

田云,蔡艳蓉.“双碳”目标下的农业碳问题研究进展及未来展望[J].华中农业大学学报,2024,43(3):75-88.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.03.008

“双碳”目标下的农业碳问题研究进展及未来展望

田云,蔡艳蓉

中南财经政法大学工商管理学院/中南财经政法大学WTO与湖北发展研究中心,武汉430073

摘要 减少农业碳排放,提高农业碳汇能力,是我国实现“双碳”目标的重要举措,也是潜力所在,故厘清农业碳问题的研究现状及其特征具有重要意义。为助力我国“双碳”目标早日实现,本文基于农业碳排放、农业碳汇以及农业低碳发展驱动因素3个维度对已有相关研究进行全面梳理:首先,明确了农业碳排放的基本概念并介绍了常见的测算方法,同时基于时序演变、空间分布、效率特征、减排路径等视角对其研究现状进行了回顾;其次,界定农业碳汇的基本概念,进而引申出森林碳汇、土壤碳汇和海洋碳汇并介绍各自的测算方法,而后则围绕农业净碳汇与碳汇市场化展开重点阐述;最后,从宏观和微观2个层面探讨影响农业低碳发展的主要因素,其中前者着眼于政策、经济、社会等方面,而后者则侧重于户主的内在因素和农户面临的外部环境。针对未来农业碳问题的研究方向,本文认为可重点围绕以下4个方面,即农业碳达峰的科学预测与差异化减排路径设计、农业减碳固碳潜力的科学评估与实现路径探讨、农业碳市场的构建与碳汇价值变现的思路探索以及农户低碳生产技术供需匹配探究与其制度优化。

关键词 农业碳问题;农业碳排放;农业碳汇;农业低碳发展

中图分类号 F323 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)03-0075-14

近年来,全球气候系统极不稳定,海平面上升、城市热岛效应加剧、生物多样性遭受破坏等,这一系列由全球气候变暖引发的“蝴蝶效应”不容忽视。为了应对气候变化带来的不利影响,习近平总书记在第75届联合国大会上明确提出“中国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”目标(以下简称“双碳”目标),向世界各国做出庄严的“绿色承诺”。在此背景下,除了需要关注二、三产业的节能减排外,亦不可忽视兼具碳源与固碳双重属性的农业生产部门所能发挥的重要作用。一方面,农用物资投入量的快速增加、农地的大规模种植以及畜禽养殖活动的广泛存在,导致了大量的碳排放;另一方面,农作物生长过程中光合作用的存在以及农田土壤所拥有的固碳属性,能大量吸收或封存空气中的二氧化碳。减少农业碳排放,提高农业碳汇能力,是我国实现“双碳”目标的重要举措,也是潜力所在。目前,学术界围绕农业碳问题已展开了大量研究,并形成了一系列有价值的研究成果,为

类似问题的后续研究奠定了坚实基础。但同时,现有研究也存在一定的局限性,主要表现为成果数量虽多,系统梳理却稍显不足,且缺乏对未来研究动向的科学展望。基于此,笔者拟从农业碳排放、农业碳汇以及农业低碳发展驱动因素3个维度对已有研究进行全面梳理,在此基础上对未来农业碳问题的研究方向进行合理展望,以期为农业生产领域减排增汇路径的探索提供新思路,助力我国“双碳”目标早日实现。

1 农业碳排放问题研究现状

1.1 农业碳排放概念界定及碳源确定

农业碳排放是农业生产过程中所产生温室气体的一个总称,但其概念并非一直就有。早期,农业温室气体这一说法得到了更多学者的认可,其数量多少与土地利用、农作物施肥、水稻生长、畜禽养殖等密切相关^[1]。Pretty等^[2]在探讨可持续农业与可再生资源管理的温室气体减排效应时,发现农业生产

收稿日期:2024-01-27

基金项目:国家社会科学基金项目(23BGL189);国家自然科学基金项目(71903197);中南财经政法大学中央高校基本科研业务费专项(2722022AL003;2722023EJ012);2023年度河南省高校哲学社会科学创新人才支持计划(2023-CXRC-21)

田云,E-mail:tianyun1986@163.com

通信作者:蔡艳蓉,cyr11150416@163.com

系统会因为化石燃料使用、农用物资投入以及土壤有机质流失等原因导致碳排放,农业碳排放概念初具雏形。与此同时,West等^[3]基于农业投入物与农机能源消耗测算了其碳排放,但仍局限于二氧化碳这一温室气体。而在接下来一段时期内,农业温室气体排放概念相比农业碳排放概念运用更为广泛,后者即便存在也多被用来指代某一类温室气体排放。比如,董红敏等^[4]仍称水稻种植和畜禽养殖引发的碳排放为农业温室气体排放,李国志等^[5]则将单一的农业能源消费碳排放界定为农业碳排放。直到李波等^[6]基于化肥、农药、农膜等6类碳源对碳排放进行测度,农业碳排放概念才正式形成,即指农业生产过程中由于人为活动(包括农业生产资料投入、农业机械作业等)所导致的碳排放。在此基础上,田云等^[7]基于农业能源利用、农用物资投入、水稻种植、畜禽养殖等4个维度重构了农业碳排放测算体系,使其理论边界得到了较大拓展。

基本概念明确之后,则是具体碳源的确定,而相比二、三产业,农业碳源更具复杂性,现有研究通常从投入产出角度和生产过程角度明确碳源。其中,投入产出视角主要指农业生产活动中所消耗的各类物资,涉及到要素投入与能源消费。关于要素投入,一些学者^[6,8]将化肥、农药、农膜、农用机械耗能都归于此类,特指它们生产、运输以及使用过程中所产生的碳排放^[9]。至于能源消费,初期主要聚焦于原煤、柴油、汽油、电力等一些农业生产过程中的直接能源投入;而随着研究的不断深入,农产品生产、加工及运输过程中所消耗的煤炭、焦炭、汽油、电力等也被纳入了进来,计算间接的农业碳排放^[10]。从生产过程角度来看,水稻生长、畜禽养殖以及生物燃烧等均会导致碳排放产生。稻田土壤中存在大量的产甲烷基质和产甲烷菌,它们氧化后会形成甲烷并通过水稻植株排放到大气中^[11]。畜禽养殖活动中,部分草食性和反刍动物在摄入纤维素饲料后,会因为肠道发酵产生甲烷,同时在其粪便堆放过程中,微生物作用下会发生反硝化和硝化反应,由此生成氧化亚氮,构成了农业碳排放的又一重要来源^[12]。生物燃烧多指农作物秸秆焚烧,在其燃烧过程中会产生大量二氧化碳和甲烷^[13]。

1.2 农业碳排放测算方法

农业碳排放测算方法主要包括排放系数法、生命周期法、投入产出法和实地测量法等4种。其中,排放系数法主要是将IPCC公布以及部分学者^[14]模

拟实验测算得来的排放系数与确定的碳源数据相乘,得到农业领域各类温室气体的排放量,而后统一置换成标准二氧化碳,最后汇总即为农业碳排放总量。该方法适用范围较广,可运用到宏观、微观等不同场景,且公式构造简明,原理通俗易懂;但稍显不足的是,碳排放系数易受农业生产管理方法、作物类型的影响,不确定性较强。生命周期法是自下而上的过程分析法,首先确定农业生产过程中直接或间接产生碳排放的活动,而后利用碳排放因子对相关活动的碳排放量进行测算,最后相加即可得到农业生产生命周期内所有活动的碳足迹^[15]。该方法操作较为简单,但由于碳排放活动的界定具有一定主观性,若不能完整界定极易造成边界截断,致使测算结果不够准确。投入产出法是利用里昂惕夫逆矩阵并结合投入产出表全面分析农业生产投入品各上游生产阶段直接与间接的能源需求,进而基于能源碳排放因子测算农业碳排放量^[16]。由于所需数据量较大且操作相对复杂,该方法较少被使用,一般只用于农业能源碳排放分析。实地测量法是利用相关测量仪器获取各类碳源的排放数据再进行汇总得到最终碳排放量的一类方法^[17]。该方法计算结果较为精准,但由于数据获取困难且成本投入较大,更适用于微观层面的农业碳排放测算。

1.3 农业碳排放研究进展

基于农业碳排放测算体系的构建,学者们对中国农业碳排放进行了测算。现有研究表明,自1961年开始,中国农业碳排放量就始终处于波动上升态势,尤其是改革开放以来至21世纪初期这段时期内,增长趋势尤为明显;不过,自此之后农业碳排放增速明显放缓,近几年甚至处于下降趋势,全国已趋近达峰^[18]。从气体成分来看,虽然二氧化碳占比上升趋势明显且增速越来越快,但目前农业碳排放仍以甲烷和氧化亚氮为主,二者占据了农业碳排放总量的85.67%^[19]。从碳源结构上来看,随着农业现代化进程的不断加快,能源消耗正逐渐成为农业碳排放的主要来源,而水稻种植以及化肥、农药、塑料薄膜等农用物资的使用也扮演了重要角色^[20]。

