

生命周期评价在畜牧生产中的应用研究现状及展望

姜明红¹, 刘欣超^{2,3}, 唐华俊², 辛晓平², 陈吉泉⁴, 董刚^{2,5}, 吴汝群⁴, 邵长亮²

(¹呼伦贝尔学院初等教育学院, 中国内蒙古呼伦贝尔 021008; ²中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 中国北京 100081;

³内蒙古农牧业科学院, 中国呼和浩特 010031; ⁴全球变化和地球观测中心, 地理、环境和空间科学系, 密歇根州立大学,

East Lansing, MI 48824 美国; ⁵山西大学生命科学学院, 中国太原 030006)

摘要: 生命周期评价 (life cycle assessment, LCA) 作为一种全程评价产品总体环境影响和生产效率的方法, 被广泛应用于企业优化生产经营结构和政府政策制定等方面。近年来, 出于粮食安全保障和生态环境保护的考虑, LCA 在农牧生产中的应用越来越受到重视。但我国相关方面的研究和应用并不多见, 特别是作为畜牧业重要产区的北方草原牧区, 尚没有开展针对当地畜牧生产体系的 LCA 研究。在这一背景下, 本文围绕主要环节和流程对国内外畜牧生产 LCA 方法框架和研究现状进行了综述, 主要从 LCA 研究目的与范围的确定、生命周期清单分析和影响评价三个方面展开。国内外文献综述表明, 国外畜牧产业中 LCA 的应用已相当普遍, 无论从方法上还是技术上都已经相当成熟和完备, 对我国畜牧产业 LCA 科学研究和实际应用均有较强的借鉴意义。然而, 由于国内外畜牧产业的具体情况差异, 国外 LCA 经验难以直接应用到国内。首先, 在我国北方牧区, 家庭牧场是当地畜牧生产的主要经营方式, 具有季节性放牧与圈舍饲养结合、不同牲畜混养、牧民生活和生产经营界限不明确等特点, 难以直接套用国外方法。此外, 在我国开展畜牧生产 LCA 研究所需的数据收集非常困难, 这是制约我国畜牧生产 LCA 应用的最大短板。最后, 由于畜牧生产技术及经营方式的差距, 相比于欧美澳等畜牧业发展成熟国家, 我国北方牧区畜牧生产受降水等自然因素及市场供求价格因素影响年际间差异更大, 这也是我国开展畜牧生产 LCA 研究必须考虑的问题。为了使 LCA 能够精准且广泛地应用于我国畜牧产业, 应从以下几个方面进行改进: 首先, 开展我国北方牧区不同规模畜牧生产经营系统物料投入和产出的调查和研究, 为畜牧产业 LCA 研究收集必要数据; 其次, 根据我国畜牧产业的特征建立并完善适合国情的畜牧业 LCA 标准方法和数据库, 提升我国 LCA 结论的准确性; 第三, 在我国畜牧 LCA 研究中还应加大学科交叉力度, 理清畜牧产业发展中的自然和社会驱动因素, 为我国北方牧区畜牧产业的可持续发展提供数据参考和科技支撑。

关键词: 生命周期评价; 北方草原牧区; 畜牧业; 畜牧生产系统; 资源消耗; 环境影响评价

Research Progress and Prospect of Life Cycle Assessment in Animal Husbandry

JIANG MingHong¹, LIU XinChao^{2,3}, TANG HuaJun², XIN XiaoPing², CHEN JiQuan⁴, DONG Gang^{2,5},
WU RuQun⁴, SHAO ChangLiang²

(¹College of Primary Education, Hulunbuir University, Hulunbuir 021008, Inner Mongolia, China; ²Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; ³Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China; ⁴Center for Global Change and Earth Observations,

Department of Geography, Environment, and Spatial Sciences, Michigan State University, East Lansing, MI 48824, USA;

⁵School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

收稿日期: 2018-09-30; 接受日期: 2019-02-22

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0500600)、国家自然科学基金面上项目 (41771205)、内蒙古自然科学基金项目 (2017BS0317)、现代农业产业技术体系建设专项资金 (CARS-34)

联系方式: 姜明红, E-mail: jiangminghong@hlbec.edu.cn; 刘欣超, E-mail: liuxinchao3211@126.com。姜明红与刘欣超为同等贡献作者。通信作者 邵长亮, E-mail: shaochangliang@caas.cn

Abstract: Life Cycle Assessment (LCA) is a generally accepted method to evaluate the overall environmental burden and production efficiency during the entire life cycle of a product, which is widely used for production management structure optimization in the enterprises and policy formulation in governments. In recent years, for food safety and environmental protection considerations, more and more studies emphasize that the LCA method should be used in animal husbandry to comprehensively assess the environmental burden and resources consumption during the animal-source food production. In China, LCA research and application of animal husbandry are rare, especially in the northern grassland pastoral area, which are the main livestock produce region, and no LCA research on the local livestock production system has been carried out. This paper reviewed the framework and research status of livestock production LCA methods on the main sections and processes, including (1) the goal and scope definition of livestock husbandry LCA; (2) life cycle inventory (LCI); and (3) life cycle impact assessment (LCIA). Through review the domestic and foreign LCA literatures on animal husbandry production, we noticed that the frame and methodology of animal husbandry LCA had been constructed well in developed country. It had an importance instructing significance for the research and practical application of Chinese animal husbandry LCA. However, we also needed to recognize that due to the differences in the specific situations of the livestock industry between domestic and foreign country, foreign LCA experience should not be applied directly in China. First of all, in the northern pastoral areas of China, family farm is the main production system mode of local livestock production, unclear boundaries between herdsmen's life needs and livestock production inputs exist in this system, therefore, it is difficult to apply the foreign experiences directly. Secondly, it is really a challenge to collect the data required for livestock husbandry LCA, which is the biggest restrictive factor of LCA application in livestock production in China. Third, compared with the animal husbandry developed countries, such as European countries, the United States and Australia, due to the gaps in livestock production technology and management methods, the livestock production in the northern pastoral areas of China is affected more by natural factors, such as precipitation, and various marketing factors, including the market supplies and demands. This is also an important issue that must be considered in the research and application of animal husbandry LCA in China. In order to widely practice Chinese livestock husbandry LCA, the following aspects should be improved: (1) the investigation about material input and output of livestock husbandry production in the northern pastoral areas of China should be carried out to collect necessary data; (2) the Chinese animal husbandry LCA database should be established in order to improve the accuracy of livestock husbandry LCA; and (3) we should strengthen the interdisciplinary study to clarify the natural and social driving factors in the development of animal husbandry, and to provide data reference and technology support for the sustainable development of animal husbandry in the northern pastoral areas of China.

