

DOI: 10.5846/stxb202012093135

罗怀良.国内农业碳源/汇效应研究:视角、进展与改进.生态学报, 2022, 42(9): 3832-3841.

Luo H L. Research on domestic agricultural carbon source/sink effect: perspectives, advances and improvements. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(9): 3832-3841.

国内农业碳源/汇效应研究:视角、进展与改进

罗怀良^{1,2,*}

1 四川师范大学地理与资源科学学院, 成都 610101

2 西南土地资源评价与监测教育部重点实验室, 成都 610066

摘要:结构复杂、自然生态与社会经济过程交织、地域特征显著的农业碳源/汇效应存在基于内部结构、双重属性、区域尺度等多种研究视角。国内基于内部结构视角的农业碳源/汇效应研究多局限于种植业,且多以单一的碳源或碳汇研究为主;农业组分细化与组分关联的系统综合研究明显不足。在基于双重属性视角的研究中,自然生态视角侧重于碳吸收和直接碳排放,社会经济视角则聚焦于间接碳排放;由自然与经济相互割裂到相互融合的二元农业碳源/汇综合方法尚需深化。基于区域尺度视角的研究多集中在大中尺度和样地尺度,小尺度县域研究比较薄弱;农产品供应链关联的区域间碳流及减排值得关注。针对中国小规模家庭农场和种养关联的多种经营特征,农业碳源/汇效应研究应将农业产业组分、农产品碳源/汇构成解析与种养关联碳源/汇综合并重,发展和完善评估模型、提高参数本土化程度,追踪农产品生产、流通与消费等区域间碳流全过程。研究综述国内基于内部结构、双重属性和区域尺度等视角的农业碳源/汇效应研究进展,并提出基于我国农业经营特征的碳源/汇效应改进研究。

关键词:碳源/汇效应;内部结构视角;双重属性视角;区域尺度视角;种养关联。

Research on domestic agricultural carbon source/sink effect: perspectives, advances and improvements

LUO Huailiang^{1,2,*}

1 College of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China

2 Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Monitoring in Southwest, Ministry of Education, Chengdu 610066, China

Abstract: Considering the substantial potential of agricultural carbon emission reduction and carbon sink increase and possible positive external effects, the issue of agricultural carbon source/sink effect has garnered extensive attention from academia and most sectors of society. Agriculture is a sector with a complex structure, interwoven with natural ecology and socio-economic processes, and with observable regional characteristics. Additionally, there are multiple research perspectives for agricultural carbon source/sink effects, such as internal structure, dual attributes, and regional scale. Most domestic research on agricultural carbon source/sink effect based on internal structure perspective is limited to the planting industry, mainly focusing on a single carbon source or carbon sink; however, systematic, comprehensive research on agricultural internal component refinement and component correlation is noticeably insufficient. As for research based on dual attribute perspective, a natural ecological perspective focuses on carbon absorption and direct carbon emission, whereas a socio-economic perspective focuses on indirect carbon emissions. The comprehensive method needs to be deepened, from separating nature and the economy to integrate dual agricultural carbon source/effect. Research based on regional scale perspectives primarily focuses on large, medium-sized, and sample plot scales, whereas counties' small-scale

基金项目:国家社科基金项目(17BGL137)

收稿日期:2020-12-09; 网络出版日期:2022-01-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huail@163.com

research is relatively weak. Carbon flow among regions and the carbon emission reduction of agricultural product supply chains should receive increased attention. Small-scale family farms and diversified management associated with planting and breeding are outstanding characteristics of China's agricultural production and management. Accurate assessment of the regional agricultural carbon source/sink effect under the characteristics of small-scale family farms and diversified management associated with planting and breeding is essential to formulate effective agricultural emission reduction strategies and achieve "double carbon" goals, namely carbon dioxide emissions peak and carbon neutrality, as quickly as possible. In the future, research on the agricultural carbon source/sink effect should integrate sample observation, household survey, and statistical data; focus on the analysis of industrial components and agricultural carbon source/sink composition; strengthen comprehensive research on planting and breeding related to the carbon source/sink effect; expand the research perspective and data acquisition method; develop and improve the evaluation model; improve the degree of parameter localization; track the process of interregional carbon flow, including the production, circulation, and consumption of agricultural products; and encompass the entire carbon emission reduction process. This paper reviews the domestic research progress of agricultural carbon source/sink effect based on internal structure, dual attributes, and regional scale, thereby proposing improvements in the research of carbon source/sink effect based on China's agricultural management characteristics.

Key Words: carbon source/sink effect; internal structure perspective; dual attributes perspective; regional scale perspective; correlation between crop planting and animal breeding

随着气候变化研究的深入,碳减排增汇和适应已成为应对气候变化的共识^[1-3]。受自然和人文双重影响,农业系统既可是碳源,也可是碳汇。鉴于农业碳减排增汇所具有的巨大潜力以及可能带来的正外部效应,农业碳源/汇问题受到学术界乃至社会各界的广泛关注。目前全球及区域农业碳源/汇研究快速推进,并取得大量成果。研究尺度从大洲、国家等大尺度向中小尺度,甚至农场尺度转化^[4]。IPCC 发布 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories^[2]促进了区域农业碳排放估算,随后碳足迹(Carbon Footprint, CFP)被引入农业碳源/汇研究^[5-6]。基于 IPCC 清单的排放因子估算法和生命周期评估法(Life Cycle Assessment, LCA)等^[4,7]被大量应用并不断完善。为实现气候适应、减排和食物安全的协同,出现气候智能型农业(Climate-smart Agriculture, CSA)^[8],并成立气候智能型农业全球联盟。国内通过大量区域农业碳收支估算、动态构成、驱动机理及区域分异等研究,提出系列减排固碳对策,为我国农业碳减排增汇提供了有力的科学依据。

