

生命周期评价在玉米种植及深加工产品中的应用

丁佳莹,董黎明*,刘岩峰,孙东霞 (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,国家环境保护食品链污染防治重点实验室,北京 100048)

摘要: 对 LCA 在玉米种植环境影响研究中的目标与范围定义、清单分析、环境影响指标与计算方法、结果解释等方面的研究进行了梳理分析,其中大部分文献均对碳足迹进行了计算,CML (Institute of Environmental Sciences of the University of Leiden), ReCiPe (许多 LCA 领域研究人员共同开发)和 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)方法是应用最多的 3 种方法,经分析计算得到国外玉米种植单位产量碳足迹均值为 0.50kg CO₂-eq /kg,我国的均值为 0.58kg CO₂-eq /kg.同时本文也对 LCA 在玉米深加工产品中的研究进展进行了分析整理,对今后 LCA 应用于玉米种植及深加工产品中的发展方向进行了展望.

关键词: 生命周期评价; 玉米种植; 玉米深加工产品; 环境影响

中图分类号: X820.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)11-5405-11

Application of life cycle assessment in maize planting and deep processing products. DING Jia-ying, DONG Li-ming*, LIU Yan-feng, SUN Dong-xia (State Environmental Protection Key Laboratory of Food Chain Pollution Control, Key Laboratory of Cleaner Production and Integrated Resource Utilization of China National Light Industry, School of Ecological Environment, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China). *China Environmental Science*, 2021,41(11): 5405~5415

Abstract: This paper focused on the research of Life Cycle Assessment (LCA) in the environmental impact of maize planting, including the definition of goal and scope, inventory analysis, environmental impact indicators and calculation methods, results interpretation and so on. Carbon footprint was calculated in most literatures. CML(Institute of Environmental Sciences of the University of Leiden), ReCiPe (developed by many LCA researchers) and IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) are the three most widely used methods. Through analysis and calculation, the average carbon footprint per unit yield of corn planting in foreign countries is 1.78kg CO₂-eq/ kg, while that in China is 1.31kg CO₂-eq / kg. Meanwhile, this research also reviewed the research of LCA in deep processing products from maize, and prospects the development direction of LCA in maize planting and deep processing products in the future.

Key words: life cycle assessment; maize planting; deep processing products from maize; environmental impact

玉米是全球也是中国第一大作物^[1],种植面积约 1.6 亿 hm²,占全球耕地面积的 11%^[2].玉米不仅在保障国家粮食安全中占据重要地位,同时也是饲料、乙醇、氨基酸等许多食品和工业产品的重要原料.随着世界各地食品、饲料和能源需求不断增加,人们对玉米生产环境影响的关注也在不断增加^[3].不同玉米种植制度、种植过程中农资过度投入等会带来一系列环境问题,同时对玉米产量也有影响^[4].农业系统目前所面临的挑战就是减少资源和能源消耗、降低环境负担的同时生产更多的粮食^[5],实现向可持续的农业-食品系统转变.因此,定量评价玉米种植过程中的环境影响对玉米农业可持续发展至关重要.

生命周期评价(LCA)方法是对产品或系统整个生命周期环境影响及其潜在影响进行研究的工具.

该方法贯穿产品生命周期全过程,即从原材料获取、生产、使用、直至最终处置.国际标准化组织于 1997 年将 LCA 结构确定为目的和范围的确定、清单分析、影响评价及结果解释 4 部分^[6].明确的研究目标是确定研究范围即系统边界的基础^[7].随着研究目标的确定,功能单位也随之确定.精准定义功能单位是 LCA 计算结果准确性、实用性的前提^[8].尤其在比较研究中,不同功能单位对结果的影响尤为显著^[9].LCA 研究需要使用原始数据(实验测量、实地调研等)^[10]进行计算,当原始数据不可得或不可用时,也可以通过文献调研、模型模拟或采用数据库中的数据等进行计算^[11-12].生命周期环境影响评估(LCIA)

收稿日期: 2021-04-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41861124004)

* 责任作者, 教授, donglm@btbu.edu.cn

中的归一化和加权评估不是环境影响评估中必须的步骤,但当需要比较几种不同方案时,归一化和加权评估则是重要的步骤^[13].生命周期解释则是将其其他部分与 LCA 结论和建议联系起来的“枢轴”^[14].相比于其他环境影响评价方法,LCA 具有系统、客观等优势,并且已经成为一种广泛应用的产品环境特征分析和决策支持工具^[15].LCA 最初为评估工业系统的环境影响而开发^[16],随着消费者对绿色食品的关注,LCA 在农业-食品系统中迅速发展^[17].目前在与食品有关的农作物种植^[18-20]、畜牧业^[21-22]、渔业^[23-25]、食品制造业^[26-29]中都得到了广泛应用,已经成为指导农业生产向可持续系统转变的主要工具.目前,针对 LCA 在玉米中的应用研究虽然很多,但各个研究所收集的排放数据内容、数据获取方法不尽相同.在量化玉米种植过程中施肥带来的环境影响时,Wang 等^[30]考虑了农田重金属污染,但 Li 等^[31]和 Bacenetti 等^[32]则未进行考虑.在探究玉米种植模式环境影响时,Boone 等^[33]考虑了农药挥发,但 Zhang 等^[34]、Feng 等^[35]和 Fantin 等^[36]均未考虑.清单数据收集的完整性与准确性会影响环境影响结果的可信度.另外,我国缺乏玉米种植环境影响数据库,在进行以玉米为原料的产品 LCA 研究时,通常选用国外数据库中的数值,Yang 等^[37]在对味精生产过程清洁生产措施进行生命周期评估时,原材料玉米就选择了 Ecoinvent 数据库数据.那么国内外玉米种植环境

影响数值是否存在差异?这关系到玉米深加工产品环境影响计算结果的准确性.

鉴于此,本文梳理了国内外 LCA 在评估玉米种植环境影响中的应用,分析了目标与范围定义、清单分析、环境影响指标与计算方法选择、结果不确定性来源等方面的差别与联系.另外,农业是温室气体重要排放源,占人类活动温室气体排放总量的 23%~30%^[38],结合我国作为能源消费和碳排放大国,在《气候变化联合声明》中承诺 2030 年左右实现碳排放达峰^[39],本文还得到了国内外玉米种植碳足迹结果范围.同时也对 LCA 在玉米深加工产品中的有限应用进行了概述,展望了 LCA 在玉米种植及深加工产品中应用的发展趋势,旨在为促进玉米种植可持续发展及玉米深加工产品绿色供应链建设提供科学依据.

1 玉米种植的 LCA 研究

1.1 目的和范围的确定

1.1.1 研究目标 玉米种植 LCA 研究目标包括:量化种植过程中施用化肥所带来的环境影响;识别玉米种植生命周期内各阶段重要环境因素;进行种植模式的对比、改进.表 1 为当前 LCA 研究的研究目的与定义的功能单位.数据来源有实地调研、官方统计数据、实测、模型模拟和相关文献 5 种渠道.