Key words: life cycle assessment; northern grassland pastoral area; animal husbandry; livestock production system; resource consumption; environmental impact assessment

生命周期评价 (life cycle assessment, LCA) 方法自上世纪六十年代建立以来, 一直被不同行业用于评估其产品或服务的环境影响。这一方法主要对某种产品或服务在“从摇篮到坟墓”或“从摇篮到摇篮”整个生命周期中的环境影响和资源消耗进行综合量化评估, 评估结果可以用来改善产品生产、销售、使用、回收利用乃至最终废弃这一完整生命周期中的资源环境负担^[1]。随着方法体系的不断发展和完善, LCA 已经成为了国际上环境管理和产品设计的标准方法 (ISO14040-14044 系列标准), 广泛应用于建筑设计、生物能源、食品生产和循环产业中^[2-7]。

目前全球粮食安全问题日益严重, 同时乳、肉、禽、蛋等资源环境成本较高的食物消耗又在逐年增加^[8-10]。因此, 对于以乳、肉产品生产为主的畜牧产业来说, 如何合理利用日益紧张的土地、淡水等资源,

提高畜牧生产能力, 减轻畜牧产品生命周期中的资源环境负担, 建立高效、节约、环境友好的畜牧生产系统是目前急需解决的问题, 也是当前国际上 LCA 评价应用研究的热点之一^[9,11-17]。

在我国, LCA 评价在农畜产品生产方面的研究和应用并不多见。林剑艺等^[18]从食物需求和供给变化的角度利用混合 LCA 方法 (hybrid LCA, HLCA) 对我国 1979 年至 2009 年食物生产的碳足迹进行了计算。孙赵华^[19]论述了 LCA 方法在循环农业中的应用前景、框架和方法体系。白林^[20]开展了四川猪肉生产系统的 LCA 评价研究, 对散养、适度规模、集约化饲养三种情境下肉猪生产的环境影响效应进行了评价。而 WANG 等在 2016 和 2018 年发表的两篇文章中分别对我国关中平原和华北平原的奶牛养殖场牛奶生产中的温室气体排放、土壤酸化和富营养化等环境影响开展了 LCA 评价^[21-22]。

以上研究结果主要针对我国农区以圈养方式为主的畜产品生产系统，而作为我国畜牧业重要产区的北方草原牧区，还没有开展针对当地畜牧生产体系的 LCA 研究。在我国北方牧区，畜牧生产技术手段相对落后，单位畜牧产品产生的环境负担远高于欧美国家^[18,23-24]，而日益增长的人口和有限的资源环境容量，使得当地资源环境负担急剧增加，严重地妨碍了当地草原生态环境的保护和居民生活福祉的提升^[25-31]。在这一背景下，引入 LCA 方法对我国北方牧区畜牧产品生产进行环境影响全生命周期评

价，对于降低当地生态环境负担、优化畜牧资源配置、促进畜牧生产和产品加工标准化，提高我国北方牧区畜牧产业竞争力，实现草原畜牧业可持续发展具有重要意义。

本文在对国内外已有的畜牧生产 LCA 进行综述的基础上，围绕 LCA 的主要步骤（目的与范围确定、清单分析、环境影响评估以及结果解释和改进分析），对 LCA 评价在我国草原牧区畜牧产品生产中应用的方法和前景进行了梳理和探讨（图 1），以为当地畜牧产业的绿色可持续发展提供参考。

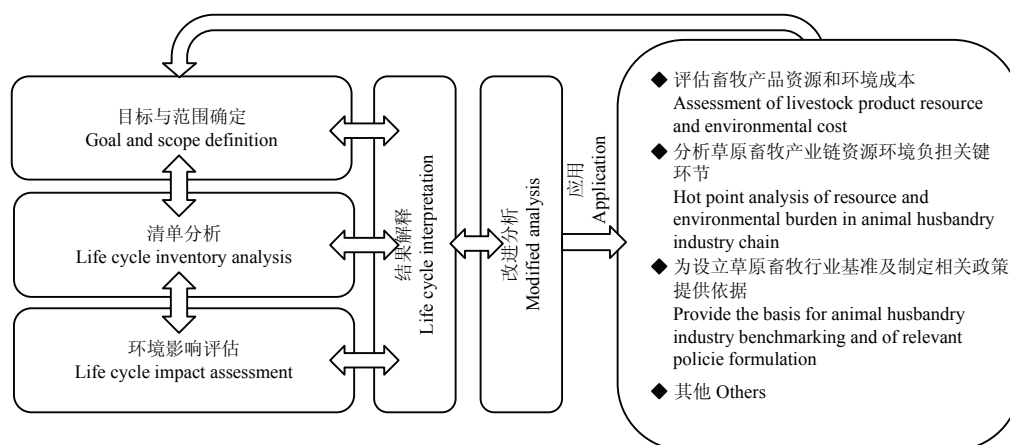


图 1 LCA 主要步骤框架及其在我国畜牧产业中的应用价值

Fig. 1 Life cycle assessment framework and Its application value in animal husbandry in China

1 畜牧产业 LCA 目标与系统边界选择

开展 LCA 评价的第一步是研究目的与范围的确定，需要确定 LCA 开展的目标、所评价产品系统的系统边界、功能单位、数据分配方法等问题，这直接决定了 LCA 评价的深度和广度^[32]。

首先从研究目标上来说，目前大部分畜牧生产 LCA 研究可以分为两类^[1]：第一类主要针对选定的生产系统，对其环境负担和资源消耗情况进行评估，例如，MCAULIFFE 等^[33]利用精确到牲畜个体的第一手观测数据，对英国北威克农场平台的肉牛生产温室气体排放进行了计算；BEAUCHEMIN 等^[34]通过一个长达 8 年的 LCA 评价研究估算了加拿大西部牛肉生产的温室气体排放。第二类研究则主要侧重于对不同地区^[35-36]、不同经营方式^[37-40]畜牧生产系统间环境负担的比较，例如 TICHENOR 等^[41]对美国东北部集约化放牧的肉牛牧场以及圈养的奶牛场进行了 LCA 评价，

