 年)中最具代表性的印证^[41]。通过观察碳排放变化率可知,农业碳排放总量与政策方向调整有着紧密联系,第一阶段在 1985—1998 年间,产出规模贡献与财政支出规模贡献率基本相同,这得益于 1978 年以来,全国改革最先从农村发起,家庭联产承包责任制的推行极大程度解放了农村的生

产力,而相应的统收统支体制变革为包干体制,例如小型农田水利设施包干给地方进行资金处置,消除了其准公共品的“拥挤效应”和过度使用的可能,提升了农业生产的效率,可以说该阶段政策对应的财政支出规模和产值规模有较好的联动效应,碳排放增长处于“财政支出—生产规模扩大—碳排放”的积累期。

第二阶段在1998—2003年间,产值规模的碳排放贡献率逐渐被财政支出规模超越,这归因于1997年爆发了亚洲金融危机和1998年的特大洪涝灾害,国家开始重新审视国民基础行业的重要性,在各部门采取积极财政政策加大基础设施建设力度,促使财政支出多被用于水利设施、公路、电网等方面,加之退耕还林、天然林保护项目等生态工程的实行,财政投入效果并未直接体现在农业产出规模上,年平均产出规模和碳排放变化率分别为6.65%和1.5%,结合图4可以看出第二阶段的产出规模(Y)与产出强度(YCI)对碳排放的影响均趋近于平衡,主要排放路径来自于“财政支出—生产支出增加—碳排放”,而主要减排影响来自于财政支出强度(FI),总的来说,我国农业碳排放量进入了增长平缓时期。

第三阶段在2004—2009年间,农业碳排放进入

另一个高速增长阶段,产出规模(Y)的碳排放贡献率低于生产支出规模(AE),若除去产出强度(YCI)和生产支出强度(ACI)的减排效应,两者的净增长效应分别占总效应的16.5%和33.6%,也就是说农业政策强化了农户利用农用物资支出进行农业增产的方式,“财政支出增加—生产支出增加—碳排放”的增长模式得到进一步印证。

第四阶段在2010—2017年,在此期间农业产值规模仍呈现正向增长,但随着绿色发展、“两型社会”等政策提升至国家发展战略,全国农业碳排放总量年平均降低0.37%。产出强度(YCI)、财政支出强度(FCI)和农业支出强度(ACI)促降效应有所提升,有效缓解了碳排放量的持续增长。特别的,2009年第一次出现碳排放零增长后,之后连续9年碳排放变化率呈现上下波动的特征,通过图3进一步观察可知,除2012—2013年增长率基本持平外,碳排放总量呈现增减不断变化趋势,这可以解释为在节能减排政策和绿色低碳技术推广过程中,落地实施环节存在“一紧一松”的现象,地方政府未将低碳效率提升视为发展转型的常量,导致了规制强度随着任务命令不同出现上下波动。

