

# 中国农业碳中和目标分析与实现路径\*

赵敏娟 石 锐 姚柳杨

(西北农林科技大学经济管理学院 杨凌 712100)

**摘 要:** 实现农业碳中和既是缓解全球气候变暖的应有之义,也是向现代农业转型的内在要求。本文提出农业碳中和的低碳、零碳、负碳三种目标及内涵,构建了中国在2060年实现农业碳中和的路径图。预测结果表明,中国农业碳排放在2060年的基线情景下相对于2018年将增长64.91%,减排措施将有潜力减少74.18%的基线情景碳排放量,结合碳抵消措施将能够实现农业零碳目标。同时,中国农业碳排放在2016年已经达峰,在未来通过减排能力建设阶段、快速减排阶段、巩固完善阶段将能够实现农业碳中和。在此基础上,本文提出了实现中国农业碳中和的保障措施,并展望了中国农业碳中和的发展前景。

**关键词:** 农业碳排放;碳中和;碳减排;碳抵消;实现路径

DOI:10.13246/j.cnki.iae.20220913.002

## 一、引言

农业是对气候变化最为敏感的产业,也是温室气体的主要排放源之一。中国农业温室气体排放<sup>①</sup>不仅包含二氧化碳(占比10%~15%),还包含甲烷(占比45%~55%)和氧化亚氮(占比30%~40%)等非二氧化碳温室气体。中国在2016年签署了应对气候变化减少碳排放的《巴黎协定》,并在2020年正式向国际社会承诺在2030年实现“碳达峰”、2060年实现“碳中和”,充分体现了中国政府的大国责任与担当。目前,中国“碳达峰、碳中和”主要是针对二氧化碳减排。实践中,中国也高度重视非二氧化碳温室气体排放管控,例如,“十三五”规划在控制温室气体排放工作方案中,提出要加大控排非二氧化碳类温室气体;在2021年召开的联合国气候变化框架公约第26次缔约方大会(COP26)期间,中国宣布即将制定强化甲烷排放控制的额外措施。因此,立足随着中国以更积极的姿

态参与到应对气候变化以及国际气候治理的现实,中国农业碳中和的实现应当纳入甲烷、氧化亚氮等主要温室气体减排,这符合碳中和的初衷并有助于应对未来碳中和的国际谈判与合作。

一些国家已经制定了包含所有温室气体在内的农业碳中和战略,但在实现目标和途径上不尽相同。澳大利亚的主要农业组织强调通过植树造林等措施进行碳抵消的重要性,致力于在2050年前实现农业碳中和(Kingwell, 2021)。英国农场主联合会(NFU)提出通过提高农业生产率、提升土地上的有机碳储存量、发展生物质能源和生物质材料在内的三种实现农业碳中和的有效方式,计划在2040年前实现农业碳中和(NFU, 2020)。丹麦认为既不能减少农业产量,也不能将高碳排放食物的生产转移到其他国家,将在2050年前实现碳中和(Searchinger等, 2021)。

\* 姚柳杨为本文通讯作者

① 温室气体排放历史数据来源于联合国粮食及农业组织数据库, <https://www.fao.org/faostat/zh/#data>

农业碳中和\* 所面临的挑战是在满足日益增长的粮食需求的同时,大幅减少农业温室气体排放。中国关于农业碳中和的研究主要聚焦于减排潜力测度(吴贤荣等,2015;陈胜涛等,2021)、减排政策优化(王斌等,2021;田云等,2021)以及减排技术发展(何艳秋等,2021;胡传等,2020)等方面,缺乏对农业碳中和实现路径的研究,影响了相关政策的出台与实施。而且,中国农业面临着确保粮食安全

和满足消费结构转型的内部压力,受到自然资源 and 环境保护政策趋紧的外部约束,这些都为中国农业碳中和的实现提出了新的更高要求。基于上述分析,本文的学术贡献主要在于提出中国在2060年实现农业碳中和的路径图,以期为中国农业碳中和战略规划提供参考,为其他国家尤其是发展中国家推进低碳农业和农业碳中和提供启示。

## 二、农业碳排放现状与趋势预测

### (一) 农业碳排放现状

农业碳排放包含了在农地生产过程中以及农地利用变化过程中排放的温室气体(IPCC,2006)。2018年,中国农业碳排放总量为801.61百万吨二氧化碳当量,占中国碳排放总量的6.85%。在农业碳排放总量中,甲烷(CH<sub>4</sub>)和氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)等非二氧化碳温室气体排放总占比为85.67%,其排放

量分别为377.45百万吨二氧化碳当量和309.30百万吨二氧化碳当量。在碳排放的来源中(见表1),牛羊等牲畜的肠道发酵、农业种植过程中的化肥施用、水稻种植以及农业生产过程中的能源使用是中国农业碳排放的主要来源,占中国农业碳排放总量的3/4,是碳减排的主要关注对象。

表1 2018年中国农业碳排放来源占比情况

农业碳排放源	碳排放量	
	(百万吨二氧化碳当量)	占比(%)
肠道发酵	185.47	23.14
化肥施用	156.19	19.48
水稻种植	149.84	18.69
能源使用	123.78	15.44
粪便管理	61.80	7.71
牧场残余粪便	54.65	6.82
粪便还田	33.10	4.13
作物残留	27.85	3.47
秸秆燃烧	6.55	0.82
有机土壤排水	2.16	0.27
草原烧荒	0.21	0.03