表 1 玉米种植 LCA 研究中的研究目标、研究对象及区域、功能单位和其他排放数据
Table 1 Research objectives, regions, functional units and other emission data in LCA study of maize planting

研究目的	研究对象及区域		功能单位 (面积或质量)	其他排放数据
量化施肥影响	磷肥 ^[40]	中国巢湖	1hm ²	其他田间排放
	氮肥 ^[30]	中国全域	1hm ²	氮磷淋溶流失、氨挥发;重金属
	有机肥 ^[31-32]	河北栾城	1hm ²	氮磷淋溶流失、氨挥发;
		意大利北部	1t	氮磷淋溶流失、氨挥发;
单一种植模式环境影响研究	小麦-玉米轮作 ^[41-44]	山东桓台	1hm ² 、1t	氮磷淋溶流失、氨挥发;农药挥发
		河北栾城	1t	氮磷淋溶流失、氨挥发;重金属
		河北曲周	1kg	氮磷淋溶流失、氨挥发;农药挥发、重金属
		河北吴桥	1hm ² 、1t	土壤有机碳变化
单一种植模式环境影响研究	玉米种植 ^[45-46,34-36,3,33]	中国全域	1hm ² 、1kg	未收集
		山西太古	1hm ² 、1kg	土壤有机碳变化
		山西新绛	1hm ² 、1t	氮磷淋溶流失、氨挥发;
		黄淮海区域	1hm ² 、1kg	氨挥发
		意大利北部	1t	氮磷淋溶流失、氨挥发;
	美国中西部 12 州	比利时 Flanders	1kg	其他田间排放
				氮磷淋溶流失、氨挥发;农药挥发

续表 1

研究目的	研究对象及区域		功能单位 (面积或质量)	其他排放数据
不同种植模式环境影响对比研究	小麦-玉米两季制与玉米单作 ^[47]	河北吴桥	1hm ²	未收集
	春玉米-晚稻与早晚稻 ^[48]	中国杭州	1hm ²	氨挥发
	玉米-高粱间作与玉米单作 ^[49]	美国 Fargo 等地	1hm ²	其他田间排放

1.1.2 系统边界 定义系统边界对 LCA 模型至关重要^[50].系统边界的相同与否决定了 LCA 研究结果是否具有可比性^[8].玉米种植包括播种、喷洒农药、施用化肥、灌溉等过程.系统边界如图 1 所示,玉米作为原料类产品,成熟收割后作为食品和工业原材料.意大利、美国、比利时等国家关于玉米种植 LCA 研究较多,我国关于玉米种植 LCA 研究多在河北、山东、山西等省份.不同国家和地区的玉米种植 LCA 研究都是“从摇篮到大门”的研究,即从原材料生产开始,到成熟收割为止.有文献将秸秆破碎^[31]、玉米收获后干燥^[35]、储存^[32]过程也纳入研究范围内.

1.1.3 功能单位 如表 1 所示,在本文所分析的相关研究中,功能单位可分为两种,一是基于每单位质量产品产量(质量);二是基于每单位种植面积(hm²).

也有文献将单位产值(元)做为功能单位^[45].

功能单位的选择取决于研究目标和研究对象类型^[8].如果将研究目标聚焦在种植环节,例如比较同一种植区域选择何种作物进行种植可以减少对该区域的环境影响,由于不同作物产量往往不同,这时选择单位种植面积作为功能单位比选择单位质量农产品更为合适.如果研究目标聚焦在产品上,而不是进行农作物种类的挑选,则可以选择单位质量或者同时选择面积和质量作为功能单位.例如有研究^[41]对玉米集约化生产方式进行评价,结果表明玉米集约化生产每公顷温室气体排放量增加 40%,但单位质量玉米碳足迹可降低 37%.进行玉米种植的目的是生产玉米供人类消费,按单位质量玉米产品进行环境影响计算便于不同地区生产的玉米进行对比.

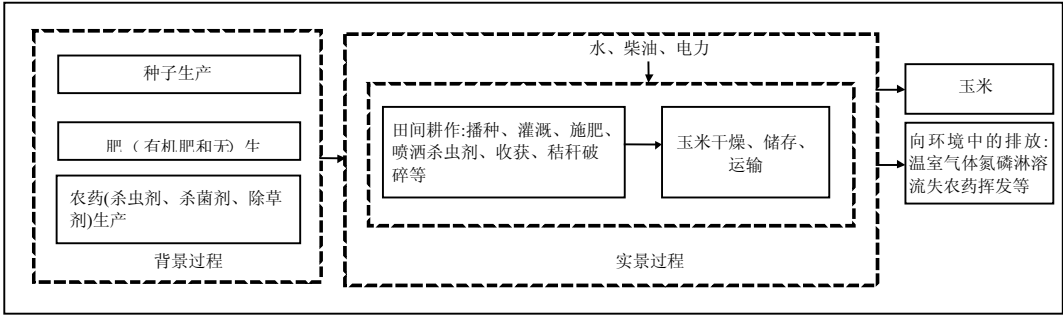


图 1 玉米种植 LCA 研究系统边界

Fig.1 Boundary map of LCA research system for maize planting

1.2 清单分析

玉米种植数据收集分为 3 部分,一是背景数据收集,即种子、化肥、农药等生产数据;二是实景数据收集,即田间作业部分,包括播种、灌溉、施肥、收割等过程的资源、能源投入;三是向环境中的排放,包括温室气体(土壤 CO₂ 和 N₂O)的排放、土壤有机碳的变化、氮磷的淋溶流失、氨挥发、农药挥发及肥料、灌溉水等带入农田的重金属污染.清单数据来源需要根据研究区域特点确定,不同数据来源会影响计算结果的准确性.表 1 中所列其他排放数据就是除温室气体排放外不同文献所收集的排放清单.

目前玉米种植 LCA 研究输入清单完整,均考虑了能源(柴油、电力)、灌溉水和农资投入,其中,农资投入包括化肥(矿质肥或有机肥)、种子、柴油、农药等.排放清单包括玉米产品和向环境中的排放.目前玉米种植 LCA 研究清单数据收集差异主要在排放数据.CO₂ 和 N₂O 是玉米种植系统释放的两种重要温室气体,有研究表明,大气中的 CO₂、N₂O 来源于农业活动的比例分别为 20%和 90%^[5].根据 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)第五次报告,N₂O 的折算系数为 298 CO₂ 当量^[51].CO₂ 与 N₂O 释放量会因气候、土壤条件和作物管

理差异而发生很大变化^[52].目前研究均对这两种温室气体排放量进行了收集,但存在多种计算方法.其他排放数据并不是所有的研究都进行了考虑,且收集方式不一.

1.2.1 温室气体 对于温室气体的计算方法有以下3种,一是通过实验测得,主要方法有箱法、微气象学法、超大箱长光程红外色谱法和同位素法,其中微气象学法是观测气体扩散最佳测定方法^[53].Glenn等人在加拿大某地进行的一项野外实验就是采用微气象技术测量土壤 CO₂ 和 N₂O 的排放量^[52].