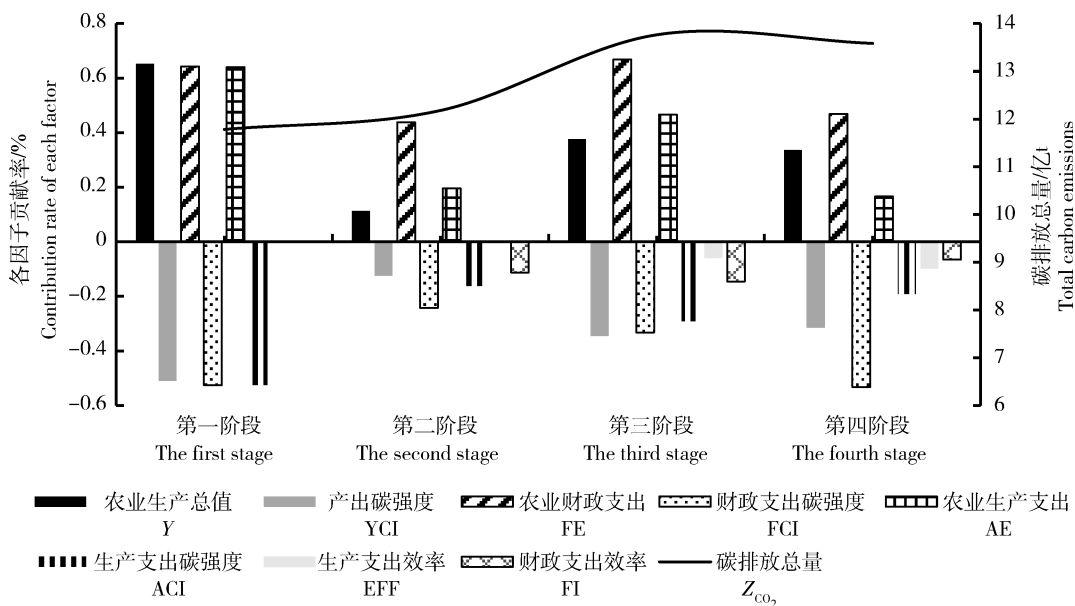


图4 政策不同阶段各驱动因素分解结果

Fig. 4 Decomposition results of various driving factors at different stages of policy

4 动态情景设置和蒙特卡洛模拟

4.1 动态情景设置

通过上述分析可知,中国农业碳排放的促增因

素主要集中在财政支出、农业产值和农业生产支出三类因素中。由此可以得到以下3个情景设置思路:第一,农业财政支出在3个促增因素中贡献率最大,因此农业财政支出应被纳入到政策情景中;第

二,农业生产支出冗余是导致碳排放量增加的主要原因,农业生产支出过度投入造成农资、能源等利用率低下,可以说农业生产支出碳强度的演变趋势与减排空间大小密切相关,因此也应被纳入政策情景;第三,农业支出效率和财政支出强度在不同时期起到了一定的促降效果,在农业产出规模扩大时期,农业支出效率和财政支出强度分别是体现有效农业生产支出和农业财政支出的关键,具有显著的减排潜力。综上,本研究选取农业财政支出(FE)、农业生产支出碳强度(ACI)、农业支出效率(EFF)和财政支出强度(FI)等4个变量为基础来设定动态情景,令4个变量变化率分别表示为 α 、 β 、 γ 、 δ ,下一期的碳排放变化率可以表示为:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{CO_2,t+1} &= FE_t(1+\alpha) \times ACI_t(1+\beta) \times \\ &EFF_t(1+\gamma) \times FI_t(1+\delta) = \\ &FE_{t+1} \times ACI_{t+1} \times EFF_{t+1} \times FI_{t+1} \end{aligned} \quad (11)$$

碳排放变化率可以表示为:

$$\Delta Z_{CO_2,t+1} = (1+\alpha) \times (1+\beta) \times (1+\gamma) \times (1+\delta) \quad (12)$$

在选取合适驱动因素的基础上,蒙特卡洛模拟通过以随机序列的反复采样为手段,探究不同变量在给定区间内取得特征样本的概率分布,并识别出符合逻辑推演基础的演化路径。现有研究已表明经济因素的变化通常具有较为明显的路径依赖特征,而在中国过去的发展轨迹中,通常时间越近的阶段对未来的影响越大,反之,越远的阶段对未来影响越小^[42]。由于第一阶段和第二阶段本距今年份较长,本研究选择第三阶段和第四阶段为2个基准期,并在实证数据基础上进行3个政策情景的划分:高速增长情景、政策规制情景和绿色低碳情景。

1)高速增长情景。高速增长情景对应第三阶段(2004—2010年),多予少取、全面减负政策的时期,该时期内历年的中央一号文件都与“三农问题”紧密相关,国家在制定政策的过程中持续明确以提高农民收入为核心,辅以农业财政支出绝对规模的高速增长。

结合蒙特卡洛模拟的需要^①,尝试进行不同驱动因素的变化率设定。首先,选取2018年作为模拟

的起始年份,根据《中国住户调查主要数据—2019》^[43]可得,2018年农业生产支出增长速度为8.9%,价格平减后实际增长速度是9.9%,农业增加值实际增长速度是3.5%,计算得出农业支出效率(EFF)为-5.8%。进一步的,由农业财政支出(FE)比上年实际增长9.9%(财政部新闻办公室,2019),可以推算出财政支出强度(FI)为6.2%。最后,根据不同环节的农业生产核算可得^②,2018年农业碳排放增加值为0.9%,继而算出农业生产支出碳强度(ACI)为-8.2%。在确定起始年份驱动因素变化率后,依据第三阶段(2004—2010年)年均变化率设定2018—2030年潜在变化率的中间值,而最大值和最小值分别选取上述7年中各驱动因素出现的最大值和最小值,各驱动因素潜在变化率的设定如表2所示。

