



DOI: 10.5846/stxb201906201307

徐湘博, 孙明星, 张林秀. 农业生命周期评价研究进展. 生态学报, 2021, 41(1): 422–433.

# 农业生命周期评价研究进展

徐湘博<sup>1,2</sup>, 孙明星<sup>1,2,\*</sup>, 张林秀<sup>1,2</sup>

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, CERN 综合研究中心, 北京 100101

2 联合国环境署国际生态系统管理伙伴计划, 北京 100101

**摘要:** 作为评价产品系统全链条环境影响的有效工具, 生命周期评价(LCA)方法已广泛用于工业领域。农业领域也面临着高强度的资源和环境压力, LCA 在农业领域的应用应运而生。旨在综述已有农业 LCA 研究的基础上, 鉴别农业 LCA 应用存在的问题, 并为农业 LCA 未来的发展提出建议。目前农业 LCA 存在系统边界和功能单位界定不清晰、缺少区域清单数据库、生命周期环境影响评价模型(LCIA)不能准确反映农业系统环境影响、结果解释存在误区等方面的问题。为了科学准确地衡量农业系统的环境影响, 促进农业系统的可持续发展, 文章认为农业 LCA 应该从以下几个方面加强研究, 即科学界定评价的参照系、系统边界的扩大及功能单位的合理选取、区域异质性数据库构建与 LCIA 模型开发、基于组织农业 LCA 的开发以及对于利益相关者行为的研究。

**关键词:** 农业; 生命周期评价; 生命周期清单; 环境影响评价模型

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)始于 20 世纪 60 年代末的美国资源与环境状况分析(REPA), 在 20 世纪 80 年代末以后进入迅速发展阶段, 于 1990 年由“国际环境毒理学与化学学会(SETAC)”首次提出概念, 对产品及其“从摇篮到坟墓”的全过程所涉及的环境问题进行评价<sup>[1]</sup>。1997 年, 国际标准化组织(ISO)定义了 LCA, 并颁布国际标准, 制定了理论框架(ISO14040, 2006)<sup>[2]</sup>。ISO 将 LCA 定义为“对一个产品系列的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价”, 并将其分为四步, 即 1) 目标定义和范围界定, 2) 清单分析, 3) 影响评价, 4) 结果解释。迄今, LCA 已广泛应用于工业产品及产品系统, 对工业产品环境影响进行定量化评估, 成为工业产品及产品系统改进和绿色设计的决策支撑工具。农业系统同样面临资源与环境双重压力, 减小农业系统的资源环境压力, 促进农业系统的绿色生产成为农业可持续发展的关键问题。LCA 的理论与方法在农业系统的应用可量化的评估其资源环境压力, 为农业系统的可持续发展提供决策支撑, 农业 LCA 应运而生。

## 1 农业生命周期评价研究现状

### 1.1 农业生命周期评价简介

农业系统同样面临资源与环境双重压力下的可持续发展问题, 农业 LCA 理论与方法研究应运而生。LCA 在工业企业部门、政府环境管理部门等应用较早, 农业 LCA 起步较晚<sup>[3]</sup>。农业 LCA 发展过程中的标志性事件为 1993 年 Weidema 组织的第一届农业生命周期评价(life cycle assessment)的学术研讨会, LCA 由此开始广泛应用于农业系统, 并建立了相应评价体系<sup>[4-5]</sup>。与工业领域相比, 农业 LCA 存在着以下特点: 相较于

基金项目: 国家自然科学基金项目(41901255); 中国科学院战略性先导科技专项(A 类)(XDA20010303)

收稿日期: 2019-06-20; 网络出版日期: 2020-11-19

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunmx@igsnrr.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

工业产品,农业产品受产地的影响更大,因此必须考虑区域化的生命周期清单和评价模型<sup>[8]</sup>;农业系统边界定义更为模糊,如农业种植对土壤质量的影响是否包含在系统边界内,肥料使用带来的多年的效应如何界定,这些都需要设定假设<sup>[9]</sup>;农业系统在不同产品影响分配上更为模糊,特别对于间作作物水和肥的分配问题;农业生产大量占用土地,对于土地占用带来的环境影响需要重点考虑。农业 LCA 开展也遵从 ISO 规定的四步<sup>[8]</sup>,即 1) 目标定义和范围界定,2) 清单分析,3) 影响评价,4) 结果解释。目前,研究者对农业 LCA 方法的运用并不一致,但研究越来越完善和规范,欧洲国家等发达地区处于农业 LCA 方法论研究的领先地位<sup>[9-10]</sup>。

随着对可持续农业的持续关注,农业 LCA 的研究不断增多。中文数据库中关于农业 LCA 的发表相对较少,此类研究大都发表于英文杂志。基于 Web of Science 核心数据库,对农业 LCA 的文献进行汇总分析发现,2000 年以前农业 LCA 研究受到的关注较少,进入 21 世纪后特别是 2010 年后对于农业 LCA 的关注持续增加,论文数量及单篇论文平均引用次数持续增加(图 1)。

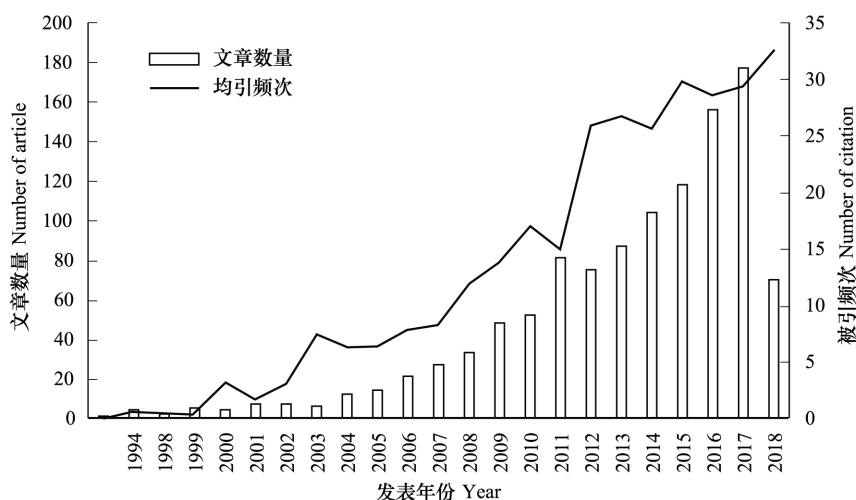


图 1 基于 Web of Science 核心数据库中农业生命周期评价(LCA) 文章发表数量及单篇文章平均引用次数

Fig.1 The number of agricultural life cycle evaluation (LCA) articles published and the average citations per article based on the core database of Web of Science