来比较这两种系统生产牛肉的环境负担；O'BRIEN 等^[42]则对比了季节性放牧和圈养两种牛奶生产系统的环境影响差异。

总体而言，LCA 评价范围的界定也就是系统边界设置的越完整，对于环境影响和资源消耗的评价结果就越准确^[43-44]。理想的情况下，LCA 分析的系统边界应包含与产品相关的所有方面，完全意义上实现“从摇篮到坟墓 (from cradle to grave)”即从原材料获取到产品生产、使用、废弃物处理、再循环和最终废弃处置的全生命周期评价^[1]。然而对于大部分农畜产品 LCA，受限于数据可获取性等客观条件，都将评价重点放在从原材料生产获取开始直到畜牧产品从农场售出为止这一阶段的生产环节和过程上，以限制 LCA 研究的复杂性，相应的系统边界被称为“从摇篮到农场大门 (from cradle to farm gate)”^[4,45-46]。图 2 展示的是作者归纳的我国草原畜牧生产系统从摇篮到农场大门这一系统边界所包含的主要生产环节对应的物料投

入和资源环境影响。但是也有一些 LCA 评价在条件允许的情况下,将系统边界扩展到农场大门以外,实现从摇篮到坟墓的完整生命周期的评价^[1]。例如,HELLER 等^[47]在关于美国有机乳制品产业碳排放的

LCA 评价研究中,利用有机乳制品企业产品追溯数据完整的特点对有机乳制品产业中从饲料生产一直到产品被使用后废物处理的完整生命周期的碳排放进行了估算。

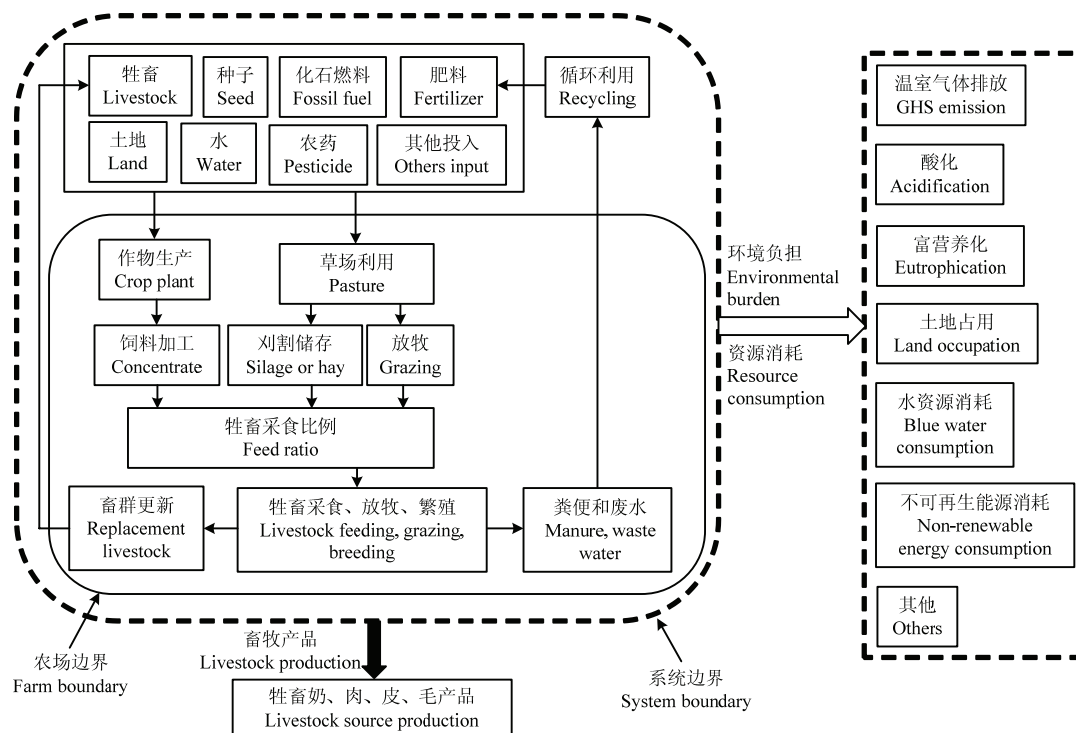


图 2 畜牧生产 LCA 系统边界（从摇篮到农场大门）

Fig. 2 System boundary of animal husbandry LCA (from cradle to farm gate)

选择功能单位的目的就是将 LCA 所评价畜牧生产系统的主要功能与系统产生的环境影响联系起来。一般而言, LCA 评价选择畜牧产品生产也就是系统的经济功能作为主要研究角度,因而将环境影响或资源消耗分摊到产品上进行描述,作为度量单位的产品就被称为 LCA 评价的功能单位,如肉牛或肉羊生产系统往往采用每千克活体重或胴体重作为功能单位^[36,38,41],乳制品生产系统则常用每公斤/公升牛奶或脂肪和蛋白质校正乳作为功能单位^[21,48]。在实际应用中还需要根据生产系统的特点来设定功能单位,例如 HELLE 等^[47]在有机乳制品 LCA 中把功能单位定义为一升装的商品液态牛奶;而 MCAULIFFE 等^[33]和 MOREL 等^[49]等在关于肉牛生产系统的 LCA 评价中,考虑到育肥肉牛的生产,将功能单位设置为活体重的增长量 (kg of live weight gain 或 live weight produced)。

也有学者认为,畜牧生产系统占用农场本身的和

农场以外的土地,因此发挥着维持土地利用和提供生态系统服务的功能。这些土地自身承受着畜牧生产带来的环境影响,对于富营养化等影响范围较小的环境影响类别来说,畜牧生产所占用的土地就是主要的环境影响发生区域。因此除了利用畜牧产品作为功能单位外,也有研究选择畜牧生产所占用的土地面积(分为农场内以及农场外)作为第二功能单位来评价畜牧生产在当地产生的环境影响。如 O'BRIEN 等^[50]在评价肉羊生产系统环境影响时,考虑到畜牧生产分别对全球范围和农场当地环境所产生的作用不同,除了使用卖出肉羊的活体重量作为功能单位外,针对波及空间范围较小的环境影响类别(如富营养化),将农场的土地占用面积作为功能单位进行分析,结果表明从农场当地环境的角度来说,集约化畜牧业会大大增加当地的环境负担,而如果以生产的羊肉作为衡量标准的话,集约化生产降低了畜牧生产中的

环境影响。SALOU 等^[51]在评价牛奶生产环境影响时也选择了每吨牛奶和每公顷土地占用两种功能单位, 分别用来表示牛奶生产系统在食物生产和维持土地利用方面的作用, 得到了与前文相似的结果: 实行牛奶集约化生产, 会增加所占用土地的环境负担, 而如果以牛奶产品作为功能单位的话, 集约化牛奶生产反而会减轻富营养化和土地占用方面的环境影响。