2)政策规制情景。政策规制情景对应了多予少取、全面减负政策时期(2011—2017年),该时期我国工作重点仍在农民增收,但考虑到资源环境承载能力,自2010年起国家开始逐步完善农业政策转移支付子项目。例如对部分农耕示范区进行耕地轮作休耕、重点生态功能区进行生态补奖,目的是为减少粗放生产、缓解环境压力。总的来说,政府加强了对农业粗放型生产的干预,通过补偿和规制等手段强化了农业低碳生产,农业增加值进入平稳中低速增长阶段。本研究对照第四阶段各因素增长率变化,设置政策规制情景。具体变化率设定如表3所示。

3)绿色低碳情景。绿色低碳情景是指在政策规制的基础上,有效提高农资利用率、实现农业低碳生产,尤其是做到节能减排技术的突破。结合Chen^[45]在对低碳情景中经济增速的研究,该情景设定财政支出不变的前提下,农业生产支出碳强度(ACI)相较政策规制情景降低1%,得到其潜在年均变化率分别为-8.3%(2018—2020年)、-7.6%(2021—2025年)和-6.9%(2026—2030年),在此基础上分别向上和向下调整1%得到其潜在变化率的最大值和最小值^[33]。具体变化设定如表4所示。

① 蒙特卡洛是基准变量的在取值区间内进行的随机取值和组合后,计算目标变量的一种方法。必须对驱动因素(即蒙特卡洛模拟中的基准变量)的取值范围进行估计后,才能符合蒙特卡洛“区间分布式”模拟的要求。

② 2018年碳排放数据来源分别为全国各类作物种植面积,猪、羊、牛等牲畜存栏量,新增灌溉面积由《2018年国民经济和社会发展统计公报》获得;农业生产能源消耗等数据由《中国住户调查主要数据-2019》^[43]获得;化肥、农药等农资施用量由国家统计局相关数据获得。

表2 高速增长情景下驱动因素变化率设定

变量 Variables	2018—2020年				2021—2025年				2026—2030年			
	最小值 Minimum	平均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	最大值 Maximum
财政支出 FE	1.14	5.81	9.02	1.02	5.19	8.06	0.91	4.60	7.15			
生产支出碳强度 ACI	-3.98	-1.80	0.93	-3.55	-1.61	0.83	-3.15	-1.43	0.74			
生产支出效率 EFF	-3.71	-0.40	1.98	-3.32	-0.36	1.77	-2.94	-0.32	1.57			
财政支出强度 FI	-6.64	-1.17	5.02	-5.57	-1.04	4.49	-3.50	-0.11	2.38			

表3 低碳转型情景下驱动因素变化率设定

变量 Variables	2018—2020年				2021—2025年				2026—2030年			
	最小值 Minimum	平均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	最大值 Maximum
财政支出 FE	8.608	16.7	30.19	7.59	14.6	26.40	6.5	12.5	22.6			
生产支出碳强度 ACI	-29.93	-7.3	6.01	-26.16	-6.6	5.26	-22.4	-5.9	4.5			
生产支出效率 EFF	-17.50	-3.2	10.69	-15.30	-3.2	9.34	-13.1	-2.6	8.0			
财政支出强度 FI	-18.84	-3.6	9.62	-16.47	-3.4	8.41	-14.1	-3.1	7.2			

表 4 绿色低碳情景下驱动因素变化率设定
 Table 4 Setting of change rate of driving factors under green and low-carbon scenarios

变量 Variables	2018—2020 年			2021—2025 年			2026—2030 年			%
	最小值 Minimum	平均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	最大值 Maximum	
财政支出 FE	8.68	16.7	30.19	7.59	14.6	26.40	6.5	12.5	22.6	
生产支出碳强度 ACI	-30.93	-8.3	5.01	-27.16	-7.6	4.26	-23.4	-6.9	3.5	
生产支出效率 EFF	-17.50	-3.2	10.69	-15.30	-3.2	9.34	-13.1	-2.6	8.0	
财政支出强度 FI	-18.84	-3.6	9.62	-16.47	-3.4	8.41	-14.1	-3.1	7.2	