但农业碳源/汇效应十分复杂,由于缺乏区域农业碳源/汇内外关联的深刻认识,农业整体和具体农产品碳源/汇效应间存在割裂,尚未形成统一的研究范式,致使该领域研究尚具有很大的不确定性。本文拟综述国内基于内部结构、双重属性和区域尺度等 3 种视角的农业碳源/汇研究进展,并提出基于农业实际的碳源/汇效应改进研究。

1 农业产业特性及碳源/汇效应研究视角

1.1 农业产业特性

农业具有复杂的内部结构。广义农业包括种植业、林业、畜牧业、渔业和农林牧渔服务业(曾称“副业”)。而狭义农业仅指种植业:粮食、经济作物、饲料和绿肥等生产。由于种植业地位重要而特殊,狭义的农业概念使用频繁。农业生产过程是一个自然再生产与经济再生产相融合的过程,农业系统既包括农田生态系统,也包括与农业生产关联的社会经济系统。农田生态系统是一种由环境、生物、生产活动和社会经济等组成,人类活动影响显著的半自然人工生态系统。

农业最突出的产业特性是兼具自然、社会双重属性以及独特物质转化和能量流动过程^[9]的复杂产业体系。其具有突出的地域、周期和季节特征,不同区域之间还存在大量农产品和农资物料交换与能量流动。

1.2 农业碳源/汇效应研究视角

由于农业独特的产业特性,农业碳源/汇效应存在针对产业部门——内部结构、生产过程——自然生态与社会经济双重属性、空间关联——从样地到区域乃至全球的区域尺度、动态序列——气候变化与技术进步的时间动态等多种研究视角。而基于内部结构、双重属性和区域尺度等视角是农业碳源/汇效应研究的重要基础视角(图1)。本文着重讨论该3种视角的农业碳源/汇效应研究。

(1) 基于内部结构的研究视角。农业包括种植业、林业、畜牧业、渔业和农林牧渔服务业,其内部各业又存在若干复杂组分。基于内部结构视角的农业碳源/汇效应研究以农业部门、类型和品种等为研究对象,采用顺序分解或逐级整合的方式探讨其整体与组分的碳源/汇效应。而农业组分间物质交换与能量流动所关联的复杂碳流是研究难点。

(2) 基于双重属性的研究视角。农业兼具自然生态(自然再生产)与社会经济(经济再生产)双重属性。农业碳吸收主要通过作物、牧草与林木等植物光合作用吸收 CO_2 。而农业碳排放包括土壤 N_2O 排放、稻田 CH_4 排放,化肥、农膜、农药、机械、灌溉等农资和能量投入产生的碳排放,以及畜禽肠道发酵和粪便产生的碳排放等。随着农业对化石能源投入依赖的增加,农业碳排放成为重要的碳源。基于双重属性视角的农业碳源/汇效应研究以生产过程为研究对象,分别采用自然生态视角——动植物生长过程中直接碳收支分析、社会经济视角——农业生产中的农资投入与产出所涉及间接碳排放分析的思路探讨农业碳源/汇效应。而融合自然生态与社会经济的生态-经济复合农业碳源/汇研究既是研究重点,更是难点。

(3) 基于区域尺度的研究视角。受自然环境以及社会经济的制约与影响,不同区域都有相应的种植条件及种植制度。产业分工和农业地域性导致农业生产所需的农资投入以及农产品产出均存在区际流动。基于区域尺度视角的农业碳源/汇效应研究以农业生产的空间关联为研究对象,探讨伴随农资投入、农产品等物质交换和能量流动在区域间产生的碳转移、碳减排、碳循环与碳平衡等。

2 基于内部结构、双重属性和区域尺度视角的农业碳源/汇效应研究进展

2.1 基于内部结构视角的研究进展

分别用“农业、种植业、森林/林业、畜牧业、渔/水产业和农林牧渔服务业”等部门名称,结合“碳吸收/碳汇、碳排放/碳源和碳收支/碳源汇”等主题词通过 CNKI 数据库检索,合并具有包含关系的检索结果,得到基于内部结构视角的农业碳源/汇效应研究(表1)。综合表1和相关文献可得出基于该视角的研究进展:

表1 基于内部结构视角的农业碳源/汇研究/篇

Table 1 Research on agricultural carbon source/sink from perspective of internal structure

主题 Subjects	单一产业部门 Single industrial sector				种植与畜牧综合 Integration of planting and animal husbandry	合计 Total
	种植业 Planting	林业 Forestry	畜牧业 Animal Husbandry	渔业 Fisheries		
碳吸收/碳汇 Carbon absorption/sink	1560 (215/1345)	348 (224/124)	47 (7/40)	232 (3/229)	30 (6/24)	2217 (455/1762)
碳排放/碳源 Carbon emission/source	5790 (2979/2811)	146 (99/47)	170 (140/30)	179 (132/47)	92 (73/19)	6377 (7476/2957)
碳收支/碳源汇 Carbon budget/source and sink	475 (188/287)	144 (99/45)	20 (7/13)	15 (0/15)	23 (6/17)	677 (300/377)
合计 Total	7350	494	217	411	122	8594

表中括号外为总数,括号内“/”前后数值与主题词中“/”前后对应;检索时间:2020-10-13

(1) 多局限于种植业,且多以单一的碳源或碳汇研究为主。

由表1可知,部门碳源/汇文献量排序为:种植业(86.94%)>林业(5.75%)>渔业(4.78%)>畜牧业(3.95%),而未检索到农林牧渔服务业的文献。这表明既有研究多局限于种植业,未能全面覆盖农业全产业。需要指出的是,在研究文献中农业与种植业的概念含混。检索到的7350篇种植业碳源/汇文献中,仅226篇