同一生产系统往往会出产多种产品, 对于畜牧产业来说也是如此, 例如牲畜提供的肉、奶、皮、毛等共生产产品, 因此如何将整个生产系统造成的环境影响分配到不同的产品上, 也是在畜牧生产 LCA 评价中需要重点考虑的问题。目前最为普遍使用的分配方法是根据共生产产品价值的比例进行分配 (公式 1), 这一方法具有简单易行, 数据来源可靠客观等优势^[21-22,45,50]。但是, 产品的价值受市场价格、供求关系、相关补贴政策等因素影响会时时变化, 因此利用产品价值作为分配依据的缺点是不利于不同时期和地点间 LCA 评价结果的比较。

$$E_{ij} = E_j \times \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (1)$$

式中, i 为生产系统中第 i 项产品, j 为生产系统中第 j 项环境负担, E_{ij} 为生产系统中第 i 项产品带来的第 j 项环境负担, E_j 为生产系统带来的第 j 项环境负担, V_i 为第 i 项产品的价值, $\sum_{i=1}^n V_i$ 为生产系统中所有产品总价值。

也有一些 LCA 采用了生物物理学的方法来进行分配, 例如在处理羊肉和羊毛之间的分配关系时因为羊肉和羊毛都是由蛋白质构成的, 而羊毛生产又主要是由牲畜对蛋白质需求决定的, 根据这一逻辑就可以用这两种产品所需要的可吸收蛋白质的比例进行分配^[35,52]。

除了采用以上分配方法外, 系统扩展也是一个可行的解决方案, 系统扩展是指当生产系统中存在 A 和 B 两种商品时, 为了评价主要产品 A 的环境影响, 首先在市场上找到副产品 B 的替代商品 C, 然后扩大系统边界将 C 的生产系统包括进来, 当需要计算生产 A 产品的环境影响时, 就利用原来系统生产 A+B 的环境影响减去相应生产 C 的环境影响即可 (公式 2)。例如, WIEDEMANN 等^[35]在对绵羊生产系统 LCA 评价时就尝试了通过牛肉或其他肉羊品种的羊肉, 来代替系统中肉毛两用羊生产的羊肉, 避免了羊毛和羊肉两种产品之间的分配问题。在牛奶生产系统中, 也可以

通过系统扩展加入肉牛生产系统, 来替代牛奶生产中的牛肉和粪便肥料的部分, 从而避免牛奶生产中主副产品间的分配问题^[53]。

$$E_a = E_{a+b} - E_c \quad (2)$$

式中, E_a 为主要产品 A 的环境影响, E_{a+b} 为原来系统生产 A 和 B 的环境影响, E_c 为生产 C 的环境影响。

2 清单分析

清单分析是对所研究系统中输入和输出数据建立清单的过程。首先针对生产系统的各个环节列出其废气、废水、废料的排放以及资源消耗占用的清单数据, 以此来量化产品系统中的相关输入和输出, 是 LCA 整个操作中工作量最大的一步^[32]。在清单分析过程中, 可以将所需收集的数据分为两大类: 第一类数据是所研究的目标生产系统中生产制造过程涉及到的消耗和排放数据, 需要从生产系统获取, 称之为前景数据 (foreground data); 第二类数据则是产品生产所需系统外资源和原料的开采、制造以及这些环节所需的电力、燃料等, 称作背景数据 (background data)。

畜牧生产 LCA 所需的前景数据目前存在三种收集方式, 第一种就是通过调研等方式直接从农场收集到的第一手资料, 这也是目前主要的前景数据收集方式^[33,47,54]; 第二种方式是从全国调查中获得平均数据, 常常用于较大空间尺度上如地区间或国家尺度上开展的 LCA 评价^[36,55]; 第三种方式则是通过对前人发表文献进行数据挖掘获取所需数据^[1,41,56]。对于 LCA 背景数据收集来说, 往往通过 LCA 相关数据库或是文献调研获取^[21-22,57]。使用专门的 LCA 评价软件如德国的 GaBi, openLCA, 荷兰的 SimaPro 或我国的 eBalance, 则可以直接从专门的 LCA 数据库选择并导入相应的背景数据。目前常用的 LCA 数据库有瑞士的 Ecoeint, 德国的 GaBi 数据库和欧盟的 ELCD 数据库等, 这些数据库数据资源较为丰富, 但是主要还是针对欧美的生产模式和需求构建的, 很多时候并不适合国内 LCA 评价使用。而国内的 CLCD 等数据库往往更注重化工、材料、能源、建筑等工业产品的 LCA 评价, 构建适合我国畜牧产业实际情况的 LCA 本土数据库因而成为当务之急。

根据对数据清单数据的获取方法不同, 可以分为几种不同的 LCA 分析方法。基于生命周期清单罗列数据自下而上开展的生命周期分析方法, 叫做过程生命周期评价方法 (PLCA), 是最为传统和经典的评价方法, 这一方法的数据收集方式主要是通过实地调查、

监测或统计资料进行,是目前在畜牧生产 LCA 评价中较为普遍采用的方法^[45,49,58]。但是有学者认为 PLCA 方法存在着数据收集困难、只能核算实物投入、系统边界设定不够客观,忽略系统边界外环境影响容易导致截断误差^[43-44]。

为了克服 PLCA 方法的以上问题, LAVE 等^[59-60]将经济系统中的输入输出模型引入生命周期评价中,创建了投入产出生命周期评价模型(EIO-LCA)。EIO-LCA 是一种自上而下的生命周期分析方法,它首先利用投入产出表计算出部门层面的能耗及排放水平,再通过评价对象与经济部门的对应关系评价具体产品或服务环境影响^[6,43],其模型公式为:

$$E=R \times (I-A)^{-1} \times p \quad (3)$$

$$R_i=c_i/x_i \quad (4)$$

式中, E 为产品 p 引起的各部门环境负担向量, R 为对角矩阵, 其对角元素 R_i 是部门 i 单位货币产出的环境负担, $(I-A)^{-1}$ 为列昂惕夫逆矩阵, 反映了经济的中间投入产出结构以及生产技术水平, I 为单位矩阵, A 为直接消耗系数矩阵, p 为产品列向量, c_i 为部门 i 的环境负担, x_i 为部门 i 的总产出。

EIO-LCA 虽然避免了 PLCA 的系统边界主观设定的问题,但也存在着核算针对性和精度不高,难以体现出技术和生产效率差异等不足之处,在畜牧生产 LCA 评价中并不常用。通过将 PLCA 和 EIO-LCA 两种方法整合到同一分析框架内,形成了 HLCA 方法,这一方法将 LCA 评价范围分为两大块,对于产品生产的各个关键过程利用 PLCA 方法评价,而对于不需要过于详细数据的部分采用 EIO-LCA 方法评价^[6]。