二是通过机理模型进行模拟.Abdalla 等^[54]对 DNDC (Denitrification-Decomposition)模型进行校正后估算了河北省不同施氮量下夏玉米-冬小麦两熟制 N₂O 的排放和作物产量.DNDC 模型即反硝化-分解作用模型,用于模拟农业生态系统中碳、氮生物地球化学过程,由 Li 等^[55]于 1992 年根据美国农田管理方式为基础提出,在中国、加拿大等多个国家得到了广泛应用.Bacenetti 通过 EFE-SO(Estimation of Fertilisers Emissions-Software)软件模拟了施用肥料后氮挥发量、N₂O 排放量以及硝酸盐和磷酸盐的排放量^[32].EFE-SO 模型由英国曼彻斯特大学研究小组开发,用来估算与肥料相关的氮排放.Lee 等人采用 EPIC (Environmental Policy- Integrated Climate)模型模拟碳、氮、磷循环及现场环境释放^[3].EPIC 模型是定量评价“气候-土壤-作物-管理”系统的综合动力学模型,于 20 世纪 80 年代初由美国德克萨斯农工大学黑土地研究中心和美国农业部草地土壤水分研究所共同开发^[56].

三是对于 N₂O 排放量还可以根据已有研究中给出的排放因子进行计算.IPCC 建议 N₂O 排放因子为 1%,即以 N₂O 形式损失的氮占所施肥料中氮含量的 1%^[57].我国学者通过多年田间实验也确定了不同气候、土壤特性等条件下的 N₂O 排放因子.Ju 等^[58]确定了我国夏玉米、冬小麦-夏玉米轮作的 N₂O 排放因子为施用氮肥含氮量的 0.44%~0.59%和 0.10%~0.59%.有学者^[59]建议在有机碳含量为 4.5~15.6g/kg 的石灰性土壤旱地施氮的年直接排放因子为(0.54±0.09)%.Gao 等^[60]建议华北平原玉米 N₂O 排放因子为 0.53%.

农田温室气体排放机理复杂且受到多种因素影响,需要根据具体区域现场条件来确定.田间测定

排放量虽准确度高,但对于区域性研究测量难度较大.我国幅员辽阔,不同地区土壤特性、耕作制度等差异较大,采用已知的排放因子进行计算,与实际排放量会存在一定差异^[50].而在使用基于国外情况建立的模型对我国农田温室气体排放进行估计时,应结合我国的土壤、农田管理方式等条件对模型进行修正,加强模型在中国的本地化研究.

1.2.2 土壤有机碳 土壤有机碳变化可以通过实验法、经验公式和模型进行测量和估算.Zhang 等^[44]通过实地取样测得土壤容重和实验室重铬酸钾加热法测定土壤有机碳浓度,计算土壤有机碳储量.韩冰等^[61]搜集整理了全国典型农业长期试验站数据,通过自建经验公式和情景分析,发现提高化肥施用量、秸秆还田、增施有机肥和推广免耕可以使我国农田土壤的固碳量分别提高至 94.91,42.23, 41.38 和 2.58Tg/a(百万 t/a).Lu 等^[62]根据我国农业土壤有机碳实验数据库建立了土壤固碳经验模型,能够对我国玉米种植区的氮肥施用量、秸秆还田量、是否免耕等引起的土壤固碳量变化进行模拟.

1.2.3 氮磷的淋溶流失、氮挥发、农药挥发和重金属 氮磷淋溶流失和氮挥发均取自文献数据^[44].Ju 等^[58]通过田间实验,确定玉米氮挥发量为施氮量的 19.4%,华北平原玉米氮淋溶量为施氮量的 12.1%.陈新平等^[63]确定夏玉米氮挥发量为施入氮素量的 16%^[63].Gaynor 等^[64]确定磷流失量为无机肥和有机肥投入总量的 1%.

农药挥发到大气中以及排放到地下水和地表水中的量可以通过 Pest LCI 2.0 进行估算^[33],该模型能够估计农药对空气、地表水和地下水的排放,用于生命周期清单数据(LCI)建模.也有学者确定农药排放到空气、淡水和土壤中的标准残留率分别为每单位重量农药的 10%、1%和 43%^[65].有研究在计算人类生态毒性和水生生态毒性这两种环境影响指标时还考虑了化肥、灌溉带入农田的重金属,参数来自 Audsley 等^[66]和 Huijbregts 等^[67]研究中的值.

1.3 环境影响评估

环境影响评估计算首先应根据玉米种植过程中所产生的能源、水资源消耗和碳排放等环境问题,并结合各地节能减排等政策目标,选择相应的环境影响指标,然后选择计算方法和软件工具.

1.3.1 环境影响指标 环境影响指标的选择受到

研究目标与范围的影响^[68],图 2 展示了所分析文献中对不同环境影响指标的选择比例。

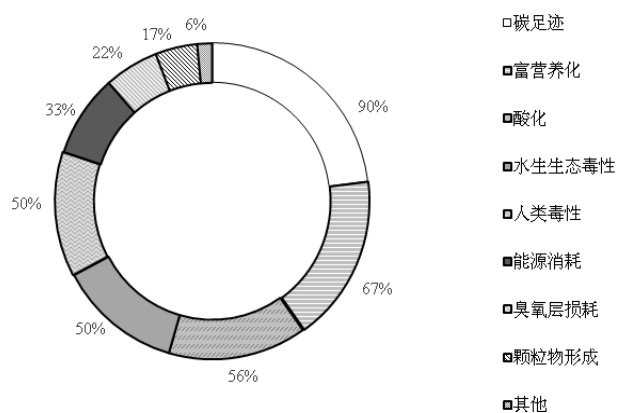


图2 环境影响指标选择比例

Fig.2 Selection proportion of environmental impact indicators

由于农业占全球温室气体排放量的 13.5%^[69],是温室气体重要排放源,所以 90%的相关文献都对碳足迹指标进行了计算分析。其次由于玉米种植过程中施用的化肥,会造成氮、磷通过挥发、淋溶等方式进入大气和水体,以及农药的挥发,所以有 50%及以上的文献关注了水体富营养化、酸化、水生生态毒性和人类生态毒性 4 个环境影响指标。在机械作业和灌溉过程中,会消耗柴油和电力,所以有 33%的文献关注了玉米种植过程中的能源消耗。仅有 22%和 17%的文献对臭氧层消耗、颗粒物形成这两个环境影响指标进行了计算。

1.3.2 计算方法及软件选择 CML、ReCiPe 和 IPCC 方法是应用最多的 3 种方法。CML 方法由莱顿大学环境科学研究所于 1992 年首次开发,是一种面向中点的方法。该方法影响类别中酸化和光化学氧化剂形成两种环境影响是基于欧洲平均值,其他影响类别的区域有效性是全球^[70-71]。ReCiPe 方法是由许多 LCA 领域开发人员共同开发,被认为是 CML2002 和 EI99 方法的综合,该方法同时具有中点建模和端点建模两种方法。该方法的区域有效性是欧洲,但气候变化、臭氧层损耗和资源消耗适用于全球^[70-71]。IPCC 方法最早在 2001 年制定,2007 年进行了版本更新,它被认为是用于计算气候变化特定的 LCIA 方法^[70-71]。有文献使用 CML 和 ReCiPe 方法同时对玉米青贮饲料生产系统的环境影响指标进行计算,结果表明气候变化结果相差不大,CML 方法得

