

基于粮食生命周期碳核算的粮食安全影响研究进展^{*}

崔冠楠^{1,2)} 白鑫宇^{1,2)} 王鹏飞³⁾ 刘岩峰^{1,2)} 徐一鸣¹⁾ 董黎明^{1,2)†}

(1)北京工商大学生态环境学院,中国轻工业清洁生产和资源综合利用重点实验室,100048,北京; (2)国家环境保护食品链污染防治重点实验室,100048,北京; (3)中国环境科学研究院,湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室,国家环境保护湖泊污染控制重点实验室,100012,北京)

摘要 基于粮食生命周期的碳核算可找出碳排放较高的活动,有利于碳中和目标下的粮食安全。本文综述了粮食种植阶段及副产物资源化利用阶段的粮食全生命周期碳核算研究进展,并提出了不同阶段的碳减排措施。稻田 CH_4 与旱地 N_2O 是种植阶段直接碳排放的主要来源,间接碳排放主要来自氮肥施用,土地利用变化是影响种植阶段粮食安全的另一因素。未来应提高氮肥利用率,合理规划城市建设,建立粮食-林地协同发展的碳核算系统,发展非粮燃料乙醇。能源政策下乙醇副产物生产饲料可降低饲料行业对粮食的需求,粪便还田可减少工业化肥使用,提高土壤质量。未来应继续从碳足迹角度探究乙醇副产物资源化利用对粮食安全的影响,开展作物不同生长期的碳核算研究,帮助建立粮食全生命周期内更细化时间尺度上低碳高产的粮食安全模式,保障粮食安全稳定格局。

关键词 粮食安全;碳核算;生命周期评估;土地利用

中图分类号 X24;S19

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021185

0 引言

中国是一个人口大国,也是一个农业大国,主要粮食作物有水稻、玉米及小麦等。随着人口的增加,粮食需求量将继续增加,对粮食安全的要求也将持续提高。粮食安全指所有人在任何时候都可以在物质、社会和经济上获得充足、安全和营养丰富的粮食,以满足他们对积极健康生活的膳食需求和饮食偏好。此次国家在“十四五”规划中首次提出粮食安全指标,旨在形成自给自足、保证产能的粮食安全新格局。2020年肆虐的新冠疫情引发了世界粮食市场异常波动^[1],全球粮食短缺人数新增0.83亿~1.32亿人,粮食安全面临严峻挑战^[2]。

粮食安全是维持国家稳定的基础,若保持当前的饮食模式,预计到2050年全球的温室气体(greenhouse gas, GHG)排放量将增加80%^[3]。习近平主席表示中国将于2030年前实现碳达峰,2060年实现碳中和目标。目前中国粮食产量的提高通常以牺牲环境为代价,如何在低碳可持续发展下实现粮食安全已成为学术界和政治界关注的热点。碳足迹(carbon footprint, CF)可以描述一个活动或产品直接或间接产生的GHG的排放量^[4],粮食作物的CF一般包括作物和土壤的

直接GHG排放,以及农业活动投入的间接GHG排放,常使用生命周期评价方法(life cycle assessment, LCA)来定量核算粮食作物全生命周期的碳排放量^[5]。碳中和与能源息息相关,因此本文关注了以粮食为原料的第一代能源作物全生命周期的碳排放,其生命周期包括了粮食从播种、生长到收获的种植阶段,以及粮食生产燃料乙醇,到乙醇副产品加工饲料,再到动物食用饲料后粪便堆肥还田的副产物资源化利用阶段的全生命周期链,具体如图1所示。

前人已对粮食生命周期碳核算做出大量研究,但大多未将种植阶段与粮食副产物资源化利用阶段相结合,且未探讨碳中和背景下与能源政策有关的粮食作物资源化利用CF。将种植阶段与粮食副产物资源化利用阶段结合进行碳核算研究,有利于全生命周期链的碳减排与资源化利用。因此本文将粮食种植阶段与副产物资源化利用阶段结合,探究了能源政策下粮食全生命周期链对粮食安全与碳排放的影响,针对不同阶段提出减排增产措施,有利于在碳中和背景下寻求稳定粮食安全的可持续发展模式。

1 粮食种植阶段对粮食安全影响

粮食种植阶段的碳排放主要为农田土壤直接产

^{*} 国家自然科学基金资助项目(41861124004)