从地理空间来看,除了一般省际比较之外,现有研究多立足于东、中、西三大地带和粮食生产三大功能区对农业碳排放的空间收敛、影响因素以及溢出效应等展开探讨。从绝对数量来看,农业碳排放总量以中部地区居首,东部地区居中,西部地区最后,且中部与东西部地区之间的差距相对较大,集聚效

应正不断减弱^[21]。粮食主产区种植结构的“趋粮化”虽然会影响农资投入,进而导致大量碳排放,但由于更多的财政资金和农业绿色技术投入使用,其农业碳排放强度却低于非粮食主产区^[22]。整体来看,中国农业碳排放呈“中心-外围”模式分布,并有向“外围”扩散的趋势,其空间正相关性呈减弱态势且空间差异逐渐扩大,在一定程度上具有路径依赖或空间锁定特征^[23]。

与此同时,学者们还围绕农业碳排放效率及碳减排潜力展开了大量研究,其视角聚焦于国家、区域、省际、县域等多个层次。其中,关于农业碳排放效率的测度,较为通行的做法是将农业碳排放作为非期望产出纳入农业生产投入指标体系中,以此衡量碳排放作用下农业活动的经济价值^[24]。综合研究表明,虽然中国农业碳排放效率整体呈逐年递增趋势但省域间仍有差异^[25];不过,区域农业碳排放效率整体存在正向溢出效应^[26],且低效率省份正逐步向高效率省份靠近^[27]。至于农业碳减排潜力,不同省份表现出了极大差异,其中西藏、海南、青海等地排名居前^[28];进一步基于三大主粮作物,利用历史增速模拟和现有政策模拟对中国各省份农业碳减排潜力进行预测,发现西部、中部省份的减排潜力要明显高于东部省份^[29]。

为了推进农业碳减排,学者们从政策设计、技术创新、机制构建等多个维度提出了相应策略。一方面,需不断强化制度层面的创新,积极发挥数字普惠金融^[30]、政策性农业保险^[31]在农业碳减排上的助力作用;另一方面,要加快农业低碳生产技术的创新与普及,构建适宜多元主体约束的激励制度,积极引导农户应用免耕、氮肥减施、间歇灌溉等农艺措施,减少农业碳排放^[32];除此之外,建立健全市场与政府相结合的农业碳减排补偿机制^[33],开展生态环境综合治理、废弃物沼气开发、畜禽粪污资源化等一系列农业领域PPP项目^[34],不断提高农业减排固碳水平。

2 农业碳汇问题研究现状

2.1 农业碳汇相关概念界定

碳汇概念最早出现于减缓气候变化领域,《京都议定书》中将其定义为,从空气中清除二氧化碳的过程、活动和机制。根据生态系统的不同,碳汇分为陆地碳汇和海洋碳汇。早期农业碳汇研究主要聚焦于陆地生态系统,除了对农田土壤固碳潜力^[35]进行探讨外,学者们重点关注了农作物的吸碳能力,认为农

业碳汇是指农作物通过光合作用从空气中吸收二氧化碳并释放氧气的过程^[36]。而随着相关研究的不断丰富,金书秦等^[37]从更为全面的视角对农业碳汇进行了界定,认为农业碳汇是通过种植农作物、植树造林、实施农田管理以及开展非投饵的渔业生产等措施固定和吸收大气及水体中的二氧化碳,从而降低大气中温室气体浓度的过程。结合该定义,农业碳汇细分领域下又包含林业碳汇、土壤碳汇和海洋渔业碳汇等。

由于植物光合作用的存在,树木一直被认为是陆地上最主要的碳汇,由此也衍生出了森林碳汇与林业碳汇2个不同概念,且不少研究还将它们混用,但就其概念而言,二者是存在明显区别的。其中,森林碳汇是指森林生态系统吸收空气中的二氧化碳并将二氧化碳固定在植被和土壤中,从而减少大气中二氧化碳浓度的过程^[38]。林业碳汇是指通过植树造林、减少毁林、保护和恢复森林植被等林业活动,吸收和固定大气中二氧化碳的过程^[39]。通过比较可知,森林碳汇主要强调森林的自然属性而突出其吸碳特性,而林业碳汇更为强调人的参与,侧重于森林的经济社会属性^[40]。故而在后续的研究中,学者们对二者需严格区分,切忌混为一谈。

同森林一样,土壤也是陆地生态系统碳循环的重要组成部分。土壤碳汇是指植物在生长过程中通过光合作用吸收大气中的二氧化碳并将二氧化碳以有机质的形式存储在土壤碳库中,使得大气中温室气体浓度降低的过程^[41]。耕地碳汇、草地碳汇和湿地碳汇等均是依靠土壤微生物实现,属于土壤碳汇的不同表现形式。其中,相较草地和湿地,耕地更易受人为干扰且可在短时间内调节,由此更受学界关注。耕地碳汇,又称农田土壤碳汇,起初是指农作物通过光合作用固定碳并通过土壤成岩作用转化为土壤有机质的过程^[35]。而后一些研究表明,耕地种类^[42]、农地利用方式^[43]等均会影响到耕地的固碳能力。为此,白洋等^[44]进一步拓展了耕地碳汇概念,不仅考虑到了固碳过程,更强调了耕地固碳能力的提升,具体措施包括秸秆还田、种养结合模式等。

除了陆地,海洋生态系统也是吸收二氧化碳的重要碳库。海洋浮游植物,如绿藻、红藻和褐藻等,可以充分吸收被太阳紫外线光分解溶解的有机碳^[45];同时,海岸带植物群落、贝类等也有较强的碳捕捉和储存能力^[46]。相比陆地碳汇,海洋碳汇具有储碳周期长、碳吸附密度强、自身循环规律等特

点^[47]。虽然当前国际官方层面对海洋碳汇并无直接定义,但根据政府文件中一些常见的提法,并结合李纯厚等^[48]的研究,海洋碳汇通常被认为是海洋从大气中清除二氧化碳及其前体的任何过程,其实现主要依靠海洋中的贝类、藻类等水生生物,它们通过光合作用吸收二氧化碳并储存在自身体内,使得空气中二氧化碳浓度降低。相比海洋碳汇概念的较难明确,由于部分渔业产业可以依靠人工养殖实现碳汇功能,学术界引申出了渔业碳汇概念,即渔业生产活动可以促进水生生物吸收水体中的二氧化碳,然后通过收获将这些已经转化为生物产品的碳移出水体的过程和机制^[49]。

2.2 农业碳汇测算研究

根据研究对象的不同,农业碳汇测算可以大致分为3类,即常规农业碳汇测算、林业和土壤碳汇测算、海洋及渔业碳汇测算。

1)常规农业碳汇测算。此类测算主要考察农作物生长全生命周期中的碳吸收,又被称为种植业碳汇或耕地碳汇。在查找水稻、小麦、玉米、豆类等十余种农作物的经济系数、含水率和碳吸收率的基础上对各自碳汇量进行测算,而后将其加总即为种植业总碳汇^[50]。耕地碳汇的测算方法与种植业较为类似,同样需要搜集各类农作物的含碳量、含水率以及经济系数,但稍显不同的是,耕地碳汇除了要关注农作物光合作用下的固碳量外,还需考虑其非经济生物量,即地上秸秆量和地下根茬量。为此,在对耕地碳汇进行测算时,需在种植业测算模型的基础上增加根冠比,对弃置秸秆和根茬生物量进行估算^[51]。与此同时,还有不少学者围绕农业净碳汇展开研究,即考察农作物生长过程及农田产生的碳汇与农业碳排放之间的差值,以便更好地呈现地区碳汇发展潜力^[52]。

2)林业和土壤碳汇测算。关于二者的测算目前尚未形成相对统一的标准,方法与系数值选择的不同导致测算结果差异较大。对于林业碳汇,学术界逐渐形成了以生物量储存碳和碳通量监测为基础的2类测算方法。其中,生物量法是采用各种技术手段获取不同尺度森林生物量数据,然后利用计量或人工智能等方法估算其碳汇量,包含模型模拟法^[53]、生物量换算因子法^[54]和遥感估算法^[55]等;碳通量法则是利用相关仪器观测森林植被所在区域二氧化碳浓度,然后根据气体浓度变化测算碳汇量,主要包括微气象学法^[56]和箱式法^[57]。至于土壤碳汇,常见测算

方法包括Meta分析、土壤调查数据差减和过程模拟等3类,主要通过测量和建模实现^[58]。与此同时,IPCC也提供了3类测算方法(缺省方法、纳入国家特定数据和高级估算系统),但限于数据来源的不同以及方法自身的差异,致使测算结果依旧差异较大。值得注意的是,即便目前林业碳汇和土壤碳汇的测算体系尚未统一,但仍有学者尝试将它们与常规农业碳汇汇总,并界定为广义农业碳汇^[59]。

