

农业技术进步对农业能源使用与碳排放的影响^{*}

——基于 *GTAP-E* 模型分析

魏 玮 (中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101)

文长存 (浙江省农业科学院农村发展研究所 杭州 310021)

崔 琦 解 伟 (北京大学中国农业政策研究中心 北京 100871)

内容提要 受劳动力成本上升、水土资源制约,未来农业生产增长将依赖集约化、规模化、机械化经营,由此将带来农业能源使用与碳排放量的快速增长。技术进步被认为是减少农业碳排放量的重要途径。本研究利用能源-经济 CGE 模型(*GTAP-E* 模型)构建 2012—2030 年中国经济增长的情景方案,模拟未来农业生产增长趋势,分析农业技术进步对农业能源使用与碳排放的影响。研究结果,随着农业生产的增长,2012—2030 年农业部门对能源产品消耗的增长速度远高于同期产出增长率,同期农业碳排放增长超过 120%。尽管影响机理存在差异,农业全要素技术进步和能源增进型技术进步在控制农业能源增长、减缓碳排放均起到了重要作用。

关键词 农业生产预测 技术进步 能源使用 碳排放

DOI:10.13246/j.cnki.jae.20180116.002

一、引 言

气候变化是当今人类社会普遍关注的全球性问题,有效地控制农业碳排放增长将为气候变化减缓与适应做出巨大贡献。根据 IPCC 的估计,农业生产已经成为全球温室气体排放的第二大来源,仅次于电热生产(IPCC 2006)。改革开放以来,以机械化、规模化等为特征的农业现代化过程,极大的提高了农业生产效率,但伴随而来的是农业能源使用的快速增长。随收入进一步增长与城市化进程的推进,中国城乡居民食物消费结构将转型升级,这意味着未来农业生产需保持一定的增长速度。在努力实现 2030 年碳排放峰值目标的背景下,如何减少农业部门的碳排放成为学术界和政府关注的热点问题。有研究表明,中国农业活动所导致的温室气体排放约占全国碳排放总量的 17%(董红敏等, 2008)。1978—2008 年,农业直接碳排放增加了近 3 倍,间接碳排放增加了近 4 倍(Zhang, 2010、2014)。

在影响农业碳排放强度的诸多因素中,技术进步不仅是提高能源效率、减少碳排放的主要途径,也是实现农业可持续发展、保障国家粮食安全的重要驱动力。农业部门的技术进步有助于优化资源配置,突破资源环境约束,提高农业生产效率(陈锡文, 2010)。有研究显示,改革开放以来,农业的

^{*} 项目来源:中国博士后科学基金面上项目(编号:2017M610710),国家重点研发计划项目(编号:2016YFA0602604)和国家自然科学基金项目(编号:71503243)

TFP 增长率基本上保持年均 3% 左右的速度增长,而增长的主要源泉是农业技术进步(Huang 等, 1996;王东阳 2007;李谷成等 2010)。我国农业科技进步在农业增长中的贡献率在最近几年已经超过了 50%(李家洋,2016)。国家“十三五”规划指出,力争到 2020 年使农业科技进步贡献率达到 60%。受资源约束和生产成本上升等影响,保障国家粮食安全及其他主要农产品的供给能力,农业科技是进步是关键。

尽管农业生产增长将不可避免地产生增排效应,但技术进步能显著降低能源强度、减缓碳排放增长。目前研究大多集中在工业部门的能源使用与碳排放上,他们发现技术进步对碳排放的影响是多方面的。一方面,通过提高能源要素的利用效率,有效降低二氧化碳排放的排放强度;另一方面,技术进步通过学习效应显著降低碳减排的成本,增加了碳减排的社会收益,抑制碳排放增长(Gerlagh, 2007)。技术进步对碳排放的影响不仅体现在减排技术的应用上,而且体现在经济运行的每个环节中,如运输物流、生产组织、制度设计、运营管理等(张兵兵等 2014)。技术进步将有效减少农业碳排放强度(杨钧 2013)。

针对现有文献的不足,本研究采用能源-环境 CGE 模型(GTAP-E)来分析未来我国农业生产增长对能源使用、碳排放的影响以及农业技术进步对碳排放增长的作用。本文试图回答以下问题:第一,伴随未来农业生产的增长,农业能源使用与碳排放将会怎样变化?第二,农业技术进步能否减少农业的能源使用与碳排放?第三,不同类型的农业技术进步对农业能源使用与碳排放的影响是否存在差异?回答这些问题,不仅有利于科学地分析农业技术进步对农业能源使用与碳排放的影响,也将为政府部门制定相关减排政策提供重要依据。