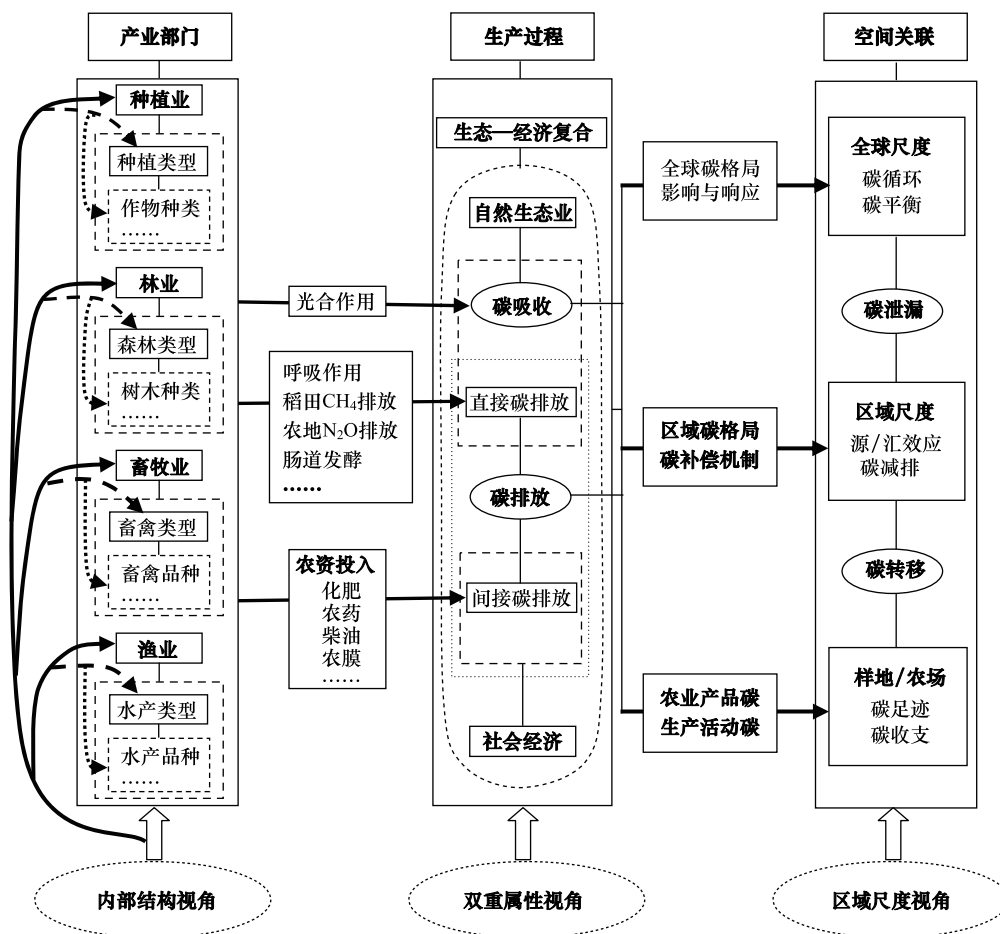


图1 农业碳源/汇效应研究的基础视角

Fig.1 Basic research perspectives of agricultural carbon source/sink effect

(3.07%)以“种植业”为题,而96.93%的文献为“农业”,农业指代种植业较普遍。此外,既有研究多以单一的农业碳源或碳汇研究(91.12%)为主,且碳源文献(74.20%)远多于碳汇(25.80%);鲜有将二者有机衔接的碳源/汇研究(仅7.88%),综合研究甚是薄弱。农业兼具碳源/汇双重属性,单一层面的分析易导致研究结论的片面性。

(2)农业组分细化与组分关联的系统综合研究明显不足。

无论是国家尺度还是区域尺度的农业碳源/汇效应研究大多将农业生产整体或所有作物作为研究对象,少有针对性对不同作物或组分进行研究,这限制了对某种作物、组分和某个重要农作区的农业生产提供配套的固碳减排技术以及政策革新方向^[10]。近期呈现从农业整体向作物^[10-14]、反刍动物^[15]、畜禽^[16-17]和大棚蔬菜^[18]等部门组分细化趋势,并获得一些组分差异的认识(如华北平原粮食、饲料和能源作物种植系统碳足迹^[19]等)。但既有研究多以单个部门(种植业、林业、畜牧业和渔业)研究占绝对优势(98.58%),缺乏多部门组分间碳源/汇效应的系统关联研究。仅极少量文献(1.42%)进行种植业与畜牧业的碳源/汇综合研究(表1)。要准确评估农业碳源/汇效应,必须要加强内部组分细化及组分关联的综合研究。

2.2 基于双重属性视角的研究进展

(1)自然生态视角侧重于碳吸收和直接碳排放,社会经济视角则聚焦于间接碳排放。

自然生态视角的农业碳源/汇效应研究通过土壤和植被碳库动态估算、温室气体通量观测与模型模拟等方法探讨农业生产的碳吸收和直接碳排放。土壤有机碳库估算主要采用土壤类型法、植被类型法、生命带类型法和模型法等^[20-21]。但土壤有机碳库估计还存在很大误差和不确定性^[22]。作物植被碳库估算主要采用

参数估算法、遥感资料反演法和环境参数模型法^[23-25]。与农田土壤相比,对作物植被碳库及农田生态系统碳循环的综合研究相对薄弱,且对作物植被碳库变化的源汇效应存在不同认识^[23]。随着研究深入,与农业有关的温室气体 (GHGs) 范围扩大到 CO₂、N₂O 和 CH₄,并将 N₂O 和 CH₄按增暖潜势折算(折算系数为 298 和 21—25)为 CO₂当量(CO_{2e})^[2,26]。稻田 CH₄^[27-28]、农田土壤 N₂O^[29-32]和 CO₂^[33-34]等通量观测主要采用原位封闭静态箱-气象色谱法和微气象法的窝度相关法。同时,也开展了温室气体排放的模型模拟(DNDC 生物地球化学过程模型^[35]等)。