在上述三类情景的设置下,每个情景包含了四类变量,一般而言,依据每个变量的均值、标准差与相关系数矩阵,就可以得到多维联合正态分布。在概率矩阵未知时,可将相关系数矩阵 ρ 进行 Cholesky 分解,即 $\rho = LL^T$ 。将分解得到的矩阵乘以向量 Y ,即为所要求的多维正态分布随即向量。基于以上操作,本研究使用 stata 15.0 针对三类情景中的变量进行 10 万次模拟,结果以每两年的碳排放总量的概率密度值呈现。

4.2 蒙特卡洛模拟结果

通过对不同情景模拟显示,高速发展情景的农业碳排放量未达到峰值,且碳排放持续增长速度较快,由初始期 2017 年 13.62 亿 t,增长至 2030 年总

量概率值高于 22 亿 t。依据初始设定的农业总产值增长率,2018—2030 年农业碳排放强度相较 2017 年不降反升,增长了 4.1 个百分点。该增长模式可以归结为依靠资源禀赋的粗放型生产方式,在农业部门势必不会取得可持续性的高额回报,并且极大削弱了环境承载力,威胁着农业的高质量发展。在国务院发展研究中心印发的《绿色发展的源起与内涵》^[44]中强调了“绿色发展主要特征是要提高生产效率、市场效率、资源利用率,即实现效率最大化发展。”同时指出现代农业发展应“加速传统农业向现代农业转型。加快农业科技进步、调整农业生产结构、转变农业增长方式,提高农业综合生产能力。”可以预见的是,转变农业政策指向是达到减排目标的关键。

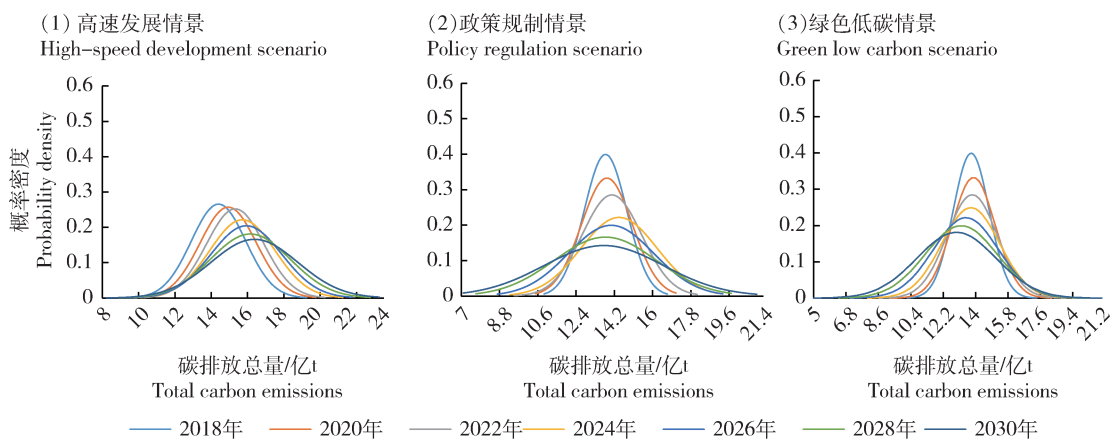


图5 三类政策情景下不同年份的碳排放总量概率密度演化

Fig. 5 Probability density evolution of total carbon emissions in different years under three types of policy scenarios

2018年7月,国家农业农村部印发了《农业绿色发展技术导则(2018—2030年)》,提出在绿色发展制度与低碳模式基本建立的基础上单位农业增加值温室气体排放强度降低30%以上,相比国家自主贡献目标(碳排放强度下降40%~45%)更为合理。结合Chen^[45]对强化低碳情景中经济增速的研究,在预设经济增速下,每个时期的年均碳排放增长率分别控制在2.8%(2018—2020年)、2.45%(2021—2025年)、2.1%(2026—2030年)以内,即农业碳排放总量低于15.36亿t可达到强度降低30%的标准。