从发表文献的关键词来看,除了生命周期评价和农业系统外,碳足迹、温室气体排放、全球变暖等词汇是最为关注的关键词,此外,有机农业、可持续性、可持续农业指征关键词,水足迹、土地利用、生物多样性等环境影响关键词也备受关注(图 2)。从时间序列的关注点来看,农业 LCA 从有机种植、土地利用、生物能源等的关注,慢慢转向对食物生产、肉奶生产、氮素排放、碳排放与固定的关注,目前研究开始关注可持续消费、碳足迹等方面(图 2)。

## 1.2 分区域农业生命周期评价

从研究区域来看,欧美地区是农业 LCA 研究的热点区域,也是开展农业 LCA 研究最多的区域。其中最早对农业 LCA 进行研究的国家包括美国、加拿大、西欧和北欧等,意大利、西班牙、澳大利亚、巴西、日本等国随后对农业 LCA 开展了大量的研究,而后中国、伊朗、南非、葡萄牙等国对农业 LCA 展开了大量的研究(图 3)。

在国际上,荷兰等一些欧洲国家的研究机构如农业环境中心、农业经济研究所等早在 1996 年就已经开始了 LCA 在农业生产领域的研究工作<sup>[11-12]</sup>,丹麦、瑞典等北欧国家也于 21 世纪初对农业 LCA 进行了大量的探索,如农产品种植、食物消费等<sup>[13-14]</sup>。日本是较早开展农业 LCA 研究的国家之一。1998 年,日本政府在国际上率先组织农林水产省所属的有关研究机构、农业企业及大学开始了面向可持续农业 LCA 的系统研究,研究成果代表当时国家研究机构的较高水平<sup>[15]</sup>。目前已经较为成熟地将农业 LCA 方法应用到种植方式、耕作制度等的环境影响评估或对比研究中<sup>[16-18]</sup>。虽然澳大利亚的研究文献相对较少,但是近年澳大利亚也已启动





康影响的减小也没有体现在研究中,大部分研究仅考虑了化肥农药进入水体或土壤进而造成人体健康的影响,然而研究表明食物中农药的残留造成的人体健康的影响远远高于其进入水体或土壤造成的人体健康的影响<sup>[43]</sup>。

除此之外,有关农产品生产的评价还体现在密集化种植、农药化肥施用、新技术使用、食物全产业链评估等方面。对于密集化种植和一般化种植及有机种植的环境影响分析表明,无论功能单位定义为单位产品或单位种植面积,密集化种植的环境影响都要高于一般化种植及有机种植<sup>[44]</sup>。有关代表性蔬菜西红柿种植的环境影响的评价在不同区域广泛开展,种植方式、作物种类、种植地点等都影响最终的环境影响评价结果<sup>[41, 43]</sup>。研究还对比了不同害虫控制方式的影响,结果表明农药的种类和施药期是环境影响的重要影响因素<sup>[44]</sup>。有研究针对某种物质的投入进行了探讨,如 Nikkhah 等选择化肥作为研究对象,探究了伊朗农业生产对环境的影响,并选择全球变暖潜势、酸化潜势和陆地富营养化潜势这三类影响类型来评估环境影响<sup>[47]</sup>;有研究对使用有机肥所带来的不同种类的环境影响进行了详细讨论,有机肥带来的营养提供与固碳等效应比较容易计量,应当纳入评价中;抑制昆虫和疾病、提高土壤活力、提高产量等变动性较大,不易计量,难以评价;预防土壤侵蚀及增加土壤湿度等虽然易计量,但缺乏适当的模型进行评价;抑制杂草的效应并不明确<sup>[48]</sup>。有研究对转基因抗除草剂的甜菜种植的环境影响进行了研究,结果表明转基因品种的环境影响更小,主要是它避免了农药的生产、运输和使用环节的环境影响<sup>[49]</sup>,但研究并没有考虑转基因带来的其他的潜在风险。除此之外,有研究对一天饮食的环境影响进行了评价,并核算了一天不同国家早中晚餐的环境影响,并指出高蛋白类食物的环境影响较高<sup>[41]</sup>。

对于肉和奶生产的评价主要集中在欧洲国家<sup>[53]</sup>。肉和奶生产过程中一个重要的问题就是环境影响的分配问题,尤其对于牛奶生产来说,牛肉和牛粪便是其副产品。通过系统边界的扩大可以规避分配问题,也可按照经济价值、质量和所含能量进行分配。对于肉类生产,功能单位定义为肉的产量或蛋白的产量可能对结果产生影响<sup>[41]</sup>。关于有机和传统肉奶生产的环境影响也有文献报道,一般认为有机养殖可以减小大部分的环境影响,不过需要占用更多的耕地,减小传统养殖的环境影响的措施包括减少牧场营养投入、减少农药用量、更多使用本地饲料等<sup>[53]</sup>。甲烷的排放是肉奶生产的过程温室气体效应的重要贡献者。

农产品加工,如制作面包、番茄酱、啤酒等<sup>[50-52]</sup>,评价类似于工业产品的评价,通常将生产一定质量的产品作为功能单位,进行定量化评价并鉴别最主要的环境影响种类和影响因素。该类产品融合了农业种植和工业加工,不同环境影响种类的最主要的影响因素可能来自于农业种植阶段或工业加工阶段,研究发现工厂规模化生产的环境影响远小于家庭作坊生产的环境影响<sup>[54]</sup>。

通过分析来自于不同国别研究文献,可以看出各个国家都已认识到农业 LCA 方法论体系在建立可靠的农产品环境标准的应用前景以及对国际农产品贸易的重要性<sup>[53]</sup>。我国关于农业 LCA 的研究起步较晚,研究相对较少,且集中于对农产品生产本身的评价。面对我国农业系统存在的突出环境问题,以及提升我国农产品在国际贸易中地位的迫切需求,基于生命周期评价的农业系统环境效应研究框架以及评价体系的建立显得

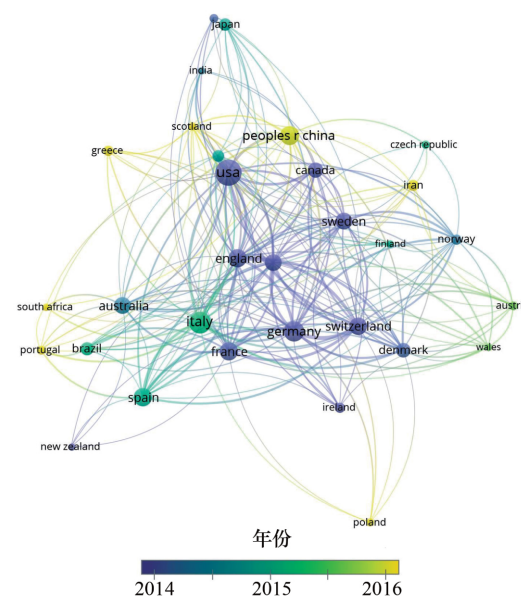


图3 基于 Web of Science 核心数据库的农业生命周期评价 (LCA) 研究国家分析

Fig.3 Countries of agricultural life cycle assessment article published based on the core database of Web of Science  
圆圈的大小代表杂志发文章量,连线的粗细代表相互引用情况