3)海洋及渔业碳汇测算。学者们结合海洋碳汇定义,基于“可移出碳汇”概念对海洋渔业碳汇进行了测算。孙吉亭等^[60]认为,贝、藻类养殖以及增殖放流是渔业实现碳汇的主要方式。而在更早的时候,张继红等^[61]根据贝藻养殖产量、体内碳元素含量及其能力收支模型测算出了贝藻养殖碳汇量。随后,岳冬冬等^[62]利用碳汇转换系数、质量占比以及碳含量3个参数对我国贝类养殖的直接碳汇量进行了测算。进一步,邵桂兰等^[63]基于干重系数和固碳系数测算了贝类、藻类的海水养殖碳汇量。不过,该测算忽视了贝类生物体中碳的不同来源,即将部分不具有碳汇功能的碳纳入到了测算模型,从而在一定程度上导致了测算结果的偏高。但同时,对于贝藻类生长过程中释放颗粒有机碳和溶解有机碳形成的碳汇该测算却未涉及,如此又可能导致测算结果偏低。基于此,杨林等^[64]将上述2个因素充分考虑在内,重新构建了测算模型,进而确保了海洋碳汇测算结果的科学性。

2.3 农业碳汇研究进展

随着测算体系的日臻完善,近年来关于农业碳汇的研究成果越来越多。鉴于农业兼具碳源、碳汇双重属性,学者们更为关注农业净碳汇的变化趋势。其中,国外学者主要对不同国家和局部地区农业净碳汇进行测算和比较,涵盖美国、加拿大、东欧等国家和地区^[65-66]。国内学者多基于省域尺度对中国农业碳汇及净碳汇进行测算与分析。研究发现,中国农业碳汇功能发挥稳定,固碳量持续稳步上升,主要归功于农作物自身固碳能力与稻田土壤固碳能力不同程度的增长^[67]。关于农业净碳汇,国家层面整体上升趋势较为明显^[68],各省份绝对数量差异较大且内部差距也逐步扩大^[69]。随着中部地区增速的加快,我国农业净碳汇东西差异日益缩小,南北差距却呈扩大趋势^[70]。

与此同时,农业碳汇市场化也是近年的研究热点。农业碳汇潜力巨大,具有较强的市场交易价值,

目前已在国际上引起了广泛关注,如澳大利亚的农田碳汇项目^[71]。国内的碳汇市场化研究要略晚于国外,多围绕碳汇交易及其交易保障机制展开,且研究对象以林业碳汇为主。其中,曹先磊等^[72]立足于碳交易视角,对我国林业碳汇生态补偿的优化管理进行了初步探究。曾维忠等^[73]从扶贫视角出发,强调要深入挖掘森林碳汇的减贫潜力。田刚等^[74]则在分析中俄森林碳汇供给能力的基础上,构建了两国碳汇交易市场的发展路径及对应的保障措施。除此之外,学者们还围绕林业碳汇交易的产权体系^[75]、质押贷款融资模式^[76]等展开了深度探讨,以期助力我国尽早建立健全全国统一林业碳汇交易支付体系,促进碳汇生态价值和经济价值的实现。

3 农业低碳发展驱动因素研究进展

基于当前“双碳”目标早日实现的迫切要求,推进农业低碳发展已刻不容缓,而其关键在于驱动因素的精准识别,以便于针对性策略的制定。为此,越来越多的学者开始围绕农业低碳发展的驱动因素展开探讨,并取得了一系列有价值的研究结论,在此本文将从宏观和微观2个层面进行系统梳理。

3.1 宏观层面因素识别

推进农业低碳发展是一项全面系统的工程,其进展能否顺利显然会受到宏观外部大环境的影响。为此,有必要对宏观层面的相关因素进行阐述,以便后续可以趋利避害,具体涉及到了政策因素、经济因素以及社会因素。

1)政策因素。政策效应被广泛认为是实现农业碳减排的有效路径之一,主要依靠环境规制、碳税征收、碳交易等手段实现减排目标。环境规制体现了政府对环境保护的重视程度,其力度越大,越有利于农业碳减排^[7]。环境规制手段可分为命令控制型、市场激励型、自愿性和隐性等4种,其中市场激励型环境规制更有利于激发农户减排行为^[77]。关于碳税, Schneider等^[78]利用一般均衡模型模拟发现,碳税与补贴的科学设计不仅能提高农户福利,还可减少农业碳排放。然而, Dumortier等^[79]研究发现,碳税政策虽然有力改变了美国农作物进出口贸易模式,但也导致了其他国家和地区土地利用结构的再分配,进而引起全球温室气体排放量增加。除此之外,粮食主产区倾斜政策、政策性农业保险等同样对农业碳排放产生了影响。其中,粮食主产区倾斜政策可以通过扩大土地经营规模的方式达到抑制农业碳排

放增长的目的,在长江经济带该项政策展现出了极为明显的减排效果^[80]。政策性农业保险可以通过规模效应、结构效应与技术效应改变农业生产方式,进而促进农业碳减排,该项政策在东部地区成效明显^[31]。除此之外,金书秦等^[81]就农业碳交易市场如何助力农业碳减排进行了初步探索,认为政策层面有必要将农业纳入碳减排交易范围。

2)经济因素。经济因素被认为是导致农业碳排放增加的关键动因。学者们多从农业经济发展、农村金融发展、农业产业结构、产业集聚、财政支农等视角切入展开相关分析。其中,农业经济增长与农业碳排放之间存在“倒U型”关系^[6],且二者之间存在的拐点甚至不只一个^[82]。相比传统金融普遍存在的“金融排斥”,数字普惠金融不仅能为农业低碳生产提供资金保障,还能提高农民环保参与积极性,促进低碳、绿色农业生产经营模式被广泛采用,切实减少农业碳排放^[83]。目前中国农业产业结构仍以种植业、畜牧业为主,其中前者兼具碳源与碳汇双重属性,而后者主要表现为碳排特征,故畜牧业占比的持续上升将不利于碳减排^[84]。产业集聚水平的提升可以带来规模经济和范围经济,促使农业专业化、集约化水平提升,进而降低农业碳排放强度^[85],但在特定阶段也可能不利于农业低碳发展^[86]。关于财政支农对农业碳排放的影响,目前学界仍存争议,有学者认为财政支农能有效促进农业碳减排^[87],但也有学者研究发现财政支农在一定程度上会扭曲要素投入结构,刺激农户增加化学品投入而导致农业碳排放增加^[88]。

3)社会因素。社会的发展与变迁亦会对农业低碳发展产生显著影响。学者们主要探讨了城镇化水平、农业社会化服务等对农业碳排放的影响。其中,关于城镇化对农业碳排放产生了何种影响,目前学界并未达成统一观点。一方面,城市化进程的加快改变了农村劳动力结构,使农村劳动力结构趋于老龄化、女性化和兼业化,农业生产面临巨大挑战,为了避免农业减产,剩余农户会选择投入大量生产要素,由此导致农业碳排放量剧增^[89];另一方面,农村青壮年劳动力的减少一定程度上会促进资本密集型生产,提高农业生产的劳动生产率与资源利用率,进而实现农业碳减排^[90]。农业社会化服务主要表现在为农业生产链提供大量的基础服务、生产经营服务、金融和流通服务,其水平的提升能极大提高资源利用率,减少农业碳排放^[91]。其中,农业交通运输服

务、农业批发与零售服务投入对农业碳排放的抑制作用最为明显^[92],而农业生产性服务主要通过促进规模经营、调整种植结构等途径降低农业碳排放水平^[93]。

3.2 微观层面因素识别

截至目前,农户在我国农业生产中仍扮演着重要角色,是农业生产活动的组织者、实施者和决策者,其低碳生产意愿与低碳技术采纳水平会影响到农业低碳发展。正是基于此,近年来探讨农户低碳生产意愿与低碳生产行为决策的微观类研究越来越多,涉及到了内在与外部层面的影响因素。

1) 内在因素。影响农户低碳生产意愿与行为的内在因素包括户主个体特征、技术认知、心理特征等。其中,以性别、务农年限、生产态度等为代表的户主个体特征均会对农业低碳生产意愿及行为产生影响。相比女性,男性户主对新生事物的接纳程度更高,且冒险精神的存在使得男性更愿意选择低碳生产^[94]。相比务农时间较短的户主,务农经验丰富的户主对各类先进农业生产技术更易产生排斥心理,由此导致农业低碳生产意愿较低^[95]。低碳生产态度作为前置驱动因素,决定了户主的低碳生产意愿,只有当意愿达到某个临界点后,户主才会选择低碳生产行为^[96]。户主技术认知主要包括信息获取与受教育程度。信息获取能力较强的户主,更能意识到农业低碳发展的重要性,其低碳生产意愿由此增强^[97]。受教育程度较高的户主对低碳生产的认知程度更深,不仅倾向选择低碳生产技术,还能有效提高技术利用效率^[98]。户主心理特征主要包括预期收益感知、风险感知等。户主对低碳农产品的价格预期越高、声誉预期越好,其农业低碳生产意愿就越强^[95]。当户主对农业低碳生产技术的应用结果处于不确定状态时,其风险感知越强,低碳生产意愿越弱^[99]。