数据来源:联合国粮食及农业组织数据

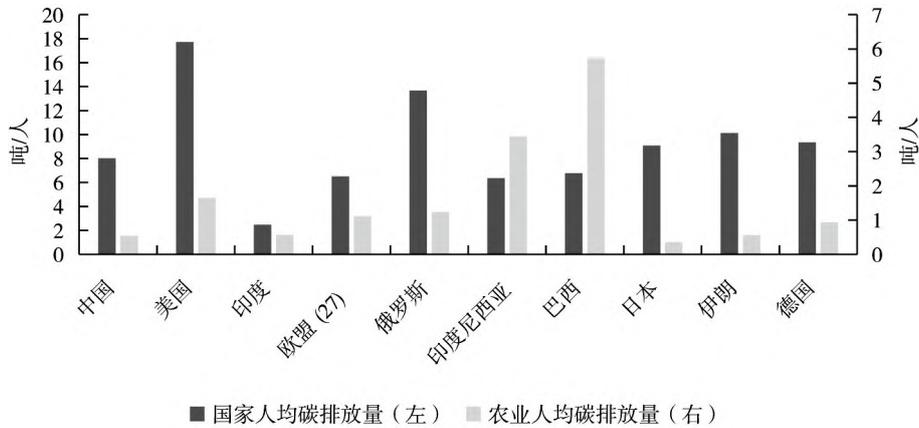
本文选取2018年全球碳排放总量最高的十个经济体,也即中国、美国、印度、欧盟、俄罗斯、印度尼西亚、巴西、日本、伊朗和德国,进行人均碳排放和碳排放强度的国际比较。图1是对人均碳排放

的国际比较,可以看出虽然中国的碳排放总量最高,但人均碳排放相对较低,为8.02吨/人,不到美国的一半;俄罗斯、伊朗、德国和日本的人均碳排放量均高于中国。如图1所示,农业人均碳排放的国

\* 这里和之后的碳排放均指二氧化碳当量排放,即温室气体排放

际比较反映出,巴西排名第一,高达5.74吨/人,约为中国的3倍;印度尼西亚、美国、俄罗斯和欧盟的人均农业碳排放量也相对较高,均超1吨/人;中国

的人均农业碳排放量相对较低,为0.55吨/人,仅略高于日本的0.36吨/人。

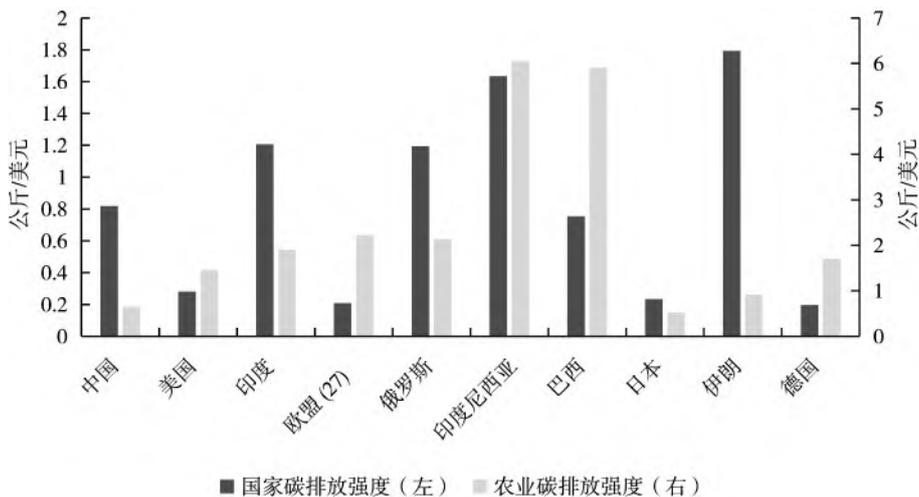


数据来源: 联合国粮食及农业组织数据库,世界资源所气候观察数据库

图1 各国及农业人均碳排放量

如图2所示碳排放强度的国际对比中,国家碳排放强度为单位国民生产总值的全国碳排放,农业碳排放强度为单位农业生产总值的农业碳排放。上述十个国家的国家碳排放强度中,伊朗最高,为1.79公斤/美元,是中国的2倍左右;印度尼西亚、

印度和俄罗斯的碳排放强度也相对较高,均大于1公斤/美元。就农业碳排放强度而言,印度尼西亚最高,为6.06公斤/美元;中国农业碳排放强度为0.65公斤/美元,这些国家中排名第九,不足美国的1/2、欧盟的1/3。



数据来源: 联合国粮食及农业组织数据库,世界资源所气候观察平台数据库

图2 各国及农业碳排放强度

从上述分析可知,中国的农业碳排放绝对量较高,但是就人均碳排放量和碳排放强度而言,仍处于较低水平。可能的原因是,中国居民膳食结构中还是以植物性为主,对环境影响较大的牛肉消费消

比例较低,对肉类的综合利用比例较高,属于低碳、节约型消费结构(程广燕,2022)。此外,中国全面推进畜禽粪污资源化利用过程中,畜禽粪肥利用比例和秸秆还田比例逐年提升,有效降低了来自于秸

秆焚烧、动物粪便的温室气体排放。在未来,伴随着中国居民收入水平的提高和膳食结构的转型,势必会要求农产品产量的提高,从而对中国农业碳中和的实现形成巨大的压力。考虑到中国农业碳排放人均量和强度均在国际上具有比较优势,通过进口国外农产品将农业碳排放转移到其他国家将会增加全球农业碳排放,也不利于中国农产品自给率的提高。因此,为了在2060年实现农业碳中和,中国需要进一步降低国内农业生产过程中以及农地利用过程中的温室气体排放。