HLCA 方法既保留了 PLCA 具有针对性的特点,又避免了截断误差,同时也能有效利用已有的投入产出表,减少核算过程中的人力、物力投入。近年来 HLCA 方法开始在畜牧生产相关领域得到了应用,例如 LIN 等^[18]就利用 HLCA 方法对 1979—2009 年我国 15 种主要的食物生产碳足迹进行了计算,在该研究中对农业生产中的直接碳排放(如施肥、牲畜肠道甲烷排放、粪便管理等)通过 PLCA 方法计算,而对于间接碳排放(如化肥、农药、农业设施的生产建造等)通过 EIO 方法计算。

3 环境影响与改进分析

影响评价(life cycle impact assessment, LCIA)的目的是根据 LCA 评价的目标和范围,基于清单分析结果对产品生命周期的环境影响进行评价。这一过程

中,根据预想的环境影响类型,将清单数据转化为具体的影响类型和指标参数,更便于认识产品生命周期的环境影响。LCA 影响评价通常包括三个部分:影响分类、特征化和量化评价。其中影响分类指的是将从清单分析得来的数据归纳到不同的环境影响类型中,影响类型通常包括资源消耗、人类健康影响和生态环境影响 3 个大类,每一大类下又包含有许多小类,如在资源消耗包括石油化石能源消耗、净水资源消耗等,生态环境影响有全球变暖、酸雨和富营养化等。特征化指的是评估清单上各个物流和能流对应的潜在环境影响的大小(例如评估排出二氧化碳对应的潜在温室效应,评估排出含 N、P 废水对应的潜在富营养化效应等),并且通过标准化则可以让不同物质或能量流的潜在的环境影响可以计算比较,这一计算过程可以通过公式 5 实现^[7],这是 LCA 影响评价的中间(Mid-point)指标,如目前常见的针对畜牧生产温室气体排放开展的 LCA 研究在评估甲烷、氧化亚氮等温室气体增温效应时通常都换算为等效的二氧化碳当量($\text{CO}_{2\text{eq}}$)作为评价指标^[61-62]。在获得中间指标评价结果之后,确定不同资源环境影响类型的贡献大小即权重因子和归一化基准值,使得不同类别环境影响能够比较和整合,进而得到一个归一化的综合指标,这一指标表征总的环境影响水平,即为 LCA 终点(End-point)指标。中间指标具有评价相对客观,结果明确易于解释等优点,因此很多畜牧 LCA 研究直接选用多个中间指标来解释不同的环境影响评价结果而不再计算终点指标结果^[21,63-64]。与中间指标相比,终点指标的计算在专业的研究学者来看难免会存在不同环境影响间相互权衡方法不同导致的异议,但是对于普通消费者来说,单一的综合性终点指标将不同的环境影响类别进行了整合,得到单一指标可以简单明确的反映产品生命周期中的综合环境影响,更利于公众接受和理解 LCA 评价结果。例如,荷兰开发了一个手机程序,可以让消费者在购物时通过这一程序了解到所购买动物产品的全生命周期环境影响,出于让消费者容易理解评价结果的考虑,这一软件展示给普通消费者的就是终点指标(ReCiPe hierarchic endpoint)评价结果^[65]。除了常规的 LCA 环境影响评价方法之外,一些学者将其他的方法和技术手段与 LCA 评价方法结合,扩展了畜牧生产 LCA 评价的范围^[66]。例如, PAYANDEH 等人^[67]将数据包络分析方法和 LCA 方法相结合,评估了伊朗肉鸡养殖场通过提升能源使用效率所带来的改善环境影响的潜力。

$$D = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m D_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{ij} \times \lambda_{ij} \times \frac{1}{f_{ij}} \times q_{ij} \quad (5)$$

式中, D 为某一影响类别的影响指数; n 为某一影响类别的子项总数; m 为某一子类型中排放物种数; D_{ij} 为某一影响类别第 i 子项的第 j 种排放物的影响指数; M_{ij} 为第 i 子项的第 j 种排放物的排放量; λ_{ij} 为第 i 子项的第 j 种排放物的特征化因子; f_{ij} 为第 i 子项的第 j 种排放物的标准化系数; q_{ij} 为第 i 子项的第 j 种排放物的权重系数。

改进分析这一步骤需要做的是从清单分析和环境影响评价结果中归纳出易于理解的 LCA 评价结果, 进而帮助决策者识别、评价并选择能减少研究系统整个生命周期内能源和物质消耗以及污染物释放机会的环节和过程。最终通过改变产品设计、原材料的使用、工艺流程、消费者使用方式及废物管理等改善产品生产系统的环境负担。为达到以上目的, 需要对畜牧产品生产消费中各个环节的环境影响进行评价, 并探讨不同生产管理模式下的畜牧产品资源环境影响的异同^[33-34,68]。例如 WANG 等^[22]在关中平原奶牛养殖场牛奶生产的 LCA 研究中, 通过对各个生产环节中的温室气体排放和土地占用情况的分析, 提出了可以通过提高饲喂效率、改善畜群结构、提高奶牛产奶能力以及改善牲畜粪便处理利用方式等途径来降低当地牛奶生产中的温室气体排放的建议。但该研究也认为一些减排措施, 如通过增加不施肥低产苜蓿的投入, 增加奶牛产奶量, 进而降低温室气体排放, 会引起土地占用增加, 造成额外的环境影响。

4 我国北方牧区畜牧业生产现状与 LCA 应用展望

通过对国外畜牧生产 LCA 研究文献的综述, 可以看到国外畜牧产业中 LCA 评价研究已相当普遍, 无论从方法上还是技术上来说都已经相当成熟和完备, LCA 已广泛应用于畜牧产品环境成本标识和生产管理方式改进等方面, 对我国畜牧产业 LCA 评价研究和实际应用的开展都有较强的借鉴意义。

对于我国北方牧区畜牧业来说, LCA 评价方法在这一领域具有广泛的应用前景。近年来我国在草原生态环境保护、草原畜牧产业技术改良方面取得了显著的进展, 但是当前大部分工作的开展只局限于解决单个问题或改进某一生产环节, 对畜牧生产全生命周期总体的环境影响和资源消耗缺乏准确的认识。此外,