2) 外部因素。政府引导、劳动力转移等是影响农户低碳生产意愿与行为选择的外部因素。其中,政府自上而下的引导会吸引大量农户选择低碳生产技术,而群体效应的存在使得余下农户也偏向于低碳生产技术的应用,以此寻求社会认同^[100];当然在这过程中,政府及农技部门也需通过有效措施不断消除农户对潜在技术风险的担忧^[101]。与此同时,政府通过约束或者激励手段亦能对农户低碳生产行为选择产生积极影响,一方面,政府对低碳农资市场的有效监管为农户低碳生产创造了有利的外部环境,

加之对一些高污染生产行为的法律约束,促进农户主动转向低碳生产^[102];另一方面,政府通过财政支持等手段给予农户低碳补贴,在农业产量得到基本保障的前提下,农户也会倾向选择低碳生产方式^[103]。劳动力转移一方面意味着农业生产劳动力数量的减少,为了弥补劳动力的不足,农户会选择使用化肥、农机等高碳生产方式以维持产量^[104],另一方面也会有助于农户家庭用能优化,高碳能源消耗减少,进而促进农业碳减排^[105]。

4 农业碳问题研究的未来展望

4.1 农业碳达峰的科学预测与差异化减排路径设计

中国政府已明确提出要在2030年之前实现碳达峰。在这进程中,二、三产业固然是减碳的主战场,是整个达峰工作能否顺利实现的关键所在,但我们亦不可忽视农业碳排放问题。截至目前,虽然也有研究围绕农业碳排放的达峰问题展开初步探讨,但囿于农业碳排放测算指标体系的非全面性,其研究结论的普适性受到了极大影响。为此,有必要在科学重构指标体系并完成农业碳排放再测算的基础上,对中国及各省份农业碳排放的达峰时间及峰值水平展开合理预测,进而明确各自碳达峰如期实现的可能性。具体而言,首先,在进行相关理论阐述的基础上实证检验影响农业碳排放的关键性因素;其次,构建预测模型,完成相应参数设定与情景设置,代入相关数据对中国及各省份的农业碳排放达峰情况进行合理预测;再次,评估中国及各省份农业碳减排成效,结合各自农业碳排放峰值预测结果,准确识别减排“后进省份”;从次,在保证国家总体战略的前提下,对于如期达峰困难的减排“后进省份”,结合其农业碳排放现状特征及减排成效构建差异化的减排路径,比如可进行目标重构与路径优化,即完成时间可延迟,但总体要求相应拔高;最后,可从制度、资金、宣传等不同维度完成农业碳减排支持政策体系的构建,为农业碳达峰目标的实现提供必要保障。

4.2 农业减排固碳潜力的科学评估与实现路径探讨

“双碳”目标能否如期实现,很大程度依赖于减排固碳能力的提升。在这一过程中,大力推进二、三产业降碳减排固然重要,但绝不可忽视农业部门的重要作用。不同于二、三产业单一的碳排放特征,农业兼具碳排与固碳的双重属性。该特质决定了农业

对于“双碳”目标实现的重要性,具体表现为,减排可助力碳排放早日达峰,固碳则是碳中和实现的重要保障。那么,在明晰农业减排固碳价值的基础上,其潜力评估的关键着力点及具体思路是什么?如何在优化目标的前提下探索农业减排固碳潜力实现的差异化路径,进而构建有助于农业减排固碳潜力充分实现的政策支持体系与保障机制?上述问题不仅是探究农业生产低碳转型迫切需要解决的重要科学问题,更是推动国家早日实现“30·60双碳目标”亟待回答的重大现实问题。实际分析中,可以遵循“减排固碳潜力评估—减排固碳潜力实现的路径探讨—减排固碳潜力实现的政策机制保障”的逻辑主线,以国家《农业农村减排固碳实施方案》所重点倡导的化肥减量增效、农机绿色节能、稻田甲烷减排、农田碳汇提升等模式为例,探讨农业的减排固碳潜力,进而在完成其目标优化与路径设计的基础上,构建有助于推动农业减排固碳潜力实现的政策支持体系。

4.3 农业碳市场的构建与碳汇价值变现的思路探索

全国统一碳排放权交易市场已于2017年底正式建立,但农业尚未被整体纳入碳市场之中,目前仅有少量农业减排项目参与温室气体自愿减排碳交易活动。在此背景下,亟需建立健全农业碳市场,加快推动农业碳交易。而为了更早日更好地让碳汇价值变现,以下几方面研究工作亟待开展:一是着力提高农业碳排碳汇的测算精度。可在现有指标体系的基础上,将更多的碳源、碳汇纳入到测算体系,并借助大数据、云计算等信息技术对原始数据测量误差进行修正,同时选择与实际情形相匹配的测算方法,切实提高测算结果的准确性,为农业碳交易提供可靠的数据支撑。二是积极探索能充分发挥农民市场主体作用与政府宏观调控能力的制度体系。政府既要通过针对性培训提高农民对碳市场的认知,给予必要的技术、资金支持引导农民强化低碳生产并参与到碳交易活动中;也需不断完善相关的政策制度与法律法规体系,为农业碳交易市场发展创造良好条件,积极引导减排企业特别是农业减排企业在交易市场中优先购买农业碳汇产品。三是系统总结国外经验并强化国际交流与合作。认真学习美国、德国、新西兰等发达国家在农业碳交易市场建设上的一些典型做法,为中国农业碳交易试点项目的开展提供经验借鉴;同时加强对外交流,与其他国家友好合作,共同探索农业碳交易新模式。

4.4 农户低碳生产技术供需匹配探究与其制度优化

近年来,虽然以涉农企业、各类合作经营组织为代表的农业新型经营主体正不断涌现,但以小农经济为主的农业生产模式仍未改变,普通农户依然是从事农业生产活动的第一行为主体。为此,有必要围绕农户低碳生产技术的现实需求与供给匹配展开研究。其中,需求层面,在完成农业低碳生产技术甄别与分类的基础上,组织专业队伍奔赴农业生产典型地区开展农户调研工作,搜集大量一手数据,而后理论探讨与实证分析相结合,明晰农户农业低碳生产技术的需求偏好、采用意愿、行为及其影响机制。供给层面,针对实地调研所获取的信息反馈,技术供给方应不断强化技术创新,研发出与农户需求相匹配的农业低碳生产技术。在这过程中,需充分调动科研院所、涉农企业、社会团队等各类科研创新主体的积极性,集中优势资源联合攻关,推动农村新能源、绿色肥料、农业碳捕捉等关键技术的研发,同时强化数字技术在农业生产领域的应用。为了促进农业低碳生产技术的供需衔接,政府还应在制度及措施方面予以支持。一方面,需强化对农业低碳发展的财政支持。比如为农业低碳技术研发设置专项资金,对购买和使用农业低碳生产资料的农户给予价格补贴等。另一方面,大力促进农业低碳生产技术的推广与应用。通过示范或试点地区,加强农业低碳生产技术推广,加快技术成果转化并充分发挥示范辐射作用,扩大低碳技术的应用范围。

参考文献 References

- [1] 张厚瑄,李玉娥. 减缓农业生产中温室气体排放的对策及其经济可行性初探[J]. 中国农业气象, 1996(5): 7-11. ZHANG H X, LI Y E. Study on countermeasures and economic feasibility of reducing greenhouse gas emissions in agricultural production[J]. Chinese journal of agrometeorology, 1996(5): 7-11 (in Chinese).
- [2] PRETTY J N, BALL A S, LI X Y, et al. The role of sustainable agriculture and renewable-resource management in reducing greenhouse-gas emissions and increasing sinks in China and India[J]. Philosophical transactions of the Royal Society A-mathematical physical and engineering sciences, 2002, 360 (1797): 1741-1761.
- [3] 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(1/2/3): 217-232.