## (二) 农业碳排放基线预测

考虑到未来中国膳食结构转变,本文预测了2060年中国农业碳排放量,结果如图3所示<sup>①</sup>。在没有出现技术变革且不采取任何减排措施的情况

下(也即基线情景),2060年中国农业碳排放总量将达到1321.96百万吨二氧化碳当量,相比于2018年增长64.91%。2060年中国农业最大的四种碳排放来源分别为肠道发酵、化肥施用、水稻种植和能源使用,分别占农业碳排放的24.94%、22.67%、14.37%和12.70%。考虑到未来粮食(特别是饲料用粮)需求总量的增长,粮食产量将会大幅度提高,导致来自于化肥施用、水稻种植和能源使用的碳排放相对于2018年分别增长91.90%、26.80%和48.35%。与此同时,中国饮食结构的持续性转变将导致消费者对肉蛋奶的需求大幅度上升,将导致来自于畜牧业胃肠道发酵的碳排放相对于2018年增长77.76%。

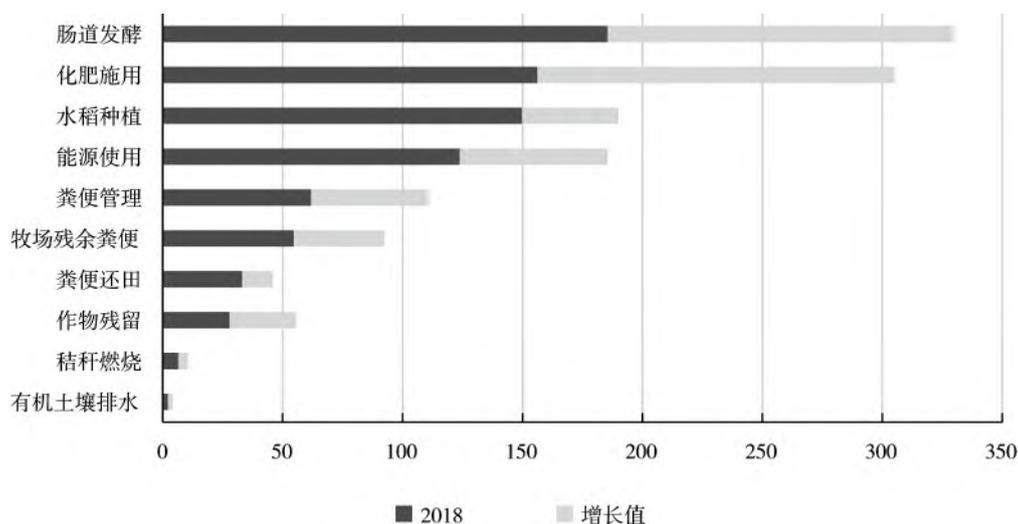


图3 2060年中国农业碳排放趋势预测 (百万吨二氧化碳当量)

## 三、农业碳中和的目标

农业碳中和并不是追求农业生产的零碳排放,也不是以牺牲农业产值和粮食产量为代价的碳排放抑制,而是在考虑了未来人均粮食消费需求的大幅度增加以及饮食结构的持续性转变的基础上,通

过技术创新(Auvikki等2021;黄钢等2010)、生产管理改善(Suresh等2021)等方式减少或抵消<sup>②</sup>农业温室气体的排放,实现农业生产的净零排放。不同文献对净零排放的目标设定不同,丁仲礼

<sup>①</sup> 本文参照基于食物系统模型(Food-system model)预测的未来全球食物需求增长速度(Springmann等2018),考虑膳食结构转变,设定种植业碳排放增长速度与粮食需求增长速度同比例变化,畜牧业碳排放增长速度与肉类需求增长速度同比例变化,预测2060年我国农业碳排放基线。但是,根据Liu等(2021)、Zhao等(2021)的研究,我国的食物需求增长速度将可能快于全球平均水平。因此,本文的预测结果将存在偏低的风险

<sup>②</sup> “抵消”包括在农业用地上增加土壤碳汇、退耕还林等碳捕获与封存措施,也包括发展生物质能源等为其他部门创造的碳减排机会(Searchinger等2021)

(2022) 和 Liu 等(2022) 认为中国碳中和是 2060 年的碳排放量不超过陆地生态系统碳汇潜力,也即碳预算约束下的碳中和;舒印彪等(2021) 认为中国电力系统碳中和是 2060 年电力系统碳排放量不超过电力系统碳捕集量 Mayberry 等(2019) 认为澳大利亚红肉行业碳中和是 2030 年反刍牲畜的碳排放量不超过通过将草地转换为林地所额外增加的碳汇,二者都是在行业内部实现碳中和;Searchinger 等(2021) 在研究丹麦 2050 年农业实现碳中和时,农业碳排放来源于丹麦国内农产品和从国外进口的农产品的生产过程,即同时考虑了国内和国外两个农业碳排放来源。

综合上述分析,本文认为农业碳中和包含了由易到难的三种目标。第一个目标是包含碳预算的国内农业净零排放,以下称为“低碳目标”。低碳目标计入了国家碳汇总量中提供给农业生产的碳排放配额,通过碳减排、碳抵消实现农业净碳排放不高于碳排放配额。第二个目标是国内农业净零排放,以下称为“零碳目标”。零碳目标是在低碳目标的基础上,不考虑农业碳排放配额,进一步通