到的结果为 383.26(kg CO₂-eq/t),ReCiPe 方法结果为 329(kg CO₂-eq/t)。海洋生态毒性计算结果差异较大,分别为 9.15×10^5 和 4.66×10^3 (kg 1,4-DCB-eq/t,表示向土壤和空气中排放 1kgAs 和 Pb 的效应值),但两种方法计算结果具有相同的灵敏度排行^[72]。这说明由于不同方法所涵盖的清单物质数量、所采用的标准、以及所使用数据有效性等存在差别,对于相同清单数据同一环境影响类别的计算结果往往也存在差异。由于环境问题的复杂性,很难得到一个被广泛接受的 LCIA 方法,LCIA 方法和科学的基准体系仍在不断发展中。Lindeijer^[73]认为国际上比较有代表性的影响评价方法有瑞典的产品设计的环境优先战略方法(EPS)、瑞士和荷兰的生态稀缺性方法以及丹麦的工业产品环境设计方法(EDIP)等 25 种影响评价方法。

Simapro 和 eBalance(现更新为 eFootprint)是在玉米种植 LCA 研究中使用最多的两种软件工具。Simpro 由荷兰 Leiden 大学环境科学中心开发,集成了 Eco-indicator99、CML1992v2.1 等多种生命周期评价方法,以及 Ecoinvent、DataArchive 等多个数据库^[74]。eBalance 是由中国亿科环境科技有限公司(IKE)设计开发,内置 Ecoinvent、ELCD 和中国生命周期数据库 CLCD。相比于其他数据库,CLCD 数据库更能代表中国实际情况^[75-76]。Herrmann 等^[77]对比了使用不同生命周期评价软件计算结果的差异,发现通常结果是相同或相近的,但由于不同软件内置的数据库不同,在选择不同的背景数据来源时,有的结果也会存在较大差异。

1.3.3 计算结果 本文对玉米种植 LCA 研究特征化计算结果中的碳足迹值进行分析。

图 3 展示了所分析文献中国内外以单位质量玉米为功能单位的玉米种植碳足迹结果。由于各地区玉米种植存在差异,也有文献^[3]计算得到玉米种植单位产量碳足迹为 20.2 和 -6.4kg CO₂-eq/kg。其中碳足迹为负值的原因在于该地区土壤固碳量大于玉米种植生命周期内碳释放量^[3]。我国碳排放高于国外,主要在于氮肥生产、田间 N₂O 排放、灌溉耗电和机械作业的化石能源消耗排放等环节,我国在这些环节比美国碳排放量多 1535kg CO₂-eq/hm²^[78]。同时由于我国免耕比例低,造成我国土壤固碳效率低于国外。经分析计算,国外玉米种植单位产量碳足迹

均值为 $(0.50 \pm 0.30) \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$,我国玉米种植单位产量碳足迹均值为 $(0.58 \pm 0.34) \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$.

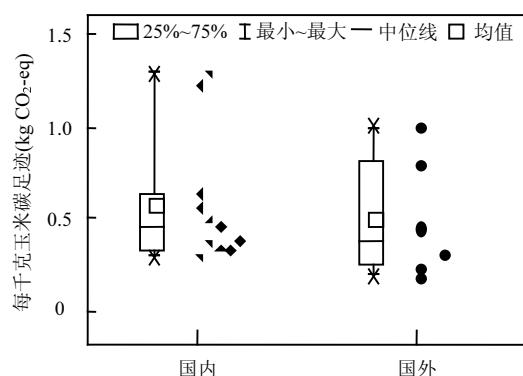


图3 国内外玉米种植碳足迹分析

Fig.3 Carbon footprint analysis of maize planting at home and abroad

目前核算区域尺度玉米种植碳足迹数据来源有 3 种,一是通过国家统计数据,二是通过实测或农户调研,三是通过模型模拟.通过国家统计数据仅能获得农资投入信息,无法反映出不同地区生产方式的差异,例如灌溉方式、翻耕免耕等,这些都是影响碳足迹大小的关键因素.来源于实测、农户调研或模型模拟的数据则考虑了不同地区生产环节的差异,能更加精确的计算各地实际生产水平下的碳足迹值.图 3 所示分析数据来源于实测、农户调研和模型模拟,但其中部分数据未考虑土壤碳变化.张丹等^[78]通过农户调研并通过模型模拟土壤碳变化,计算得到我国玉米种植单位产量碳足迹均值为 $0.48 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$,低于图 3 所得均值.也有文献通过国家统计数据核算,并未对土壤碳变化进行考虑,计算得到我国玉米种植单位产量碳足迹均值为 $0.79 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$,高于图 3 所示均值^[45].

对于归一化计算,理论上对于全球性环境影响应采用全球尺度的基准,区域性环境影响则采用相应的区域基准.为了将全球性、区域性的影响在同一水平上进行比较,Liang 等^[41-42]和 Cui 等^[47]采用的归一化因子均为 2000 年全球人均环境影响的归一化因子,来源于 Sleeswijk 等^[79]的研究.该研究选择 2000 年为基准年,收集全球和欧洲一级的相关资料,在 LCA 方法学背景下进行气候变化、酸化、富营养化、生态毒性等 15 个环境影响指标的归一化研究,结果被广泛应用于各类 LCA 研究归一化计算^[14].加权评

估中权重因子的设置往往依赖于社会、政治等因素,具有主观性.王明新等^[80]的研究表明通过专家组评议方法确定的权重系数,加权评估结果可以反应不同种植制度对环境造成的总潜在影响.

1.4 生命周期解释

1.4.1 不确定性分析 清单数据来源和 LCIA 方法等会影响 LCA 结果的准确性^[32].不确定性分析就是对造成结果不确定性的来源进行识别以提高结果的准确性和可靠性^[6].首先是清单数据收集应尽可能完整.土壤中碳固定可以抵消部分温室气体排放,土壤有机碳变化量的缺失会影响碳足迹计算结果.但土壤有机碳除了受耕作(免耕、旋耕等)、秸秆还田等人为因素的影响,还会受气候、土壤条件等自然因素的影响^[78,81-82].是否将土壤有机碳变化纳入粮食产品碳足迹计算仍存在争议^[46].同时,这也与所研究的系统边界相联系.有研究认为,若研究系统边界仅为单季玉米从播种到成熟收获过程,不包括收获后土壤的耕作管理及秸秆还田等过程,则土壤有机碳变化不是必须要考虑的因素.若是包括收获后的相关处理过程,或是对不同耕作制度进行比较研究,则必须要考虑土壤有机碳的变化^[81,83].

有研究表明^[20]施肥所带来的氨挥发、氮磷淋溶流失对气候变化和颗粒物形成结果贡献分别为 42%和 78%,农药挥发对淡水生态毒性的贡献率约为 98%,所以在选择这 3 种指标进行计算时,相关数据如若缺失,则对结果不确定性影响较大.其次清单数据应尽可能准确,田间温室气体排放量会受到肥料类型、土壤性质差异等影响,应选择最接近所研究区域条件的排放因子或模型进行计算.