二、文献综述

在现有研究中,农业能源使用与碳排放的研究主要归纳为以下 3 类:(1)农业碳排放量的测算。如李波等(2011)基于农业生产数据,测算了 1993—2008 年中国农业生产的碳排放。结果显示,中国自 1993 年以来,农业碳排放处于阶段性上升态势,农业碳排放总量和强度年平均增长率分别为 4.08%、2.38%。黄祖辉等(2011)利用投入产出和生命周期法,详细核算了 2008 年浙江农业生产的碳排放。(2)碳排放发生机理及农业碳排放影响因素分解研究。吴贤荣等(2017)利用中国 2002—2014 年省份数据,分析了农业碳排放增长驱动及减排退耦特征,发现农业经济增长是引起中国农业碳排放变化以及导致区域显著差异的主导原因。李国志等(2010)利用 LMDI 因素分解,分析了 1981—2007 年全国农业碳排放的主要影响因素。研究发现,经济增长是农业碳排放增长的主要动因,技术进步对农业碳排放有较强的抑制作用,能源消费结构的恶化一定程度上促进了农业排放。李波等(2011)通过指数分解法分析认为,农地利用中农业生产投入要素的使用效率、农业产业结构及农业规模等因素均对农业碳排放总量增长具有不可忽视的推动作用。吴贤荣等(2014)运用多元线性回归模型证实了产业结构、耕地面积和自然灾害等因素与农业碳排放效率间呈显著相关性。Dyer 等(2010)加拿大将燃油运用于农业生产的实验证实了农业生产过程中化肥、农药的施用及机械对柴油的消耗是农业碳排放日益增长的主导因素。(3)农业碳减排机制与减排政策研究。在农业碳减排政策选择上,以碳税、补贴为标志的经济手段是许多学者的首选(向平安等 2007;Murray 2004;Ryan, 1998)。

尽管很多研究关注农业生产中的碳排放,但研究农业技术进步对农业能源使用与碳排放影响的文献还较少。相关研究集中在技术进步对工业领域碳排放的影响上。Gerlagh(2007)利用内生技术进步模型,研究了技术进步对碳减排的影响,研究发现技术进步通过学习效应显著降低了碳减排成本,增加了碳减排的社会收益。魏巍贤等(2010)利用 1997—2007 年中国的省级面板数据,研究了技

术进步(本土研发和引进技术)对碳排放的影响,研究表明本土研发和引进技术对碳排放下降具有显著的积极影响。李子豪等(2011)利用30个省份2000—2008年的面板数据,考察了外商直接投资(FDI)通过技术渠道对中国碳排放的影响,研究发现FDI技术效应对碳排放的积极影响存在一定滞后性。然而针对农业部门技术进步对碳排放的影响,目前仍缺乏研究。仅有杨钧(2013)基于中国1997—2009年省级数据,并以DEA-Malmquist指数测得的农业全要素生产率表征农业技术水平,考察了中国农业技术进步对农业碳排放总量和碳排放强度的影响。该研究表明,农业技术进步显著增加了农业碳排放总量,但农业技术进步降低了农业碳排放强度,且随着人力资本的提升,农业技术进步对农业碳排放降低的积极影响会逐渐增强。

总结来说,已有研究存在以下三方面不足:首先,大部分研究集中于工业部门,较少涉及到农业部门的碳排放及其减缓措施;其次,农业技术进步多以研发投入、专利数或FDI等间接指标衡量,少有研究将农业技术进步进行分类,区别不同农业技术进步类型对农业碳排放的影响;第三,现有文献大多基于历史数据,缺乏对未来农业能源使用与碳排放变化趋势的科学判断。

三、研究设计

(一) 模型选取

本文利用全球可计算一般均衡框架分析农业技术进步对农业能源使用与碳排放的影响。全球能源-环境分析模型(Global Trade Analysis Project Energy,GTAP-E)是对标准GTAP模型的扩展,其前身GTAP由美国普渡大学开发,被广泛应用于国际贸易、气候变化、环境能源等研究。在构建标准的GTAP模型时,假设生产者最小化其生产成本,而消费者最大化其效用水平。在完全竞争市场上,市场价格灵活调整实现所有产品的供给与需求出清。利用非齐次CDE需求函数(Constant Difference of Elasticity Demand Function)刻画消费者的消费行为。在生产模块,假设规模报酬不变,公司利用中间投入品和生产要素(如土地、劳动力和资本)生产产出。中间投入品的使用采用Armington假设,区分本国生产与进口的中间投入品。