社会经济视角的农业碳源/汇效应研究以农业生产经济过程为研究对象,重点关注农业生产过程中化肥、农药、种子、地膜、灌溉和耕作等农资物料和能源投入而引起的间接碳排放。目前常采用 IPCC 清单排放因子估算法、生命周期评估法、投入产出分析和碳足迹估算法等^[36]进行该视角的农业碳排放研究。该视角研究多采用基于农业投入的宏观统计数据,从农资投入、能源消费、废弃物处理和反刍动物等排放源头进行碳排放估算。单一的农业生产宏观统计数据很难分配到明确的区域空间,而且对农业经营模式、产品构成、种养关联等微观数据有所忽略,必然会导致估算结果具有较大的不确定性和模糊性。

(2)由自然与经济相互割裂到相互融合的二元农业碳源/汇综合方法尚需深化。

农业植被与土壤的碳排放与吸收监测使微小尺度(样地)农业碳源/汇得以综合,并被外推到不同尺度农地利用变化与生态系统的碳平衡。但在国家、区域或者局地尺度碳收支估算中,各种方法之间的准确性和精度以及监测实验数值的区域空间适用性等均缺乏充分而严格的评估。当前大部分的碳排放量估算均基于能源消费量和能源排放系数,而碳吸收又多从植物生长过程而获得,两者相互隔离。随着自然科学与社会科学的融合与整合^[37],近年来突破了单一自然生态系统或社会经济活动领域的视角局限,形成区域“自然-社会”二元碳源/汇综合研究框架^[38-39]。然而,农业的特殊性在于其需要同时缓解和适应气候变化。由自然与经济相互割裂到相互融合的二元农业碳源/汇效应研究的综合方法还需要具体化。

2.3 基于区域尺度视角的研究进展

(1)多集中在大中尺度和样地尺度,小尺度县域研究比较薄弱。

国内对全国、省域、市县、乡镇和样地等不同区域尺度的区域农业碳源/汇进行了大量研究。但多集中在大中尺度(全国^[40-41]、大地形区、行政区和省区^[42-43]等)和样地尺度,小尺度县域的研究不足^[36]。县域是我国现阶段具有独立运行功能、完整社会经济结构、分布最为广泛的基本地域单元。加强县域农业碳源/汇研究,可提高研究结果的针对性与可操作性。此外,既有研究偏集东部平原地区,对经营模式多样、种养构成复杂和内在关联多元的西部丘陵山地县域关注明显缺乏。

在区域农业碳源/汇估算基础上,区域分异、变化趋势、排放因子分析和公平性评价等研究逐渐深入。如通过碳源/汇强度分析区域空间分异^[44-46],利用环境库兹涅茨曲线和灰色预测模型^[47]、变化斜率^[48]等刻画变化趋势,采用碳重心和重心移动距离探讨区域碳源/汇重心转移^[49-50],运用 LMDI 模型和 Kaya 恒等式剖析区域农业碳源/汇效应的驱动机理^[51]和排放因子^[52-54];使用碳排放生态承载系数及经济效率评价区域农业碳排放公平性^[55-56]。这些研究为促进农业结构优化和科学减排提供策略依据。

(2)农产品供应链关联的区域间碳流及碳减排问题值得关注。

农业碳源/汇效应除涉及生产过程外,还与农产品供应链关联的区域间碳流及碳减排问题有关,如碳泄露、食物浪费、热量消耗过剩以及营养习惯或食物结构等^[57-60]。国内仅有城市食物浪费碳足迹^[61-62]和部门贸易隐含碳排放^[63]等个别报道(表 2)。

部门碳收支揭示了重要的碳流,这些碳流影响到多个部门,如果不计入区域碳收支核算,就是碳泄(渗)漏(carbon leak)。跨部门碳流动包括农资生产投入,以及从农业部门转移到能源部门的能源作物及其他生物燃料和在其他部门使用的农、林产品等。区域碳收支中可能遗漏的部门流动就是区域间产品的进出口。碳泄漏使一个领域或区域的耗费反映在其他地区的 CO₂排放中。虽然追踪地区间化石燃料转移的机制很发达,但地区间农林牧产品的交换并非如此^[57]。

表 2 农产品供应链关联的区域间碳流及碳减排问题

Table 2 Interregional carbon flow and emission reduction associated agricultural products supply chain

主题 Subjects	关联的碳流或碳减排 Associated carbon flow or carbon reduction	策略 Strategies	参考文献 References
碳泄漏 Carbon leakage	碳排放区域间转移	根据温室气体排放量对进口产品征收关税	[57—58, 64]
供应链浪费 Waste along supply chain	农产品处理、储存、加工、分销、消费等环节浪费造成碳排放	发达地区在供应链下游的食物加工、分销和消费;欠发达地区在供应链上游的农业生产后处理和储存	[59, 61—62]
热量消耗过剩 Excessive heat consumption	食物过度消费产生不必要的碳排放	建立健康的饮食习惯和结构	[58]
营养习惯/食物结构 Nutrition habits/food structure	食物生产效率差异使温室气体排放水平受到饮食的显著影响	动物蛋白质比植物蛋白质的排放量大,健康饮食应少肉食	[58, 60]

面对碳排放增多带来的气候变化难题,碳减排责任划分是各国争论的焦点。国际贸易造成的“碳泄露”问题已有相当程度的认识,国家间针对碳泄漏可采用对进口产品征收关税等^[63]减少排放泄漏的边界调整措施。中国的碳减排责任最终要落实到省市尺度上,区域间贸易引起的“碳泄露”同样值得考虑。可以使用多区域投入产出分析法,分别从生产者和消费者的角度对区域各部门碳排放进行分析,进而估算各部门进出口贸易中隐含的碳排放量^[58]。