在我国北方草原牧区, 也很少对人工草地建设或牲畜规模化、集约化养殖等草牧产业技术改良措施在温室气体排放、环境富营养化、土地资源占用和水资源消耗等方面的综合环境影响进行全面的评估, 使得当地政府和政策制定者在制定畜牧产业规划、生产技术改良和生态环境保护政策方案时, 面对畜牧生产过程中所产生方方面面的影响难以做出权衡和取舍。引入 LCA 方法, 可以将畜牧产品生产、消费中的各个环节结合起来, 权衡不同资源环境影响类别, 综合考量畜牧产品全生命周期总体环境影响和资源损益, 为以上问题的解决提供了新的视角和技术途径。

同时也需要认识到, 由于国内外畜牧产业的具体情况差异, 国外 LCA 经验难以直接在国内应用。首先, 在我国北方牧区, 家庭牧场是当地畜牧生产的主要经营方式, 具有季节性放牧与圈养舍饲结合, 不同牲畜混养, 牧民生活和生产经营界限不明确等特点, 使得在这一区域开展畜牧生产 LCA 评价, 无论是系统边界确定、功能单位选择还是结果分配等一系列环节的复杂性都大大增加, 难以直接套用国外方法。其次, 当地农牧民很少对经营活动进行准确记录, 国内也很少开展牧户尺度的畜牧生产物料投入和产出调研, 并且国内 LCA 背景数据库建设尚不完善, 因此在我国开展畜牧生产 LCA 所需的数据收集非常困难, 这也将是制约我国畜牧生产 LCA 应用的最大短板。最后, 由于畜牧生产技术及经营方式的差距, 相比与欧美澳等畜牧业先进国家, 我国北方牧区畜牧生产受降水等自然因素及市场供求价格因素影响, 无论从畜群规模还是经营方式上来讲年际间差异极大, 这也是在我国开展畜牧生产 LCA 评价中必须要考虑的问题。

为了促使 LCA 能够深入、广泛的应用于我国畜牧产业, 应从以下几个方面进行改进: 首先, 开展我国北方牧区不同规模畜牧生产经营系统物料投入和产出调查和研究, 在为当地环境保护和畜牧产业发展工作提供第一手资料的同时, 也为畜牧 LCA 评价收集了必要的数据。其次, 建立并完善我国畜牧业 LCA 标准方法和数据库, 根据我国畜牧产业的时间和区域差异特征, 建设相应的标准、方法和数据库等, 提升我国 LCA 评价结论的准确性。第三, 在我国畜牧 LCA 评价研究中还应加大学科交叉力度, 积极引入 CLCA、HLCA 等近年来的新方法和新概念, 通过 LCA 评价与生态学和经济学等学科的融合, 理清影响畜牧产业发展的自然和社会驱动因素, 通过宏观统计数据与实际

调研数据相结合, 简化开展 LCA 评价的数据需求, 而提高在我国草原牧区开展畜牧产业 LCA 研究的可操作性, 为我国北方牧区畜牧产业的可持续发展提供数据参考和技术支撑。

References

- [1] BALDINI C, GARDONI D, GUARINO M. A critical review of the recent evolution of life cycle assessment applied to milk production. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 421-435.
- [2] ANAND C K, AMOR B. Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 67: 408-416.
- [3] FANG K, DONG L, REN J, ZHANG Q, HAN L, FU H. Carbon footprints of urban transition: Tracking circular economy promotions in Guiyang, China. *Ecological Modelling*, 2017, 365: 30-44.
- [4] NIJDAM D, ROOD T, WESTHOEK H. The price of protein: Review of land use and carbon footprints from life cycle assessments of animal food products and their substitutes. *Food Policy*, 2012, 37(6): 760-770.
- [5] 鲍威, 陈亮, 郭慧婷, 孙亮. 生命周期评价方法在绿色设计产品中的应用. *标准科学*, 2016 (S1): 22-25.
BAO W, CHEN L, GUO H T, SUN L. Application of life cycle assessment method in green design products. *Standard Science (Suppl.)*, 2016(S1): 22-25. (in Chinese)
- [6] 李小平, 计军平, 马晓明, 王靖添. 基于 EIO-LCA 的燃料乙醇生命周期温室气体排放研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011(06): 1081-1088.
LI X H, JI J P, MA X M, WANG J T. Life cycle greenhouse gas emission assessment of fuel ethanol based on EIO-LCA. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011 (06): 1081-1088. (in Chinese)
- [7] 张赞齐, 贾黎明, 刘诗琦, 宋怡静, 苏淑钗. LCA 法在木本生物柴油清洁生产评估方面的应用研究. *中国油脂*, 2017 (10): 100-105.
ZHANG Y Q, JIA L M, LIU S Q, SONG Y J, SU S C. Evaluation of cleaner production of woody biodiesel using LCA method. *China Oils and Fats*, 2017 (10): 100-105. (in Chinese)
- [8] FAOSTAT 粮农组织, 农发基金, 儿基会, 粮食署, 世卫组织. 2017 年世界粮食安全和营养状况: 增强抵御能力, 促进和平与粮食安全. 2017. <http://www.fao.org/state-of-food-security-nutrition/zh/>.
Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), International Fund for Agricultural Development (IFAD), the United Nations Children's Fund (UNICEF), World Food Programme (WFP), World Health Organization (WHO). The state of food security and nutrition in the world 2017: Building resilience for peace and food security. 2017. <http://www.fao.org/state-of-food-security-nutrition/zh/>.
- [9] VAN ZANTEN H H E, MOLLENHORST H, KLOOTWIJK C W, VAN MIDDELAAR C E, DE BOER I J M. Global food supply: Land use efficiency of livestock systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, 21(5): 747-758.
- [10] 唐华俊, 李哲敏. 基于中国居民平衡膳食模式的人均粮食需求量研究. *中国农业科学*, 2012, 45(11): 2315-2327.
TANG H J, LI Z M. Study on per capita grain demand based on Chinese reasonable dietary pattern. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(11): 2315-2327. (in Chinese)
- [11] MCAULIFFE G A, CHAPMAN D V, SAGE C L. A thematic review of life cycle assessment (LCA) applied to pig production. *Environmental Impact Assessment Review*, 2016, 56: 12-22.
- [12] 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.
- [13] CLUNE S, CROSSIN E, VERGHESE K. Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 766-783.
- [14] BRAGHIERI A, PACELLI C, BRAGAGLIO A, SABIA E, NAPOLITANO F. *The Hidden Costs of Livestock Environmental Sustainability: The Case of Podolian Cattle*. Cham: Springer International Publishing, 2015: 47-56.
- [15] CAPPER J L, CADY R A, BAUMAN D E. The environmental impact of dairy production: 1944 compared with 2007. *Journal of Animal Science*, 2009, 87(6): 2160-2167.
- [16] 唐华俊, 吴文斌, 余强毅, 夏天, 杨鹏, 李正国. 农业土地系统研究及其关键科学问题. *中国农业科学*, 2015, 48(05): 900-910.
TANG H J, WU W B, YU Q Y, XIA T, YANG P, LI Z G. Key research priorities for agricultural land system studies. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(05): 900-910. (in Chinese)
- [17] 侯向阳. 可持续挖掘草原生产潜力的途径、技术及政策建议. *中国农业科学*, 2016, 49(16): 3229-3238.
HOU X Y. Priority Approaches, techniques and models to sustainably tap the grassland productivity potential. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(16): 3229-3238. (in Chinese)
- [18] LIN J, HU Y, CUI S, KANG J, XU L. Carbon footprints of food production in China (1979-2009). *Journal of Cleaner Production*, 2015, 90: 97-103.
- [19] 孙赵华. 循环农业 LCA 技术体系研究-以吉林省为例. 长春: 吉林大学, 2009.