[†] 通信作者:董黎明(1974—),男,教授,博士。研究方向:生命周期分析及产品碳足迹核算。E-mail: donglm@btbu.edu.cn

收稿日期:2021-08-07

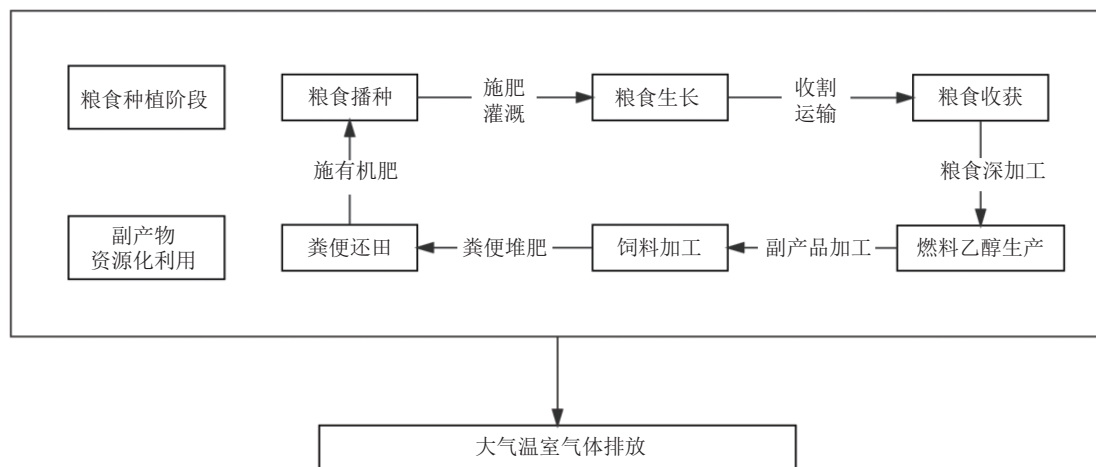


图1 燃料乙醇原料作物全生命周期链

生的碳排放,以及农资投入和农业活动造成的间接碳排放^[3]。土地作为种植阶段影响粮食安全的刚性因素,近年来从农业转向非农业的现象越来越严重,通过土地利用碳核算来利用有限的土地资源保障粮食安全已成为亟待解决的问题^[6]。

1.1 生产过程田间措施对粮食安全的影响 粮食作物种植阶段碳排放如图2所示,包括:农田土壤产生的直接碳排放以及田间管理措施所需的农业投入品的碳排放;灌溉过程电能柴油消耗的碳排放;耕作、播种、收获、运输等农机使用过程的碳排放^[7]。

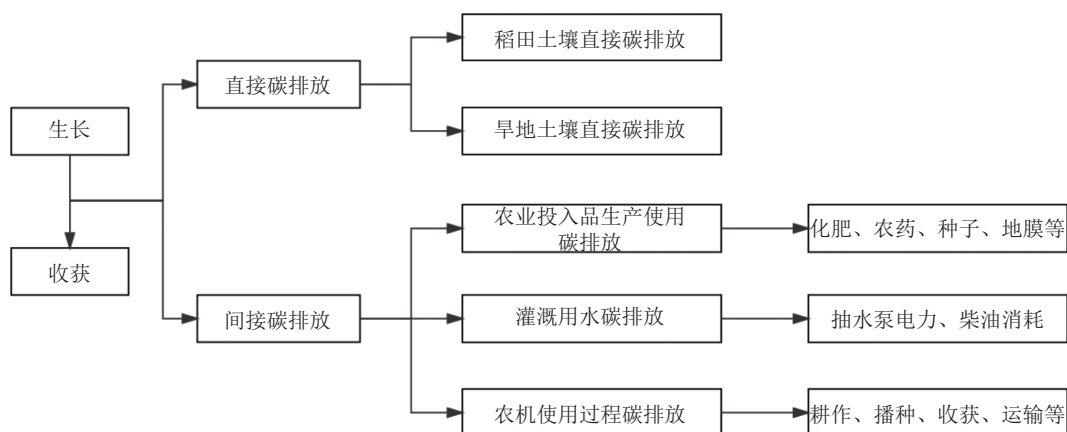


图2 粮食种植阶段碳排放

农田土壤产生的直接碳排放主要来自稻田产生的 CH_4 以及旱地产生的 N_2O ^[8-9]。由于稻田连续淹水灌溉形成厌氧环境,农田土壤中的产甲烷基质在产甲烷菌的作用下产生大量 CH_4 ^[10]。Xia 等^[11]发现,稻田高 CH_4 排放使得水稻生产的 CF 比小麦和玉米高数倍,且稻田排放的 CH_4 约占总碳排放的 85.05%。张惠云等^[12]发现,稻田 CH_4 排放占水稻生产碳排放比例最大,约为 41%。此外,全球大气 N_2O 人为排放源约有 65% 来自旱地农田土壤中微生物对氮素的硝化作用和反硝化作用^[13]。Cayuela 等^[14]发现自然灌溉作物的 N_2O 排放因子低于人工灌溉的旱地作物。Jiang 等^[15]表示旱地玉米-玉米系统的 N_2O 排放量最大且玉米面积产量最小。

除直接碳排放外,播种、灌溉、收获等农业活动

以及农药、化肥等农资投入造成的间接碳排放也不容小觑。Rajeev 等^[16]、Chen 等^[17]发现施肥对小麦、玉米和水稻生产系统的碳排放贡献均最大,且主要来自氮肥的施用^[18]。有研究表明,氮肥施用碳排放较高是由于制造氮肥需燃烧大量煤炭,每生产和使用 1 t 氮肥就会排放 13.5 t CO_2 ,氮肥制造过程产生的 GHG 排放占旱地作物生产过程 CF 的 50% 以上^[19]。化肥过量使用会增加碳排放,同时导致土壤肥力减弱、土壤压实和酸化、降低生产力,间接影响粮食安全^[20]。Ouyang 等^[21]发现,1991—2013 年中国合成氮肥的 NH_3 排放从每年 3.20 Mt 增加到 5.21 Mt, NH_3 沉降后导致土壤酸化和富营养化,降低土壤肥力。Zhu 等^[22]发现若氮肥投入以每年 1% 的速度增加,预计 2050 年的粮食产量损失将增加到 24%。播种、灌溉、收获的碳排放主要来

自抽水泵、农机等对柴油、电力的消耗,对粮食生命周期碳排放的贡献较小^[15, 23]. Yan 等^[24]指出播种、收获过程农机作业产生的碳排放占小麦、玉米总 CF 的 8%~15%,且灌溉仅占总 CF 的 2%~3%.