过碳减排、碳抵消将农业净碳排放降至零以内。第三个目标是农业净零排放,以下称为“负碳目标”。负碳目标同时考虑了国内农业生产碳排放和从国外进口农产品生产过程中的碳排放,在零碳目标的基础上,进一步降低碳排放至能够抵消国外进口农产品产生的碳排放。上述三个目标可以分别用公式表示如下:

$$\text{低碳目标: } EM \leq RE + OF + BU \quad (1)$$

$$\text{零碳目标: } EM \leq RE + OF \quad (2)$$

$$\text{负碳目标: } EM + IM \leq RE + OF \quad (3)$$

其中,EM 代表基线情景的农业碳排放;RE 代表通过农业碳减排措施能够减少的碳排放量;OF 代表通过碳抵消措施能够减少的碳排放量;BU 代表国家碳汇总量中提供给农业生产的碳排放配额;IM 代表进口的农产品在生产过程中产生的碳排放。本文参照已有研究(IPCC,2018; McKinsey Company,2020; Searchinger 等,2021),从中选取了在未来可能具有成本有效性的农业碳减排(RE)、碳抵消(OF)措施,分为作物生产、动物管理、能源使用、土地利用、能源替代等方面(见表2)。

表2 农业碳减排和碳抵消措施

类别	一级	二级	具体措施
碳减排 (RE)	作物生产	肥料管理(73%)	减少氮肥过度施用 改种高效氮肥作物
		水稻种植减排(82%)	改善稻田排水方式 改善稻田灌溉方式
		秸秆燃烧(100%)	禁止秸秆燃烧
	动物管理	作物残留管理(59%)	提高秸秆资源化利用率 作物残留物及时清理
		肠道发酵减排(68%)	改进饲料加工 优化饲料配比
		粪便管理(65%)	基因优选 开发甲烷抑制剂和疫苗 改进粪便存储和清理方式
碳抵消 (OF)	能源使用	清洁能源(89%)	使用太阳能、风能等清洁能源
	土地利用	退耕还林还草 (8.5tCO <sub>2</sub> eq/公顷)	将部分耕地转化为林地和草地
	能源替代	泥炭地修复(95%) 生物质能源(98%)	水文修复、植被恢复措施 将秸秆作为生物质能源

数据来源:参照 Searchinger 等(2021) 和 McKinsey Company(2020) 的研究,表2 汇总了适用于我国的碳减排和碳抵消措施。表中第三列括号内的数字代表碳减排和碳抵消措施的减碳潜力。依据我国秸秆禁烧政策,本文预计 2060 年我国将全面禁止秸秆燃烧,设定禁止秸秆燃烧的减碳潜力 100%;参照 Searchinger 等(2018),设定退耕还林还草措施的减碳潜力为 8.5tCO<sub>2</sub>eq/公顷;参照 Searchinger 等(2021) 的研究,设定其余碳减排和碳抵消措施的减碳潜力,原文作者开发了单独的电子表格模型来估计不同减排措施的减碳系数,研究结果得到了世界各地专家的认可,具有重要的参考价值。

碳中和低碳目标中,农业碳预算依赖于全国碳汇总量和其他行业碳减排的情况,低碳目标的实现存在一定的不确定性。此外,由于中国庞大的人口基数,即使维持较高的农产品自给率,仍会从国外进口大量的农产品(Zhao等,2021),产生相应的国

外农业碳排放。考虑到中国人均自然资源占有量少的现实情况,在中国农业用地上实现农业碳中和负碳目标是不切实际的。因此,零碳目标是中国农业碳中和政策制定的最优选择,也将是本文分析的重点。

#### 四、农业碳中和的实现路径

##### (一) 农业碳中和的潜力

依据表2的减碳潜力系数和2060年农业碳排放基线预测结果,本文计算了不同碳减排措施的减排量。不同的农业碳减排措施具有不同减排潜力,在实现难度上也存在一定的差异(见图4)。图4

中,前两列分别是2018年的农业碳排放量(801.61百万吨二氧化碳当量)、2060年基线情景的农业碳排放预测值(1321.96百万吨二氧化碳当量),之后的各列减排措施按照从易到难的顺序依次列出。