在标准GTAP模型基础之上,GTAP-E模型扩展了各国不同产业的CO₂排放量,并改进了生产、消费、碳税以及福利分解等模块。具体来说,生产模块内嵌了多个层次的常替代弹性生产函数,资本与能源产品可以相互替代。生产结构的最上层嵌套与GTAP模型相同,企业最优化利用基本生产要素和中间投入,采用列昂惕夫生产函数进行刻画。GTAP-E的基本生产要素除包含土地、劳动力、自然资源外,还包含资本-能源复合要素。资本与能源之间可以相互替代,该模块利用CES生产函数进行刻画,如果相对于资本价格来说,能源价格上升,企业将会多用能源产品替代资本投入品。进一步将能源产品划分为电力和非电力复合要素,非电力复合要素又可以进一步分解为煤炭、原油、天然气和石油产品,每级复合结构都采用CES生产函数。在消费模块中,利用CDE函数模型化消费者行为,能源产品作为一组与其他消费品存在相互替代关系,而在能源产品组内不同能源产品也可以相互替代。值得注意的是,GTAP-E模型假定同类能源的CO₂排放系数在各区域之间完全相同,即给定某种能源产品,在不同地区该能源产品的CO₂排放系数是恒定的。在不同地区,不同产业能源的使用量存在差异,导致不同能源产品的CO₂排放量存在差异。

本文使用澳大利亚维多利亚大学COPs中心开发的GEMPACK软件求解GTAP-E模型。该软件的优点在于能够快速求解大型的线性方程系统模型,在求解多区域、多部门的可计算一般均衡模型,GEMPACK软件具有较大优势。

(二) 数据来源与情景方案

1. 数据来源。本研究采用普渡大学开发的GTAP-E第9版数据库。标准的GTAP-E第9版数

数据库以 2011 年为基准期,包含 140 个国家和 57 个产业部门。57 个产业部门中,7 个部门为种植业部门、4 个部门为畜牧业部门和 1 个渔业部门。GTAP-E 模型包含 5 个能源产品:煤炭、原油、天然气、石油制品和电力。

为了便于分析和模拟,我们将 GTAP-E 模型第 9 版数据库的 140 个国家和地区加总为 15 个国家和地区,包括中国主要农产品贸易国,分别为:澳大利亚和新西兰、中国、其他东亚国家、东南亚、南亚、西亚和北非、其他非洲国家、欧盟 28 国、俄罗斯、其他东欧国家、美国、加拿大、巴西和阿根廷、其他南美国家、世界其他国家。57 个产品部门加总成 12 个,分别为种植业、畜禽业、渔业、林业、煤炭、原油、天然气、石油制品、电力、其他工业部门、服务业。同时,也对 GTAP-E 第 9 版的能源和排放数据库进行了相应加总。值得说明的一点是,本研究分析的农业只关注种植业、畜禽业、渔业,并未包括林业部门。

为了模拟未来农业生产、能源使用与碳排放的变化趋势,我们选择模拟时期为 2012—2030 年。为了便于模拟和分析,我们将模拟时期划分为 6 个时期,即 2012—2015 年、2016—2018 年、2019—2021 年、2022—2024 年、2025—2027 年和 2028—2030 年。

2. 2012—2030 年农业生产增长基准情景(Baseline Scenario)。为了分析未来中长期(2012—2030)中国农业产出增长、能源使用与碳排放的变化,我们基于 Hetel 等(1999)开发的递归动态方法,建立 2012—2030 年全球宏观经济路径。其中,对中国经济增长、人口变化、劳动力增长率与自然资源增长率等方面做了一系列的假设和判断,如表 1 所示。

表 1 2012—2030 年中国经济增长的基准情景

项目	2012—2015 年	2016—2018 年	2019—2021 年	2022—2024 年	2025—2027 年	2028—2030 年
GDP	33.9	20.8	19.7	17.4	15.2	14.1
人口	2.4	1.6	1.3	0.9	0.6	0.3
非熟练劳动力	1.1	-0.3	-0.9	-1.0	-1.3	-1.5
熟练劳动力	13.7	9.7	8.2	6.1	5.7	5.5
自然资源	假设每年增长 0.7%					

数据来源:国家统计局,2016;国家人口发展规划(2016—2030),2017;劳动力的变化率来自 IASA 的预测(IASA, 2016)

GDP 增长率:2012—2015 年采用真实的 GDP 增长数据,分别增长 8.6%、7.1%、8.3%、6.3%(国家统计局,2016)。假设,在 2016—2020 年年均 GDP 增长 6.5%,在 2021—2025 年年均 GDP 增长 5.5%,在 2026—2030 年年均 GDP 增长 4.5%。

人口增长率:2012—2015 年按照真实的全国人口增长数据,累积增长 2.02%。根据《国家人口发展规划(2016—2030)》,中国总人口将在 2030 年前后达到峰值。为此,预计在 2016—2020 年,年均人口增长率为 0.45%,到 2020 年人口达到 14.2 亿;2021—2025 年,年均人口增长率为 0.21%,2026—2030 年,年均人口增长率为 0.10%,到 2030 年人口达到 14.5 亿。