目前已有众多学者研究了减少粮食作物生命周期碳排放的措施.有研究发现由湿润灌溉替代淹水灌溉可以降低 64% 的稻田 CH₄ 排放,同时使水稻产量增加 11%^[18],滴灌可使旱地 N₂O 排放量减少

14%^[25].对间接碳排放而言,国内外亦有针对其减排措施的相关研究:姜珊珊等^[26]发现减氮施肥和有机无机配施 2 种方式的水稻碳减排稳产效果最好;Jiang 等^[27]发现玉米-晚稻比早稻-晚稻耕作制度碳排放减少 35.1%~41.7%,且第 2 年产量增加 17.6%.因此未来需探究合理的粮食种植模式,在恢复土壤肥力的同时能减少碳排放.表 1 列举了不同农业活动阶段应对碳排放对粮食安全的影响措施.

表 1 应对碳排放影响粮食安全的措施

农业活动	应对措施
播种	改良粮食作物品种,使用轮作、间作等耕作模式
灌溉	由湿润灌溉改为滴灌等节水灌溉方式,提高灌溉效率,减少灌溉用电量
施肥	提高化肥生产能源效率,有机肥无机肥配施,探寻高产量低化肥使用量的施肥模式
耕作、运输、收获	使用清洁能源代替汽油、柴油,提高农机用具燃料使用效率

单一技术对碳减排潜力影响不大,未来需改进田间管理措施,采用轮作、套作等耕作模式多方面协调灌溉方式与化肥施用,构建增产减排协同系统以及节肥节水的低碳粮食种植模式.此外还应增强新型肥料研制与氮肥增效减量技术,优化、控制氮肥的施用时间和施用量,减少 GHG 排放同时维持粮食产量,还应提高资源利用效率、发展农业集约化生产、改善土壤品质、实现高产量和高资源利用效率,以长期确保低碳要求下的粮食安全.

1.2 土地利用变化对粮食安全的影响 除农业活动外,土地利用方式也是种植阶段影响粮食安全的另一制约因素.土地利用/覆被变化(land use/cover change, LUCC)指人类改变土地利用管理方式导致土地覆被变化.为了满足人类不断增长的物质需求,全球范围内大规模地人为改变了土地利用方式,当粮食生产达到技术峰值时,耕地短缺将成为限制粮食安全的关键因素^[28].城市扩张、退耕还林是耕地资源短缺的主要原因,城市扩张会导致碳排放,而退耕还林又会增加碳汇,对土地利用进行科学合理的管理,可以更有效地发挥土地固碳作用,实现土地的低碳高产利用.

1.2.1 城市扩张对粮食安全的影响 城市扩张造成了不同土地利用方式在时空上的竞争,图 3 列举了近年来我国建设用地占用耕地的面积变化,受建设面积增加影响,2000—2008 年耕地面积持续递减,由于第 2 次全国土地调查数据更加全面,2010 年耕地面积比 2008 年增加 1355 万 hm²,多出的耕地有相当数量需生态退耕或不宜耕种,另有部分因表土层破坏、地下水超采等已影响耕种,2010 年后耕地面积整体仍呈下降趋势,建设用地占用耕地面积整体呈上升趋势.

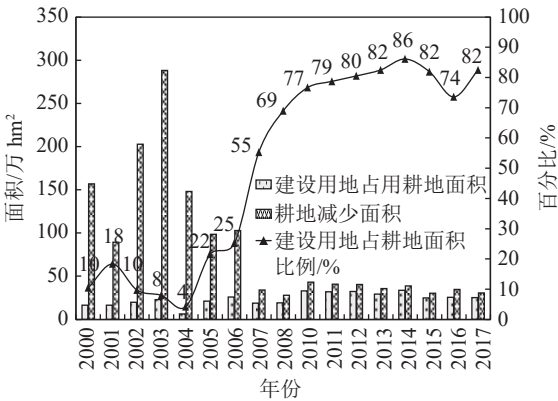


图 3 建设用地占用耕地面积

已有学者对耕地面积变化与粮食安全的关系作出研究,发现城市扩张导致耕地面积不断减少,严重挤压了农业和生态用地,且在发展中国家尤为严重,粮食自给率下降将直接影响粮食安全^[29]. Bren 等^[30]、Huang 等^[31]发现近 10 年全球城市扩张造成的耕地损失占全球耕地总损失的 45.9%,到 2030 年城市扩张将导致全球耕地减少 1.8%~2.4%,且耕地损失约 80% 发生在城市化进程最快的亚洲和非洲,而城镇化伴随的人口增多亦使得粮食安全不稳定性上升^[32].

城市化的扩张不断占用耕地面积,而粮食安全需要充足的耕地面积维系,且建设用地碳排放通常对区域总碳排放贡献最大.因此未来需最大限度减少对耕地及优质耕地的占用,建设低碳城市,保证粮食安全所需的耕地面积;另可使用有机改良剂,增加土壤肥力,以保证耕地面积减少下的粮食安全.

1.2.2 退耕还林对粮食安全的影响 退耕还林通过改变土地利用类型来修复生态环境,宏观上退耕还林使耕地大面积向林地转换,图 4 给出了近年来我国生

态退耕面积占耕地减少总面积的比例, 前一轮退耕还林还草始于 1999 年, 2000—2006 年生态退耕是耕地面积减少的主要原因, 退耕还林成效显著. 2006 年后为保证 1.2 亿 hm^2 耕地红线, 国家暂停退耕还林, 生态退耕面积占耕地减少面积比例显著下降. 2014—2019 年全国共退耕 4.45 万 km^2 , 十八大将生态文明建设提升至战略高度后未来还将继续加快退耕实施进度.