鉴于农业部门温室气体排放量巨大,减少食物生产损失和浪费或解决热量消耗过剩问题的战略,有很大潜力成为减缓全球气候变化的有效工具^[59]。其中,营养习惯改变对农业能源消费和温室气体排放有重要影响^[60],节约和减少粮食浪费等是碳减排的重要途径。国内区域关联的碳泄漏需要定量评估,而食物生产损失和浪费等碳减排潜力值得关注。

3 基于我国农业经营特征的农业碳源/汇效应改进研究

3.1 我国小规模家庭农场和种养关联的多种经营特征

目前,国内已对作物秸秆草谷比^[64]和畜禽粪尿排泄系数^[65]等进行大量研究。据估算我国农业年生产有机物料资源量巨大^[65]:畜禽粪尿约 38 亿 t,秸秆(风干)约 10 亿 t。数量庞大的农业有机物料可通过种养关联的循环农业加以利用。种养关联的核心是作物秸秆、畜禽养殖废弃物的资源化利用。由养殖企业、有机肥企业、种植企业、政府等多主导^[66],形成多种以沼气工程、好氧堆肥和秸秆资源化为纽带的种养循环农业模式^[67],以及稻田种养结合等空间共生循环农业^[68]均具有整体减缓温室效应的作用。而目前我国农业生产经营的突出特征之一是小规模家庭农场和种养关联的多种经营,这种经营特征具有种养关联的分散和随意性。即使由农户组织形成的专业生产合作社仍然存在种养比例失调、种养分离与投入过剩^[69]等问题。既有研究常将种植业和畜牧业视为独立生产过程,忽略了种养关联碳效应。因此,加强种养关联模式、组织形式及其碳效率的理论探索和实践均对农业碳减排具有重要意义。

3.2 基于我国农业经营特征的碳源/汇效应改进研究

鉴于农业生产兼具缓解与适应气候变化的特征以及我国农业经营模式的特征,可进行如下多视角的碳源/汇效应改进研究。

(1) 将农业产业组分、农产品碳源/汇构成解析与种养关联碳源/汇综合并重。

农业同能源部门有类似的特征,即区域碳收支通常是部门碳收支的总和。不区分内部产出和投入结构的农业碳源/汇估算会造成结论模糊化,进而掩盖不同种植模式对碳足迹的影响。碳足迹评估的重要前提是边界界定^[70],科学的区域边界确定可以有效避免重复计算,从而更有针对性地提出减排策略^[71]。而我国小农经营的种植、畜牧和渔业混杂,彼此间的空间界限往往不够清楚。为避免漏报和重复计算,需要加强区域农业的全碳研究。而农业封存碳的行动可能影响农业机械、肥料、除草剂与杀虫剂、灌溉和产品运输等能源使用。

未来既应深化内部产业与农产品碳足迹的构成解析,探讨碳排放强度与农业产业和农产品结构的关系;也应加强种养关联模式中结构、规模、组分和技术等生产方式变化与碳源汇效应的综合关联,筛选适合经营特征的“以地定畜、以种定养、以养促进种养平衡”低碳农业循环模式和减排技术。

(2) 发展和完善农业碳源/汇评估模型、提高参数本土化程度。

区域农业碳源/汇效应的区域分异、变化趋势、排放因子分析和公平性评价等研究采用的模型方法见表 3。限于研究视角单一和数据缺乏等诸多原因,既有模型方法对经济增长、生产模式、技术进步、区域尺度等诸多因素多有忽略;对农业碳源/汇效应的综合性和动态性考虑不足。需要通过多视角关联(如种养关联、自然生态与社会经济二元关联、农产品供应链关联)的综合模拟,并将气候变化与农业适应及碳源/汇效应进行综合集成,发展和完善评估模型。