劳动力增长:熟练劳动力和非熟练劳动力的增长率来自于 IASA 的预测。在 2016—2018 年之后非熟练劳动力的增长率由正变为负,3 年累积下降-0.3%;2019—2021 年非熟练劳动力下降 0.9%,2022—2024 年下降 1.0%,2025—2027 年下降 1.3%,2028—2030 年下降 1.3%。与非熟练劳动力相比,熟练劳动力的未来仍将保持增长趋势,尽管增长率逐年下降。

另外,假设自然资源每年增长 0.7%。假设资本增长由经济系统内生决定,在模拟中采用长期闭

合,资本存量能够根据资本回报率变化充分增长。为了模拟农业供需的长期变化,本研究对收入/价格弹性采用了变参数的模拟方法。

3. 技术进步情景设置。考虑到未来农业技术进步,我们设置了3个农业技术进步情景,探究不同技术进步情景下农业能源使用和碳排放的变化路径。农业技术进步可以分为两类:第一类是全要素技术进步,即产出增进型的技术进步,当所有投入品保持不变时,使农业产出增加的技术进步;第二类是能源增进型的技术进步,当农业产出保持不变时,技术进步提高农业部门的能源使用效率,从而减少能源使用。针对两种不同类型的技术进步,我们设置了如下3个农业技术进步情景:

技术进步情景(1):假设农业全要素技术进步在2012—2030年每年提高1%。在农业劳动力、资本、土地、水资源等投入保持不变情况下,通过提高农业育种技术、种植技术,增加水利设施、交通设施等投资,推动制度改革与创新,从而提高农业全要素生产率。过去30年,中国农业全要素技术进步率超过3%(Jin等,2010),推动了粮食产出增长超过50%。尽管预期未来农业全要素生产率的增长速度将逐渐减缓,但与国外农业生产技术相比,我国农业全要素生产率仍有一定的增长空间。因此技术进步情景(1)假设在未来20年,中国农业全要素生产率每年提高1%。

技术进步情景(2):假设农业能源增进型使用技术进步在2012—2030年每年提高1%。在农业生产要素和能源产品投入保持不变时,改进农业机械设施,加强农机维护管理,减少能源浪费,从而提高农业部门对能源产品的使用效率。当农业能源效率提高,同样的农业产出将消耗更少的能源产品。减少能源产品使用将降低农业生产的能源成本和生产成本,提高农业生产利润,带来农业产出的增长。技术进步情景(2)假设到2030年末,农业部门能源利用效率每年提高1%。

技术进步情景(3):假设农业全要素技术进步和能源增进型使用技术进步在2012—2030年每年均提高1%。最乐观的情景是,未来中国农业全要素生产率提高的同时,农业能源利用效率也将提高进一步提高。技术进步情景(3)假设未来20年中,农业全要素生产率和能源利用效率每年提高1%。

通过比较不同技术进步情景与基准情景的估计结果,可获得不同类型的技术进步对农业能源使用与碳排放的影响。

四、中国农业能源使用与碳排放模拟结果

为研究不同技术增长情景下中国农业增长、能源使用与碳排放的演变路径,本研究利用GTAP-E模型模拟了上述基准情景和3个技术增长情景方案。下面将分别阐述对不同情景下中国农业增长、能源使用与碳排放的变化趋势与规律。

(一) 2012—2030年中国农业技术进步与产出增长

到2030年,中国农业产出还将进一步增长,但农业产出增长率将逐渐减缓。根据基准情景结果,种植业、畜牧业和渔业的产出在2012—2030年均将继续增长,但增长速度逐步下降。根据GTAP-E的模拟结果,基准情景显示,种植业产出在2016—2018年内累积增长4.5%,到2025—2027、2028—2030年3年累积增长率下降到3%以下(表2,第1行)。同期畜禽业和渔业产出的增长速度均快于种植业,2016—2018年累积增长超过9%,2019—2021年累积增长超过7%,直到2028—2030年3年累积增长率仍超过3%(表2,第2~3行)。2012—2030年种植业、畜禽业和渔业产出分别累积增长27.6%、56.1%和64.9%。由于GDP和人口持续增长的影响,城乡居民食物消费将在未来10年保持较快增长。特别是畜禽产品和水产品的消费增长快于粮食、蔬菜等食物,这是由于前者具有较高的收入弹性。在供给方面,由于农业科技持续提高、基础设施投资不断增加,导致农业单产不断提高。在供需两方面的共同作用下,种植业、畜禽业和渔业的产出在2012—2030年将持续增长。随着GDP和劳动力、资本等要素供给增长放缓,农业产出增速在未来10年将逐步减缓。