尤为重要,亟需建立并完善基于我国农业特征的 LCA 方法论体系。从研究系统边界来看,研究边界从“摇篮到大门”向“摇篮到坟墓”扩展,从全产业链的角度考察农业产品的全生命周期环境影响对于可持续食物消费具有重要意义。

## 2 农业生命周期评价存在的问题

根据 LCA 的国际定义,研究者尝试把农业 LCA 定义为:伴随农业生产活动而引起的所有物质和能量的投入、产出与可计量的环境负荷之间的关系,以评价农业生产活动的资源消耗、能源消耗以及对环境的综合影响<sup>[3]</sup>。目前农业 LCA 的研究存在功能单位与系统边界界定不清晰、数据获取途径方式不明确、数据质量良莠不齐、缺乏本地化评价模型、结果解释不科学等问题。

### 2.1 目标定义与范围界定

农业 LCA 的评价范围界定依赖于研究目标,多数研究探究农产品生产过程的环境影响,其中多采取“摇篮到门”的系统边界界定方式,主要包括原材料的获取和运输、中间产品的生产和农产品的生产过程,部分研究单独定义运输阶段为一个独立的阶段<sup>[3]</sup>,对于副产品的生产多采用质量或价值分配的方法,采用扩大研究边界的方式避免副产品的分配问题较为少见<sup>[5]</sup>。从“摇篮到门”的界定方法不能反映农产品加工、运输、消费及废弃阶段所造成的环境影响,另副产品的处理方式对农产品整个生命周期影响较大,例如农产品副产物农业秸秆露天焚烧和综合利用造成巨大的环境影响差异<sup>[5]</sup>。有研究将研究目标定义为餐桌上消费的食物,其系统边界包括产品的生产、收获、包装、运输等环节,这种界定能更准确的衡量农产品作为能量或营养提供者的环境影响,然而农产品消费和废弃的环境影响仍未包含在系统边界内。此外,已有研究均未考虑相关的厂房设备、建筑设施、运输工具生产的环境影响。为更全面了解农产品全生命周期的环境影响,在有数据条件的情况下应适当扩大系统边界。

功能单位的选定是影响环境影响结果的最主要的因素之一。由于农业涉及产品生产和土地利用两方面,所以早期的农业 LCA 研究建议研究人员使用产品重量和土地面积两个功能单位定义目标<sup>[6-5]</sup>。在已有文献中,相关研究多采用单位质量的产品、单位土地面积或两者的结合作为功能单位进行评估<sup>[6]</sup>。以单位质量产品为功能单位更多的是从产品供给角度进行考量,对比生产相同质量的产品所造成的环境影响,由于生产相同质量的产品所需土地差异较大,而生命周期评价缺乏对于土地质量的评价指标,因此该方法不能很好地反映农业活动对于土地的环境影响。以单位土地面积为功能单位更多的是从土地承载力的视角进行衡量,该方法可以更准确地衡量单位土地的环境影响,但对于单位产品的环境影响评价不充分。目前大部分研究将生产单位作物产品作为功能单位,我国三项研究分别对山东桓台县、河北曲周县、陕西关中地区的小麦-玉米轮作系统生命周期评价,皆以生产 1t 冬小麦和夏玉米作为功能单位<sup>[24, 29-3]</sup>。国际上也有大量研究采用单位作物产量作为功能单位,如 Taki 等采用生产 1t 小麦作为功能单元评价伊朗不同小麦生产系统的环境影响<sup>[2]</sup>。除了以单位作物产品作为功能单位以外,也有研究将单位面积作为功能单位<sup>[1]</sup>。另外,有研究同时使用这两种功能单位进行生命周期评价<sup>[5]</sup>。单独使用产品重量或者土地面积作为功能单位评价的环境影响没有充分考虑生产强度的变化,因为产品信息(产量等)并未反映到两个功能单位的影响中,使用单位面积影响与单位面积产量的比率对于不同农业系统农产品环境影响比较更为合理<sup>[6]</sup>。近年来,一些研究采用农产品营养价值作为功能单位,包括能量等价物、特定营养成分如蛋白质的量等,尤其对于肉类产品<sup>[61-63]</sup>,以体现产品最主要的功能,并尝试统一功能单位实现不同农产品的比较。有学者认为功能单位应该体现产品的社会功能和文化功能,比如喝酒所带来的快乐作为功能单位,但以社会或文化功能作为功能单位主观性过强,并不是所有的产品都适合以此作为功能单位<sup>[64-6]</sup>。对农民而言,农产品的经济价值似乎是一个更合理的功能单位,有些学者也认为这样能够反映产品的质量,但价格受其他因素影响较大,总是在变动,不一定能够准确衡量产品的质量<sup>[6]</sup>。此外,以一个人一天的膳食消费作为功能单位,可以更好地反映不同消费方式和消费习惯所造成的环境影响,同时可以从终端消费的角度衡量食物系统的环境影响,为可持续食物消费提供更明确的数据支撑。

目标界定应该依从于决策需要,不同的功能单位的选择主要考虑产品不同的现实功能以期提供更准确的测度。

与功能单位界定相关的另一个重要问题为多产品影响分配问题。由于农业产品多为联产产品,单独评价其中一种产品涉及到输入输出等在不同产品上的分配,比较常用的方法为通过产品的质量或经济价值对不同的产品进行分配。有学者认为质量或经济价值分配不能反映产品真实的环境影响,建议通过生物过程而不是产品的物理性质进行分配<sup>[67]</sup>,但生物过程往往比较复杂,存在着很强的不确定性,使得评价和比较难以实现。ISO 则建议通过扩大系统边界来避免分配问题,然而扩大系统边界往往对数据要求更高而难以实现。