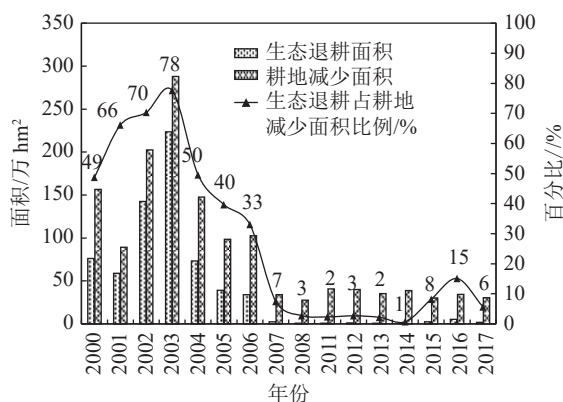


图4 耕地减少面积与生态退耕面积

林地具有碳汇作用, 可以增加土壤碳储量, 在固碳中发挥着重要作用^[33]. 曹永强等^[34]发现, 由于林地固碳作用, 林地碳承载力占河北省碳承载力的97%左右, 林业发达地区碳承载力较高. Guo等^[35]综述了全球造林对土壤碳储量的影响, 发现造林使不同深度的土壤碳储量增加了.

林地虽具有碳“汇”作用, 但其可通过土地利用变化影响粮食安全. Lu等^[36]预计退耕还林政策下, 中国南方农田粮食总产量在2000年的基础上将减少7.77%, 若25°以上坡地全部退耕还林还草, 粮食产量将减少2.1%. 诸多学者研究了应对退耕还林政策威胁粮食安全的措施, 结果表明可通过提高农业生产技术以增加农作物面积产量^[37]. Lü等^[38]发现, 自退耕还林政策实施以来黄土高原总播种面积迅速减少, 但玉米作物单株产量提高, 高原粮食总产量呈增长趋势, 退耕还林并未引起明显的粮食安全风险. 郑雪等^[39]发现, 退耕还林政策下提高粮食单产水平, 可使山西省粮食总产量和单产总体呈上升趋势, 未对粮食安全产生负面影响.

林地作为碳汇虽有固碳作用, 但退耕还林导致可用耕地面积减小, 综合退耕还林与粮食产量的研究发现, 随着农业生产技术的提高, 集约化生产使局部地区耕地的粮食面积产量增加, 可减小退耕还林政策对粮食安全的威胁. 未来可通过碳核算方法探究不同地域尺度退耕还林政策对粮食安全的影响, 寻找粮食产量最大化、碳吸收最大化与碳排放最小化的退耕

还林管理模式, 以明确退耕还林与粮食安全之间的联系.

1.2.3 能源政策变化对粮食安全的影响 2017年国务院印发了《关于扩大生物燃料乙醇生产和推广使用车用乙醇汽油的实施方案》, 以粮食作物为原料的第一代生物燃料乙醇具有较高的燃料产量和能源效率, 在所有乙醇原料中粮食作物的占比较高^[40]. 燃料政策变化势必会导致原料作物种植结构发生变化, 从而引起土地利用方式的改变, 因此有必要探究能源政策对典型乙醇原料作物种植区粮食安全的影响.

能源政策主要从土地利用变化、土地集约化和粮食价格波动方面影响粮食安全, 如图5所示. 燃料乙醇需求增长导致能源作物与粮食作物争夺土地资源, 使人均可用粮食减少, 降低粮食安全稳定性^[41]. Brandão等^[42]、Chen等^[43]发现, 与化石燃料相比, 生物燃料可以减少89%的化石能源消耗和66%~72%的GHG排放, 其中种植阶段土地利用变化碳排放占主导地位. 尽管生物能源具有环境友好优势, 但燃料作物仍属于耗地作物, 种植过程施用大量化肥、农药与大量耗水将造成土壤退化和侵蚀. 此外, Brinkman等^[44]指出生物燃料对粮食安全的最大影响是导致粮食价格上涨和进口依赖, 特别是在粮食进口国和低收入城市.

然而有学者认为, 在边际土地上种植能源作物不会对区域粮食安全造成较大波动. Weng等^[45]研究发现, 若开垦边际土地用于种植能源作物, 则可减轻对耕地资源和粮食安全的不利影响. Dias等^[46]模拟了在不影响粮食安全的情况下, 2050年生物能源项目可用土地面积的潜力, 发现尽管农业扩张给生物多样性带来了风险, 但仍有足够耕地养活2050年的人口.

新的能源政策实施使得玉米、小麦等传统粮食作物供应减少, 造成全球粮食价格波动, 导致耕地资源压力变大, 威胁粮食安全稳定性. 表2列举了部分未来可采取的措施以应对能源政策变化对粮食安全的影响.

为早日实现碳达峰与碳中和目标, 清洁能源的发展势在必行, 未来应发展耕地后备资源种植能源作物, 发展非粮燃料乙醇, 加强能源作物对土地质量的影响评估, 避免种植行为导致的土壤质量和水环境质量下降. 此外, 应从农户角度分析种植决策行为, 制定合理的能源作物种植规模, 从经济和环境效益引导农户的种植行为.