表 3 区域农业碳源/汇效应评估方法

Table 3 Evaluation methods of regional agricultural carbon source/sink effect

主题 Subjects	模型方法 Models and methods
时空变化 Spatiotemporal variation	(1) 环境库兹涅茨曲线(EKC), GM(1,1) 灰色预测模型^[47]。 (2) 变化斜率^[42]: $X_{sl} = [n \times \sum_{i=1}^n i \times y_i - (\sum_{i=1}^n i)(\sum_{i=1}^n y_i)] / [n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2]$, 式中, X_{sl} 为变化斜率; n 为时段数; y_i 为第 i 时段碳吸收、碳排放与净碳汇量(t)。 (3) 碳源/汇重心和重心移动距离^[49-50]: 碳源/汇重心: $X = \sum_{i=1}^n G_i x_i / \sum_{i=1}^n G_i$, $Y = \sum_{i=1}^n G_i y_i / \sum_{i=1}^n G_i$, 式中, X、Y 分别为重心经纬度值; n 为区内次级区域数目; x_i 和 y_i 分别为第 i 个次级区域的经纬度值。 G_i 为第 i 个次级区域的属性值(碳吸收量、碳排放量和净碳汇量) 重心移动距离: $D_{ij} = R \times \sqrt{(y_i - y_j)^2 + (x_i - x_j)^2}$, 式中: D 为时段内重心转移距离; i、j 为不同的年份; (x_i, y_i)、(x_j, y_j) 分别为第 i、j 年的区域重心坐标; R 为常数, 根据区域取值。
排放因子 Emission factor	(1) 对数平均权重法(Logarithmic mean weight Divisia method, LMDI)^[51-54]: $C = \sum_{i=1}^n E_{id} \times E_{ip} \times E_G \times AG = \sum_{i=1}^n (C_i/E_i) \times (E_i/E) \times (E/AG) \times AG$, 式中, C 为 CO₂ 排放量, E_{id} 为第 i 类能源排放强度, E_{ip} 为第 i 类能源在一次能源消费中的份额, E_G 为能源利用效率, AG 为农业实际总值, C_i 为第 i 类能源 CO₂ 排放量, E_i 为第 i 类能源消耗量, E 为能源消费总量。 (2) Kaya 恒等式^[51]: $C = ED \times EG \times GP \times P = (C/E) \times (E/G) \times (G/P) \times P$, 式中, C 为碳排放量, ED 为能源结构碳强度, EG 为单位 GDP 能耗, GP 为人均 GDP, P 为人口规模, E 能源消耗量, G 为国内生产总值。 改进的 Kaya 恒等式一: $aC = aED \times aEG \times aGP \times uP \times P = (aC/aE) \times (aE/aG) \times (aG/uP) \times (uP/P) \times P$。式中, aC 为农业碳排放量, aED 为农业能源碳排放强度, aEG 为农业能源使用效率, aGP 为生活水平, uP 为农村人口占总人口的比重, P 为人口规模, aE 为农业能源消耗量, aG 为农业贡献的 GDP, uP 为农村人口, P 为人口规模。 改进的 Kaya 恒等式二: $C = EI \times AI \times aG = (C/pG) \times (pG/aG) \times aG$, 式中, C 为碳排放量, pG 为种植业总产值, aG 为农林牧渔总产值, EI 为农业生产资料效率因素, AI 为农业结构因素, aG 为农业规模因素。
公平性评价 Fairness evaluation	区域农业碳排放公平性评价^[55-56]: (1) 农业碳排放生态承载系数: $S_i = M_i/N_i = \frac{E_i}{E} / \frac{C_i}{C}$, 式中, S_i 为 i 区域农业碳排放生态承载系数(%); M_i 为 i 区域农业碳吸收系数(%); N_i 为 i 区域农业碳排系数(%); E_i 为 i 区域农业碳吸收量(kg); C_i 为 i 区域农业排放量(kg); E 为大区农业碳吸收总量(kg); C 为大区农业排放总量(kg)。 (2) 农业碳排放经济效率: $O_i = F_i/N_i = \frac{G_i}{G} / \frac{C_i}{C}$, 式中, O_i 为 i 区域农业碳排放经济效率系数(%); F_i 为 i 区域经济贡献系数(%); N_i 为 i 区域农业碳排系数(%); G_i 为 i 区域农业生产总值(元); G 为大区农业生产总值(元); C_i 为 i 区域农业排放量(kg); C 为大区农业排放总量(kg)。

农田监测与样方试验推动农业碳源/汇综合研究和估算参数本土化。由于对不同区域尺度的自然环境制约以及对种植制度、生产模式与技术水平(如设施农业)等动态缺乏认识,致使农业碳源/汇估算参数依然匮乏。目前区域尺度普遍使用全球和国家尺度的缺省值,使研究结果存在较大的不确定性。应加大不同区域、

尺度和类型的农田监测与样方实验,并综合田间调查与农户问卷等途径,完善和修正温室气体排放系数,实现排放因子区域化、提高估算参数本土化程度。

(3) 追踪农产品生产、流通与消费等区域间碳流全过程。

农业与自然生态系统有着天然联系而具有较强的碳汇能力。目前的农业碳源/汇研究将生产到收获的生物周期边界视为系统边界,而将农产品运输、出口和销售及消费等潜在碳排放量置于系统边界之外。农产品生产、流通与消费供应链碳流的忽略限制了农业碳减排潜力。未来应从耕作、作物系统到作物秸秆和畜牧生产有机废物,并扩展到农产品供应链分配和消费环节,追踪农产品生产、流通与消费等区域间碳流全过程。注重经营模式、产品构成、种养关联、产品贸易、消费结构和家庭个体行为^[72]背景下的农业碳源/汇空间分异、碳补偿、碳泄漏、食物生产损失和浪费等碳排放综合研究。

4 结语

国内基于内部结构、双重属性和区域尺度等视角的农业碳源/汇研究,为农业减排增汇提供了有力支撑。但农业碳源/汇是一个异常复杂的问题,精确评估小规模家庭农场和种养关联多种经营特征下的我国农业碳源/汇对制定有效的减排策略、尽早实现碳达峰和碳中和的“双碳”目标至关重要。未来应集成样地观测、农户调查和统计数据,着力产业组分、农产品碳源/汇构成解析并加强种养关联碳源/汇综合研究;拓展和关联研究视角与数据获取方式,发展和完善评估模型,提高参数本土化程度;追踪农产品生产、流通与消费等区域间碳流过程,开展碳减排全过程研究。

参考文献 (References):