## 2.2 清单分析

清单分析是生命周期评价的核心环节。在农业 LCA 中,除了传统 LCA 经常忽略的基础设施建造过程中的清单分析外,对于人力投入的清单分析也不多见。有研究将人力投入换算为肌肉能量进行评价,但这种方式不能准确衡量差异化的人力投入的环境影响<sup>[61]</sup>。农业 LCA 的清单分析有其特殊的复杂性,集中体现在环境排放上,农业的环境排放不仅与当地的土壤与气候条件相关,更与投入的化肥和农药相关,对于环境排放的模拟需要特别关注。对于农药使用造成排放的模拟尚不健全,比如 Eco-invent 数据库中农药向陆地表层水的排放数据缺失,造成了水生毒性评价指标的不准确,目前农药使用的排放清单确定是农业 LCA 中亟待解决的问题之一<sup>[68]</sup>。化肥引起的排放也是急需解决的问题,由于不同国际组织对于温室气体的排放的关注,化肥引起的气体排放的清单较为确定,但化肥引起的土壤和水的排放清单仍旧缺乏全球适用的模型进行模拟,这些排放与土壤的性质高度相关<sup>[69]</sup>。有机种植中有机肥使用的排放清单也是农业 LCA 中需要解决的重要问题<sup>[68]</sup>。

可靠且实时更新的清单是保证 LCA 顺利进行的基础。过程的输入输出清单大部分通过调研获取,而背景数据则需通过数据库获取。在工业 LCA 中 Eco-invent 数据库是目前最为广泛使用的数据库,并在 Gabi、Simapro 等专业软件中集成。随着可持续食物消费理念的不断发展,农业领域的数据库的构建也在不断推进,比如荷兰开发的 Agrifootprint、丹麦开发的 Food LCA-DK、法国开发的 Agribalyse 和日本开发的 JALCA (Japanese Agricultural Life Cycle Assessment) 数据库等<sup>[18, 70-72]</sup>,部分已经和商业化的专业软件进行集成。但农业领域的 LCA 数据库通常是特定区域的特定案例的数据,具有很强的区域异质性且不透明性,由于农业生产本身异质性的特性,这些数据库很难被用作其他区域或做横向对比。因此,亟需建立包含我国区域异质性的特定农业生产 LCA 评价的数据库,为农业生产进行全生命周期的评价提供数据支撑。

## 2.3 环境影响评价

结合国内外研究进展,目前在农业 LCIA 中采用的特征化中点环境影响种类主要包括非能源资源消耗、初级能源消耗、全球变暖、臭氧层消耗、光化学污染、富营养化、环境酸化、人体毒性、水生生态毒性、海洋生态毒性、陆生生态毒性、土地使用、水消耗等。在案例研究中不同评价标准的农业 LCA 研究可根据具体情况对环境影响指标酌情取舍。为了便于不同影响种类间的再比较以及为决策提供政策建议,通常进行特征化、归一化、加权评估等评价流程。LCIA 评价一般借助模型来实现,常用的模型为工业 LCA 中的模型,针对农业 LCA 的评价模型较为少见。

目前农业 LCIA 都是基于一般性的、不考虑区域异质性的、稳态的多介质环境影响评价模型,这种模型对于全球气候变化、臭氧层破坏等全球性指标影响不大,而对酸化、富营养化等局域指标则具有较大影响。农业过程高度依赖自然资源、生态系统质量等因素,具有很强的区域异质性,对于环境排放的暴露机制和敏感性具有很强的区域特征<sup>[73]</sup>,因此评价模型更需要考虑区域的异质性。

目前的评价模型中缺乏对农业重要影响因素的考量。工业 LCA 中认为过程是在技术圈,而环境排放是在生态圈。农业 LCA 从工业 LCA 中演化而来,如同在工业 LCA 的处理一样,土地被认为是技术圈的要素,仅作为粮食生产的物理要素投入,而土壤肥力、土壤结构、土壤水平衡、土壤的生物多样性以及生态系统服务功能的影响并没有包含在目前的评价模型内,但这些是保护生态资产和保证粮食生产的必要条件,因此应加强

对土壤环境质量的考虑<sup>[74-75]</sup>。农业领域水资源利用最大的部门,农业生产的水足迹占全球水足迹的 90% 以上<sup>[76]</sup>,目前大多数的研究和模型缺乏水利利用的考虑,或仅仅考虑了使用量,而没有考虑使用过程所带来的环境影响,因此应加强农业用水考量<sup>[77]</sup>。为了完善农业 LCA 评价,部分研究模型对农业的水利用和土地利用的环境影响进行考量<sup>[68, 78]</sup>,GaBi 公司最近提出了农业 LCA 评价模型,特别考虑了植物的轮作、土地利用、土地利用变化、水利用等因素<sup>[79]</sup>,但在研究中应用还较少。

农业 LCA 的特征化、归一化和加权评估的步骤类似于工业 LCA,环境影响的特征化通常采用当量系数,即以某种生态影响因子为基准。如全球暖化潜势根据  $\text{CO}_2$  作为当量因子,并得到了学术研究和实践上的高度认可<sup>[82]</sup>,富营养化潜势将  $\text{PO}_4^{3-}$  作为当量因子<sup>[80]</sup>,环境酸化潜势将  $\text{H}^+$  作为当量因子<sup>[81]</sup>,人体毒性和水生生态毒性采用 USEtox model 中的 CTUh 和 CTUe 特征因子<sup>[82]</sup>等。为了比较不同种类的环境影响的大小,通常将不同种类的重点环境影响除以该类物质的参考值得到归一化后的指标,而参考值一般为该类物质的全球(区域)年人均排放量。加权评估一般基于使用者的目的为不同的环境影响种类赋予不同的权重,以得到综合的指标为决策者提供依据<sup>[83]</sup>。同样,农业 LCA 也可以进行终点影响评价,即将不同种类的环境影响换算成对人体健康、全球气候变化、生态系统质量和资源的影响<sup>[84]</sup>。

## 2.4 结果解释

LCA 评价结果因涵盖不同种类的环境影响从而得到学术界、商界、政界人士的欢迎,现在也有在 LCA 中包含更多种类环境影响的趋势。然而,在资源、时间、数据都不充分的情况下,我们无法一次获取一种农产品所有的环境影响,加入更多的环境影响种类有可能会降低 LCA 评价的价值和公信力。同时 LCA 应该与其他评价工具结合,特别是简单易懂的评价指标,以给决策者提供易于理解与操作的决策信息。

对于 LCA 评价结果的解释需要建立在对系统边界、功能单位、数据源、分配原则等充分理解的基础上,然而非专家在不了解的情况下可能会误解 LCA 的评价结果。在农业 LCA 中,评价结果不能完全反应风险相关的后果,如人体健康指标。对于健康的评价必须建立在排放-暴露-致病的传导链上,而 LCA 的评价结果不能反应受体对有害物质的接受渠道和暴露时间,因此不能科学做出对人体健康影响的推断,一种物质的排放量和它的毒性不存在显著的因果关系<sup>[85]</sup>。