不同技术进步情景下,农业产出具有不同的增长率。从表2中可以看到,技术进步情景(1)的农业产出增长率与基准情景基本一致(表2 4~6行)。技术进步情景(1)假设农业的能源利用效率提高1%,在一定程度上降低了能源成本,但对农业产出的影响较小。技术进步情景(2)与(3)的农业产出增长率比较接近,也显示能源利用效率提高对农业产出的影响相对较小(表2 7~12行)。另外,技术进步情景(2)与(3)都假设农业全要素技术进步率每年提高1%,全要素生产率的提高增加了农业产出,带来更高的产出增长率。受到农业全要素生产率提高的影响,种植业产出在2016—2018年累积增长5.3%,比基准情景高0.8%;2012—2030年种植业产出累积提高33.6%,比基准情景高6.0%。畜禽业和渔业的产出增长率均高于基准情景,2012—2030年累积增长均超过60%。我们的预测结果与国内外主要农产品供需预测研究的结果基本一致(USDA 2016;中国农业科学院 2016)。

表2 2012—2030年中国农业增长率的模拟结果 (%)

	2012—2015	2016—2018	2019—2021	2022—2024	2025—2027	2028—2030
基准情景						
种植业	7.9	4.5	3.7	3.1	2.9	2.8
畜禽业	16.1	9.3	7.9	5.9	4.2	3.3
渔业	16.3	10.0	8.9	7.2	5.6	4.6
技术进步情景(1)						
种植业	7.9	4.5	3.7	3.2	2.9	2.8
畜禽业	16.1	9.3	7.9	5.9	4.2	3.3
渔业	16.3	10.0	8.9	7.2	5.6	4.6
技术进步情景(2)						
种植业	8.6	5.3	4.6	4.0	3.7	3.6
畜禽业	16.4	9.7	8.5	6.7	5.0	4.1
渔业	16.5	10.2	9.2	7.6	6.1	5.1
技术进步情景(3)						
种植业	8.6	5.3	4.6	4.0	3.7	3.6
畜禽业	16.4	9.7	8.5	6.7	5.0	4.1
渔业	16.5	10.2	9.2	7.6	6.1	5.1

数据来源:GTAP-E 模拟结果

(二) 2012—2030年中国农业能源使用的增长率

GTAP-E 数据库中,中国农业对能源产品的使用主要为石油制品,如汽油、柴油、煤油等。在2011年,石油制品的份额超过了65%,电力约占30%。因此我们的分析聚焦于农业对石油制品和电力的使用(表2 第4~5行)。

受农产品产出增长的影响,农业对能源产品的使用在2012—2030年将快速增长,其增速甚至超过农产品产出的增长速度。基准情景显示,2016—2018年农业对石油制品和电力的使用分别累积增加了13.6%和15.0%,而同期种植业产出增长为4.5%,畜禽业和渔业产出增长率分别为9.3%和10.0%;随着农业产出增速的逐步减缓,农业对石油制品使用的增速也逐步放缓。2028—2030年农业对石油制品和电力使用分别累积增加了9.7%和13.1%,仍然远远高于农业部门产出的增长速度(2.8%~4.6%)。2012—2030年农业对石油制品和电力使用分别累积增加了110.6%和139.1%,远

高于农业部门的累积增长率。由此可见,农业对石油制品和电力使用的增速超过了农业产出的增速,且远远超出了种植业产出增长的速度;农产品生产除了消耗能源、化肥、农药等中间产品外,还需要土地、资本、劳动等生产要素。当土地供应、劳动力供给(非熟练劳动力)减少后,农业产出的进一步增长就需要投入更多中间产品,包括能源产品。基准情景发现,除了原油外(极少在农业生产中直接使用),农业对其他能源产品的使用也将快速增长,其增速均高于农业部门。

表3 2012—2030年中国农业能源使用增长率的模拟结果 (%)

	2012—2015年	2016—2018年	2019—2021年	2022—2024年	2025—2027年	2028—2030年
基准情景						
煤	24.4	14.9	14.0	13.0	11.9	11.9
原油	15.9	7.8	5.9	4.7	3.7	3.8
天然气	24.5	13.5	11.4	9.5	8.0	8.0
石油制品	24.2	13.6	12.0	10.8	9.7	9.7
电力	24.7	15.0	14.5	13.8	13.1	13.1
技术进步情景(1)						
煤	23.8	14.3	13.4	12.4	11.3	11.4
原油	15.2	7.2	5.3	4.1	3.2	3.2
天然气	23.8	12.9	10.8	8.9	7.4	7.4
石油制品	23.5	12.9	11.4	10.1	9.1	9.1
电力	24.0	14.4	13.9	13.2	12.5	12.5
技术进步情景(2)						
煤	23.5	14.1	13.3	12.4	11.5	11.5
原油	15.2	7.3	5.5	4.4	3.6	3.6
天然气	23.7	12.8	10.9	9.2	7.9	7.9
石油制品	23.3	12.9	11.4	10.2	9.3	9.3
电力	23.9	14.4	13.9	13.2	12.6	12.6
技术进步情景(3)						
煤	22.9	13.5	12.7	11.8	10.9	10.9
原油	14.5	6.7	4.9	3.8	3.0	3.0
天然气	23.0	12.2	10.3	8.6	7.3	7.3
石油制品	22.6	12.2	10.8	9.6	8.7	8.7
电力	23.2	13.7	13.2	12.6	12.0	12.0