- [4] 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[J]. 农业工程学报, 2008(10): 269-273. DONG H M, LI Y E, TAO X P, et al. Greenhouse gas emissions from agricultural sources in China and technical countermeasures for emission reduction[J]. Transactions of the CSAE, 2008(10): 269-273(in Chinese with English abstract).
- [5] 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[J]. 农业技术经济, 2010(10): 66-72. LI G Z, LI Z Z. Factorization of carbon emissions from agricultural energy consumption in China: an empirical analysis based on LMDI model[J]. Journal of agrotechnical economics, 2010(10): 66-72(in Chinese).
- [6] 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. Temporal and spatial characteristics and influencing factors of agricultural carbon emissions in China[J]. China population, resources and environment, 2011, 21(8): 80-86(in Chinese with English abstract).
- [7] 田云,尹恣昊. 中国农业碳排放再测算: 基本现状、动态演进及空间溢出效应[J]. 中国农村经济, 2022(3): 104-127. TIAN Y, YIN M H. Re-evaluation of China's agricultural carbon emissions: basic status, dynamic evolution and spatial spillover effects[J]. Chinese rural economy, 2022(3): 104-127(in Chinese with English abstract).
- [8] 曾大林,纪凡荣,李山峰. 中国省际低碳农业发展的实证分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(11): 30-35. ZENG D L, JI F R, LI S F. An empirical analysis of Chinese provincial low carbon agriculture development[J]. China population, resources and environment, 2013, 23(11): 30-35(in Chinese with English abstract).
- [9] 田云,张俊飏,尹朝静,等. 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, et al. Distributional dynamics and trend evolution of China's agricultural carbon emissions: an analysis on panel data of 31 provinces from 2002 to 2011[J]. China population, resources and environment, 2014, 24(7): 91-98(in Chinese with English abstract).
- [10] 史常亮,郭焱,占鹏,等. 中国农业能源消费碳排放驱动因素及脱钩效应[J]. 中国科技论坛, 2017(1): 136-143. SHI C L, GUO Y, ZHAN P, et al. Driving factors and decoupling effect of carbon emissions from energy consumption: evidence from China's agricultural sector[J]. Forum on science and technology in China, 2017(1): 136-143(in Chinese with English abstract).
- [11] KUMAR J, VIYOL S V. Short-term diurnal and temporal measurement of methane emission in relation to organic carbon, phosphate and sulphate content of two rice fields of central Gujarat, India[J]. Paddy and water environment, 2009, 7(1): 11-16.
- [12] 蒋旭东,王丹,杨庆. 碳排放核算方法学[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2021. JIANG X D, WANG D, YANG Q. Methodology of carbon emission accounting[M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2021(in Chinese).
- [13] 吴昊玥,何宇,黄瀚蛟,等. 中国种植业碳补偿率测算及空间收敛性[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(6): 113-123. WU H Y, HE Y, HUANG H J, et al. Emission and spatial convergence of carbon compensating rate of planting industry in China[J]. China population, resources and environment, 2021, 31(6): 113-123(in Chinese with English abstract).
- [14] 王明星,李晶,郑循华. 稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理[J]. 大气科学, 1998(4): 218-230. WANG M X, LI J, ZHENG X H. Mechanism of methane emission, production, transformation and transport in paddy field[J]. Chinese journal of atmospheric sciences, 1998(4): 218-230(in Chinese with English abstract).
- [15] 梁龙,吴文良,孟凡乔. 华北集约高产农田温室气体净排放研究初探[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(S1): 47-50. LIANG L, WU W L, MENG F Q. Preliminary study on net greenhouse gas emissions from intensive high-yield farmland in North China[J]. China population, resources and environment, 2010, 20(S1): 47-50(in Chinese with English abstract).
- [16] 马翠萍,刘小和. 低碳背景下中国农业温室气体排放研究[J]. 现代经济探讨, 2011(12): 67-71. MA C P, LIU X H. Research on agricultural greenhouse gas emissions in China under the background of low carbon[J]. Modern economic research, 2011(12): 67-71(in Chinese).
- [17] 刘明达,蒙吉军,刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理, 2014, 34(2): 248-258. LIU M D, MENG J J, LIU B H. Progress in the studies of carbon emission estimation[J]. Tropical geography, 2014, 34(2): 248-258(in Chinese with English abstract).
- [18] 金书秦,林煜,牛坤玉. 以低碳带动农业绿色转型: 中国农业碳排放特征及其减排路径[J]. 改革, 2021(5): 29-37. JIN S Q, LIN Y, NIU K Y. Driving green transformation of agriculture with low carbon: characteristics of agricultural carbon emissions and its emission reduction path in China[J]. Reform, 2021(5): 29-37(in Chinese with English abstract).
- [19] 赵敏娟,石锐,姚柳杨. 中国农业碳中和目标分析与实现路径[J]. 农业经济问题, 2022(9): 24-34. ZHAO M J, SHI R, YAO L Y. Analysis on the goals and paths of carbon neutral agriculture in China[J]. Issues in agricultural economy, 2022(9): 24-34(in Chinese with English abstract).
- [20] 田成诗,陈雨. 中国省际农业碳排放测算及低碳化水平评价: 基于衍生指标与TOPSIS法的运用[J]. 自然资源学报, 2021, 36(2): 395-410. TIAN C S, CHEN Y. China's provincial agricultural carbon emissions measurement and low carbonization level evaluation: based on the application of derivative indicators and TOPSIS[J]. Journal of natural resources, 2021, 36(2): 395-410(in Chinese with English abstract).

- [21] 黄晓慧,杨飞,陆迁.城镇化、空间溢出效应与农业碳排放:基于2007—2019年省级面板数据的实证分析[J].华东经济管理,2022,36(4):107-113. HUANG X H, YANG F, LU Q. Urbanization, spatial spillover effect, and agricultural carbon emission: empirical analysis based on the data of provincial panel from 2007 to 2019 [J]. East China economic management, 2022, 36 (4) : 107-113 (in Chinese with English abstract).
- [22] 徐清华,张广胜.农业机械化对农业碳排放强度影响的空间溢出效应:基于282个城市面板数据的实证[J].中国人口·资源与环境,2022,32(4):23-33. XU Q H, ZHANG G S. Spatial spillover effect of agricultural mechanization on agricultural carbon emission intensity: an empirical analysis of panel data from 282 cities [J]. China population, resources and environment, 2022, 32(4):23-33(in Chinese with English abstract).
- [23] 夏四友,赵媛,许昕,等.1997—2016年中国农业碳排放率的时空动态与驱动因素[J].生态学报,2019,39(21):7854-7865. XIA S Y, ZHAO A, XU X, et al. Spatiotemporal dynamics and driving factor analysis of agricultural carbon emissions rate om China from 1997 to 2016[J]. Acta ecologica sinica, 2019, 39 (21) : 7854-7865 (in Chinese with English abstract).
- [24] 吴贤荣,张俊飏,田云,等.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, et al. Provincial agricultural carbon emissions in China: calculation, performance change and influencing factors [J]. Resources science, 2014, 36 (1) : 129-138 (in Chinese with English abstract).
- [25] 高鸣,陈秋红.贸易开放、经济增长、人力资本与碳排放绩效:来自中国农业的证据[J].农业技术经济,2014(11):101-110. GAO M, CHEN Q H. Trade openness, economic growth, human capital, and carbon performance: evidence from Chinese agriculture [J]. Journal of agrotechnical economics, 2014(11): 101-110(in Chinese).
- [26] 吴昊玥,黄瀚蛟,何宇,等.中国农业碳排放效率测度、空间溢出与影响因素[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(10):1762-1773. WU H Y, HUANG H J, HE Y, et al. Measurement, spatial spillover and influencing factors of agricultural carbon emissions efficiency in China [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2021, 29 (10) : 1762-1773 (in Chinese with English abstract).
- [27] 郭四代,钱昱冰,赵锐.西部地区农业碳排放效率及收敛性分析:基于SBM-Undesirable模型[J].农村经济,2018(11):80-87. GUO S D, QIAN Y B, ZHAO R. Analysis of agricultural carbon emission efficiency and convergence in western China: based on SBM-Undesirable model [J]. Rural economy, 2018 (11):80-87(in Chinese).
- [28] 吴贤荣,张俊飏,田云,等.基于公平与效率双重视角的中国农业碳减排潜力分析[J].自然资源学报,2015,30(7):1172-1182. WU X R, ZHANG J B, TIAN Y, et al. Analysis on China's agricultural carbon abatement capacity from the perspective of both equity and efficiency [J]. Journal of natural resources, 2015, 30(7) : 1172-1182 (in Chinese with English abstract).
- [29] 王雅楠,张琪琳,陈伟.基于碳汇功能的省域农业碳排放及减排潜力研究:以中国三种主要粮食作物为例[J].重庆社会科学,2022(5):58-75. WANG Y N, ZHANG Q L, CHEN W. Study on provincial agricultural carbon emission and emission reduction potential based on carbon sink function: taking China's three main grain crops as an example [J]. Chongqing social sciences, 2022 (5) : 58-75 (in Chinese with English abstract).
- [30] 程秋旺,许安心,陈钦.“双碳”目标背景下农业碳减排的实现路径:基于数字普惠金融之验证[J].西南民族大学学报(人文社会科学版),2022,43(2):115-126. CHENG Q W, XU A X, CHEN Q. The realization path of agricultural carbon emission reduction under the background of “Double carbon” target: verification based on digital financial inclusion [J]. Journal of Southwest Minzu University (humanities and social sciences edition), 2022, 43(2) : 115-126 (in Chinese).
- [31] 张壮,田云,陈池波.政策性农业保险能引导农业碳减排吗? [J].湖南农业大学学报(社会科学版),2023,24(2):29-38. ZHANG Z, TIAN Y, CHEN C B. Can policy-supported agricultural insurance guide agricultural carbon emission reduction? [J]. Journal of Hunan Agricultural University (social sciences), 2023, 24(2) : 29-38 (in Chinese with English abstract).
- [32] 陈松文,刘天奇,曹凑贵,等.水稻生产碳中和现状及低碳稻作技术策略[J].华中农业大学学报,2021,40(3):3-12. CHEN S W, LIU T Q, CAO Z G, et al. Current situation of carbon neutrality in rice production and technical strategy of low carbon rice cultivation [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40 (3) : 3-12 (in Chinese with English abstract).
- [33] 田云,陈池波.市场与政府结合视角下的中国农业碳减排补偿机制研究[J].农业经济问题,2021(5):120-136. TIAN Y, CHEN C B. Research on the compensation mechanism of agricultural carbon emission reduction in China from the perspective of combination of market and government [J]. Issues in agricultural economy, 2021 (5) : 120-136 (in Chinese with English abstract).
- [34] 王伟,毛伟.农业领域政府和社会资本合作对农业高质量发展的影响效应研究[J].世界农业,2023(9):82-96. WANG W, MAO W. Research on the effect of cooperation between government and private capital in agricultural on high-quality agricultural development [J]. World agriculture, 2023(9) : 82-96 (in Chinese with English abstract).
- [35] WIESENBERG G L B, SCHWARZBAUER J, SCHMIDT M W I, et al. Source and turnover of organic matter in agricultural soils derived from n-alkane/n-carboxylic acid compositions and C-isotope signatures [J]. Organic geochemistry,