- [1] 葛全胜, 陈泮勤, 方修琦, 林海, 叶谦. 全球变化的区域适应研究: 挑战与研究对策. 地球科学进展, 2004, 19(4): 516-524.
- [2] IPCC. National Greenhouse Gas Inventories Programmer. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. [2016-12-20]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.
- [3] IPCC. AR5 Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. [2017-03-15]. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>.
- [4] O'Brien D, Brennan P, Humphreys J, Ruane E, Shalloo L. An appraisal of carbon footprint of milk from commercial grass-based dairy farms in Ireland according to a certified life cycle assessment methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19(8): 1469-1481.
- [5] Hammond G. Time to give due weight to the 'carbon footprint' issue. Nature, 2007, 445(7125): 256.
- [6] Wiedmann T, Minx J. A definition of "carbon footprint". Ecological Economics Research Trends, 2008, (1): 1-11.
- [7] Peter C, Fiore A, Hagemann U, Nendel C, Xiloyannis C. Improving the accounting of field emissions in the carbon footprint of agricultural products: a comparison of default IPCC methods with readily available medium-effort modeling approaches. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2016, 21(6): 791-805.
- [8] Negra C, Vermeulen S, Barioni L G, Mamo T, Melville P, Tadesse M. Brazil, Ethiopia, and New Zealand lead the way on climate-smart agriculture. Agriculture & Food Security, 2014, 3(1): 1-6.
- [9] 罗怀良, 袁道先, 陈浩. 近 50 年来重庆南川区三泉镇喀斯特区农田生态系统的演替分析. 中国岩溶, 2007, 26(3): 230-236.
- [10] 王占彪, 王猛, 陈阜. 华北平原作物生产碳足迹分析. 中国农业科学, 2015, 48(1): 83-92.
- [11] 黄晓敏, 陈长青, 陈铭洲, 宋振伟, 邓艾兴, 张俊, 郑成岩, 张卫建. 2004—2013 年东北三省主要粮食作物生产碳足迹. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3307-3315.
- [12] 曹黎明, 李茂柏, 王新其, 赵志鹏, 潘晓华. 基于生命周期评价的上海市水稻生产的碳足迹. 生态学报, 2014, 34(2): 491-499.
- [13] 陈中督, 徐春春, 纪龙, 方福平, 陈阜. 2004—2014 年南方稻区双季稻生产碳足迹动态及其构成. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3669-3676.
- [14] Li T X, Zhang F, Jiao Y Y, Zhang M J, Chang Y H, Matomela N. Study on carbon sequestration capacity of typical crops in Northern China. Journal of Plant Biology, 2019, 62(3): 195-202.
- [15] 李胜利, 金鑫, 范学珊, 黄文明, 曹志军. 反刍动物生产与碳减排措施. 动物营养学报, 2010, 22(1): 2-9.
- [16] 胡向东, 王济民. 中国畜禽温室气体排放量估算. 农业工程学报, 2010, 26(10): 247-252.
- [17] 廖仁郡, 陈玉成. 重庆市规模化畜禽养殖氨排放特征及减排策略研究. 中国生态农业学报, 2017, 25(5): 769-777.
- [18] 陈琳, 闫明, 潘根兴. 南京地区大棚蔬菜生产的碳足迹调查分析. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1791-1796.

- [19] Yang X L, Sun B B, Gao W S, Chen Y Q, Sui P. Carbon footprints of grain-, forage-, and energy-based cropping systems in the North China plain. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24(3): 371-385.
- [20] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究. *科技通报*, 1999, 15(5): 330-332.
- [21] 金峰, 杨浩, 蔡祖聪, 赵其国. 土壤有机碳密度及储量的统计研究. *土壤学报*, 2001, 38(4): 522-528.
- [22] 李玉宁, 王关玉, 李伟. 土壤呼吸作用和全球碳循环. *地学前缘*, 2002, 9(2): 351-357.
- [23] 罗怀良. 中国农田作物植被碳储量研究进展. *生态环境学报*, 2014, 23(4): 692-697.
- [24] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(6): 804-812.
- [25] 罗怀良. 川中丘陵地区近 55 年来农田生态系统植被碳储量动态研究——以四川省盐亭县为例. *自然资源学报*, 2009, 24(2): 251-258.
- [26] Gan Y T, Liang C, Campbell C A, Zentner R P, Lemke R L, Wang H, Yang C. Carbon footprint of spring wheat in response to fallow frequency and soil carbon changes over 25 years on the semiarid Canadian prairie. *European Journal of Agronomy*, 2012, 43: 175-184.
- [27] 王明星, 李晶, 郑循华. 稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理. *大气科学*, 1998, 22(4): 600-612.
- [28] 鲍远航, 徐晋保, 陈晔. 太湖流域农田稻季 CH_4 通量特征及影响因子. *生态学报*, 2020, 40(21): 7690-7698.
- [29] 黄国宏, 陈冠雄, 吴杰, 黄斌, 于克伟. 东北典型旱作农田 N_2O 和 CH_4 排放通量研究. *应用生态学报*, 1995, 6(4): 383-386.
- [30] 王少彬, 苏维瀚. 中国地区氧化亚氮排放量及其变化的估算. *环境科学*, 1993, 14(3): 42-46.
- [31] 于克伟, 陈冠雄, 杨思河, 吴杰, 黄斌, 黄国宏, 徐慧. 几种旱地农作物在农田 N_2O 释放中的作用及环境因素的影响. *应用生态学报*, 1995, 6(4): 387-391.
- [32] 邱炜红, 刘金山, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成. 种植蔬菜地与裸地氧化亚氮排放差异比较研究. *生态环境学报*, 2010, 19(12): 2982-2985.
- [33] 赵辉, 郑有飞, 李硕, 袁月, 黄积庆, 刘俊, 曹嘉晨. 基于微气象学方法的麦田 CO_2 和 O_3 通量的观测与模拟. *中国环境科学*, 2020, 40(3): 1038-1048.
- [34] 林而达, 李玉娥, 郭李萍, 高德明. 中国农业土壤固碳潜力与气候变化. 北京: 科学出版社, 2005: 29-40.
- [35] 李长生, 肖向明, Frolking S, Moore III B, Salas W, 邱建军, 张宇, 庄亚辉, 王效科, 戴昭华, 刘纪远, 秦小光, 廖柏寒, Sass R. 中国农田的温室气体排放. *第四纪研究*, 2003, 23(5): 493-503.
- [36] 刘明达, 蒙古军, 刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展. *热带地理*, 2014, 34(2): 248-258.
- [37] 李健, 周慧. 中国碳排放强度与产业结构的关联分析. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(1): 7-14.
- [38] 赵荣钦, 黄贤金. 城市系统碳循环: 特征、机理与理论框架. *生态学报*, 2013, 33(2): 358-366.
- [39] 赵荣钦, 刘英, 丁明磊, 张战平, 黄贤金, 秦耀辰. 区域二元碳收支的理论方法研究进展. *地理科学进展*, 2016, 35(5): 554-568.
- [40] 鲁春霞, 谢高地, 肖玉, 于格. 我国农田生态系统碳蓄积及其变化特征研究. *中国生态农业学报*, 2005, 13(3): 35-37.
- [41] 田云, 张俊飏, 吴贤荣, 程琳琳. 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. *自然资源学报*, 2015, 30(11): 1885-1895.
- [42] 张秀梅, 李升峰, 黄贤金, 李颖. 江苏省 1996 年至 2007 年碳排放效应及时空格局分析. *资源科学*, 2010, 32(4): 768-775.
- [43] 尧波, 郑艳明, 胡丹, 聂兰琴, 付姗, 胡启武. 江西省县域农业碳排放的时空动态及影响因素分析. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(3): 311-318.
- [44] 张开, 罗怀良, 王睿. 安岳县 2008—2012 年农田作物植被碳储量及其空间分布. *西南农业学报*, 2017, 30(8): 1860-1866.
- [45] 陈林, 罗怀良, 李政, 张梅. 宜宾市近 15 年农业碳排放时空格局及其驱动力分析. *西南农业学报*, 2019, 32(6): 1426-1434.
- [46] 田云, 张俊飏. 中国农业生产净碳效应分异研究. *自然资源学报*, 2013, 28(8): 1298-1309.
- [47] 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. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(11): 231-234.
- [48] 高标, 房骄, 卢晓玲, 李玉波. 区域农业碳排放与经济增长演进关系及其减排潜力研究. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(1): 13-18.
- [49] 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. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 91(1/3): 217-232.
- [50] 田云, 李波, 张俊飏. 我国农地利用碳排放的阶段特征及因素分解研究. *中国地质大学学报: 社会科学版*, 2011, 11(1): 59-63.
- [51] 田云, 张君. 地理分区视角下的农业碳效应驱动机理研究. *华中农业大学学报: 社会科学版*, 2020, (2): 78-87.
- [52] 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): 66-72.
- [53] 戴小文, 何艳秋, 钟秋波. 中国农业能源消耗碳排放变化驱动因素及其贡献研究——基于 Kaya 恒等扩展与 LMDI 指数分解方法. *中国生态农业学报*, 2015, 23(11): 1445-1454.
- [54] 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.
- [55] 田云, 张俊飏. 中国省级区域农业碳排放公平性研究. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(11): 36-44.
- [56] 罗红, 罗怀良, 李朝艳, 熊静芸. 泸州市农业碳收支时空变化及公平性评价. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(4): 409-418.
- [57] Smith P, Nabuurs G J, Janssens I A, Reis S, Marland G, Soussana J F, Christensen T R, Heath L, Apps M, Alexeyev V, Fang J Y, Gattuso J