数据来源:GTAP-E 模拟结果

通过比较技术进步情景与基准情景,技术进步情景下的农业能源使用增速均低于基准情景,这意味着技术进步降低了农业部门对能源产品的使用。在技术进步情景(1)下,2012—2030年农业对石油制品的使用增长了103.7%,电力使用增长了131.4%,均低于基准情景(110.6%和139.1%)。在农业能源技术进步每年提高1%的假设下,农业消耗更少的能源就可以生产相同的产出。尽管技术进步情景(1)与基准情景具有基本一致的产出增长率,但是前者却具有较低的能源使用增长速度。更有意思的是,农业全要素生产率提高1%的技术进步情景不仅具有更高的农业产出,还具有较低的

能源使用增长率。在技术进步情景(2),2012—2030年石油制品和电力的使用分别累积增长了104.2%和131.5%(表3第12行)不仅低于基准情景的增长率,也低于假设能源效率提高1%的技术进步情景(1)。农业全要素技术进步提高了农业产出的效率,使得同样的投入可以获得更高的农业产出,因此技术进步情景(2)减少了能源产品的使用。我们的结果意味着,即使没有农业领域清洁能源技术的发展,只要能够提高农业的生产效率,也可以部分降低能源使用。如果能够同时提高农业全要素生产率与能源利用效率(技术进步情景(3)),不仅具有较高的农业产出,也具有最低的能源使用增长率:2012—2030年石油制品使用累积增长97.5%,电力使用累积增长124%。

(三) 技术进步情景下农业碳排放路径

表4 2012—2030年中国农业每年碳排放模拟结果 (亿吨 CO₂)

年份	基准情景	技术进步情景		
		(1)	(2)	(3)
2011—2015	1.97	1.96	1.95	1.94
2016—2018	2.24	2.22	2.21	2.19
2018—2021	2.54	2.51	2.50	2.46
2022—2024	2.87	2.81	2.80	2.75
2025—2027	3.21	3.13	3.12	3.05
2028—2030	3.57	3.47	3.46	3.36

数据来源:GTAP-E 模拟结果

除了分析未来农业生产、能源使用的演变规律外,我们还探究了农业生产中 CO₂ 排放的变化趋势及对技术进步的影响。GTAP-E 模型中包含了五类能源产品:煤炭、原油、天然气、石油制品与电力。其中,前四类能源产品在农业生产消耗时直接排放了 CO₂。而对电力的使用并不直接排放 CO₂,但电力作为二次能源,在其生产过程中会排放 CO₂,因此本研究还计算了农业生产使用电力的间接 CO₂ 排放。

2012—2030年中国农业碳排放将快速增长,远远超过了农业产出的增长速度。根据基准情景,农业年均碳排放量将从2011年的1.60亿吨 CO₂ 增长到2030年末的3.57亿吨 CO₂,增长123%(表4第1列)。而同期种植业、畜牧业和渔业产出分别累积增长27.6%、56.1%和64.9%,碳排放的增长速度远快于同期农业产出的增长速度。这一结果与农业对能源产品使用的增长速度保持一致,在2012—2030年农业对石油制品和电力使用增长均超过100%;随着农业产出的增长,农业对能源产品使用也迅速增加,而更多能源的使用进一步导致了碳排放的快速增长。由于农业能源使用增长速度快于农业产出的增长速度,最终农业碳排放增长速度快于农业产出的增长速度。

技术进步对碳排放的影响通过两个不同方向:一是通过能源利用技术进步或全要素技术进步,减少能源产品的使用,从而降低农业碳排放量;二是通过技术进步降低农业能源使用成本,可能导致经营者使用更多的低成本能源来提高农业产出,导致农业碳排放总量的增加。技术进步对农业碳排放量的影响最终取决于两个渠道影响大小的比较。根据我们的模拟结果,农业全要素技术进步情景比农业能源技术进步情景产生更少的农业碳排放量。在能源技术进步情景下(表4第2列),到2030年农业碳排放量达到3.47亿吨 CO₂,比基准情景低1000万吨 CO₂,但略高于农业全要素技术进步情景的碳排放量(3.46亿吨 CO₂,表4第3列)。如果农业全要素进步技术与能源技术进步同时提高,农业碳排放量将能明显降低,到2030年末每年将减少超过2100万吨 CO₂,占同期农业碳排放的