对 LCA 评价结果的敏感性分析和不确定进行分析如今成为 LCA 研究的必要步骤。敏感性分析主要是指数据或方法论的选择和变化如何影响 LCIA 的结果,LCA 的不确定性指的是由于模型不精确性、输入的不确定性、数据的变动性累积引起的结果的不确定性<sup>[86]</sup>。目前很多研究中缺乏对评价结果敏感性和不确定性的评价,应对评价结果进行敏感性分析和不确定性检验以增强结果的可信度。

## 3 农业生命周期评价展望

农业生态系统是一类经人工驯化了的生态系统,是一种人工-自然复合生态系统<sup>[87]</sup>。采用生命周期评价方法对农业生态系统进行评估既需要考虑农业过程在技术圈的输入输出,也需要考虑其在生态圈的输入输出,以科学客观地评价农业系统的环境影响。展望未来农业 LCA 评价需要加强以下方面的研究。

### 3.1 参照系的选取

农业生态系统不是原生生态系统,农业生态系统的形成即对原生生态系统的产生影响。农业生态系统产生环境影响的大小或者正负取决于参照系的选取。农业生产造成土地利用变化,改变了原有土地的生态系统结构与功能,进而引起生态系统服务功能发生变化。农业本身与土地利用变化之间的强相互关系导致了农业 LCA 与工业或工业园区 LCA 的差异。农业种植的改变(集约化或土地扩张)会造成土地利用的变化及土地生态系统服务功能和生物多样性的变化。因此衡量农业 LCA 需要特别关注土地利用和生态系统服务的变化,选择适当的参照系以衡量由于农业种植的变化带来的全生命周期的环境影响的变化。建议参照系选取所评价对象的所在地原生生态系统作为参照对象。以农业产品或副产品为原料的工业的 LCA 也有类似的特征,由于工业产品规模的变化,造成其所需原料的变化,因此需要在空间上界定可能发生变化的区域或者农业集

约化经营的区域。土地利用变化模型通过考虑气候因素和土壤适应性采用 logistic 回归分析确定可能发生变化的空间区域,而不是简单地按照目前的情况线性推测未来的情况;土地利用变化引起生态系统服务功能的变化和生物多样性的变化可分别通过 InVEST 模型和 MSA 模型确定,以评估由于工业规模的变化造成的生命周期环境影响的变化<sup>[74]</sup>。

### 3.2 系统边界的扩大与功能单位界定

基于农业生产过程的 LCA 能够反映种植本身所造成的环境影响,对农业的清洁生产具有重要意义。然而农业生产是为了满足人类的饮食需要或能源需求,从满足人类需求的角度来讲,应当将采用“摇篮到餐桌”的系统边界界定方法,将农产品的生产、运输、深加工、包装、分配、消费等环节纳入到评价体系中,从更长的产业链探究农业系统的环境影响,寻求减小环境影响的措施。由于当前日益增长的食物浪费现状<sup>[87]</sup>,有必要将食物末端处理阶段纳入到评价框架中来,采用“摇篮到坟墓”或“摇篮到摇篮”的系统边界界定方法,从可持续消费的角度全面衡量农业(食物)系统的生命周期环境影响,并鉴别降低环境影响的途径。随着系统边界的扩大和评价目标的变化,功能单位也将随之改变,单位餐桌上的产品、单位营养物质的生产、一个人一天的食物消费都可以作为功能单位来衡量农业系统的环境影响。

### 3.3 区域异质性数据库构建与评价模型开发

目前国际上已经初步构建农业 LCA 评价的数据库,但由于数据库具有很强的区域异质性,国际数据库并不适用中国农业 LCA 的评价;此外,由于中国地域面积大,不同区域的农业生产方式存在较大差异,因此有必要建立区域异质性的农业 LCA 评价数据库。由于收集大量区域异质性的数据成本过高,如何在收集有限数据的基础上反应农业 LCA 区域上的变异性需要方法论的创新。目前农业 LCA 的评价大都借助于工业 LCA 评价的常用模型,而模型中对于土地质量、水利用、生态风险、生态系统服务等指标考虑较少,因此有必要将以上指标纳入评价模型,结合地理信息系统(GIS)构建区域特色的环境影响表征模型,以提高农业 LCA 评价在区域特异性评价的准确性。

### 3.4 基于组织的农业 LCA 开发

虽然生命周期评价最初主要针对产品的影响评估,但它也适用于组织级别(Organizational LCA, O-LCA)(ISO/TS 14072),与其在产品层面进行比较不同的是,基于组织的生命周期评价是一种时间上的比较,可以为支持战略决策和可持续发展评估提供信息,O-LCA 更有前途的应用是通过定期评估组织的环境绩效来持续改进组织,即绩效跟踪<sup>[88]</sup>。最新的研究结果显示,该方法成功应用于巴西一家拥有 2600 种产品化妆品公司的环境影响评估<sup>[89]</sup>。O-LCA 采用 ISO 14040 和 ISO 14044 规定的 4 个步骤,产品 LCA 标准中的大多数原则、要求和指导方针也适用于 O-LCA。O-LCA 同样适用于农业系统的环境效应评价,从环境承载力的视角衡量农业系统的环境影响,从横向和纵向上衡量农业系统环境效应的改善或恶化,为农业系统可持续生产提供建议。

### 3.5 对于利益相关者行为的研究

从农业系统全产业链的角度看,农业系统涉及多个利益相关者,包括生产阶段的大型农场或农民,加工阶段的工业企业、运输阶段的物流公司、消费阶段的广大消费者、末端的食物废弃再利用企业、提供管理的政策制定者与决策者等。不同利益相关者的行为不仅对产业链上下游的主体产生影响,同时也对农业系统环境影响产生影响。探究不同利益相关者的行为对全产业链的环境影响,并识别主要的影响因素对农业系统全产业链的绿色升级具有重要意义。生产阶段生产规模、新技术的采用、低化肥农药投入的生产方式等对农业系统的影响应予以关注;加工阶段对不同产品的包装方式不仅影响着产品的质量和包装阶段的环境影响,也会对包装废物的后期处理产生显著影响;运输阶段不同产品的市场分配,尤其对需要远距离运输的产品,物流产生显著的影响;消费者在一定程度上对农业系统具有决定性的作用,消费者饮食结构的变化及消费的偏好可对农业系统及其环境影响产生显著影响;废弃食物的再利用方式受其收集方式的影响也受处理技术的影响,探究适宜的废弃食物收集及处理系统对于绿色产业链的构建具有重要意义;管理者与政策制定者通过产品绿色