进一步分析可知,政策规制情景在2024—2026年前后的农业碳排放总量已出现峰值,峰值预期达到14.6亿~15亿t,之后2026—2030年碳排放增

长率呈现下降趋势,在2030年稳定在13.4亿~13.8亿t,对比高速增长情景减少了9亿t左右的碳排放总量。根据农业部门的减排目标要求,可以看出在政策规制情景下,农业碳排放可以较早达到减排标准。在绿色低碳情景下(图5),全国农业部门碳排放峰值在2020—2022年达到,相比政策规制情景提前了5年左右,在2030年稳定在12.8亿t左右。可以看出,尽管减排的上行空间只有1亿t左右,但农业低碳生产转变方式加快,碳排放峰值在2030年前始终不会触及15.36亿t的红线。此外,依据国外实践经验^[46],绿色低碳情景假设条件下有较好实现农业生产与碳排放的脱钩的可能,并且可以最大程度上杜绝政策规制“一年紧一年松”的现象,确保了农业减排目标如期甚至提前实现。

5 结论与启示

5.1 研究结论

本研究基于GDIM对1985—2017年农业碳排放进行了因素分解,并依据不同因素的贡献程度设置动态情景对2018—2030年间不同情景下的碳排放进行预测,得到如下结论:1)财政支出规模是引致碳排放增长的首要因素,促增贡献达到39.28%,而财政支出强度与产出强度为促降贡献的关键因素,促降贡献分别达到39.26%、29.39%;2)从时间阶段来看,1985—2017年的碳排放总量变化可以分为4个政策阶段,前三阶段碳排放增长表现为由“产值规模效应带动”到“生产支出效应带动”,第四阶段碳排放量呈现“政策规制效应”下的年际间交替增减变化态势;3)在动态情景预测中,高速发展情景的碳排放量未达到峰值,政策规制情景和绿色低碳情景分别在2025和2020年前后达到峰值,并始终低于15.36亿t的碳排放红线,高速发展情景和绿色低碳情景在2030年的碳排放总量相差近10亿t。

5.2 政策启示

基于上述结论,本研究得到了以下启示:

1)优化农业生产投入结构、提高农资消耗品使用率是促进低碳生产的长久之计。农业在各生产部门中不是排放大户,但根据论证,农业部门具备较强的减排潜力。为此,更应挖掘各方面的农业生产低碳化渠道。一方面通过种养加模式和沼气等技术的推广,降低农业生产对于化学肥料的依赖,增加生产要素使用率;另一方面通过秸秆还田、秸秆能源化有效抑制废弃物处理等环节的粗放生产行为。惟此,才能在根源上实现农业绿色低碳生产的转型。

2)直接影响低碳农业生产的政策中,国家应注重“萝卜”与“大棒”的有机结合。不仅要给予低碳生产税费减免、项目投资和补贴等措施,更要对地力损坏、面源污染等问题采取相应的处罚措施,对不同程度的损害行为提供法律层面的惩治依据。同时,针对政策实施“一年紧一年松”现象,应将低碳生产项目纳入干部绩效考核体系,严格监控管理执行力度和政策资金处置,避免“筛子现象”和“虚投现象”的发生。

3)间接影响低碳农业生产的政策中,政府应借助市场作用激励农户开展绿色低碳生产。如果延续当前政策及实施力度,农业碳排放量在2025年达到峰值仍存在不小困难,而单纯依赖限价补贴手段可

能导致“以量持价”、要素投入失衡的负面影响,因此,政府借助市场进行适当的政策干预将是促进农业产业转型的现实之选。例如,以农作物收入保险逐步替代价格支持政策可以弱化农户以量持价的心理,稳定农户长期的收益预期,解决价格扭曲效应;再如,增加农产品低碳标签制度,形成绿色低碳生产与财政资金奖励的闭环,避免出现“撒胡椒面”式的补偿机制。