1.4.2 灵敏度分析、方案对比及改进潜力分析 灵敏度分析就是进一步分析关键流程对 LCA 结果的贡献程度^[6].氮肥和磷肥的施用是玉米生产系统中的关键清单物质,特别是对气候变化、酸化和富营养化 3 种环境影响类别.有研究表明^[47],通过增施氮肥,玉米产量增长相对较小.所以可以通过测土配肥来科学施肥,使用小型施肥设备提高氮肥利用率、降低氮肥施用量、提高施用率以减少流失,或者用液体粪肥来替代矿肥,是降低玉米生产系统环境影响的潜在解决方案.文献表明,使用液体粪肥替代 50%的矿肥可降低 37.9%的端点水平环境影响^[31].另外耕作方式也对碳足迹影响很大,留茬免耕是在

提高玉米产量的同时降低碳足迹的最好方式^[44].相比于冬小麦-夏玉米生产系统适当进行灌溉的玉米单作系统是有望平衡粮食安全和环境可持续性的种植制度,总潜在环境影响可降低 39.59%~40.30%^[47].

1.5 LCA 方法与其他评价方法的结合

LCA 研究计算出玉米种植所带来的环境影响,为降低环境影响所采取的种植模式调整、耕作管理方式变更等措施,除了带来环境影响的变化还会带来资源利用效率、粮食安全、经济收入等一系列变化.单独进行环境影响研究会带来建议或决策的片面性,而综合分析则比单项影响评价更具有说服力.Cui 等人^[47]在对华北平原小麦-玉米轮作转向玉米单作种植模式进行评价时,采用经济分析、LCA 方法和能值分析方法对环境与经济影响进行了综合评价,结果表明玉米单作系统产量较低,但却具有更高的可持续性水平,环境负荷比小麦-玉米轮作系统低 8.16%~26.7%,能值可持续性指数高 10.20%~30.52%,说明单作玉米是解决目前华北地区小麦-玉米轮作系统造成的环境压力的有效措施.Liang 等人^[41]采用经济分析和 LCA 研究对华北平原玉米-小麦轮作系统用有机肥替代矿肥的经济和环境可持续性进行了评价,结果表明使用液态有机肥替代 50%的矿肥后,相比于 100%使用矿肥,经济利润增加 19.1%,端点水平环境影响降低了 37.9%,生态效率提高了 91.7%.表明使用液态有机肥替代 50%的矿肥在促进农业可持续生产中的应用前景.

2 LCA 在玉米深加工产品中的应用

2019 年世界工业消费玉米占玉米总产量的 30.27%,玉米深加工产品超过 1000 多种.在食品、化工、医药等多领域广泛应用.目前 LCA 在玉米深加工产品中应用有限,主要集中在葡萄糖^[84]、乙醇^[85-90]、谷氨酸钠^[37]等产品.

2.1 目的和范围的确定

玉米深加工产品生产系统边界如图 4 所示.对于玉米燃料乙醇这类终端产品的 LCA 研究都是从“摇篮到坟墓”的研究,即包括从玉米种植到燃料乙醇的使用所有过程,对于葡萄糖、谷氨酸钠这类中间产品的 LCA 研究系统边界则都是从“摇篮到大门”,即从玉米种植开始到产品出厂为止.通常选择单位

质量深加工产品为功能单位,Yang 在对比玉米燃料乙醇与汽油生命周期环境影响时,选择汽车行驶一公里为功能单位^[89].

2.2 环境影响指标选择及计算结果

对于玉米深加工产品来说,碳足迹仍然是重点关注的环境影响指标,有 88%的文献都对其进行了计算.其次是能源消耗、酸化和富营养化.玉米是深加工产品中最重要的原料,其生产过程包含在深加工产品系统边界内,淡水作为玉米生产必需的资源,也有文献对水足迹进行了计算^[88].Yang^[89]在对比同作为燃料的玉米乙醇与汽油环境影响时,选择的环境影响指标为水生生态毒性和人类健康毒性,发现用乙醇代替汽油,会进一步降低水质,加剧非癌症相关的人类健康风险.该研究表明,在进行环境决策时,除了碳足迹和能源消耗等,还应考虑更广泛的环境影响,以避免或减少环境负担的转移.

玉米深加工产品生产过程中会产生玉米蛋白、饲料、酒糟等副产品,多产出系统不同产品之间共同承担总环境影响,所以关于副产物的分配程序也是 LCA 研究中的重要环节^[87].分配方法可以基于主副产品的物理参数(如质量、营养价值等)、经济关系(市场价格)进行分配,也可以通过系统扩展法进行分配^[90].在系统扩展法中,假设副产品的环境负担与功能等价的其他产品环境负担相同,在总环境影响中扣除等价产品的环境影响,即为主产品环境影响.这几种分配方法在玉米深加工产品的 LCA 研究中均得到了广泛应用^[37].采用不同分配方法可能会导致不同的计算结果.

Tsiropoulos 等^[84]研究玉米湿磨法生产葡萄糖的环境影响及不同分配方法对环境的影响时,采用经济价值和系统扩展分配方法计算每生产 1kg 葡萄糖对不可再生资源消耗量为 6.8~9MJ,温室气体排放量为 0.7~1.1kg CO₂-eq.对于不同分配方法,玉米都是最重要的清单物质,在经济价值和系统扩展分配方法中,玉米种植过程对葡萄糖生产过程温室气体排放的贡献都约为 75%,对能源消耗贡献都约为 50%.Cheroennet 等^[88]对比了玉米乙醇与木薯乙醇的能源效率和水足迹,结果表明玉米种植阶段的能源消耗量在玉米基乙醇生命周期仅次于工业生产过程,为总能耗的 20%.Yang 等^[37]对中国味精生产过程中的清洁生产措施进行评估,结果表明当采用经济

价值分配方法时,味精生产过程对气候变化的影响为 6.26t CO₂-eq,对水生生态毒性影响为 848t TEG water-eq,对酸化影响为 83.5kg SO₂-eq,对富营养化潜值贡献为 5.04kg PO₄P-lim eq,采用质量分配方法时结果分别为 4.65t CO₂-eq,630t TEG water eq、62.1kg SO₂-eq 和 3.75kg PO₄P-lim eq.玉米种植过程对水生生态毒性贡献约 90%,对酸化和富营养化的贡献分别约为 75%和 70%.

目前应选择哪种分配方法没有直接的答案,分配方法的选择取决于数据详细程度、可用性等^[90].不同分配方法影响环境影响的绝对值,但不会改变各种清单物质对环境影响的贡献排名^[37].玉米种植环节始终是深加工产品环境影响的主要贡献者.选用不同地区玉米为原料对结果贡献大小也不同,深入研究玉米生产,对于提高深加工产品环境性能具有重要意义.