- 2004,35(11/12):1371-1393.
- [36] 谢淑娟,匡耀求,黄宁生.中国发展碳汇农业的主要路径与政策建议[J].中国人口·资源与环境,2010,20(12):46-51. XIE S J, KUANG Y Q, HUANG N S. Main paths and policy proposals for the development of carbon-sinking agriculture in China[J]. China population, resources and environment, 2010, 20(12):46-51(in Chinese with English abstract).
- [37] 金书秦,马如霞.当前农业碳汇价值实现的主要途径和完善建议[J].环境保护,2023,51(3):25-29. JIN S Q, MA R X. How to realize the value of agricultural carbon sink: pathways and suggestions for improvement[J]. Environmental protection, 2023, 51(3):25-29(in Chinese).
- [38] SANDS P. The united nations framework convention on climate change[J]. Review of European community and international environmental law, 1992, 1:270-277.
- [39] 李怒云,徐泽鸿,王春峰,等.中国造林再造林碳汇项目的优先发展区域选择与评价[J].林业科学,2007(7):5-9. LI N Y, XU Z H, WANG C F, et al. Selection and evaluation of preferential development area for afforestation and reforestation project under CDM in China[J]. Scientia silvae sinicae, 2007(7):5-9(in Chinese with English abstract).
- [40] 朱婧.林业碳汇若干法律问题的理解与适用[J].法律适用,2023(1):141-149. ZHU J. Comprehension and application of some legal issues in the forestry carbon sequestration[J]. Journal of law application, 2023(1):141-149(in Chinese).
- [41] EVE M D, SPEROW M, PAUSTIAN K, et al. National-scale estimation of changes in soil carbon stocks on agricultural lands[J]. Environmental pollution, 2002, 116(3):431-438.
- [42] 韩冰,王效科,欧阳志云.中国农田生态系统土壤碳库的饱和水平及其固碳潜力[J].农村生态环境,2005(4):6-11. HAN B, WANG X K, OUYANG Z Y. Saturation levels and carbon sequestration potentials of soil carbon pools in farmland ecosystems of China[J]. Journal of ecology and rural environment, 2005(4):6-11(in Chinese with English abstract).
- [43] 王海候,金梅娟,陆长婴,等.秸秆还田模式对农田土壤碳库特性及产量的影响[J].自然资源学报,2017,32(5):755-764. WANG H H, JIN M J, LU C Y, et al. Effects of patterns of returning straw to field on soil carbon pool and yield in rice-wheat double cropping systems[J]. Journal of natural resources, 2017, 32(5):755-764(in Chinese with English abstract).
- [44] 白洋,董雨瑞,李姿莹.耕地碳汇与粮食安全保障协同推进的制度完善[J].世界农业,2023(8):76-87. BAI Y, DONG Y R, LI Z Y. Research of perfection of the system for the coordinated promotion of cultivated land carbon sink and food security[J]. World agriculture, 2023(8):76-87(in Chinese with English abstract).
- [45] HADER D P. Effects of solar UV-B radiation on aquatic ecosystems[J]. Advances in space research, 2001, 26(12):2029-2040.
- [46] 刘慧,唐启升.国际海洋生物碳汇研究进展[J].中国水产科学,2011,18(3):695-702. LIU H, TANG Q S. Review on worldwide study of ocean biological carbon sink[J]. Journal of fishery sciences of China, 2011, 18(3):695-702(in Chinese with English abstract).
- [47] 胡剑波,张强.低碳经济发展新思路:蓝色碳汇及中国对策[J].世界农业,2015(8):43-47. HU J B, ZHANG Q. New ideas for low-carbon economic development: blue carbon sinks and China's countermeasures[J]. World agriculture, 2015(8):43-47(in Chinese).
- [48] 李纯厚,齐占会,黄洪辉,等.海洋碳汇研究进展及南海碳汇渔业发展方向探讨[J].南方水产,2010,6(6):81-86. LI C H, QI Z H, HUANG H H, et al. Review on marine carbon sink and development of carbon sink fisheries in South China Sea[J]. South China fisheries science, 2010, 6(6):81-86(in Chinese with English abstract).
- [49] TANG Q S, ZHANG J H, FANG J G. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO₂ absorption by coastal ecosystems[J]. Marine ecology progress series, 2011, 424:97-105.
- [50] 田云,张君.地理分区视角下的农业碳效应驱动机理研究[J].华中农业大学学报(社会科学版),2020(2):78-87. TIAN Y, ZHANG J. Research on driving mechanism of agricultural carbon effect from the perspective of geographical division[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (social sciences edition), 2020(2):78-87(in Chinese with English abstract).
- [51] 王琦,魏冶.基于非经济生物量的中国耕地碳汇空间分布研究[J].资源开发与市场,2017,33(8):928-932. WANG Q, WEI Y. Spatial pattern of arable land carbon sinks in China from the perspective of non-economic biomass[J]. Resource development & market, 2017, 33(8):928-932(in Chinese with English abstract).
- [52] 吴嘉莘,杨红娟.农业净碳汇测算方法研究综述[J].农业经济,2020(10):29-31. WU J X, YANG H J. A review of measurement methods of agricultural net carbon sink[J]. Agricultural economy, 2020(10):29-31(in Chinese).
- [53] 王效科,冯宗炜.中国森林生态系统中植物固定大气碳的潜力[J].生态学杂志,2000(4):72-74. WANG X K, FENG Z W. The potential to sequester atmospheric carbon through forest ecosystems in China[J]. Chinese journal of ecology, 2000(4):72-74(in Chinese with English abstract).
- [54] 方精云,陈安平.中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J].植物学报,2001(9):967-973. FANG J Y, CHEN A P. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance[J]. Journal of integrative plant biology, 2001(9):967-973(in Chinese with English abstract).
- [55] 魏智海,张乐艺,李霞.森林地上生物量遥感估算研究进展[J].农业与技术,2021,41(11):78-84. WEI Z H, ZHANG L Y, LI X. Research progress of forest above-ground biomass estimation by remote sensing[J]. Agriculture and technology, 2021, 41(11):78-84(in Chinese).