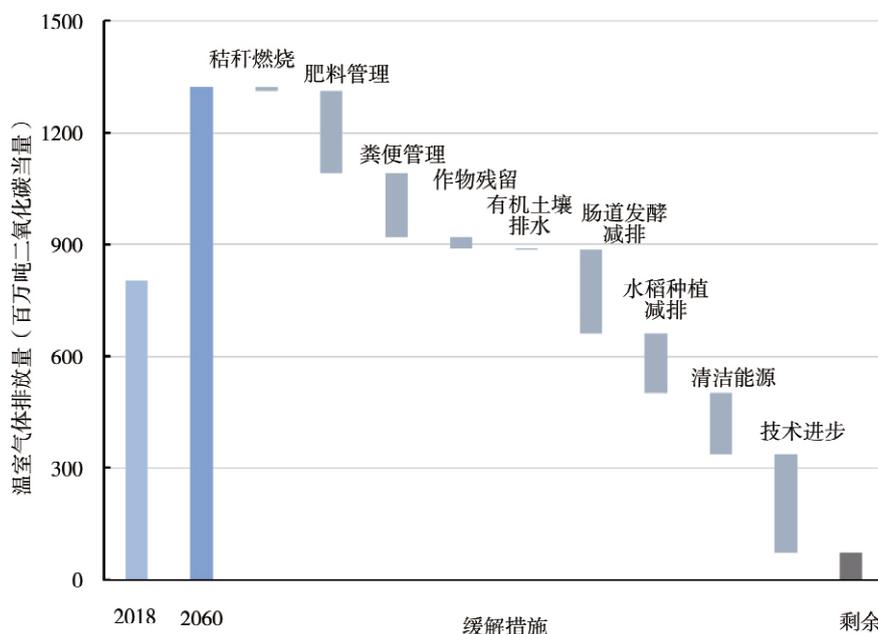


图4 我国农业碳中和的碳减排潜力

在短期内,随着中国禁止秸秆焚烧监控力度加大,预计可以减少碳排放10.31百万吨二氧化碳当量;通过测土配方施肥、有机肥替代等环境友好型施肥技术,预计可以减少碳排放218.80百万吨二氧化碳当量,减排潜力巨大。在中期,通过高效粪便管理、牧场粪便及时清理、粪便还田等粪便管理措施,预计可以分别减少碳排放72.00百万吨二氧化碳当量、66.45百万吨二氧化碳当量、33.53百万吨二氧化碳当量;通过提高及时清理作物残留并进行资源化利用,可以减少碳排放32.22百万吨二氧化碳当量。在长期,畜牧业内部最具潜力也最具有

难度的减排措施是减少牲畜反刍产生的甲烷排放,通过改善饲料结构、添加抑制剂、注射甲烷疫苗等方式,预计可以减少碳排放224.19百万吨二氧化碳当量;种植业内部贡献最大比例农业碳排放的是水稻种植,通过优化排灌环节可以抑制甲烷的产生,预计可以减少碳排放155.81百万吨二氧化碳当量;伴随着农业能源使用向新能源转型,预计能够减少碳排放163.53百万吨二氧化碳当量。综上,通过减排措施,预计可以减少农业碳排放980.60百万吨二氧化碳当量(占基线情景碳排放的74.18%),农业碳排放将降低至341.36百万吨

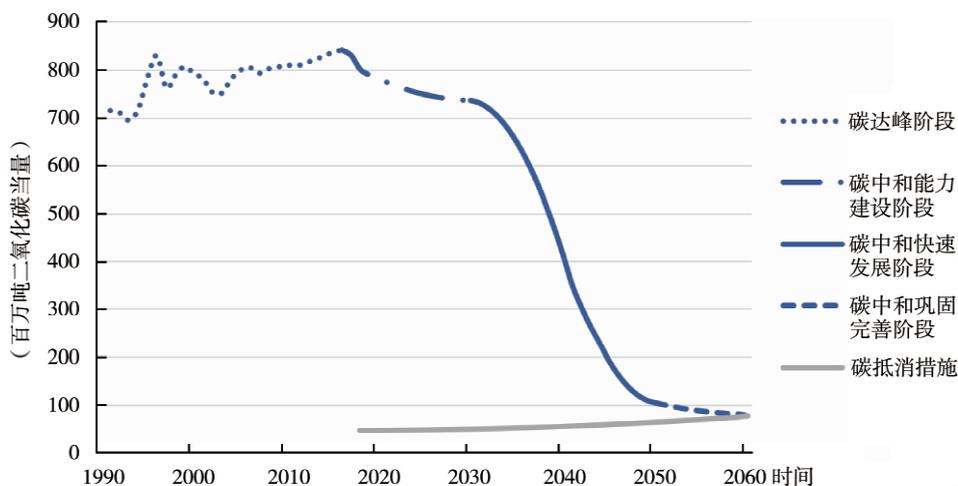
二氧化碳当量。此外,由于农业技术进步(例如育种技术、光能利用技术)和管理水平提升(例如减少食物损失和浪费)将能够使得食物转化效率提高约20%(Searchinger等,2021),从而节约一定的农业产出,减少农业碳排放约264.39百万吨二氧化碳当量(占基线情景碳排放的20%)。也就意味着,通过碳减排措施和农业全要素生产率的减排贡献,中国2060年农业碳排放将从基线情景的1321.96百万吨二氧化碳当量降低至76.97百万吨二氧化碳当量(占基线情景碳排放的5.82%)

根据Liu等(2022)的研究,预计2060年中国森林碳汇中可以为农业提供的碳排放预算为353.56百万吨二氧化碳当量。通过碳减排措施和农业全要素生产率的减排贡献,2060年中国农业碳排放(76.97百万吨二氧化碳当量)是农业可用碳排放预算(353.56百万吨二氧化碳当量)的21.78%。因此,本文认为中国有较大把握实现上述三种目标中的低碳目标。进一步,如果要实现零碳目标,需要通过碳抵消措施来实现76.97百万吨

二氧化碳当量的农业碳减排,具体方式可以借助发展生物质能源、退耕还林还草和增加土壤碳汇等,将有一定把握能够实现三种目标中的零碳目标。最后,对于负碳目标,需要考虑进口的农牧产品碳排放,预计需要在零碳目标的基础上进一步通过碳抵消措施来减少161.92百万吨二氧化碳当量,占基线情景农业碳排放预测值的12.25%,难以在国内实现。本文建议加强农业低碳技术积累,通过技术输出的方式帮助中国农产品主要进口国实现碳中和目标,从而间接实现我国农业碳中和的第三个目标。

## (二) 农业碳中和的阶段

根据中国农业碳排放从1990—2018年的趋势(见图5),1990—2016年农业碳排放波动增长了19.73%,2016—2018年农业碳排放下降了4.8%。在2018年之后,随着中国农业发展绿色转型和对温室气体减排的重视,农业碳排放将持续下降。因此,可以判断中国农业碳排放从2016年已经实现“碳达峰”。