2 燃料乙醇原料作物副产品资源化利用对粮食安全的影响

除种植阶段外, 包含粮食生产燃料乙醇、乙醇副

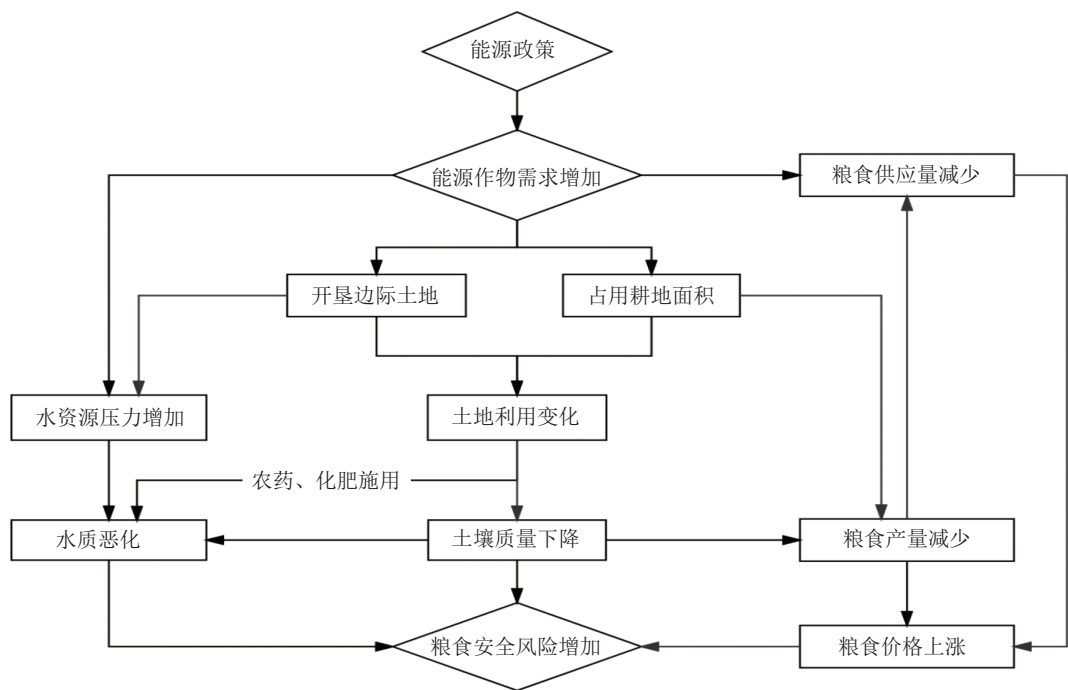


图 5 能源政策对粮食安全的影响

表 2 应对能源政策对粮食安全影响的措施

影响因素	应对措施
种植能源作物占用大量耕地面积	确定适宜边际土地时空分布, 利用耕地后备资源种植能源作物
粮食供应减少, 粮食价格上涨	发展集约化生产, 提高耕地的粮食面积产量, 发展以糖类、纤维素为原料的非粮生物乙醇
长期种植能源作物导致土壤与水环境质量下降	加强能源作物对土地质量的影响评估, 建立合理的能源作物种植管理制度
农户选择经济效益更高的作物	分析农户种植决策行为, 制定合理的能源作物种植规模, 从经济和环境效益引导农户种植行为

产物加工饲料以及粪便还田在内的粮食副产物资源化利用阶段亦可影响粮食安全。受能源政策变化影响, 生物燃料对粮食的消耗同时会对动物饲料行业产生负面冲击^[47]。为减小粮食消耗对饲料行业的冲击, 目前美国大力推广燃料乙醇副产物用于饲料行业, 全球约有 5200 万 t 生物燃料副产物用于生产动物饲料^[48]。另外, 将畜禽食用饲料后的粪便资源化处理, 形成的有机肥不仅可作为作物营养物质的来源, 还可实现粮食从种植到粪便还田全生命周期的资源化循环利用^[49]。

2.1 饲料加工 以玉米为原料的燃料乙醇产生的副产品——含可溶物的干酒糟(DDGS)含有未发酵的营养物质, 可作为饲料的蛋白质来源, 目前已被广泛应用于动物饲料行业^[50]。DDGS 生产饲料抵消了部分饲料对粮食的需求, DDGS 生产饲料所替代的粮食量相当于 1 年乙醇生产使用粮食的 38%^[51]。目前 DDGS 饲料对碳排放影响的研究还较少, Benavides 等^[52]发现生产 DDGS 饲料需要更多的加工步骤, 其 GHG 排放量高于用玉米和豆粕生产的饲料。

以粮食为原料的第一代燃料乙醇与粮食安全存

在冲突, 近年来已发展以木薯等为原料的非粮燃料乙醇, 有利于减小能源市场对粮食安全的冲击^[53]。木薯乙醇的副产物木薯渣经发酵处理后可作为动物饲料, 降低饲料成本^[54]。然而目前关于木薯渣生产饲料的碳核算研究较少, 未来可考虑对木薯乙醇及其副产品生产饲料的全过程进行碳核算研究, 对比粮食乙醇生产的碳核算, 寻找能源政策背景下有利于粮食安全的乙醇原料作物与副产物资源化利用类型。