参考文献 References

- [1] 厉以宁. 中国的环境与可持续发展[M]. 北京:经济科学出版社, 2004
Li Y N. *China's Environment and Sustainable Development* [M]. Beijing: Economic Science Press, 2004 (in Chinese)
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. London: Cambridge University Press, 2014
- [3] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017
Department of Rural Social Economic Investigation, National Bureau of Statistics. *China Rural Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2017 (in Chinese)
- [4] 李燕凌, 欧阳万福. 县乡政府财政支农支出效率的实证分析[J]. 经济研究, 2011(10): 110-122
Li Y L, Ouyang W F. An empirical analysis of the efficiency of county and township governments' financial support for agriculture[J]. *Economic Research*, 2011(10): 110-122 (in Chinese)
- [5] 彭希哲, 朱勤. 我国人口态势与消费模式对碳排放的影响分析[J]. 人口研究, 2010, 34(1): 48-58
Peng X Z, Zhu Q. Analysis of the impact of population situation and consumption pattern on carbon emission in China [J]. *Population Research*, 2010, 34(1): 48-58 (in Chinese)
- [6] 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
Zhang G S, Wang S S. Structure, efficiency and decision mechanism of China's agricultural carbon emissions [J]. *Agriculture Economics Issues*, 2014, 35(7): 18-26, 110 (in Chinese)
- [7] 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
Hu C, Wei Y Y, Hu W. Research on the relationship between agricultural policy, technological innovation and agricultural carbon emission [J]. *Agricultural Economic Issues*, 2018(9): 66-75 (in Chinese)
- [8] Acemoglu D, Ghion P, Bursztyn L, Hemous, D. The