数据来源:基于图4的减排措施和潜力和我国“双碳”战略目标的时间节点,参照现有行业碳中和阶段性路径研究(舒印彪等,2021)和农业碳减排方面的技术储备和发展趋势(McKinsey Company, 2020),将我国农业碳中和划分为四个阶段,推导得到我国农业碳中和的阶段性路径图

图5 农业碳中和实现的阶段

上述分析表明,农业碳中和的第一个目标有较大把握实现,第三个目标实现的不确定性较大。因此,本文着重选取了第二个零碳目标,分析农业碳中和实现的阶段。根据图4中不同减排措施实现时期的差异,图5反映了我国农业零碳目标的分阶

段路径。在图5中,上方线段反映了碳减排措施的作用,下方线段反映了碳抵消措施与食物转化效率提高的作用,二者之间的差异是当年的农业净碳排放。

参照现有行业碳中和阶段性路径研究(舒印

彪等 2021) 根据农业碳减排方面的技术储备和发展趋势 (McKinsey Company, 2020) 和中国“双碳”战略目标的时间节点, 中国农业净碳排放被划分为四个阶段。第一阶段为农业碳达峰阶段 (1990—2016年), 该阶段由于片面追求粮食产量的提高, 造成了严峻的生态环境问题, 农业碳排放呈现波动上升趋势。第二阶段为农业碳中和能力建设阶段 (2016—2030年), 农业碳排放在这一时期开始缓慢下降。随着中国农业农村污染治理工作的开展, 农业碳排放已经进入了缓慢下降通道。在 2030 年以前, 本文建议继续深入开展农业农村污染治理工作, 持续降低农业碳排放; 通过对人力资本和技术创新的投资, 为研发低碳技术储备相关技能和知识; 通过制度建设, 完善农业碳排放的治理体系和

治理能力, 形成完善的农业碳中和政策体系。第三阶段为农业碳中和快速发展阶段 (2030—2050年), 农业碳排放在这一阶段迅速下降, 中国进入农业碳减排关键战略时期。在这一阶段, 主要的减排措施包括减少粮食损失率、开发甲烷抑制剂和疫苗以及农业低碳技术研发和应用等, 主要的碳抵消措施包括退耕还林还草和泥炭地修复等。第四个阶段为农业碳中和巩固完善阶段 (2050—2060年)。此时, 农业的碳排放量相对较低, 阶段性的目标是不断完善和强化碳减排措施和抵消措施, 以如期实现农业碳中和目标。在这一阶段, 主要的碳减排措施包括改善农田排灌方式、使用清洁能源和采用低碳农业技术等; 碳抵消措施为开发生物质能源等。

## 五、实现农业碳中和的挑战和保障措施

相较于发达国家, 中国实现农业碳中和面临的挑战史无前例。首先, 中国农业尚未完成向现代化农业转型, 推进农业碳中和的不确定性大且选择空间小。其次, 中国农业减排固碳技术实践较晚, 低碳技术研发支撑不足。最后, 随着中国人口结构和国民膳食结构的持续性转变, 农业碳中和各阶段需要兼容粮食安全、乡村振兴等其他战略目标。因此, 中国实现农业碳中和面临的挑战包括: 一是低碳农业转型需要新要素和新技术注入、气候变化与极端天气频发等多方面的不确定性, 导致农业碳中和将面临满足农产品日益增长的刚性需求与传统农业生产要素减量降碳导致农产品供给波动之间的严峻挑战。二是《中国气候变化第二次两年更新报告》是中国目前唯一的农业温室气体排放公开数据来源, 主要依据 2014 年企业报送信息编制, 存在数据滞后、统计测算方法和标准比较粗放、缺乏动态调整等问题, 不能为农业碳排放测算和监测提供坚实的数据支撑。三是相较于发达国家, 中国农业减排固碳技术专业人才和研究基础薄弱, 检测技术、减排技术、排放源精细化管理技术等发展低碳农业的技术储备尚不充分。四是小农户的生产行为不确定性高, 应对各类风险能力差, 对低碳生产方式带来的风险与收益判断不足, 加剧了农业碳中和的实践难度。五是对畜牧业产品需求的持续增长、农业现代化进程中农业土地集约化、机械化

水平会不断提高等, 农业的能源消耗碳排放很可能同比例、甚至超比例增加, 进而农业现代化农业结构调整实现减排固碳空间有限 (赵敏娟, 2021)。聚焦这五方面挑战, 围绕充分发挥农业在经济、社会、环境等方面的多重功能, 协同推进实现农业高质量发展目标, 农业碳中和实现的保障措施包括五个方面。

(1) 提升农业投入的利用效率, 协同农业增产减排目标。农业投入利用效率的提高能够节约大量的农资生产费用, 降低农业生产成本, 可以通过调整作物生产方式、改善畜禽管理和能源结构转型等来减少农业生产碳排放。第一, 作物生产方面, 通过肥料管理、灌溉管理等方式, 减少温室气体排放的同时增加作物单位面积产量。第二, 畜禽管理方面, 主要以提高饲料转换效率为目标, 通过饲养更高效的畜产品、提高动物健康等措施, 节约生产资料的投入并减少温室气体的排放。第三, 能源使用方面, 推动农业机械装备向新能源转型, 以氢或电力替代化石能源使用。