认证、生态标签等方式可引导消费者,着力推进农业系统的绿色生产与消费。探究不同利益相关者的行为和偏好及其对农业系统的影响应是农业 LCA 研究的一个重要方向。

#### 参考文献(References):

- [1] 杨建新,王如松. 生命周期评价的回顾与展望. 环境科学进展, 1998, 6(2): 21-28.
- [2] ISO14040 Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework. Geneva Switzerland: International Organization for Standardization, 2006.
- [3] 杨印生,盛国辉,吕广宏. 我国开展农业 LCA 研究的对策建议. 中国软科学, 2003, (5): 7-11.
- [4] Rebitzer G, Ekvall T, Frischknecht R, Hunkeler D, Norris G, Rydberg T, Schmidt W P, Suh S, Weidema B P, Pennington D W. Life cycle assessment: part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. Environment International, 2004, 30(5): 701-720.
- [5] Brentrup F, Küsters J, Lammel J, Barraclough P, Kuhlmann H. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology II. The application to N fertilizer use in winter wheat production systems. European Journal of Agronomy, 2004, 20(3): 265-279.
- [6] Milù Canals L, Burnip G M, Cowell S J. Evaluation of the environmental impacts of apple production using Life Cycle Assessment (LCA): case study in New Zealand. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 114(2/4): 226-238.
- [7] Cowell S J, Clift R. Impact assessment for LCAs involving agricultural production. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1997, 2(2): 99-103.
- [8] Haas G, Wetterich F, Geier U. Life cycle assessment framework in agriculture on the farm level. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2000, 5(6): 345-348.
- [9] Charles R, Joliet O, Gaillard G, Pellet D. Environmental analysis of intensity level in wheat crop production using life cycle assessment. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 113(1/4): 216-225.
- [10] Renzulli P A, Bacenetti J, Benedetto G, Fusi A, Ioppolo G, Niero M, Proto M, Salomone R, Sica D, Supino S. Life cycle assessment in the cereal and derived products sector//Notarnicola B, Salomone R, Petti L, Renzulli P A, Roma R, Cerutti A K, eds. Life Cycle Assessment in the Agri-food Sector. Cham: Springer, 2015: 185-249.
- [11] Van Zeijts H, Leneman H, Sleeswijk A W. Fitting fertilisation in LCA: allocation to crops in a cropping plan. Journal of Cleaner Production, 1999, 7(1): 69-74.
- [12] Cowell S J, Clift R. A methodology for assessing soil quantity and quality in life cycle assessment. Journal of Cleaner Production, 2000, 8(4): 321-331.
- [13] Sonesson U, Berlin J. Environmental impact of future milk supply chains in Sweden: a scenario study. Journal of Cleaner Production, 2003, 11(3): 253-266.
- [14] Carlsson-Kanyama A. Climate change and dietary choices — how can emissions of greenhouse gases from food consumption be reduced? Food Policy, 1998, 23(3/4): 277-293.
- [15] Heinz A, Kaltschmitt M, Stülpnagel R, Scheffer K. Comparison of moist vs. air-dry biomass provision chains for energy generation from annual crops. Biomass and Bioenergy, 2001, 20(3): 197-215.
- [16] Hokazono S, Hayashi K, Sato M. Potentialities of organic and sustainable rice production in Japan from a life cycle perspective. Agronomy Research, 2009, 7(S1): 257-262.
- [17] Masuda K. Measuring eco-efficiency of wheat production in Japan: a combined application of life cycle assessment and data envelopment analysis. Journal of Cleaner Production, 2016, 126: 373-381.
- [18] Hokazono S, Hayashi K. Life cycle assessment of organic paddy rotation systems using land- and product-based indicators: a case study in Japan. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2015, 20(8): 1061-1075.
- [19] Ridoutt B G, Wang E L, Sanguansri P, Luo Z K. Life cycle assessment of phosphorus use efficient wheat grown in Australia. Agricultural Systems, 2013, 120: 2-9.
- [20] Jimmy A N, Khan N A, Hossain M N, Sujaudhin M. Evaluation of the environmental impacts of rice paddy production using life cycle assessment: case study in Bangladesh. Modeling Earth Systems and Environment, 2017, 3(4): 1691-1705.
- [21] Taki M, Soheili-Fard F, Rohani A, Chen G N, Yildizhan H. Life cycle assessment to compare the environmental impacts of different wheat production systems. Journal of Cleaner Production, 2018, 197: 195-207.
- [22] Mohammadi A, Rafiee S, Jafari A, Keyhani A, Dalgaard T, Knudsen M T, Nguyen T L T, Borek R, Hermansen J E. Joint Life Cycle Assessment and Data Envelopment Analysis for the benchmarking of environmental impacts in rice paddy production. Journal of Cleaner Production, 2015, 106: 521-532.
- [23] Nabavi-Pelesaraei A, Rafiee S, Mohtasebi S S, Hosseinzadeh-Bandbafha H, Chau K W. Integration of artificial intelligence methods and life cycle assessment to predict energy output and environmental impacts of paddy production. Science of the Total Environment, 2018, 631-632: 1279-1294.
- [24] Wang M X, Wu W L, Liu W N, Bao Y H. Life cycle assessment of the winter wheat-summer maize production system on the North China Plain.