- [56] 王文杰,于景华,毛子军,等.森林生态系统 CO₂通量的研究方法及其研究进展[J].生态学报,2003(5):102-107. WANG W J, YU J H, MAO Z J, et al. Study method and research advance in forest CO₂ flux[J]. Chinese journal of ecology, 2003(5):102-107(in Chinese with English abstract).
- [57] 令狐大智,罗溪,朱帮助.森林碳汇测算及固碳影响因素研究进展[J].广西大学学报(哲学社会科学版),2022,44(3):142-155. LINGHU D Z, LUO X, ZHU B Z. Review on forest carbon sink measurement and influential factors of carbon sequestration[J]. Journal of Guangxi University (philosophy and social science edition), 2022, 44(3):142-155(in Chinese).
- [58] 周璞,侯华丽,张惠,等.碳中和背景下提升土壤碳汇能力的前景与实施建议[J].环境保护,2021,49(16):63-67. ZHOU P, HOU H L, ZHANG H, et al. The development prospects and implementation suggestions of increasing soil carbon storage in the context of carbon neutrality[J]. Environmental protection, 2021, 49(16):63-67(in Chinese).
- [59] 唐菁,曾庆均,刘浩.中国农业碳补偿率的动态演进、区域差异及空间收敛性研究[J].农业技术经济,2024(1):54-74. TANG J, ZENG Q J, LIU H. Study on dynamic evolution, regional differences and spatial convergence of agricultural carbon offsetting rates in China[J]. Journal of agrotechnical economics, 2024(1):54-74(in Chinese with English abstract).
- [60] 孙吉亭,赵玉杰.我国碳汇渔业发展模式研究[J].东岳论丛,2011,32(8):150-155. SUN J T, ZHAO Y J. Chinese carbon sinks fishery development model research[J]. Dongyue tribune, 2011, 32(8):150-155(in Chinese).
- [61] 张继红,方建光,唐启升.中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献[J].地球科学进展,2005(3):359-365. ZHANG J H, FANG J G, TANG Q S. The contribution of shellfish and seaweed mariculture in China to the carbon cycle of coastal ecosystem[J]. Advances in earth science, 2005(3):359-365(in Chinese with English abstract).
- [62] 岳冬冬,王鲁民.中国海水贝类养殖碳汇核算体系初探[J].湖南农业科学,2012(15):120-122, 130. YUE D D, WANG L M. A preliminary research on the accounting system of carbon sink for marine culture of shellfish in China[J]. Hunan agricultural sciences, 2012(15):120-122, 130(in Chinese with English abstract).
- [63] 邵桂兰,孔海峥,李晨.中国海水养殖的净碳汇及其与经济耦合关系[J].资源科学,2019,41(2):277-288. SHAO G L, KONG H Z, LI C. Net amount of mariculture carbon sink and its coupling relationship with economics growth of China[J]. Resources science, 2019, 41(2):277-288(in Chinese with English abstract).
- [64] 杨林,郝新亚,沈春蕾,等.碳中和目标下中国海洋渔业碳汇能力与潜力评估[J].资源科学,2022,44(4):716-729. YANG L, HAO X Y, SHEN C L, et al. Assessment of carbon sink capacity and potential of marine fisheries in China under the carbon neutrality target[J]. Resources science, 2022, 44(4):716-729(in Chinese with English abstract).
- [65] CHI J S. Assessing carbon and water dynamics in multiple agricultural ecosystems in the inland Pacific Northwest using the eddy covariance method and the CropSyst-Microbasin model[D]. Washington: Washington State University, 2016.
- [66] WINKLER K, YANG H, GANZENMULLER R, et al. Changes in land use and management led to a decline in Eastern Europe's terrestrial carbon sink[J/OL]. Communications earth & environment, 2023, 4(1):237[2024-01-27]. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00893-4>.
- [67] 于卓卉,毛世平.中国农业净碳排放与经济增长的脱钩分析[J].中国人口·资源与环境,2022,32(11):30-42. YU Z H, MAO S P. Analysis of the decoupling of China's agricultural net carbon emissions from its economic growth[J]. China population, resources and environment, 2022, 32(11):30-42(in Chinese with English abstract).
- [68] 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. TIAN Y, ZHANG J B. Regional differentiation research on net carbon effect of agricultural production in China[J]. Journal of natural resources, 2013, 28(8):1298-1309(in Chinese with English abstract).
- [69] 田云,张俊飏,吴贤荣,等.中国种植业碳汇盈余动态变化及地区差异分析:基于31个省(市、区)2000—2012年的面板数据[J].自然资源学报,2015,30(11):1885-1895. TIAN Y, ZHANG J B, WU X R, et al. Research on dynamic change and regional differences of China's planting industry carbon sink surplus[J]. Journal of natural resources, 2015, 30(11):1885-1895(in Chinese with English abstract).
- [70] 李园园,薛彩霞,柴朝卿,等.中国保护性耕作净碳汇的时空分异特征及其驱动力[J].中国人口·资源与环境,2022,32(10):15-23. LI Y Y, XUE C X, CHAI C Q, et al. Spatio-temporal variation and driving forces of net carbon sink of conservation tillage in China[J]. China population, resources and environment, 2022, 32(10):15-23(in Chinese with English abstract).
- [71] 苏子龙,石吉金,周伟,等.国外农田土壤碳汇市场交易实践及对我国的启示[J].环境保护,2022,50(5):63-67. SU Z L, SHI J J, ZHOU W, et al. Cropland soil carbon sink market trading in foreign countries and its enlightenment to China[J]. Environmental protection, 2022, 50(5):63-67(in Chinese).
- [72] 曹先磊,张颖,石小亮,等.碳交易视角下森林碳汇生态补偿优化管理研究进展[J].资源开发与市场,2017,33(4):430-435. CAO X L, ZHANG Y, SHI X L, et al. Research progress on optimal management of ecological compensation of forest carbon sequestration from perspective of carbon trading[J]. Resource development & market, 2017, 33(4):430-435(in Chinese with English abstract).
- [73] 曾维忠,刘胜,杨帆,等.扶贫视域下的森林碳汇研究综述[J].农业经济问题,2017,38(2):102-109. ZENG W Z, LIU S, YANG F, et al. A research review on poverty alleviation based on forest carbon sink projects[J]. Issues in agricultural

- economy, 2017, 38(2):102-109(in Chinese with English abstract).
- [74] 田刚,袁晓,单立岩.中俄森林碳汇交易市场的发展路径与保障措施[J].国际贸易,2022(11):35-42. TIAN G, YUAN X, SHAN L Y. The development path and safeguard measures of China-Russia forest carbon sink trading market[J]. Intertrade, 2022(11):35-42(in Chinese with English abstract).
- [75] 柯水发,纪元,黄雷.新一轮中国集体林权制度改革:演进历程、驱动因素与融合趋势[J].农林经济管理学报,2022,21(4):424-432. KE S F, JI Y, HUANG L. A new round of collective forest tenure reform in China: evolution, driving factors and integration trend [J]. Journal of agro-forestry economics and management, 2022, 21(4):424-432(in Chinese with English abstract).
- [76] 秦涛,杜亚婷,陈奕多,等.林业碳汇质押贷款融资模式比较、现实困境与突破方向[J].农业经济问题,2023(1):120-130. QIN T, DU Y T, CHEN Y D, et al. The comparison, dilemmas and breakthrough strategies in forestry carbon sink pledge loan model[J]. Issues in agricultural economy, 2023(1):120-130(in Chinese with English abstract).
- [77] 师帅,荆宇,翟涛.市场激励型环境规制对低碳农业发展的作用及实施路径研究[J].行政论坛,2021,28(1):139-144. SHI S, JING Y, ZHAI T. Study on the effect and implementation path of market incentive environmental regulation on the development of low-carbon agriculture [J]. Administrative tribune, 2021, 28(1):139-144(in Chinese).
- [78] 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.
- [79] DUMORTIER J, ELOBEID A. Effects of a carbon tax in the United States on agricultural markets and carbon emissions from land-use change [J/OL]. Land use policy, 2021, 103: 105320 [2024-01-27]. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105320>.
- [80] 贺青,张俊飏.粮食主产区政策对农业碳排放的影响[J].华中农业大学学报(社会科学版),2023(4):47-55. HE Q, ZHANG J B. The impacts of policies in main grain-producing areas on agricultural carbon emissions [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (social sciences edition), 2023 (4):47-55(in Chinese with English abstract).
- [81] 金书秦,韩冬梅,林煜,等.碳达峰目标下开展农业碳交易的前景分析和政策建议[J].农村金融研究,2021(6):3-8. JIN S Q, HAN D M, LIN Y, et al. Prospect and policy recommendations for agricultural carbon trading under the carbon peak target [J]. Rural finance research, 2021 (6) : 3-8 (in Chinese with English abstract).
- [82] 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[J].农业技术经济,2017(5):27-36. WU X L, ZHANG J B. Agricultural carbon emissions at provincial level in China: growth-led effect and emission reduction decoupling effect [J]. Journal of agrotechnical economics, 2017(5):27-36 (in Chinese).
- [83] 付伟,李龙,罗明灿,等.数字普惠金融助推农业低碳发展的实证研究[J].农林经济管理学报,2023,22(1):11-19. FU W, LI L, LUO M C. An empirical study of digital inclusive finance to facilitate agricultural low-carbon development [J]. Journal of agro-forestry economics and management, 2023, 22 (1):11-19(in Chinese with English abstract).
- [84] 肖晰文,刘春红,刘再森,等.三峡库区(湖北段)农业碳排放特征、驱动因素与趋势预测[J].中国农业资源与区划,2023,44(9):212-222. XIAO X W, LIU C H, LIU Z S, et al. Characteristics, driving factors and trend prediction of agriculture carbon emission in the Three Gorges Reservoir Area (Hubei section) [J]. Chinese journal of agricultural resources and regional planning, 2023, 44(9):212-222 (in Chinese with English abstract).
- [85] 胡中应.技术进步、技术效率与中国农业碳排放[J].华东经济管理,2018,32(6):100-105. HU Z Y. Technical progress, technical efficiency and agricultural carbon emissions in China [J]. East China economic management, 2018, 32(6):100-105 (in Chinese with English abstract).
- [86] 田云,尹恣昊.产业集聚对中国农业净碳效应的影响研究[J].华中农业大学学报(社会科学版),2021(3):107-117. TIAN Y, YIN M H. Research on the impact of industrial agglomeration on China's agricultural net carbon effect [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (social sciences edition), 2021(3):107-117(in Chinese with English abstract).
- [87] SERRA T, ZILBERMAN D, GOODWIN B K, et al. Replacement of agricultural price supports by area payments in the European Union and the effects on pesticide use [J]. American journal of agricultural economics, 2005, 87(4):870-884.
- [88] 张军伟,费建翔,徐永辰.金融支持对绿色农业发展的激励效应[J].中南财经政法大学学报,2020(6):91-98. ZHANG J W, FEI J X, XU Y C. Study of the incentive effect of financial support on green agriculture development [J]. Journal of Zhongnan University of Economics and Law, 2020(6):91-98 (in Chinese).
- [89] 史常亮,李赟,朱俊峰.劳动力转移、化肥过度使用与面源污染[J].中国农业大学学报,2016,21(5):169-180. SHI C L, LI Y, ZHU J F. Rural labor transfer, excessive fertilizer use and agricultural non-point source pollution [J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(5):169-180 (in Chinese with English abstract).
- [90] 程琳琳,张俊飏,何可.空间视角下城镇化对农业碳生产率的作用与间接溢出效应研究[J].中国农业资源与区划,2019,40(11):48-56. CHENG L L, ZHANG J B, HE K. The direct influence and indirect spillover effect of urbanization on agricultural carbon productivity base on the spatial Durbin model [J]. Chinese journal of agricultural resources and region-