2.2 粪便还田 近年来中国粮食增产依赖大量化肥的投入, 畜禽食用饲料后排放的粪便养分含量丰富, 通过堆肥技术可转为有机肥料替代工业化肥, 若畜禽粪便资源化利用率由 60% 增至 70%, 则氮、磷、钾肥施用量可减少 3.7%、17.5%、44.2%^[55]。此外有研究表明, 粪便还田过程碳排放主要来自粪便处理过程^[56], 施用粪肥可使粮食生产的 GHG 减排潜力增加 54%, 提高土壤品质, 有利于粮食增产^[18]。Li 等^[57]对比了农、猪生产一体化系统与农业、猪生产分离系统的 GHG 净排放, 发现一体化系统的粪肥还田环节使得 GHG 排放比分离系统少 10%, 分离系统中化肥的 GHG 排放占总 GHG 排放的 42.56%, 而在农、猪一体化系统

中仅占 25.24%。

未来可通过核算作物种植-畜禽粪便还田全生命周期的 CF, 进一步明确有机肥与粮食全生命周期碳减排之期间的关系, 建立减排增产的作物-养殖一体化系统。此外, 乙醇副产物饲料与传统饲料在养殖过程中产生的粪污成分或有不同, 其堆肥还田后对农田的环境影响也存在差异。Benke 等^[58]发现施用含 DDGS 饲料喂养的牛粪肥后, 其大麦产量显著高于普通谷物饲料喂养的粪肥, 但同时其土壤中的总磷水平也较高。未来可考虑对生物乙醇副产物生产饲料的粪便还田进行 CF 核算, 有利于探寻能源政策变化后不同粪便成分对农田环境和碳排放的影响。

3 结论与展望

本文通过综述发现粮食安全与碳中和目标存在一定的矛盾, 保障粮食安全的农业活动通常会造成较高的碳排放, 而碳减排措施通常又会对粮食安全造成威胁。能源政策变化下的粮食生命周期包括粮食从播种、生长到收获的种植阶段, 以及粮食生产乙醇、乙醇副产物加工饲料至粪便堆肥还田的全过程。基于粮食生命周期的碳核算可以得到粮食生命周期内的碳排放量, 有利于政策制定者寻找低碳高产的粮食安全生产模式。

粮食作物直接碳排放主要来自稻田 CH_4 与旱地 N_2O , 间接碳排放主要来自于化肥尤其是氮肥的施用。改进灌溉方式、施肥方式与轮作方式等有利于减少粮食生产过程的碳排放。未来应探寻减排增产协同的作物种植模式与灌溉、施肥方式, 达到改善土壤品质、提高土壤肥力、保障粮食安全的目的。近年来土地利用变化导致大量耕地面积被占用, 城市扩张的碳排在土地利用变化的碳排放中占比最大, 退耕还林虽可增加碳“汇”, 但同时也会缩小耕地面积, 能源政策实施使粮食价格上涨, 增加全球粮食安全风险。未来应合理规划城市建设, 减少对优质耕地的占用, 建立粮食-林地协同发展的碳核算系统, 明确退耕还林与粮食安全之间的联系, 发展耕地后备资源种植能源作物, 发展非粮燃料乙醇, 引导农户合理规划能源作物种植规模。

乙醇副产物作为动物饲料可抵消部分饲料行业对粮食的需求, 粪便堆肥还田可减少化肥施用, 提高土壤品质, 实现粮食全生命周期的资源循环利用。但 DDGS 饲料粪便还田对碳排放的影响尚未可知, 且动物食用 DDGS 生产的饲料排放的粪便成分与传统饲料也不同。因此有必要对乙醇副产物生产饲料行业进行 CF 核算, 探究该饲料产生的动物粪便对环境的

影响, 与非粮燃料乙醇副产物资源化利用 CF 进行对比, 寻找低碳排放、零化肥增长的粪便还田模式。

此外, 综述不同的粮食作物碳核算后发现, 粮食种植阶段碳核算多以播种到收获为时间尺度, 缺少作物不同生长期变化的碳核算研究, 未来可对作物进行更细化时间尺度上的碳核算, 探究不同生长期的碳减排措施, 帮助政策制定者寻找从粮食种植、乙醇生产到饲料加工、粪便还田全生命周期减排增产目标, 保障国家粮食安全稳定格局。

4 参考文献

- [1] 陈志钢, 詹悦, 张玉梅, 等. 新冠肺炎疫情对全球食物安全的影响及对策[J]. 中国农村经济, 2020(5): 2
- [2] 李俊杰, 李建平, 袁月, 等. 新冠疫情冲击下中国稻谷价格上涨情势、影响因素及调控措施[J]. 农业经济问题, 2021, 42(5): 90
- [3] LING L, SHUAI Y J, XU Y, et al. Comparing rice production systems in China: economic output and carbon footprint[J]. Science of the Total Environment, 2021, 791: 147890
- [4] 孙建卫, 陈志刚, 赵荣钦, 等. 基于投入产出分析的中国碳排放足迹研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(5): 28
- [5] LIANG L, LAL R, RIDOUTT B G, et al. Life cycle assessment of China's agroecosystems[J]. Ecological Indicators, 2018, 88: 341
- [6] CHEN B, HAN M Y, PENG K, et al. Global land-water nexus: agricultural land and freshwater use embodied in worldwide supply chains[J]. Science of the Total Environment, 2018, 613/614: 931
- [7] 朱永昶, 李玉娥, 姜德锋, 等. 基于生命周期评估的冬小麦-夏玉米种植系统碳足迹核算: 以山东省高密地区为例[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(5): 473
- [8] 夏龙龙, 颜晓元. 中国粮食作物生命周期生产过程温室气体排放的研究进展及展望[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 665
- [9] SMITH K A. Changing views of nitrous oxide emissions from agricultural soil: key controlling processes and assessment at different spatial scales[J]. European Journal of Soil Science, 2017, 68(2): 137
- [10] 孙会峰, 周胜, 付子轼, 等. 高温少雨对不同品种水稻 CH_4 和 N_2O 排放量及产量的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(12): 3540
- [11] XIA L L, TI C P, LI B L, et al. Greenhouse gas emissions and reactive nitrogen releases during the life-cycles of staple food production in China and their mitigation potential[J]. Science of the Total Environment, 2016, 556:

- 116
- [12] 张惠云, 秦丽杰, 贾利. 吉林省水稻生产的碳足迹与水足迹时空变化特征[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(6): 974
- [13] SHAKOOR A, SHAKOOR S, REHMAN A, et al. Effect of animal manure, crop type, climate zone, and soil attributes on greenhouse gas emissions from agricultural soils: a global meta-analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 124019
- [14] CAYUELA M L, AGUILERA E, SANZ-COBENA A, et al. Direct nitrous oxide emissions in Mediterranean climate cropping systems: emission factors based on a meta-analysis of available measurement data[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 238: 25
- [15] JIANG R, YANG J Y, DRURY C F, et al. Assessing the impacts of diversified crop rotation systems on yields and nitrous oxide emissions in Canada using the DNDC model[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 759: 143433
- [16] RAJEEV S, PEEYUSH S, SYLVAIN R P. Environmental and economic assessment of paddy based cropping systems in Middle Indo-Gangetic Plains, India[J]. *Environmental and Sustainability Indicators*, 2020, 8: 100067
- [17] CHEN Z D, XU C C, JI L, et al. Effects of multi-cropping system on temporal and spatial distribution of carbon and nitrogen footprint of major crops in China[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: e00895
- [18] 张卫建, 张艺, 邓艾兴, 等. 我国水稻品种更新与稻作技术改进对碳排放的综合影响及趋势分析[J]. 中国稻米, 2021, 27(4): 53
- [19] CHENG K, YAN M, NAYAK D, et al. Carbon footprint of crop production in China: an analysis of National Statistics data[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2015, 153(3): 422
- [20] BARDGETT R D, GIBSON D J. Plant ecological solutions to global food security[J]. *Journal of Ecology*, 2017, 105(4): 859
- [21] OUYANG W, LIAN Z M, HAO X, et al. Increased ammonia emissions from synthetic fertilizers and land degradation associated with reduction in arable land area in China[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(11): 3928
- [22] ZHU Q C, LIU X J, HAO T X, et al. Cropland acidification increases risk of yield losses and food insecurity in China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 256: 113145
- [23] SIYAL A W, GERBENS-LEENES P W, NONHEBEL S. lower Indus Basin in Pakistan, comparing water supply by gravity fed canal networks and groundwater pumping[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 286: 125489
- [24] YAN M, CHENG K, LUO T, et al. Carbon footprint of grain crop production in China- based on farm survey data[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104: 130
- [25] BARAM S, EVANS J F, BEREZKIN A, et al. Irrigation with treated wastewater containing nanobubbles to aerate soils and reduce nitrous oxide emissions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 280: 124509
- [26] 姜珊珊, 庞炳坤, 张敬沙, 等. 减氮及不同肥料配施对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1741
- [27] JIANG Z H, LIN J D, LIU Y Z, et al. Double paddy rice conversion to maize-paddy rice reduces carbon footprint and enhances net carbon sink[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 258: 120643
- [28] LUNYOLO L D, KHALIFA M, RIBBE L. Assessing the interaction of land cover/land use dynamics, climate extremes and food systems in Uganda[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 753: 142549
- [29] ABU HATAB A, CAVINATO M E R, LINDEMER A, et al. Urban sprawl, food security and agricultural systems in developing countries: a systematic review of the literature[J]. *Cities*, 2019, 94: 129
- [30] BREN D A C, BAIOCCHI G, BARTHEL S, et al. Future urban land expansion and implications for global croplands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(34): 8939
- [31] HUANG Q X, LIU Z W, HE C Y, et al. The occupation of cropland by global urban expansion from 1992 to 2016 and its implications[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(8): 084037
- [32] CHEN C C, LIU G Y, MENG F X, et al. Energy consumption and carbon footprint accounting of urban and rural residents in Beijing through Consumer Lifestyle Approach[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 575
- [33] 朱万泽. 成熟森林固碳研究进展[J]. 林业科学, 2020, 56(3): 117
- [34] 曹永强, 朱明明, 郑爽. 河北省碳足迹及碳承载力的时空演变分析[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(8): 55
- [35] GUO Y, ABDALLA M, ESPENBERG M, et al. A systematic analysis and review of the impacts of afforestation on soil quality indicators as modified by climate zone, forest type and age[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 757: 143824
- Energy and carbon footprints for irrigation water in the

