

DOI: 10.16056/j.2096-7705.2021.01.009

更加精确的生命周期评价方法 ——区域生命周期评价

徐文娟

(内蒙古科技大学, 内蒙古包头 014000)

摘要: 通用的生命周期评价方法将环境影响简化为一个大陆甚至整个世界, 而忽略了排放发生的位置和排放的局部环境条件, 因而可能带来环境影响的重大误报。同时, 由于生产工艺的差别, 相同单位的同种物质, 在不同地区生产可能造成的环境影响种类和程度也大不相同。为了解决地理变异性对生命周期评价结果的影响, 研究人员引入了区域生命周期评价的方法, 通过区域化和空间化的措施得到更加精确的评价结果以支持环境政策的制定和环境治理手段的选择。系统介绍了区域生命周期评价方法的发展历程、原理和实施方法, 推荐了部分区域化背景数据的获取渠道, 并介绍了部分使用区域生命周期评价的研究案例, 从而验证区域化有利于提高影响评价结果的稳健性。因此区域生命周期评价可以弥补通用生命周期评价缺乏空间信息的不足, 使环境影响评价的结果更加精确。

关键词: 生命周期评价; 区域生命周期评价; 区域化; 空间化

中图分类号: X82

文献标志码: A

文章编号: 2096—7705 (2021) 01—0042—08

A More Accurate Life Cycle Assessment Method —Regional Life Cycle Assessment

XU Wenjuan

(Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014000, Inner Mongolia, China)

Abstract: The general life cycle assessment (LCA) method simplifies the environmental impact to a continent or even the whole world, but ignores the location of the emission and the local environmental conditions of the emission, which may lead to significant misstatement of the environmental impact. At the same time, due to the difference in production process, the same substance in the same unit, the possible environmental impact of production in different areas of the type and degree are also very different. In order to solve the influence of geographical variability on the results of LCA, researchers introduced the method of regional life cycle assessment to obtain more accurate assessment results through regionalization and spatialization to support the formulation of environmental policies and the selection of environmental governance means. This paper systematically introduces the development process, principles and implementation methods of the regional life cycle assessment, recommends the acquisition channels of some regional background data, and introduces some research cases using the regional life cycle assessment, so as to verify that regionalization is conducive to improving the robustness of impact assessment results. Therefore, regional life cycle assessment can make up for the lack of spatial information in general life cycle assessment and make the results of environmental impact assessment more accurate.

Keywords: life cycle assessment; regional life cycle assessment; regionalization; spatialization

收稿日期: 2020-10-27

基金项目: 内蒙古自治区科技厅重点项目“内蒙古自治区重大基础研究开放课题”(0406091701)

第一作者: 徐文娟 (1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生命周期评价。E-mail: xuwenjuan211314@163.com

引言

自改革开放以来,中国的经济总量不断上升,但随着工业规模的快速扩张和发展,诸如空气质量恶化、土壤和水资源污染、资源过度消耗等资源环境问题也逐渐成为影响中国可持续发展的重要因素。为了有效解决发展过程中产生的资源和环境问题,需要优化工业生产体系和提高生产效率。具体到一个产品而言,往往需要对其涉及到的原材料开采、生产、使用和废弃等流程中伴随的资源、能源消耗和污染物排放进行测定^[1]。为了全面客观的衡量对环境造成的影响,科学界发展了一种定量评价产品全生命周期的环境影响的工具——生命周期评价(life cycle assessment, LCA)。生命周期评价是对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价,是一种用于评价产品或服务相关环境因素及其整个生命周期环境影响的工具^[2]。

但是在传统的生命周期评价方法中,典型的清单分析通常是在一个国家或大陆的基础上进行的,很少有信息能够确定生命周期排放发生的具体位置。而且典型的环境影响评价表征方法通常集中于物质固有的物理化学性质,影响环境通常是一个国家或大陆,简化为“单位世界”,即假设平均特征^[3]。因此,从这些方法得出的特征因子一般在国家或大陆层面上使用。通用的LCA由于忽略了排放发生的位置和排放的局部环境条件,可能导致对区域环境影响的重大误报。例如,在香港排放1 kg苯对人体健康造成的损害与在西藏农村地区排放造成的损害是不同的。此外,由于供应链的全球化,构成产品生命周期清单的相关基本流可能在地理上分散,因而一些生命周期步骤可以发生在不同的国家或大洲。例如,不同国家的电力供应结构因电力生产技术(以煤或天然气为基础的能源、可再生能源等)、产量、工厂运营等因素而异。因此,同样生产1 kW·h的电能,不同国家电力生产所排放的温室气体截然不同^[4]。有些过程即使在一个国家内也面临着很高的地理变异性,如农业生产过程中的NO₂的排放量,由周围环境的微观环境参数(降雨量、土壤性质、坡度等)决定^[5]。此外,环境影响类别也具有不同的空间尺度。其中一些影响类别的空间尺度是全球性的,如气候变化或臭氧损耗,这意味着对全球影响类别做出贡献的基本流,向环境的排放将以同样的方式影响世界任何区域。相反有些影响类别具有局部规模,例如富营养化或酸化,其对人体健康的影响因

人口密度而异。也就是说对于局部尺度的影响,污染物的命运及其对敏感受体的暴露受其来源地周围局部条件的影响。因此,考虑到LCA中的空间因素似乎是增加结果代表性和可靠性的一个希望的途径^[6]。