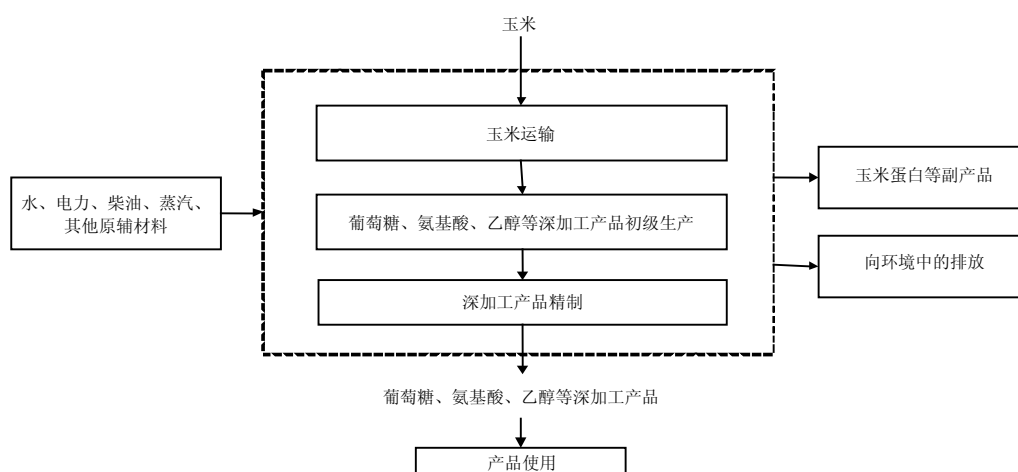


图4 玉米深加工产品 LCA 研究系统边界

Fig.4 Boundary map of LCA research system for maize deep processing products

3 结语

本文通过文献梳理,综述了 LCA 在国内外玉米种植及深加工产品中的研究进展.尽管 LCA 在玉米深加工产品中的研究数量有限,但从现有研究可以表明玉米种植过程是深加工产品环境影响的重要贡献者,对环境影响的贡献最高可达 90%.我国玉米碳足迹均值比国外高约 16%,所以在对玉米深加工产品进行 LCA 研究时,对于原料供应地的选择,除了考虑运输距离和成本外,应尽可能收集供应地的玉米种植数据进行环境影响计算,避免使用数据库中的玉米种植环境影响数据增大最终结果的不确定性.LCA 在玉米种植环境影响研究中的应用越来越多,但从目前的研究来看,尚存在一些需要改进之处.

首先清单数据收集应完整,环境影响指标选择要全面.除了对农资投入与温室气体排放的考虑,氮磷淋溶流失、氨挥发、农药挥发、重金属污染等排放数据也应尽可能进行收集,同时要注意提高所收集的清单数据质量,以增强结果的准确性.除了对碳

足迹的关注,农药、化肥施用所带来的生态毒性、臭氧层损耗等环境影响也不容忽视.另外在对生产系统进行评价时,不应只局限于环境负荷方面,可以将 LCA 方法与能值分析、经济分析等方法结合,从多方面进行评价,增强结论的说服力,以及决策的完整性.

参考文献:

- [1] 李少昆,赵久然,董树亭,等.中国玉米栽培研究进展与展望 [J]. 中国农业科学, 2017,50(11):1941-1959.
Li S K, Zhao J R, Dong S T, et al. Advances and prospects of maize cultivation in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017,50(11): 1941-1959.
- [2] Linquist B, Groenigen K J V, Adviento-Borbe M A, et al. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops [J]. Global change biology, 2012,18(1):194-209.
- [3] Lee E K, Zhang X, Adler P A, et al. Spatially and temporally explicit life cycle global warming, eutrophication, and acidification impacts from corn production in the U.S. Midwest [J]. Journal of cleaner production, 2020,242(1),DOI:10.1016/j.jclepro.2019.118465.
- [4] Li G H, Cheng Q, Li L, et al. N, P and K use efficiency and maize yield responses to fertilization modes and densities [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021,20(1):78-86.
- [5] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, et al. Producing more grain with lower

- environmental costs [J]. *Nature*, 2014,514:486-489.
- [6] ISO, 2006b ISO Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework International Organization for Standardization, Geneva (2006) ISO 14044 [S].
- [7] Shamraiz Ahmad, Kuan Y W, Riaz Ahmad. Life cycle assessment for food production and manufacturing: recent trends, global applications and future prospects [J]. *Procedia Manufacturing*, 2019,34(2019): 49-57.
- [8] Khatri P, Jain S. Environmental life cycle assessment of edible oils: A review of current knowledge and future research challenges [J]. *Journal of cleaner production*, 2017,152(5):63-76.
- [9] Weidema B, Brandao M. Book Review of Life Cycle Assessment: Theory and Practice [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2019,24(10): 726-730.
- [10] Cerutti A K, Cerutti, Bruun S, et al. Environmental sustainability of traditional foods: the case of ancient apple cultivars in Northern Italy assessed by multifunctional LCA [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013,52(8):245-252.
- [11] Almeida C, Vaz S, Ziegler F. Environmental life cycle assessment of a canned sardine product from Portugal [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2015,19(4):607-617.
- [12] Vázquez-Rowe I, Villanueva-Rey P, Iribarren D, et al. Joint life cycle assessment and data envelopment analysis of grape production for vinification in the Rías Baixas appellation (NW Spain) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012,27(5):92-102.
- [13] Yan M J, Nicholas M H. Life cycle assessment of multi-product dairy processing using Irish butter and milk powders as an example [J]. *Journal of cleaner production*, 2018,198(10),DOI:10.1016/j.jclepro.2018.07.006.
- [14] Laurent A, Weidema Bo P, Bare J, et al. Methodological review and detailed guidance for the life cycle interpretation phase [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2020,24(5):986-1003.
- [15] 罗小勇,黄希望,王大伟,等.生命周期评价理论及其在污水处理领域的应用综述 [J]. *环境工程*, 2013,31(4):118-122.
- Luo X Y, Huang X W, Wang D W, et al. The theory of life cycle assessment and its application in wastewater treatment [J]. *Environmental engineering*, 2013,31(4):118-122.
- [16] Khatri P, Jain S. Environmental life cycle assessment of edible oils: A review of current knowledge and future research challenges [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017,152(3):63-76.
- [17] Bruno Notarnicola, Serenella Sala, Assumpcio Anton, et al. The role of life cycle assessment in supporting sustainable agri-food systems: A review of the challenges [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140(1):399-409.
- [18] Jiang Z, Zheng H, Xing B, Environmental life cycle assessment of wheat production using chemical fertilizer, manure compost, and biochar-amended manure compost strategies [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,760(3),DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.143342.
- [19] Taki M, Soheili-Fard F, Chen G, et al. Life cycle assessment to compare the environmental impacts of different wheat production systems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,197(10):195-207.
- [20] Zortea R B, Maciel V G, Passuello A. Sustainability assessment of soybean production in Southern Brazil: A life cycle approach [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2018,13(1):102-112.
- [21] Wang X, Wu X, Yan P, et al. Integrated analysis on economic and environmental consequences of livestock husbandry on different scale in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016,119(4):1-12.
- [22] Esteves M, Maria E, Esteves P, et al. Greenhouse gas emissions related to biodiesel from traditional soybean farming compared to integrated crop-livestock systems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 179(4):81-92.
- [23] Abdou K, Aubin J, Romdhane M S, et al. Environmental assessment of seabass (*Dicentrarchus labrax*) and seabream (*Sparus aurata*) farming from a life cycle perspective: a case study of a Tunisian aquaculture farm [J]. *Aquaculture*, 2017,471(3):204-212.
- [24] Badiola M, Basurko O, Gabiña G, et al. Integration of energy audits in the Life Cycle Assessment methodology to improve the environmental performance assessment of recirculating aquaculture systems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017,157(7):155-166.
- [25] Biermann G, Geist J. Life cycle assessment of common carp (*Cyprinus carpio* L.)— A comparison of the environmental impacts of conventional and organic carp aquaculture in Germany [J]. *Aquaculture*, 2019,501(2):404-415.
- [26] Recanatì F, Marveggio D, Dotelli G. From beans to bar: A life cycle assessment towards sustainable chocolate supply chain [J]. *The Science of the Total Environment*, 2018,613-614(2):1013-1023.
- [27] Asem-Hiablie S, Battagliese T, Stackhouse-Lawson K R, et al. A life cycle assessment of the environmental impacts of a beef system in the USA [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24(3):441-455.
- [28] Tassielli G, Notarnicola B, Renzulli P A, et al. Environmental life cycle assessment of fresh and processed sweet cherries in southern Italy [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,171(1):184-197.
- [29] Zhu Z L, Jia Z H, Peng L, et al. Life cycle assessment of conventional and organic apple production systems in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,201(11):156-168.
- [30] Wang Y, Lu Y. Evaluating the potential health and economic effects of nitrogen fertilizer application in grain production systems of China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,264(8),DOI:10.1016/j.jclepro.2020.121635.
- [31] Li S, Wu J C, Wang X Q, et al. Economic and environmental sustainability of maize-wheat rotation production when substituting mineral fertilizers with manure in the North China Plain [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,271(10),DOI:10.1016/j.jclepro.2020.122683.
- [32] Bacenetti J, Lovarelli D, Fiala M. Mechanisation of organic fertiliser spreading, choice of fertiliser and crop residue management as solutions for maize environmental impact mitigation [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016,79(9):107-118.
- [33] Boone L, Meester SD, Vandecasteele B, et al. Environmental life cycle assessment of grain maize production: An analysis of factors causing variability [J]. *The Science of the total environment*, 2016,553(5): 551-564.
- [34] Zhang W S, He X M, Zhang Z D, et al. Carbon footprint assessment for irrigated and rainfed maize (*Zea mays* L.) production on the Loess Plateau of China [J]. *Biosystems Engineering*, 2018,167(3):75-86.
- [35] Feng Y P, Zhang Y Y, Li S, et al. Sustainable options for reducing carbon inputs and improving the eco-efficiency of smallholder wheat-maize cropping systems in the Huanghuaihai Farming Region of China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,244(1),DOI:10.1016/j.jclepro.2019.118887.