- al planning, 2019, 40(11): 48-56(in Chinese with English abstract).
- [91] CHEN Z W, TANG C, LIU B, et al. Can socialized services reduce agricultural carbon emissions in the context of appropriate scale land management?[J/OL]. *Frontiers in environmental science*, 2022, 10: 1039760[2024-01-27]. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1039760>.
- [92] 童伟伟,李玉霖,张董敏.农业服务化能降低中国农业碳排放强度吗?[J/OL]. *中国农业资源与区划*: 1-13[2024-01-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20230803.1339.002.html>. TONG W W, LI Y L, ZHANG D M. Can servitization of agriculture reduce China's agricultural carbon emissions intensity?[J/OL]. *Chinese journal of agricultural resources and regional planning*: 1-13[2024-01-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20230803.1339.002.html> (in Chinese with English abstract).
- [93] 罗明忠,魏滨辉.农业生产性服务的碳减排作用:效应与机制[J]. *经济经纬*, 2023, 40(4): 58-68. LUO M Z, WEI B H. The role of productive agricultural services in carbon reduction: effects and mechanisms[J]. *Economic survey*, 2023, 40(4): 58-68(in Chinese with English abstract).
- [94] 刘芳,李成友,张红丽.农户环境认知及低碳生产行为模式[J]. *云南社会科学*, 2017(6): 58-63. LIU F, LI C Y, ZHANG H L. Farmers' environmental cognition and low-carbon production behavior model[J]. *Social sciences in Yunnan*, 2017(6): 58-63(in Chinese with English abstract).
- [95] 田云.认知程度、未来预期与农户农业低碳生产意愿:基于武汉市农户的调查数据[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2019(1): 77-84. TIAN Y. Cognition degree, future expectation and farmers' low carbon willingness in agricultural production: based on the survey data of farmers in Wuhan[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (social sciences edition)*, 2019(1): 77-84 (in Chinese with English abstract).
- [96] 蒋琳莉,张露,张俊飏,等.稻农低碳生产行为的影响机理研究:基于湖北省102户稻农的深度访谈[J]. *中国农村观察*, 2018(4): 86-101. JIANG L L, ZHANG L, ZHANG J B, et al. The influence mechanism of rice farmers' low-carbon production behaviors: an analysis based on in-depth interview with 102 rice farmers in Hubei Province[J]. *China rural survey*, 2018(4): 86-101(in Chinese with English abstract).
- [97] 李波,梅倩.农业生产碳行为方式及其影响因素研究:基于湖北省典型农村的农户调查[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2017(6): 51-58. LI B, MEI Q. Study on carbon behavior mode and influencing factors in agricultural production: investigation of farmers based on typical rural areas in Hubei province[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (social sciences edition)*, 2017(6): 51-58 (in Chinese with English abstract).
- [98] 陈儒,孔英.农户低碳生产的技术效率及其影响因素[J]. *资源科学*, 2022, 44(7): 1405-1421. CHEN R, KONG Y. Technical efficiency of low-carbon production of smallholders and influencing factors[J]. *Resources science*, 2022, 44(7): 1405-1421(in Chinese with English abstract).
- [99] 王璇,张俊飏,何可,等.风险感知、公众形象诉求对农户绿色农业技术采纳度的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(7): 213-226. WANG X, ZHANG J B, HE K, et al. Influence of risk perception and public image appeal on the acceptability of farmers' green agriculture technology[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(7): 213-226 (in Chinese with English abstract).
- [100] 罗小娟,冯淑怡,石晓平,等.太湖流域农户环境友好型技术采纳行为及其环境和经济效应评价:以测土配方施肥技术为例[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(11): 1891-1902. LUO X J, FENG S Y, SHI X P, et al. Farm household' adoption behavior of environment friendly technology and the evaluation of their environmental and economic effects in Taihu Basin: taking formula fertilization by soil testing technology as an example[J]. *Journal of natural resources*, 2013, 28(11): 1891-1902 (in Chinese with English abstract).
- [101] 乔金杰,穆月英,赵旭强,等.政府补贴对低碳农业技术采用的干预效应:基于山西和河北省农户调研数据[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(4): 46-50. QIAO J J, MU Y Y, ZHAO X Q, et al. The intervention effect of government subsidy on the adoption of low carbon agricultural technology in Shanxi and Hebei provinces[J]. *Journal of arid land resources and environment*, 2016, 30(4): 46-50 (in Chinese with English abstract).
- [102] 沈昱雯,罗小锋,余威震.激励与约束如何影响农户生物农药施用行为:兼论约束措施的调节作用[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(4): 1040-1050. SHEN Y W, LUO X F, YU W Z. How incentives and constraints affect farmers' biological pesticide application behavior: concurrently discussing the regulating effect of restraint measures[J]. *Resources and environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(4): 1040-1050 (in Chinese with English abstract).
- [103] 李琪,李凯.农户绿色生产转型引导机制探讨:基于选择实验法的分析[J]. *调研世界*, 2022(12): 15-23. LI Q, LI K. Research on the guiding mechanism of farmers' green production transformation: analysis based on the choice experiments[J]. *The world of survey and research*, 2022(12): 15-23 (in Chinese with English abstract).
- [104] 伍国勇,陈莹,孙小钧.中国种植业碳补偿率区域差异、动态演进及收敛性分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 2(10): 1774-1785. WU G Y, CHEN Y, SUN X J. Regional differences, dynamic evolution, and convergence of the carbon compensation rate of planting industry in China[J]. *Chinese journal of eco-agriculture*, 2021, 2(10): 1774-1785 (in Chinese with English abstract).
- [105] 董梅,徐璋勇.农村家庭能源消费结构及影响因素分析:以陕

西省1303户农村家庭调查为例[J]. 农林经济管理学报, 2018, 17(1): 45-53. DONG M, XU Z Y. Energy consumption structure of rural households and influencing factors: based on

1303 rural households in Shaanxi [J]. Journal of agro-forestry economics and management, 2018, 17(1): 45-53 (in Chinese with English abstract).

Research progress and future prospects of agricultural carbon issues under “Dual carbon” goal

TIAN Yun, CAI Yanrong

School of Business Administration, Zhongnan University of Economics and Law/WTO and Hubei Development Research Center, Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan 430073, China

Abstract Reducing agricultural carbon emissions and improving the capacity of agricultural carbon sinks are important measures for China to realize the goal of “Dual-carbon”, which is also where the potential lies. Therefore, it is undoubtedly of great significance to clarify the current status of research on agricultural carbon issues and its characteristics. In order to contribute to the early realization of China’s “Dual-carbon” goal, this paper comprehensively comprehends the existing studies based on the three dimensions of agricultural carbon emissions, agricultural carbon sinks, and driving factors of agricultural low-carbon development. Specifically, firstly, the basic concepts of agricultural carbon emissions are clarified and common measurement methods are introduced, and the current research status is reviewed, taking into consideration temporal evolution, spatial distribution, efficiency characteristics, and emission reduction pathways. Secondly, the basic concepts of agricultural carbon sinks are defined, and the forest carbon sink, soil carbon sink and ocean carbon sink are derived, followed by the introduction of their respective measurement method. Then, the focus is on the net agricultural carbon sink and the marketization of carbon sink. Finally, the main factors that affect the development of low-carbon agriculture are discussed from both macro and micro levels. At the macro level, policy, economic and social factors are considered, while at the micro level, the internal factors of the head of the household and the external environment faced by the farmers are examined. With regards to the direction of future research on agricultural carbon issues, this paper believes that it should focus on the following four aspects, namely, the scientific prediction of agricultural carbon peaks and the design of differentiated emission reduction paths, the scientific assessment of the potential for agricultural carbon reduction and carbon sequestration and the discussion of paths to achieve these goals, the construction of an agricultural carbon market, and exploration of the idea of realizing the value of carbon sinks, as well as the exploration of the matching of the supply and demand of low-carbon production techniques by farmers and the optimization of their systems.

Keywords agricultural carbon issues; agricultural carbon emissions; agricultural carbon sink; low-carbon development of agriculture

(责任编辑:边书京)