(2) 推进农业低碳技术创新, 鼓励农户采纳低碳技术。农业减排措施的有效实施最终要依靠关键低碳技术突破与创新。在全国层面, 有必要成立专门的农业低碳技术评估小组, 为主要的农业碳源制定减排方案和目标, 科学评估各类减排技术的成本效益, 推动气候智慧型农业技术和低碳生态环保

技术的采用。此外,当前农业低碳技术推广与农户低碳技术需求之间的协同度低,导致农户对低碳技术的采纳意愿不足,亟需调动农业技术推广人员的工作积极性、发挥农业科技示范站的示范带动作用,提高农户低碳技术采纳的自愿性。

(3) 保障农业减排资金供应,健全农业低碳减排制度。在资金保障方面,加大政府财政拨款,建立农业低碳发展项目。设立低碳减排专项资金,用于支持农业碳减排方法开发、农业源温室气体监测、测量技术及仪器的研发,以及开展农业碳减排和碳交易所带来的辐射带动机制等方面的研究。在制度保障方面,不断在实践中探索和推广低碳农业发展模式,将低碳农业政策与其他农业农村优先发展、农业高质量发展等政策相联系,为实现农业碳中和提供制度保障。此外,积极推动农业低碳补偿制度和农业碳汇市场发展。碳市场对农业的碳排放和碳封存都能够起到有效的调控作用。政府通过补贴和税收的方式,支持各类企业、创新各种方式,联合农户开展农业自愿减排项目的开发和交易,利用市场机制使农业生态效益成为一种有价值的经济商品,减少排放或封存碳的部门以资金补偿的方式出售碳排放权而获得利润,而那些必须排放的部门通过税收缴纳,购买碳信用额来抵消自身碳排放量。

(4) 培育新型农业经营主体,实现小农户与低碳产业发展的有效衔接。实践证明,新型农业经营

主体自身素质和学习能力相对较高,能更好地落实国家有关农业方针政策,在农业产业化发展进程中有巨大作用。而小农户分散经营,容易造成碳排放评估和处理以及监督成本较高等问题,直接导致政府监管效率低下。加上农村劳动力老龄化和兼业程度高,农业生产农村劳动力短缺,也进一步限制了小农户参与农业碳减排行动。因此,要加快培育农业新型经营主体,设计新型农业经营主体参与低碳生产的激励机制,积极发挥新型农业经营主体的社会化服务与调度功能,通过辐射效应带动其他农户与现代低碳农业产业体系发展的有效衔接,真正将农业低碳减排行动落实到大规模的农户生产实践中,保障在2060年之前最大程度的实现农业碳中和。

(5) 完善农业碳排放数据监测与核算,编制科学农业碳源碳汇清单。中国应尽快更新和完善农业碳排放的监测、核算和报告体系。首先,参考国际标准,结合国内种养水平,制定符合国情的农业碳排放和碳汇计算标准。其次,探索建立一套数字化减碳导航模板,构建农业全生命周期碳排放数据指标体系,以提高农场主对农业碳排放的关注度。第三,通过农业碳排放监测平台强化农业排放数据核查校验,将农场主、企业报告数据与国家清单、科学研究、卫星遥感、地面观测数据等进行比对验证,增强数据准确性。

## 六、结论和展望

本文重点是分析中国2060年农业碳中和的实现路径,得出以下结论。一是目前中国农业人均碳排放量、单位农业产值农业碳排放量仍处于较低水平,2060年在不采取任何减排措施的情况下,中国年农业碳排放量将达到1321.96百万吨二氧化碳当量,相比于2018年增长64.91%。二是本文提出了中国农业碳中和的低碳、零碳和负碳的三个目标,对三个目标实现的潜力进行了评估,通过农业减排措施将能够使得2060年的基线农业碳排放量下降74.18%,有较大的把握能够实现低碳目标;通过进一步的农业碳抵消措施,将有一定把握实现零碳目标;负碳目标很难在国内实现,需要通过农业低碳技术输出到中国农产品主要进口国的方式来

间接实现。三是中国农业碳排在2016年已经实现“碳达峰”,本文规划了零碳目标的实现路径,包括能力建设阶段(2030年以前)、快速发展阶段(2030—2050年)和巩固完善阶段(2050—2060年)。基于上述研究结论,本文提出了中国未来农业碳中和推进过程中的三点展望。

(1) 制定减排时间表,推进农业碳中和。农业是中国温室气体的第二大排放来源,在实现全国碳中和目标中的作用非常重要。推进农业碳中和实现过程中,要立足中国农业发展实际,统筹考虑农业能源使用、农业经济发展、农村民生保障、成本投入等诸多因素,科学制定减排时间表和具体路线。同时考虑到农业碳中和计划实施的长时效性,需要

合理地分阶段化分解目标, 严把碳排放总量目标和分解指标, 做到有保有压。虽然中国农业碳排在 2016 年已经达峰, 但部分农业低碳发展滞后地区仍未实现农业碳达峰。因此, 在制定农业碳中和相关政策中要避免“一刀切”的情况, 要因地制宜地考虑农业碳中和重点任务及实现路径, 合理制定符合当地农业条件的碳中和任务, 协调推进各地区农业碳中和实施方案的落地。

(2) 完善农业碳中和标准、碳市场等重点领域建设。首先是加快出台规范农业温室气体排放标准以及低碳技术、低碳农产品认证标准的相关政策法规。其次, 农业碳排放权、农业碳汇市场建设步伐也将加快, 虽然目前农业碳排尚未纳入中国碳排放权交易体系, 但温室气体自愿减排碳交易活动中包含了农业减排项目, 相信未来农业减排项目也将会在碳汇市场上发育并活跃起来。