- [36] LU Q S, XU B, LIANG F Y, et al. Influences of the Grain-for-Green project on grain security in Southern China[J]. *Ecological Indicators*, 2013, 34: 616
- [37] SMITH P. Delivering food security without increasing pressure on land[J]. *Global Food Security*, 2013, 2(1): 18
- [38] LÜ C H, XU Z Y. Crop production changes and the impact of Grain for Green program in the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(1): 18
- [39] 郑雪, 姚顺波, 鲁亚楠. 退耕还林工程对粮食生产的影响: 以山西省为例[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(2): 239
- [40] 张蓓蓓, 马颖, 耿维, 等. 4种能源植物在中国的适应性及液体燃料生产潜力评估[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(3): 864
- [41] ROSEGRANT M W, MSANGI S. Consensus and contention in the food-versus-fuel debate[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2014, 39: 271
- [42] BRANDÃO M, AZZI E, NOVAES R M L, et al. The modelling approach determines the carbon footprint of biofuels: the role of LCA in informing decision makers in government and industry[J]. *Cleaner Environmental Systems*, 2021, 2: 100027
- [43] CHEN R, QIN Z C, HAN J, et al. Life cycle energy and greenhouse gas emission effects of biodiesel in the United States with induced land use change impacts[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 251: 249
- [44] BRINKMAN M, LEVIN-KOOPMAN J, WICKE B, et al. The distribution of food security impacts of biofuels, a Ghana case study[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2020, 141: 105695
- [45] WENG Y W, CHANG S Y, CAI W J, et al. Exploring the impacts of biofuel expansion on land use change and food security based on a land explicit CGE model: a case study of China[J]. *Applied Energy*, 2019, 236: 514
- [46] DA CUNHA DIAS T A, LORA E E S, MAYA D M Y, et al. Global potential assessment of available land for bioenergy projects in 2050 within food security limits[J]. *Land Use Policy*, 2021, 105: 105346
- [47] ANEJIONU O C D, DI LUCIA L, WOODS J. Geospatial modelling of environmental and socioeconomic impacts of large-scale production of advanced biofuel[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2020, 142: 105789
- [48] SÁNDOR Z J, RÉVÉSZ N, LEFLER K K, et al. Potential of corn distiller's dried grains with solubles (DDGS) in the diet of European catfish (*Silurus glanis*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2021, 20: 100653
- [49] PANDEY B, CHEN L D. Technologies to recover nitrogen from livestock manure: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 784: 147098
- [50] LAMMERS P J, KERR B J, HONEYMAN M S. Biofuel co-products as swine feed ingredients: combining corn distillers dried grains with solubles (DDGS) and crude glycerin[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2015, 201: 110
- [51] POPP J, HARANGI-RÁKOS M, GABNAI Z, et al. Biofuels and their co-products as livestock feed: global economic and environmental implications[J]. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 2016, 21(3): 285
- [52] BENAVIDES P T, CAI H, WANG M, et al. Life-cycle analysis of soybean meal, distiller-dried grains with solubles, and synthetic amino acid-based animal feeds for swine and poultry production[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2020, 268: 114607
- [53] REWLAY-NGOEN C, PAPONG S, ONBUDDHA R, et al. Evaluation of the environmental performance of bioethanol from cassava pulp using life cycle assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 284: 124741
- [54] TRAKULVICHEAN S, CHAIPRASERT P, OTMAKHOVA J, et al. Comparison of fermented animal feed and mushroom growth media as two value-added options for waste Cassava pulp management[J]. *Waste Management & Research*, 2017, 35(12): 1210
- [55] 石晓晓, 郑国砥, 高定, 等. 中国畜禽粪便养分资源总量及替代化肥潜力[J]. *资源科学*, 2021, 43(2): 403
- [56] 潘笑. 猪粪处理技术生命周期环境影响评估[D]. 南京: 南京大学, 2018
- [57] LI Z J, SUI P, WANG X L, et al. Comparison of net GHG emissions between separated system and crop-swine integrated system in the North China Plain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 149: 653
- [58] BENKE M B, HAO X Y, CAFFYN P, et al. Using manure from cattle fed dried distillers' grains with solubles (DDGS) as fertilizer: effects on nutrient accumulation in soil and uptake by barley[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 139(4): 720

Food security impact gauged by carbon accounting of food life cycle

CUI Guannan^{1, 2)} BAI Xinyu^{1, 2)} WANG Pengfei³⁾ LIU Yanfeng^{1, 2)}
XU Yiming¹⁾ DONG Liming^{1, 2)}

(1) School of Ecological Environment, Key Laboratory of Cleaner Production and Integrated Resource Utilization of China National Light Industry, Beijing Technology and Business University, 100048, Beijing, China; 2) State Environmental Protection Key Laboratory of Food Chain Pollution Control, 100048, Beijing, China; 3) National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, State Environment Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 100012, Beijing, China)

Abstract Food security is closely related to society and national economy. Carbon accounting based on food life cycle could identify activities with high carbon emissions, conducive to ensuring food security under the goal of carbon neutrality. The life cycle of grain under the change of energy policy includes farmland planting, ethanol preparation and ethanol by-product resource utilization, and manure-return to the field. CH₄ emission is the main source of direct carbon emission, and indirect carbon emission is mainly due to application of chemical fertilizer, especially nitrogen fertilizer. Land use change (due to urban expansion, conversion of farmland to forests and changes in energy policies) is another factor affecting food security. Future nitrogen use efficiency should be improved, organic fertilizer should be applied, urban construction should be rationally planned, carbon accounting system should be established for coordinated development of grain and forest land, and non-grain fuel ethanol should be developed. Impact of resource utilization of food crop by-products on food security was analyzed, food by-product production of feed was found to reduce feed industry demand for food, manure-return to the -field could reduce the use of industrial fertilizers and improve soil quality. Impact of by-product feed production and manure-return on carbon emissions were not studied. In the future, carbon accounting could be combined with food life cycle to help policy makers to find a low-carbon and high-yield food security model in the life cycle to ensure a stable pattern of food security.

Keywords food security; carbon accounting; life cycle assessment; land use

【责任编辑: 武 佳】