- environment and directed technical change[J]. *Nber Working Paper*, 2009, No. 15451
- [9] 马大来. 中国农业能源碳排放效率的空间异质性及其影响因素: 基于空间面板数据模型的实证研究[J]. *资源开发与市场*, 2018, 34(12): 1693-1700, 1765
- Ma D L. Spatial heterogeneity of China's agricultural energy carbon emission efficiency and its influencing factors: An empirical study based on spatial panel data model[J]. *Resource Development & Market*, 2018, 34(12): 1693-1700, 1765 (in Chinese)
- [10] 王朝明, 张海浪, 路梦瑶. 农业供给侧结构性改革中价格与财政效应[J]. *河北经贸大学学报*, 2017, 38(3): 30-40
- Wang C M, Zhang H L, Lu M Y. The price and financial effect in the structural reform of agricultural supply side[J]. *Journal of Hebei University of Economics and Business*, 2017, 38(3): 30-40 (in Chinese)
- [11] 赵爽, 陈儒, 姜志德. 低碳试点政策对农业碳排放影响的实证研究: 基于双重差分模型的检验[J]. *生态经济*, 2018, 34(12): 22-28
- Zhao S, Chen R, Jiang Z D. An empirical study on the impact of low carbon pilot policy on agricultural carbon emissions: Based on the test of double difference model[J]. *Ecology and Economy*, 2018, 34(12): 22-28 (in Chinese)
- [12] 吴贤荣, 张俊飏, 田云, 李鹏. 中国省域农业碳排放: 测算、效率变动及影响因素研究: 基于 DEA-Malmquist 指数分解方法与 Tobit 模型运用[J]. *资源科学*, 2014, 36(1): 129-138
- Wu X R, Zhang J B, Tian Y, Li P. Research on agricultural carbon emissions in China's provinces: Estimation, efficiency changes and influencing factors: Based on DEA-Malmquist index decomposition method and Tobit model application[J]. *Resources Science*, 2014, 36(1): 129-138 (in Chinese)
- [13] 刘世锦, 张永生, 宣晓伟. 国内温室气体减排: 基本框架设计[J]. *管理世界*, 2011(10): 1-9
- Liu S J, Zhang Y S, Xuan X W. Domestic greenhouse gas emission reduction: basic framework design[J]. *Management World*, 2011(10): 1-9 (in Chinese)
- [14] 展进涛, 徐钰娇, 葛继红. 考虑碳排放成本的中国农业绿色生产率变化[J]. *资源科学*, 2019, 41(5): 884-896
- Zhan J T, Xu Y J, Ge J H. Changes in China's agricultural green productivity considering the cost of carbon emissions[J]. *Resources Science*, 2019, 41(5): 884-896 (in Chinese)
- [15] 莫建雷, 段宏波, 范英, 汪寿阳. 《巴黎协定》中我国能源和气候政策目标: 综合评估与政策选择[J]. *经济研究*, 2018, 53(9): 168-181
- Mo J L, Duan H B, Fan Y, Wang S Y. China's energy and climate policy objectives in the Paris Agreement: comprehensive evaluation and policy selection [J]. *Economic Research*, 2018, 53(9): 168-181 (in Chinese)
- [16] Green F, Stern N. China's changing economy: Implications for its carbon dioxide emissions[J]. *Climate Policy*, 2017, 17(4): 20
- [17] 何建坤. 我国能源发展与应对气候变化的形势与对策[J]. *经济纵横*, 2014(5): 16-20
- He J K. The situation and countermeasures of China's energy development and climate change[J]. *Economic Aspects*, 2014(5): 16-20 (in Chinese)
- [18] 王兴, 马守田, 濮超, 赵鑫, 王钰乔, 张海林. 西南地区农业碳排放趋势及影响因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(S2): 231-234
- Wang X, Ma S T, Pu C, Zhao X, Wang Y Q, Zhang H L. Study on the trends and influencing factors of agricultural carbon emission in Southwest China[J]. *China Population · Resources and Environment*, 2017, 27(S2): 231-234 (in Chinese)
- [19] 田云, 张俊飏, 尹朝静, 吴贤荣. 中国农业碳排放分布动态与趋势演进: 基于 31 个省(市、区)2002—2011 年的面板数据分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(7): 91-98
- Tian Y, Zhang J B, Yin C J, Wu X R. The dynamics and trends of agricultural carbon emissions distribution in China: Based on panel data analysis of 31 provinces (cities, autonomous regions) from 2002 to 2011[J]. *China Population · Resources and Environment*, 2014, 24(7): 91-98 (in Chinese)
- [20] 董锋, 杨庆亮, 龙如银, 程钰博. 中国碳排放分解与动态模拟[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(4): 1-8
- Dong F, Yang Q L, Long R Y, Cheng S B. Decomposition and dynamic simulation of carbon emissions in China[J]. *China Population · Resources and Environment*, 2015, 25(4): 1-8 (in Chinese)
- [21] 林毅夫. 自生能力、经济发展与转型[M]. 北京: 北京大学出版社, 2004
- Lin Y F. *Viability, Economic Development and Transformation* [M]. Beijing: Peking University Press, 2004 (in Chinese)
- [22] 罗必良, 李尚蒲. 论农业经营制度变革及拓展方向[J]. *农业技术经济*, 2018(1): 4-16
- Luo B L, Li S P. On the reform and expansion of agricultural management system [J]. *Agricultural Technology and Economy*, 2018(1): 4-16 (in Chinese)
- [23] 鲁钊阳. 省域视角下农业科技对农业碳排放的影响研究[J]. *科学学研究*, 2013, 31(5): 674-683
- Lu Z Y. Study on the impact of agricultural science and technology progress on agricultural carbon emissions from the perspective of provinces[J]. *Science Research*, 2013, 31(5): 674-683 (in Chinese)
- [24] 穆月英. 中国农业补贴政策的理论及实证分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008
- Mu Y Y. *Theoretical and Empirical Analysis of China's Agricultural Subsidy Policy* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2008 (in Chinese)
- [25] 程豪. 碳排放怎么算: 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南[J]. *中国统计*, 2014(11): 28-30
- Cheng H. How to calculate carbon emissions: 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[J]. *China*