5.8%(表4第4列)。因此,通过投资灌溉、农业育种技术、加强田间管理等,提高农业生产率,不仅将增加农业产出、保障国家粮食安全,而且还起到减少农业碳排放、提高农业环境效益的作用。

五、结论与政策含义

为了满足日益增长的食物需求、保障国家粮食安全,中国农业生产未来还将进一步增长。受劳动力成本上升、水土资源等制约,农业生产增长将依赖集约化、规模化、机械化经营,由此将带来农业能源使用与碳排放量快速增长。本研究利用能源-经济CGE模型(GTAP-E模型)构建2012—2030年中国经济增长的情景方案,模拟分析未来农业生产增长对农业能源使用、碳排放的影响。并构建农业技术进步情景方案,模拟分析农业全要素技术进步与能源增进型技术进步对减少能源使用与碳排放的作用。主要结论为:(1)随着农业生产的增长,2012—2030年农业部门对石油制品和电力使用将分别增长110.6%和139.1%,远高于农业部门的同期增长率。同期农业部门的碳排放量将从2011年的1.60亿吨CO₂,增长到2030年末的3.57亿吨CO₂,增长123%。农业能源使用与碳排放的增速都远远超过了农业产出增长率;(2)农业全要素技术进步和能源增进型技术进步在控制农业能源增长、减缓碳排放起到了重要作用。在能源增进型技术进步情景下,到2030年农业碳排放量比基准情景降低1000万吨CO₂,而农业全要素技术进步情景将在更大程度上降低碳排放量。如果农业全要素进步技术与能源增进型技术进步同时实现,农业碳排放量将能明显降低,到2030年末每年将减少超过2100万吨CO₂,占同期农业碳排放的5.8%。

根据本文的主要研究结果,我们提出如下政策建议:

第一,高度重视农业能源使用和碳排放量增长问题。本研究发现到2030年,农业产出将增长30%~60%,然而农业的碳排放量将增长一倍以上,远远快于农业生产的增长。随着农业规模化、机械化水平的提高,化石能源使用迅速增加,使得农业碳排放量和排放强度都迅速上升。值得注意的是,本文所分析的碳排放量是基于农业生产过程中能源使用,未考察农业生产过程中诸多“潜藏”的碳排放。诸如,水稻种植过程中的二氧化碳释放;畜牧业生产过程中的甲烷释放;化肥使用过程的温室气体排放。本研究也未考察农业生产中投入品生产过程中间接的碳排放量,如生产农药、化肥过程中能源使用所排放的二氧化碳。如果把这些因素都考虑起来,农业碳排放的增长速度将超过本文的估计。为实现2030年碳排放峰值目标,需要各产业提高能源效率、降低碳排放强度,除了高耗能工业以外,农业碳减排也是值得关注与研究的重要议题。

第二,加快推进农业技术进步水平,通过农业技术进步降低农业碳排放量。一是通过提高农业全要素技术进步来降低能源使用和碳排放量,比如推进生物技术、灌溉技术、加强基础设施建设等;通过制度创新提高农业全要素生产率,如提高农田管理水平、明确农村土地产权、建立土地流转服务平台,加快土地的流转速度,促进规模化经营。二是通过提高能源要素技术进步,提高能源利用效率,发展低排放能源技术,减少农业碳排放。另外,优化农业的能源结构也将有效减少农业的碳排放。虽然GTAP-E模型仅涵盖传统的化石能源,如果能通过提高太阳能、地热、风能等清洁能源的使用比例,显然将大幅减少碳排放。由于与提高农业全要素生产率相比,农业碳排放技术的提高可以通过改进机械设备、提高能源燃烧效率、减少能源浪费实现,其实现难度和成本都远低于前者。因此,我们在具体实践中要注意区分不同技术进步类型对降低能源使用和碳排放作用的差异,注意在现有约束条件下,推进技术进步的优先序。如果能够实现更快的农业能源技术进步,将对农业碳减排产生更大贡献。