- SUN Z H. Study on the LCA technical system of recycle agriculture -Taking Jilin province as an example. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- [20] 白林. 四川养猪业清洁生产系统 LCA 及猪粪资源化利用关键技术研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2007.
- BAI L. The study on LCA of pork production for cleaner production in Sichuan and key technologies of swine manure treatment[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- [21] WANG X Q, LEDGARD S, LUO J, GUO Y, ZHAO Z, GUO L, LIU S, ZHANG N, DUAN X, MA L. Environmental impacts and resource use of milk production on the north China plain, based on life cycle assessment. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 486-495.
- [22] WANG X Q, KRISTENSEN T, MOGENSEN L, KNUDSEN M T, WANG X. Greenhouse gas emissions and land use from confinement dairy farms in the Guanzhong plain of China - Using a life cycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 113: 577-586.
- [23] 刘加文. 我国农区草业发展再思考. 草地学报, 2009(3): 270-273.
- LIU J W. Rethinking of grass industry development in Chinese rural area. *Acta Agrestia Sinica*, 2009(3): 270-273. (in Chinese)
- [24] 李青丰, Michalk D, 陈良, 张萍, 佟绍敏. 中国北方草原畜牧业限制因素及管理策略分析. 草地学报, 2003, 11(2): 178-182.
- LI Q F, MICHALK D, CHEN L, ZHANG P, TONG S M. Analysis of constrains and management strategy for animal production in grassland of northern China. *Agrestia Sinica*, 2003, 11(2): 178-182. (in Chinese)
- [25] 王关区, 花蕊. 草原生态保护建设中存在的问题. 内蒙古社会科学(汉文版), 2013 (04):163-167.
- WANG G Q, HUA R. Problems in grassland ecological protection and construction. *Inner Mongolia Social Sciences*, 2013 (04): 163-167. (in Chinese)
- [26] 马林, 张杨. 我国草原牧区可持续发展模式及对策研究. 中国草地学报, 2013(02):104-109.
- MA L, ZHANG Y. A study of on the sustainable development model and countermeasures of pastoral areas in China. *Chinese Journal of Grassland*, 2013(02): 104-109. (in Chinese)
- [27] 黄清瑞. 内蒙古呼伦贝尔草原生态畜牧业现状以及发展建议[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.
- HUANG Q R. The status and development suggestions of ecological and animal husbandry in Inner Mongolia Hulunboir grassland[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [28] 王霞霞. 内蒙古草地资源退化及其影响因素的实证研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
- WANG Y X. A positive study on the grassland degradation and its determinants in Inner Mongolia[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- [29] 王关区. 我国草原退化加剧的深层次原因探析. 内蒙古社会科学(汉文版), 2006(04):1-6.
- WANG G Q. Analysis of deep-seated causes of grassland degradation in China. *Inner Mongolia Social Sciences*, 2006(04): 1-6. (in Chinese)
- [30] 任继周, 侯扶江. 草地资源管理的几项原则. 草地学报, 2004, 12(4): 261-263.
- REN J Z, HOU F J. Principles of grassland resources management. *Acta Agrestia Sinica*, 2004, 12(4): 261-263. (in Chinese)
- [31] 马林, 张杨. 中国草原生态文明建设的思路及对策探讨. 财经理论研究, 2017(06): 64-71.
- MA L, ZHANG Y. Thoughts and countermeasures of the construction of Chinese grassland ecological civilization. *Journal of Financial and Economic Theory*, 2017(06): 64-71. (in Chinese)
- [32] 席德立, 彭小燕. LCA 中清单分析数据的获得. 环境科学, 1997(05): 86-89.
- XI D L, PENG X Y. Data acquisition for inventory analysis in LCA. *Environmental Sciences*, 1997(05): 86-89. (in Chinese)
- [33] MCAULIFFE G A, TAKAHASHI T, ORR R J, HARRIS P, LEE M R F. Distributions of emissions intensity for individual beef cattle reared on pasture-based production systems. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 171: 1672-1680.
- [34] BEAUCHEMIN K A, HENRY JANZEN H, LITTLE S M, MCALLISTER T A, MCGINN S M. Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from beef production in western Canada: A case study. *Agricultural Systems*, 2010, 103(6): 371-379.
- [35] WIEDEMANN S G, LEDGARD S F, HENRY B K, YAN M-J, MAO N, RUSSELL S J. Application of life cycle assessment to sheep production systems: Investigating co-production of wool and meat using case studies from major global producers. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015, 20(4): 463-476.
- [36] ZONDERLAND-THOMASSEN M A, LIEFFERING M, LEDGARD S F. Water footprint of beef cattle and sheep produced in New Zealand: Water scarcity and eutrophication impacts. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 73: 253-262.
- [37] SULTANA M N, UDDIN M M, RIDOUTT B G, PETERS K J. Comparison of water use in global milk production for different typical farms. *Agricultural Systems*, 2014, 129: 9-21.
- [38] RIPOLL-BOSCH R, DE BOER I J M, BERNUÉS A, VELLINGA T V. Accounting for multi-functionality of sheep farming in the carbon footprint of lamb: A comparison of three contrasting Mediterranean