- [36] Fantin V, Righi S, Rondini I, et al. Environmental assessment of wheat and maize production in an Italian farmers' cooperative [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017,140(1):631–643.
- [37] Yang D, Jia X X, Dang M Y, et al. Life cycle assessment of cleaner production measures in monosodium glutamate production: A case study in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,270(10),DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122126.
- [38] Chen X H, Ma C C, Zhou H M, et al. Identifying the main crops and key factors determining the carbon footprint of crop production in China, 2001–2018 [J]. *Resources, Conservation & Recycling*. 2021, 172(9),DOI:10.1016/j.resconrec.2021.105661
- [39] 谭 萌,彭 艺,马 戎,等.5G 对中国碳排放峰值的影响研究 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(3):1447–1454.
Tan M, Peng Y, Ma R, et al. Influence of 5G technology on the peak of China's carbon emission [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(3):1447–1454.
- [40] Wu H J, Gao L M, Yuan Z W. Life cycle assessment of phosphorus use efficiency in crop production system of three crops in Chaohu Watershed, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016,139(12): 1298–1307.
- [41] Liang L, Wang Y C, Bradley G, et al. Agricultural subsidies assessment of cropping system from environmental and economic perspectives in North China based on LCA [J]. *Ecological indicators*, 2019,96(1): 351–360.
- [42] 梁 龙,陈源泉,高旺盛,等.华北平原冬小麦-夏玉米种植系统生命周期环境影响评价 [J]. *农业环境科学学报*, 2009,28(8):1773–1776.
Liang L, Chen Y Q, Gao W S, et al. Life cycle environmental impact assessment in winter wheat–summer maize system in North China Plain [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009,28(8):1773–1776.
- [43] Wang C, Li X L, Gong T T, et al. Life cycle assessment of wheat–maize rotation system emphasizing high crop yield and high resource use efficiency in Quzhou County [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014,68(4):56–63.
- [44] Zhang X Q, Pu C, Zhao X, et al. Tillage effects on carbon footprint and ecosystem services of climate regulation in a winter wheat–summer maize cropping system of the North China Plain [J]. *Ecological Indicators*, 2016,67(8):821–829.
- [45] 王钰乔,濮 超,赵 鑫,等.中国小麦、玉米碳足迹历史动态及未来趋势 [J]. *资源科学*, 2018,40(9):1800–1811.
Wang Y Q, Pu C, Zhao X, et al. Historical dynamics and future trends of carbon footprint of wheat and maize in China [J]. *Resources Science*, 2018,40(9):1800–1811.
- [46] Qi J Y, Yang S T, Xue J F, et al. Response of carbon footprint of spring maize production to cultivation patterns in the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,187(6):525–536.
- [47] Cui J X, Yan P, Wang X L, et al. Integrated assessment of economic and environmental consequences of shifting cropping system from wheat–maize to monocropped maize in the North China Plain [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,193(8):524–532.
- [48] 姜振辉,杨 旭,刘益珍,等.春玉米-晚稻与早稻-晚稻种植模式碳足迹比较 [J]. *生态学报*, 2019,39(21):8091–8099.
Jiang Z H, Yang X, Liu Y Z, et al. Comparison of carbon footprint between spring maize–late rice and early rice–late rice cropping system [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(21):8091–8099.
- [49] Samarappuli D, M T Berti. Intercropping forage sorghum with maize is a promising alternative to maize silage for biogas production [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,194(9):515–524.
- [50] Battle-Bayer L, Bala A, Lemaire E, et al. An energy–and nutrient–corrected functional unit to compare LCAs of diets [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,671(6):175–179.
- [51] 政府间气候变化专门委员会网站 [EB/OL]. <https://www.ipcc.ch/>.
The website of the Intergovernmental Panel on Climate Change [EB/OL]. <https://www.ipcc.ch/>.
- [52] Glenn A J, Tenuta M, Amiro B D, et al. Nitrous oxide emissions from an annual crop rotation on poorly drained soil on the Canadian Prairies [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012,166–167(12):41–49.
- [53] 王 璐.夏玉米农田土壤二氧化碳碳排放通量研究 [D]. 合肥:安徽农业大学, 2012.
Wang L. The investigation of soil carbon dioxide emission of the summer maize farmland [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2012.
- [54] Abdalla M, Song X, Ju X, et al. Calibration and validation of the DNDC model to estimate nitrous oxide emissions and crop productivity for a summer maize–winter wheat double cropping system in Hebei, China [J]. *Environmental Pollution*, 2020,262(7), DOI:10.1016/j.envpol.2020.114199.
- [55] Li C S, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1992,97(6):9759–9776.
- [56] 范 兰,吕昌河,陈 朝.EPIC 模型及其应用 [J]. *地理科学进展*, 2012,31(5):584–592.
Fan L, Lv C H, Chen C. EPIC model and its application [J]. *Progress in Geography*, 2012,31(5):584–592.
- [57] IPCC. Greenhouse gases from agricultural soils [C]//Houghton J T. eds. *Greenhouse Gas Inventory Reference Manual: Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Bracknell: UK Meteorological Office, 1997.
- [58] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2009,106(9):3041–3046.
- [59] Feng C, Yan G, Zhou Z, et al. Annual emissions of nitrous oxide and nitric oxide from a wheat/maize cropping system on a silt loam calcareous soil in the North China Plain [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012,48(5):10–19.
- [60] Gao B, Ju X T, Su F M, et al. Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: A two-year field study [J]. *Science of the total environment*, 2014,472(2):112–124.
- [61] 韩 冰,王效科,逯 非,等.中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力 [J]. *生态学报*, 2008,(2):612–619.
Han B, Wang X K, Lu F, et al. Soil carbon sequestration and its potential by cropland ecosystems in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008,(2):612–619.
- [62] Lu F, Wang X K, Han B, et al. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no–tillage in China's cropland [J]. *Global Change Biology*, 2009,15(2):281–305.
- [63] 陈新平.小麦-玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践 [M]. 北京:中国农业大学出版社, 2006:203–205.