参 考 文 献

1. Lubetsky J., Steiner B. A., Lanza R. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006

2. Huang J. ,Rozelle ,S. 1996. Technological Change: Rediscovering the Engine of Productivity Growth in China's Agricultural Economy. *Journal of Development Economics* 4. Gerlagh R. Measuring the Value of Induced Technological Change. *Energy Policy* ,2007 ,35 (11) :5287~5297
3. Dyer J. A. ,Kulshreshtha S. N. ,Mcconkey B. G. , et al. An assessment of fossil fuel energy use and CO2 emissions from farm field operations using a regional level crop and land use database for Canada. *Energy* 2010 ,35 (35) :2261~2269
4. Murray B C. Overview of agricultural and forestry GHG offsets on the US landscape. *Choices* 2004 ,19(3) :14~18
5. Ryan B ,Tiffany D G. Minnesota Agricultural Energy Use and the Incidence of a Carbon Tax. Minnesota: Institute for Local Self Reliance , 1998
6. USDA (the United States Department of Agriculture) ,2016. 2016 International Long - Term Projections to 2025. < <https://www.ers.usda.gov/data-products/international-baseline-data/>>
7. Jin Songqing ,Hengyun Ma ,Jikun Huang ,Ruifa Hu and Scott Rozelle. Productivity efficiency and technical change: measuring the performance of China's transforming agriculture. *Journal of Productivity Analysis* 2010:191~207
8. 董红敏 ,李玉娥 ,陶秀萍等 . 中国农业源温室气体排放与减排技术对策 . *农业工程学报* 2008 ,24(10) :269~273
9. 陈锡文 . 中国粮食政策调整方向 . *中国经济报告* 2015 (12) :19~21c ,49:337~369
10. 王东阳 . 我国农业技术进步作用及其未来发展方向分析 . *农业科研经济管理* 2007(2) :2~7
11. 李谷成 ,冯中朝 . 中国农业全要素生产率增长:技术推进抑或效率驱动——一项基于随机前沿生产函数的行业比较研究 . *农业技术经济* 2010(5) :4~14
12. 李家洋 . 第七届国际作物科学大会开幕式报告 . 第七届国际作物科学大会 2016
13. 张兵兵 ,徐康宁 ,陈庭强 . 技术进步对二氧化碳排放强度的影响研究 . *资源科学* 2014 ,36(3) :567~576
14. 杨 钧 . 农业技术进步对农业碳排放的影响——中国省级数据的检验 . *软科学* 2013 ,27(10) :116~120
15. 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 . *中国人口·资源与环境* 2011 ,21(8) :80~86
16. 李国志 ,李宗植 . 中国农业能源消费碳排放因素分解实证分析——基于 LMDI 模型 . *农业技术经济* 2010(10) :67~72
17. 黄祖辉 ,米松华 . 农业碳足迹研究——以浙江省为例 . *农业经济问题* 2011(11) :40~47
18. 吴贤荣 ,张俊飏 . 中国省域农业碳排放:增长主导效应与减排退耦效应 . *农业技术经济* 2017(5) :27~36
19. 李国志 ,李宗植 . 中国农业能源消费碳排放因素分解实证分析——基于 LMDI 模型 . *农业技术经济* 2010(2) :67~72
20. 向平安 ,周 燕 ,黄 璜等 . 氮肥面源污染控制的绿税激励措施探讨:以洞庭湖区为例 . *中国农业科学* 2007 ,40(2) :330~337
21. 魏魏贤 ,杨 芳 . 技术进步对中国二氧化碳排放的影响 . *统计研究* 2010 ,27(7) :36~44
22. 李子豪 ,刘辉煌 . 外商直接投资的环境效应——基于中国 36 个工业部门数据的实证研究 . *系统工程* 2010(11) :59~64
23. 杨 钧 . 农业技术进步对农业碳排放的影响——中国省级数据的检验 . *软科学* 2013 ,27(10) :116~120

The Impacts of Technological Advance on Agricultural Energy Use and Carbon Emission—An Analysis Based on GTAP—E Model

WEI Wei WEN Changcun CUI Qi XIE Wei

Abstract Influenced by rising labor wages as well as water and land constraints ,China's agriculture will increasingly rely on the intensive ,large-scale and mechanized production ,which is expected to result in a rapid growth of energy consumption and carbon emission. Technological advance was regarded as a major way to reduce carbon emission in agriculture production. This study employs an energy-economic CGE model ,GTAP-E model ,and formulates a baseline scenario about global economic growth in the period of 2012-2030 to analyze the impacts of agricultural technological advance on energy use and carbon emission in agricultural sectors. Our results dem-

onstrate that the uses of energy products by agricultural sectors would increase significantly from 2012 to 2030 ,with annual averaged growth rate largely higher than that of agricultural output over the same period. Meantime ,carbon emission of agricultural sectors would rise by over 120%. Despite of different mechanisms between TFP technology advance and energy-augmented technology advance ,they both could make an important contribution in buffering the growth of agricultural energy consumption and carbon emission.

Key words Agricultural production projection Technological advance Energy use Carbon emission

责任编辑 段 艳