- systems. *Agricultural Systems*, 2013, 116: 60-68.
- [39] PELLETIER N, PIROG R, RASMUSSEN R. Comparative life cycle environmental impacts of three beef production strategies in the upper midwestern United States. *Agricultural Systems*, 2010, 103(6): 380-389.
- [40] ARSENAULT N, TYEDMERS P, FREDEEN A. Comparing the environmental impacts of pasture-based and confinement-based dairy systems in Nova Scotia (Canada) using life cycle assessment. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2009, 7(1): 19-41.
- [41] TICHENOR N E, PETERS C J, NORRIS G A, THOMA G, GRIFFIN T S. Life cycle environmental consequences of grass-fed and dairy beef production systems in the northeastern United States. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 1619-1628.
- [42] O'BRIEN D, SHALLOO L, PATTON J, BUCKLEY F, GRAINGER C, WALLACE M. A life cycle assessment of seasonal grass-based and confinement dairy farms. *Agricultural Systems*, 2012, 107: 33-46.
- [43] 王长波, 张小力, 庞明月. 生命周期评价方法研究综述—兼论混合生命周期评价的发展与应用. 自然资源学报, 2015 (07): 1232-1242.
- WANG C B, ZHANG X L, PANG M Y. A review on hybrid life cycle assessment: Development and application. *Journal of Natural Resources*, 2015(07): 1232-1242. (in Chinese)
- [44] 宋丹娜, 柴立元, 何德文. 生命周期评价模型综述. 工业安全与环保, 2006 (12):38-40.
- SONG D N, CHAI L Y, HE D W. Summarization on the life cycle assessment model. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2006(12): 38-40. (in Chinese)
- [45] BATALLA I, KNUDSEN M T, MOGENSEN L, HIERRO Ó D, PINTO M, HERMANSEN J E. Carbon footprint of milk from sheep farming systems in northern Spain including soil carbon sequestration in grasslands. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104(Suppl.C): 121-129.
- [46] CROSSON P, SHALLOO L, O'BRIEN D, LANIGAN G J, FOLEY P A, BOLAND T M, KENNY D A. A review of whole farm systems models of greenhouse gas emissions from beef and dairy cattle production systems. *Animal Feed Science and Technology*, 2011, 166-167: 29-45.
- [47] HELLER M C, KEOLEIAN G A. Life cycle energy and greenhouse gas analysis of a large-scale vertically integrated organic dairy in the United States. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(5): 1903-1910.
- [48] FLYSJÖ A, HENRIKSSON M, CEDERBERG C, LEDGARD S, ENGLUND J E. The impact of various parameters on the carbon footprint of milk production in New Zealand and Sweden. *Agricultural Systems*, 2011, 104(6): 459-469.
- [49] MOREL K, FARRIÉ J-P, RENON J, MANNEVILLE V, AGABRIEL J, DEVUN J. Environmental impacts of cow-calf beef systems with contrasted grassland management and animal production strategies in the Massif Central, France. *Agricultural Systems*, 2016, 144 (Supplement C): 133-143.
- [50] O'BRIEN D, BOHAN A, MCHUGH N, SHALLOO L. A life cycle assessment of the effect of intensification on the environmental impacts and resource use of grass-based sheep farming. *Agricultural Systems*, 2016, 148: 95-104.
- [51] SALOU T, LE MOUËL C, VAN DER WERF H M G. Environmental impacts of dairy system intensification: The functional unit matters! *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140:445-454.
- [52] EADY S, CARRE A, GRANT T. Life cycle assessment modelling of complex agricultural systems with multiple food and fibre co-products. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 28: 143-149.
- [53] ROY P, NEI D, ORIKASA T, XU Q, 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.
- [54] 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.
- [55] 王占彪, 王猛, 陈卓. 华北平原作物生产碳足迹分析. 中国农业科学, 2015, 48(01):83-92.
- WANG Z B, WANG M, CHEN F. Carbon footprint analysis of crop production in north China plain. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(01): 83-92. (in Chinese)
- [56] 黄文强, 董红敏, 朱志平, 刘翀, 陶秀萍, 王悦. 畜禽产品碳足迹研究进展与分析. 中国农业科学, 2015, 48(01):93-111.
- HUANG W Q, DONG H M, ZHU Z P, LIU C, TAO X P, WANG Y. Research progress and analysis of carbon footprint of livestock products. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(01): 93-111. (in Chinese)
- [57] 郑秀君, 胡彬. 我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展. 科技进步与对策, 2013 (06): 155-160.
- ZHENG X J, HU B. Domestic literature review and the latest overseas research progress of life cycle assessment. *Sciences & Technology Progress and Policy*, 2013 (06): 155-160. (in Chinese)
- [58] SALVADOR S, CORAZZIN M, ROMANZIN A, BOVOLENTA S.

- Greenhouse gas balance of mountain dairy farms as affected by grassland carbon sequestration. *Journal of Environmental Management*, 2017, 196(Supplement C): 644-650.
- [59] LAVE L B. Using input-output analysis to estimate economy-wide discharges. *Environmental Science Technology*, 1995, 29(9): 420-426.
- [60] HENDRICKSON C T. Environmental life cycle assessment of goods and services : An input-output approach. *Resources for the Future*, 2006, 34 (14): 116-130.
- [61] ZHUANG M H, GONGBUZEREN, LI W J. Greenhouse gas emission of pastoralism is lower than combined extensive/intensive livestock husbandry: A case study on the Qinghai-Tibet Plateau of China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 147: 514-522.
- [62] ZUCALI M, TAMBURINI A, SANDRUCCI A, BAVA L. Global warming and mitigation potential of milk and meat production in Lombardy (Italy). *Journal of Cleaner Production*, 2017, 153: 474-482.
- [63] MCCLELLAND S C, ARNDT C, GORDON D R, THOMA G. Type and number of environmental impact categories used in livestock life cycle assessment: A systematic review. *Livestock Science*, 2018, 209: 39-45.
- [64] 刘松. 关中地区奶牛饲料作物环境影响生命周期评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- LIU S. Life cycle assessment of dairy cattle feed crops in Guanzhong plain[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2010. (in Chinese)
- [65] HEAD M, SEVENSTER M, ODEGARD I, KRUTWAGEN B, CROEZEN H, BERGSMA G. Life cycle impacts of protein-rich foods: creating robust yet extensive life cycle models for use in a consumer app. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 73: 165-174.
- [66] GEYER R, STOMS D M, LINDNER J P, DAVIS F W, WITTSTOCK B. Coupling GIS and LCA for biodiversity assessments of land use. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2010, 15(5): 454-467.
- [67] PAYANDEH Z, KHEIRALIPOUR K, KARIMI M, KHOSHNEVISAN B. Joint data envelopment analysis and life cycle assessment for environmental impact reduction in broiler production systems. *Energy*, 2017, 127: 768-774.
- [68] STYLES D, GONZALEZ-MEJIA A, MOORBY J, FOSKOLOS A, GIBBONS J. Climate mitigation by dairy intensification depends on intensive use of spared grassland. *Global Change Biology*, 2018, 24(2): 681-693.
- (责任编辑 林鉴非)