- Chen X P. Theory and practice of comprehensive management of nutrient resources in wheat maize rotation system [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006:203–205.
- [64] Gaynor, J D A C, Findlay W I. Soil and phosphorus loss from conservation and conventional tillage in corn production [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995,24(4):734–741.
- [65] Van Calster K J, Berentsen P B M, Boer De I J M, et al. An LP-model to analyse economic and ecological sustainability on Dutch dairy farms: model presentation and application for experimental farm “de Marke” [J]. *Agricultural Systems*, 2004,82(2):139–160.
- [66] Audsley E, Alber S, Clift R, et al. 1997. Harmonisation of environmental life cycle assessment for agriculture [R]. Final Report, Concerted Action AIR3–CT94–2028, European Commission DG VI, Brussels.
- [67] Huijbregts M A J, Thissen U, Jager T, et al. Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part II: assessing parameter uncertainty and human variability in the calculation of toxicity potentials [J]. *Chemosphere*, 2000,41(8):575–588.
- [68] Ilari A, Duca D, Toscano G, et al. Evaluation of cradle to gate environmental impact of frozen green bean production by means of life cycle assessment [J]. *Journal of cleaner production*, 2019,236(11), DOI:10.1016/j.jclepro.2019.117638.
- [69] Benis K, Ferrao, Paulo. Potential mitigation of the environmental impacts of food systems through urban and peri-urban agriculture (UPA) e a life cycle assessment approach [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017,140(1):784–795.
- [70] Aitor P A, Cristina R, Andreas C. Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories [EB/OL]. Greendelta, 2015.
- [71] Menoufi, Karim A I. Life cycle analysis and life cycle impact assessment methodologies: A state of the art [D]. Leida: Universitat de Lleida, 2011.
- [72] Fathollahi H, Mousavi-Avval S H, Akram A, et al. Comparative energy, economic and environmental analyses of forage production systems for dairy farming [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 182(5):852–862.
- [73] Lindeijer E. Normalisation and valuation. In: Udo de Haes (ed.). *Towards a methodology for life cycle impact assessment* [M]. Brussels: Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), 1996.
- [74] Simapro 软件官方网站 [EB/OL]. <https://simapro.com/>.
The website of the LCA software: simapro. <https://simapro.com/>.
- [75] 亿科环境科技有限公司网站:生命周期节能减排(ECER)评估-eBalance 软件介绍 [EB/OL]. <http://goo.gl/pNX1Bs>.
IKE, 2012b. Introduction of life cycle energy conservation & emission reduction (ECER) assessment (in Chinese) accessed in October 2014. <http://goo.gl/pNX1Bs>.
- [76] 亿科环境科技有限公司网站:CLCD 数据库介绍 [EB/OL]. <http://www.ike-global.com/products-2/chinese-lca-database-clcd>.
IKE, 2012a. Chinese Life Cycle Database–CLCD accessed in March 2015. <http://www.ike-global.com/products-2/chinese-lca-database-clcd>.
- [77] Herrmann I T, Moltesen A. Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? – a comparative assessment of Simapro and GaBi [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015,86(1): 163–169.
- [78] 张 丹.中国粮食作物碳足迹及减排对策分析 [D]. 北京:中国农业大学, 2017.
- Zhang D. Carbon footprint and low carbon strategy for grain production in China [D]. Beijing:China Agricultural University, 2017.
- [79] Sleeswijk A W, Oers LFCMV, Guinee J B, et al. Normalisation in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000 [J]. *The Science of the total environment*, 2008,390(1):227–240.
- [80] 王明新,包永红,吴文良,等.华北平原冬小麦生命周期环境影响评价 [J]. *农业环境科学学报*, 2006,25(5):1127–1132.
- Wang M X, Bao Y H, Wu W L, et al. Life cycle environmental impact assessment of winter wheat in North China Plain [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006,25(5):1127–1132.
- [81] Li S B, Thompson M, Moussavi S, et al. Life cycle and economic assessment of corn production practices in the western US Corn Belt [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021,27(6):1762–1774.
- [82] Gan Y T, Liang C, Campbell C A, et al. Carbon footprint of spring wheat in response to fallow frequency and soil carbon changes over 25years on the semiarid Canadian prairie [J]. *European Journal of Agronomy*, 2012,43(11):175–184.
- [83] Yang Y, Bae J, Kim J. Replacing gasoline with corn ethanol results in significant environmental problem-shifting [J]. *Environmental Science and Technology*, 2012,46(7):3671–3678.
- [84] Tsiropoulos I, Benjamin C, Martin K P. Energy and greenhouse gas assessment of European glucose production from corn e a multiple allocation approach for a key ingredient of the bio-based economy [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013,43(3):182–190.
- [85] Yu S, Tao J. Simulation based life cycle assessment of airborne emissions of biomass-based ethanol products from different feedstock planting areas in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(5):501–506.
- [86] Kim S, Dale B E. Life cycle assessment of fuel ethanol derived from corn grain via dry milling [J]. *Bioresource Technology*, 2008,99(12): 5250–5260.
- [87] Pieragostini C, Aguirre P, Mussati M C. Life cycle assessment of corn-based ethanol production in Argentina [J]. *Science of the total environment*, 2014,472(2):212–225.
- [88] Cheroennet N, Suwanmanee U. Net energy gain and water footprint of corn ethanol production in Thailand [J]. *Energy procedia*, 2017, 118(8):15–20.
- [89] Yang Y. Life cycle freshwater ecotoxicity, human health cancer, and noncancer impacts of corn ethanol and gasoline in the U.S [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013,53(8):149–157.
- [90] Feng H, Rubin O D, Babcock B A. Greenhouse gas impacts of ethanol from Iowa corn: Life cycle assessment versus system wide approach [J]. *Biomass & Bioenergy*, 2010,34(6):912–921.

作者简介: 丁佳莹(1995–),女,河北承德人,北京工商大学硕士研究生,主要从事食品行业 LCA 的研究。