- Statistics, 2014(11): 28-30 (in Chinese)
- [26] 王效科, 李长生, 欧阳志云. 温室气体排放与中国粮食生产[J]. 生态环境, 2003(4): 379-383
Wang X K, Li C S, Ouyang Z Y. Greenhouse gas emissions and China's grain production[J]. *Ecological Environment*, 2003(4): 379-383 (in Chinese)
- [27] IPCC. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4: Agriculture, Forestry and other Land Use*[M]. Geneva: IPCC, 2006
- [28] 李飞跃, 汪建飞. 中国粮食作物秸秆焚烧排碳量及转化生物炭固碳量的估算[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 1-7
Li F Y, Wang J F. Estimation of carbon emissions from incineration of China's grain crops and carbon sequestration from converted biochar [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2013, 29(14): 1-7 (in Chinese)
- [29] 陈舜, 逯非, 王效科. 中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6371-6383
Chen S, Lu F, Wang X K. Estimation of greenhouse gas emission coefficients made by Chinese NPK fertilizers[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19): 6371-6383 (in Chinese)
- [30] 李波, 张俊飏, 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
Li B, Zhang J B, Li H P. Spatio-temporal characteristics of agricultural carbon emissions in China and decomposition of influencing factors [J]. *China Population · Resources and Environment*, 2011, 21(8): 80-86 (in Chinese)
- [31] 曹国良, 张小曳, 郑方成, 王亚强. 中国大陆秸秆露天焚烧的量的估算[J]. 资源科学, 2006(1): 9-13
Cao G L, Zhang X Y, Zheng F C, Wang Y Q. Estimation of the amount of straw incinerated in mainland China [J]. *Resources Science*, 2006(1): 9-13 (in Chinese)
- [32] Minx J C, Baiocchi G, Peters G P, Weber C L, Guan D, Hubacek K. A "carbonizing dragon": China's fast growing CO₂ emissions revisited [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(21): 9144-53
- [33] Guan D, Hubacek K, Weber C L, Peters G P, Reiner D M. The drivers of Chinese CO₂ emissions from 1980 to 2030[J]. *Global Environmental Change*, 2008, 18(4): 626-634
- [34] Vaninsky A. Factorial decomposition of CO₂ emissions: A generalized division index approach [J]. *Energy Economics*, 2014(45): 389-400
- [35] 中国财政年鉴编辑委员会. 中国财政年鉴, 2018[M]. 北京: 中国财政杂志社, 2018
Editorial Committee of China Finance Yearbook. *China Finance Yearbook, 2018*[M]. Beijing: China Finance Magazine, 2018 (in Chinese)
- [36] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴, 1985—2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 1985—2017
Department of Rural Social and Economic Survey. *National Bureau of Statistics. China Rural Statistical Yearbook, 1985—2017*[M]. Beijing: China Statistics Press, 1985—2017
- [37] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编, 1985—2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 1985—2017
Price Department of National Development and Reform Commission. *National Agricultural Product Cost-Benefit Compilation, 1985—2017* [M]. Beijing: China Statistics Press, 1985—2017
- [38] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴, 1985—2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 1985—2017
Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. *China Energy Statistics Yearbook, 1985—2017* [M]. Beijing: China Statistics Press, 1985—2017
- [39] 中华人民共和国农业部. 新中国农业 60 年统计资料, 2009[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. *Statistics of Agriculture in New China for 60 Years, 2009* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2009 (in Chinese)
- [40] 国家统计局. 中国统计年鉴, 2009—2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009—2017
National Bureau of Statistics. *China Statistical Yearbook, 2009—2017*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2009—2017 (in Chinese)
- [41] 欧阳斌. 财政农业支出研究[D]. 北京: 中国财政科学研究院, 2018
Ouyang Q B. Research on fiscal agricultural expenditure[D]. Beijing: Chinese Academy of Financial Sciences, 2018 (in Chinese)
- [42] 郑石明. 政治周期、五年规划与环境污染: 以工业二氧化硫排放为例[J]. 政治学研究, 2016(2): 80-94, 127-128
Zheng S M. Political cycle, five-year plan and environmental pollution: Taking industrial sulfur dioxide emission as an example[J]. *Research in Political Science*, 2016(2): 80-94, 127-128 (in Chinese)
- [43] 国家统计局住户调查办公室. 中国住户调查主要数据, 2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019
Household Survey Office of National Bureau of Statistics. *Main Data of Household Survey in China, 2018* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019 (in Chinese)
- [44] 国务院发展研究中心. 绿色发展的源起与内涵[N]. 中国经济时报, 2016-05-20(4)
Development Research Center of the State Council. The origin and connotation of green development [N]. *China Economic Times*, 2016-05-20(4) (in Chinese)
- [45] Chen L, Yang Z, Chen B. Scenario analysis and path selection of low-carbon transformation in China based on a modified IPAT model[J]. *Plos One*, 2013, 8(10): 677-699
- [46] Guan D, Hubacek K, Weber C L, Peters G P, Reiner D M. The drivers of Chinese CO₂ emissions from 1980 to 2030[J]. *Global Environmental Change*, 2008, 18(4): 626-634