- International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2007, 14( 4): 400–407.
- [25] Wang M X, Xia X F, Zhang Q J, Liu J G. Life cycle assessment of a rice production system in Taihu region, China. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2010, 17( 2): 157–161.
- [26] Wang M X, Shi Y, Xia X F, Li D L, Chen Q. Life-cycle energy efficiency and environmental impacts of bioethanol production from sweet potato. Bioresource Technology, 2013, 133: 285–292.
- [27] Wang M X, Chen Y H, Xia X F, Li J, Liu J G. Energy efficiency and environmental performance of bioethanol production from sweet sorghum stem based on life cycle analysis. Bioresource Technology, 2014, 163: 74–81.
- [28] Wang M X, Pan X X, Xia X F, Xi B D, Wang L J. Environmental sustainability of bioethanol produced from sweet sorghum stem on saline-alkali land. Bioresource Technology, 2015, 187: 113–119.
- [29] Wang C, Li X L, Gong T T, Zhang H Y. Life cycle assessment of wheat-maize rotation system emphasizing high crop yield and high resource use efficiency in Quzhou County. Journal of Cleaner Production, 2014, 68: 56–63.
- [30] 彭小瑜, 吴慧慧, 吴发后, 王效琴, 佟小刚. 陕西关中地区冬小麦-夏玉米轮作系统生命周期评价. 农业环境科学学报, 2015, 34( 4): 809–816.
- [31] 罗燕, 乔玉辉, 吴文良. 东北有机及常规大豆对环境影响的生命周期评价. 生态学报, 2010, 31( 23): 7170–7178.
- [32] 徐杰峰, 王小文, 王乐力, 王伯铎, 林积泉, 宋超山. 中国橡胶种植生命周期评价研究. 中国生态农业学报, 2011, 19( 1): 172–180.
- [33] 蔡宇杰, 乔玉辉, 徐敬, 孟凡乔, 吴文良. 有机和常规苹果生产环境影响的生命周期评价. 中国生态农业学报, 2017, 25( 10): 1527–1534.
- [34] Tricase C, Lamonaca E, Ingrao C, Bacenetti J, Lo Giudice A. A comparative Life Cycle Assessment between organic and conventional barley cultivation for sustainable agriculture pathways. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 3747–3759.
- [35] Liang L, Lal R, Ridoutt B G, Du Z L, Wang D P, Wang L Y, Wu W L, Zhao G S. Life Cycle Assessment of China's agroecosystems. Ecological Indicators, 2018, 88: 341–350.
- [36] He X Q, Qiao Y H, Liang L, Knudsen M T, Martin F. Environmental life cycle assessment of long-term organic rice production in subtropical China. Journal of Cleaner Production, 2018, 176: 880–888.
- [37] 王钰乔, 濮超, 赵鑫, 王兴, 刘胜利, 张海林. 中国小麦、玉米碳足迹历史动态及未来趋势. 资源科学, 2018, 40( 9): 1800–1811.
- [38] Williams A, Audsley E, Sandars DJZfihrdguDa. Determining the Environmental Burdens and Resource use in the Production of Agricultural and Horticultural Commodities. Technical Report for Defra Project IS0205. UK, Bedford: Cranfield University and Defra, 2006.
- [39] Silva L C A, Almeida P S, Rodrigues S, Fernandes F A N. Inactivation of polyphenoloxidase and peroxidase in apple cubes and in apple juice subjected to high intensity power ultrasound processing. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39( 6): 2081–2087.
- [40] Mattsson B, Wallén E. Environmental life cycle assessment ( LCA ) of organic potatoes. Acta Horticulturae, 2003, 619: 427–435.
- [41] Roy P, Nei D, Orikasa T, Xu Q Y, Okadome H, Nakamura N, Shiina T. A review of life cycle assessment ( LCA ) on some food products. Journal of Food Engineering, 2009, 90( 1): 1–10.
- [42] Meier M S, Stoessel F, Jungbluth N, Juraske R, Schader C, Stolze M. Environmental impacts of organic and conventional agricultural products—Are the differences captured by life cycle assessment? Journal of Environmental Management, 2015, 149: 193–208.
- [43] Margni M, Rossier D, Crettaz P, Joliet O. Life cycle impact assessment of pesticides on human health and ecosystems. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 93( 1/3): 379–392.
- [44] Haas G, Wetterich F, Köpke U. Comparing intensive, extensified and organic grassland farming in southern Germany by process life cycle assessment. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2001, 83( 1/2): 43–53.
- [45] Muñoz P, Anton A, Montero J I, Castells F. Using LCA for the improvement of waste management in greenhouse tomato production//Proceedings of the 4th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector. Denmark Horsens: Danish Institute of Agricultural Sciences, 2003: 205–209.
- [46] Antón A, Castells F, Montero J I, Huijbregts M. Comparison of toxicological impacts of integrated and chemical pest management in Mediterranean greenhouses. Chemosphere, 2004, 54( 8): 1225–1235.
- [47] Nikkhah A. Life cycle assessment of the agricultural sector in Iran ( 2007–2014 ) . Environmental Progress & Sustainable Energy, 2018, 37( 5): 1750–1757.
- [48] Martínez-Blanco J, Lazcano C, Christensen T H, Muñoz P, Rieradevall J, Møller J, Antón A, Boldrin A. Compost benefits for agriculture evaluated by life cycle assessment. A review. Agronomy for Sustainable Development, 2013, 33( 4): 721–732.
- [49] Bennett R, Phipps R, Strange A, Grey P. Environmental and human health impacts of growing genetically modified herbicide-tolerant sugar beet: a life-cycle assessment. Plant Biotechnology Journal, 2004, 2( 4): 273–278.
- [50] Rosing L, Nielsen A M. When A Hole Matters—the Story of the Hole in A Bread for French Hotdog//Proceedings of the Fourth International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector, Bygholm, Denmark, 2003.
- [51] Koroneos C, Roumbas G, Gabari Z, Papagiannidou E, Moussiopoulos N. Life cycle assessment of beer production in Greece. Journal of Cleaner Production, 2005, 13( 4): 433–439.
- [52] Andersson K, Ohlsson T, Olsson P. Screening life cycle assessment ( LCA ) of tomato ketchup: a case study. Journal of Cleaner Production, 1998, 6( 3/4): 277–288.