- P, Guerschman J P, Huang Y, Jobbagy E, Murdiyarso D, Ni J, Nobre A, Peng C H, Walcroft A, Wang S Q, Pan Y D, Zhou G S. Sectoral approaches to improve regional carbon budgets. *Climatic Change*, 2008, 88(3): 209-249.
- [58] Fellmann T, Witzke P, Weiss F, Van Doorslaer B, Drabik D, Huck I, Salputra G, Jansson T, Leip A. Major challenges of integrating agriculture into climate change mitigation policy frameworks. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2018, 23(3): 451-468.
- [59] Rees R M, Barnes A P, Moran D. Sustainable intensification: the pathway to low carbon farming?. *Regional Environmental Change*, 2016, 16(8): 2253-2255.
- [60] Fazen K, Steinmüller H. Impact of changes in diet on the availability of land, energy demand, and greenhouse gas emissions of agriculture. *Energy, Sustainability and Society*, 2011, 1(1): 6.
- [61] 黄蕊, 钟章奇, 孙翊, 刘昌新, 刘丽. 区域分部门贸易的隐含碳排放——以北京为例. *地理研究*, 2015, 34(5): 933-943.
- [62] 吴燕, 王效科, 逯非. 北京市居民食物消费碳足迹. *生态学报*, 2012, 32(5): 1570-1577.
- [63] 张丹, 成升魁, 高利伟, 刘晓洁, 曹晓昌, 刘尧, 白军飞, 许世卫, 俞闻, 秦奇. 城市餐饮业食物浪费碳足迹——以北京市为例. *生态学报*, 2016, 36(18): 5937-5948.
- [64] 彭春艳, 罗怀良, 孔静. 中国作物秸秆资源量估算与利用状况研究进展. *中国农业资源与区划*, 2014, 35(3): 14-20.
- [65] 牛新胜, 巨晓棠. 我国有机肥料资源及利用. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1462-1479.
- [66] 姜海, 雷昊, 白璐, 吴昊, 赵海燕. 不同类型地区畜禽养殖废弃物资源化利用管理模式选择——以江苏省太湖地区为例. *资源科学*, 2015, 37(12): 2430-2440.
- [67] 赵立欣, 孟海波, 沈玉君, 丁京涛, 张曦. 中国北方平原地区种养循环农业现状调研与发展分析. *农业工程学报*, 2017, 33(18): 1-10.
- [68] 王强盛. 稻田种养结合循环农业温室气体排放的调控与机制. *中国生态农业学报*, 2018, 26(5): 633-642.
- [69] 周力, 曹晓蕾, 应瑞瑶. 产业组织演进与农业清洁生产. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(11): 164-170.
- [70] 耿涌, 董会娟, 郝凤明, 刘竹. 应对气候变化的碳足迹研究综述. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(10): 6-12.
- [71] 刘巽浩, 徐文修, 李增嘉, 褚庆全, 杨晓琳, 陈阜. 农田生态系统碳足迹法: 误区、改进与应用——兼析中国集约农作碳效率. *中国农业资源与区划*, 2013, 34(6): 1-11.
- [72] Niamir L, Kieseewetter G, Wagner F, Schöpp W, Filatova T, Voinov A, Hans Bressers. Assessing the macroeconomic impacts of individual behavioral changes on carbon emissions. *Climatic Change*, 2020, 158(2): 141-160.