(3) 加强技术、政策、标准和规则等的国际衔接与合作。需要把握好中美、中欧、中国与共建“一带一路”国家和地区在清洁能源与气候变化合作方面的机遇, 持续推动低碳技术创新、绿色标准规则的合作。扩大与相似碳源排放国家之间的国际合作, 为各类农业减排措施的实现提供更大的资金链条, 减轻政府资金压力, 发挥农业碳中和在中国“双碳”目标实践中的重要力量。加强与各国技术人员、国际育种机构等之间的交流合作, 突破颠覆性减排技术的研发, 例如生物硝化抑制剂、高效氮肥作物、高产作物育种等。同时, 积极参与全球气候治理, 贡献中国力量和中国智慧, 通过与进口农产品的国家发展战略伙伴关系, 改进本国农业生产技术, 生产进口农产品的替代品, 帮助农产品进口国降低农业碳排放, 助力国际农业减排。

## 参考文献

1. IPCC. Global Warming of 1.5°C. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018
2. IPCC. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Working Group Report, 2006
3. Kingwell R. Agriculture's Carbon Neutral Challenge: The Case of Western Australia. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 2021, 65(3): 566~595
4. Liu X., Dou Y., Guan D., et al. Forecasting China's Food Grain Demand 2021—2050 with Attention to Balanced Dietary and Fertility Policies. Available at SSRN 3906598, 2021
5. Liu Z., Deng Z., He G., et al. Challenges and Opportunities for Carbon Neutrality in China. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022(3): 141~155
6. Mayberry D., Bartlett H., Moss J., et al. Pathways to Carbon-neutrality for the Australian Red Meat Sector. *Agricultural Systems*, 2019: 13~21
7. McKinsey Company. Agriculture and Climate Change: Reducing Emissions Through Improved Farming Practices. 2020
8. NFU. Achieving Net Zero: Farming's 2040 Goal. 2020-1-1, Available form URL: <https://www.nfuonline.com/updates-and-information/achieving-net-zero-meeting-the-climate-change-challenge/>
9. Searchinger T. D., Wierseniens S., Beringer T., et al. Assessing the Efficiency of Changes in Land Use for Mitigating Climate Change. *Nature*, 2018, 564(7735): 249~253
10. Searchinger T., Zions J., Wierseniens S., et al. A Pathway to Carbon Neutral Agriculture in Denmark. World Resources Institute, 2021
11. Springmann M., Clark M., Mason-D' Croz D., et al. Options for Keeping the Food System Within Environmental Limits. *Nature*, 2018, 562: 519~525
12. Zhao H., Chang J., Havlik P., et al. China's Future Food Demand and Its Implications for Trade and Environment. *Nature Sustainability*, 2021, 4(12): 1042~1051
13. 陈胜涛, 张开华, 张岳武. 农业碳排放绩效的测量与脱钩效应. *统计与决策*, 2021, 37(22): 85~88
14. 程广燕. 食物营养面对面第 1 期: 中国人, 肉吃多了么. [https://www.sohu.com/a/515278542\\_121119270](https://www.sohu.com/a/515278542_121119270), 2022
15. 丁仲礼. 碳中和对中国的挑战和机遇. *中国新闻发布(实务版)*, 2022(1): 16~23
16. 何艳秋, 成雪莹, 王芳. 技术扩散视角下农业碳排放区域溢出效应研究. *农业技术经济*, 2022(4): 132~144
17. 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. *农业经济问题*, 2018(9): 66~75
18. 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 王耀华, 鲁刚, 元博, 夏鹏. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究. *中国工程科学*, 2021, 23(6): 1~14
19. 田云, 尹志昊. 技术进步促进了农业能源碳减排吗——基于回弹效应与空间溢出效应的检验. *改革*, 2021(12): 45~58

20. 王 斌,李玉娥,蔡岸冬,刘 硕,任天婧,张嘉琪. 碳中和视角下全球农业减排固碳政策措施及对中国的启示. 气候变化研究进展. 2022,18(1):110~118
21. 吴贤荣,张俊飏,程琳琳,田 云. 中国省域农业碳减排潜力及其空间关联特征——基于空间权重矩阵的空间 Durbin 模型. 中国人口·资源与环境. 2015,25(6):53~61
22. 赵敏娟. 兼顾农业现代化和低碳发展有多难. 经济日报. 2021-11-03

## Analysis on the Goals and Paths of Carbon Neutral Agriculture in China

ZHAO Minjuan ,SHI Rui ,YAO Liuyang

**Abstract:** The achievement of carbon neutral agriculture is an essential part of mitigating global warming and realizing modern agricultural transformation. This study delivers a roadmap for China's carbon neutral agriculture by 2060 ,in which three goals of low-carbon ,zero carbon ,and negative carbon scenarios are designed. The analysis predicts that ,China's agricultural carbon emissions will increase by 64. 91% in the baseline scenario of 2060 compared with 2018 ,the baseline scenario emissions in 2060 have the potential to be reduced by 74. 18% through the implementation of mitigation measures ,and agricultural net - zero carbon will be achieved by additional carbon offset measures. Meanwhile ,the analysis also indicates China's agricultural emissions already peaked in 2016 and would be carbon neutral through the stages of capability building ,rapid emission reduction ,consolidation and improvement in the future. The study also discusses the additional guarantees and future prospects to achieve carbon neutral agriculture in China.

**Keywords:** Agricultural carbon emissions; Carbon neutrality; Carbon mitigation; Carbon offset; Realization path

责任编辑:吕新业