- [53] Ruviaro C F, Gianezini M, Brandão F S, Winck C A, Dewes H. Life cycle assessment in Brazilian agriculture facing worldwide trends. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 28: 9–24.
- [54] Cederberg C, Stadig M. System expansion and allocation in life cycle assessment of milk and beef production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2003, 8( 6) : 350–356.
- [55] Qin Z D, Sun M X, Luo X F, Zhang H R, Xie J Y, Chen H F, Yang L R, Shi L. Life-cycle assessment of tobacco stalk utilization. *Bioresource Technology*, 2018, 265: 119–127.
- [56] Van Der Werf H M G, Petit J. Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level: a comparison and analysis of 12 indicator-based methods. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 93( 1/3) : 131–145.
- [57] Van Der Werf H M G, Tzivilakis J, Lewis K, Basset-Mens C. Environmental impacts of farm scenarios according to five assessment methods. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 118( 1/4) : 327–338.
- [58] Hayashi K. Environmental indicators for agricultural management: integration and decision making. *International Journal of Materials & Structural Reliability*, 2006, 4( 2) : 115–127.
- [59] Foteinis S, Chatzisyseon E. Life cycle assessment of organic versus conventional agriculture. A case study of lettuce cultivation in Greece. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 2462–2471.
- [60] Hayashi K. Practical recommendations for supporting agricultural decisions through life cycle assessment based on two alternative views of crop production: the example of organic conversion. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013, 18( 2) : 331–339.
- [61] Sonesson U, Davis J, Flysjö A, Gustavsson J, Withthöft C. Protein quality as functional unit—A methodological framework for inclusion in life cycle assessment of food. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 470–478.
- [62] Li L, Wu W L, Giller P, O'Halloran J, Liang L, Peng P, Zhao G S. Life cycle assessment of a highly diverse vegetable multi-cropping system in Fengqiu County, China. *Sustainability*, 2018, 10( 4) : 983.
- [63] Roy P, Orikasa T, Nei D, Nakamura N, Shiina T. A comparative study on the life cycle of different types of meat//*Proceedings of the Third LCA Society Research Symposium*. Nagoya, Japan, 2008.
- [64] Notarnicola B, Tassielli G, Nicoletti G M. Life cycle assessment ( LCA) of wine production//Mattsson B, Sonesson U, eds. *Environmentally-Friendly Food Processing*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2003: 306–326.
- [65] Koohafkan P, Altieri M A. *Globally Important Agricultural Heritage Systems*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011.
- [66] Van Der Werf H M G, Salou T. Economic value as a functional unit for environmental labelling of food and other consumer products. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 94: 394–397.
- [67] Schau E M, Fet A M. LCA studies of food products as background for environmental product declarations. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2008, 13( 3) : 255–264.
- [68] Rosenbaum R K, Anton A, Bengoa X, Bjørn A, Brain R, Bulle C, Cosme N, Dijkman T J, Fantke P, Felix M, Geoghegan T S, Gottesbüren B, Hammer C, Humbert S, Joliet O, Juraske R, Lewis F, Maxime D, Nemecek T, Payet J, Räsänen K, Roux P, Schau E M, Sourisseau S, Van Zelm R, Von Streit B, Wallman M. The Glasgow consensus on the delineation between pesticide emission inventory and impact assessment for LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015, 20( 6) : 765–776.
- [69] Notarnicola B, Sala S, Anton A, McLaren S J, Saouter E, Sonesson U. The role of life cycle assessment in supporting sustainable agri-food systems: A review of the challenges. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 399–409.
- [70] Durlinger B, Koukouna E, Broekema R, Van Paassen M, Scholten J. *Agri-footprint 4.0 Part 2: Description of Data*, 2018. <https://www.agri-footprint.com/wp-content/uploads/2018/03/Agri-Footprint-4.0-Part-2-Description-of-data-2018.pdf>.
- [71] Nielsen P H, Nielsen A M, Weidema B P, Frederiksen R H, Dalgaard R, Halberg N. *LCA Food Database*, 2007. <http://www.lcafood.dk/>.
- [72] Koch P, Salou T. *AGRYBAL YSE® : Rapport Methodologique-Version 1.2*, 2015. [http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/agribalyse-rapport-methodologique-v1\\_2.pdf](http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/agribalyse-rapport-methodologique-v1_2.pdf).
- [73] Antón A, Torrellas M, Núñez M, Sevigné E, Amores M J, Muñoz P, Montero J I. Improvement of agricultural life cycle assessment studies through spatial differentiation and new impact categories: case study on greenhouse tomato production. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48( 16) : 9454–9462.
- [74] Clift R, Audsley A, Alber S, Cowell S, Crettaz P, Gaillard G, Hausheer J, Joliet O, Kleijn R, Mortensen B, Pearce D, Roger E, Teulon H, Weidema B, Van Zeijts H. *Harmonisation of environmental life cycle assessment for agriculture. Final report, Concerted Action AIR3-CT94-2028*, European Commission DG VI, Brussels, Belgium, 1997.
- [75] Chaplin-Kramer R, Sim S, Hamel P, Bryant B, Noe R, Mueller C, Rigalsford G, Kulak M, Kowal V, Sharp R, Clavreul J, Price E, Polasky S, Ruckelshaus M, Daily G. Life cycle assessment needs predictive spatial modelling for biodiversity and ecosystem services. *Nature Communications*, 2017, 8: 15065.
- [76] Hoekstra A Y, Mekonnen M M. The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109( 9) : 3232–3237.
- [77] Mattsson B, Cederberg C, Blix L. Agricultural land use in life cycle assessment ( LCA) : case studies of three vegetable oil crops. *Journal of Cleaner Production*, 2000, 8( 4) : 283–292.

- [78] Jolliet O, Frischknecht R, Bare J, Boulay A M, Bulle C, Fantke P, Cheewala S, Hauschild M, Itsubo N, Margni M, McKon T E, Canals L M, Postuma L, Prado-Lopez V, Ridoutt B, Sonnemann G, Rosenbaum R K, Seager T, Struijs J, Van Zelm R, Vigon B, Weisbrod A. Erratum to: Global guidance on environmental life cycle impact assessment indicators: findings of the scoping phase. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19( 8) : 1566–1566.
- [79] Deimling S, Bos U, Thylmann D, Hallmann A. The Agricultural LCA Model Documentation. 2019. [http://www.gabi-software.com/fileadmin/gabi/The\\_Agricultural\\_LCA\\_model\\_V1.4\\_2019.pdf](http://www.gabi-software.com/fileadmin/gabi/The_Agricultural_LCA_model_V1.4_2019.pdf).
- [80] Guinee J B. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2002, 7( 5) : 311–313.
- [81] 梁龙, 陈源泉, 高旺盛. 我国农业生命周期评价框架探索及其应用——以河北栾城冬小麦为例. *中国人口·资源与环境*, 2009, 19( 5) : 154–160.
- [82] Rosenbaum R K, Bachmann T M, Gold L S, Huijbregts M A J, Jolliet O, Juraske R, Koehler A, Larsen H F, MacLeod M, Margni M, McKone T E, Payet J, Schuhmacher M, Van De Meent D, Hauschild M Z. USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2008, 13( 7) : 532–546.
- [83] Finkbeiner M, Inaba A, Tan R, Christiansen K, Klüppel H J. The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2006, 11( 2) : 80–85.
- [84] Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G, Rosenbaum R. IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2003, 8( 6) : 324–330.
- [85] Owens J W. Life-cycle assessment in relation to risk assessment: an evolving perspective. *Risk Analysis*, 1997, 17( 3) : 359–365.
- [86] 章家恩, 饶卫民. 农业生态系统的服务功能与可持续利用对策探讨. *生态学杂志*, 2004, 23( 4) : 99–102.
- [87] Xue L, Liu G, Parfitt J, Liu X J, Van Herpen E, Stenmarck Å, O'Connor C, Östergren K, Cheng S K. Missing food, missing data? A critical review of global food losses and food waste data. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51( 12) : 6618–6633.
- [88] Martínez-Blanco J, Inaba A, Finkbeiner M. Scoping organizational LCA—challenges and solutions. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015, 20( 6) : 829–841.
- [89] De Camargo A M, Forin S, Macedo K, Finkbeiner M, Martínez-Blanco J. The implementation of organizational LCA to internally manage the environmental impacts of a broad product portfolio: an example for a cosmetics, fragrances, and toiletry provider. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24( 1) : 104–116.