本文根据LCA的最新研究进展,论述了在LCA中引入区域化的必要性,梳理了区域LCA的研究历程和现状,介绍了区域LCA的方法和模型,提供了部分区域化数据的获取来源,并展示了部分区域LCA的研究和应用成果,从而验证区域化有利于提高影响评价结果的稳健性。

1 区域生命周期评价方法的发展

“区域化”一词在20世纪90年代首次引入LCA领域,目的是减少与现场通用生命周期评价相关的不精确性^[7]。POTTING J等^[8]学者对区域化的生命周期评价进行了深入阐述,将生命周期评价方法进行了分类,包括:从典型区域收集数据用作通用清单数据的通用生命周期评价方法,该方法不考虑研究结果存在的空间变异性;从特定地点收集数据作为清单数据的定点生命周期评价方法,该方法的研究结果仅反应特定地点的工业生产造成的影响;最后一种是区域化的生命周期评价方法,该方法根据区域的空间尺度来搜集数据,计算环境影响特征因子,研究结果更具代表性。

随着研究的不断深入,人们认识到将依赖于地点的生命周期清单与区域化的特征因子相结合,能够产生更准确、更低不确定性的LCA结果。因而在生命周期清单分析阶段和环境影响评价阶段实施了区域化。清单区域化是指调整单元过程的输入或输出,以更好的描述区域技术的特点;或者对单元流程重新进行情景化,以更好的说明活动的特定背景^[9]。MUTEL C L等^[10]学者认为区域化清单建模的动机是认识到工业生产特征在整个空间内变化。通过清单区域化可以获得有地理代表性的输入,重点研究会对本地产生的污染输入基本流,从而提高LCA结果的代表性。

到目前为止,国际上比较认可的主要有两种互补的清单区域化的方法。第一种是过程再文本化(又称为过程情景化),它通过选择更相关的流程或修改流程体系结构来提高产品系统描述的代表性,使清单更能代表建模的地理覆盖范围。例如,区域化过程中的电力供应组合清单可以用更具体于一个特定地区的电力供应过程清单所取代,使其更具代表性。另一种是调整每个过程的数值数据,以更好

的反应给定空间覆盖范围的代表性。可以使用特定于地点的数据或更多聚合数据来增强清单的地理代表性。如果所选过程的地理覆盖范围不能代表建模区域, 优先执行过程的再文本化^[11]。MULLER S 等^[12]学者认为在清单区域化的过程中要使用谱系矩阵来评估清单数据的地理代表性, 以估计 LCA 结果的空间变异性。清单区域化会影响基本流的类型和数量。

此外, 根据研究目标和范围, 以及决策者所期望获取信息的精确度, 还可以进一步实施清单空间化。清单空间化是将地理信息属性化添加到基本流中, 以便使用更多的区域化特征因子。由于地理位置对于区域化特征因子的使用至关重要, 可以添加不同类型的地理信息 (如具体的地理坐标、行政区域等), 来匹配本地空间分辨率的影响评价方法^[13]。通过清单空间化提高 LCA 识别问题的能力。实践中可以使用与基本流相关的原型描述、地理区域的文字信息或利用地理信息系统 (geographic information system, GIS) 中的地理坐标信息来空间化基本流。清单空间化会影响在环境影响评价阶段使用的特征因子。

影响评价区域化是指开发空间差异化或区域化的影响评价方法。影响评价区域化涉及对同一基本流在给定区域内不同区域化特征因子的计算^[14]。传统 LCA 在计算影响分数时, ISO 14044 要求将基本流与相应的特征因子相乘之前, 首先要汇总整个生命周期的基本流^[15]。这意味着具有空间变异性的基本流的地理来源信息的丢失, 而且特征因子的计算是独立于基本流的地理信息。因此在进行基本流的汇总之前, 必须要改变传统 LCA 的计算结构, 在每个位置使用各自区域化特征因子计算影响分数。MUTEL C L 等^[16]学者提出了利用 Open LCA、Brightway 等软件中的 GIS 工具, 提出了一种基于清单区域与特征因子区域重叠加权曲面的修正矩阵计算特征因子的方法。此外, 区域化特征因子应包括不确定性和变异性, 区域化的影响评价模型除了提供本地规模的特征因子外, 还要提供聚合的特征因子, 对于特征因子的聚合使用本地规模的特征因子的加权平均值^[16]。通过影响评价区域化可以使排放的接收环境与沉积的接收环境区分开来, 有助于提高 LCA 结果的可靠性, 使其更接近实际情况。当需要在非常精细的空间分辨率上定义空间单元时, 可以建立原型模型进行影响评价, 原型可以进一步连接清单和影响评价。由于大多数网格单元是由高、低人口密度的混合体组成, 即使是本地空间分辨率为

50 km×50 km 的区域化影响评价方法也无法准确的反应摄入分数的实际变化, 将比城市和农村原型具有更高的不确定性^[17]。

近年来研究人员开发了许多区域化的影响评价方法, 例如: Impact World +、LC-Impact、LIME 2 等。Impact World + 环境影响评价方法是为了解决影响评估的区域化需求而开发的, 该方法具有全球覆盖范围, 并在国家分辨率、大陆分辨率、全球默认、本地分辨率等四个层次提供空间差异的区域化特征因子, 以及与空间变异性相关的不确定性, 是目前应用最广泛的区域化的影响评价方法^[18]。IC-Impact 是另一种区域化的影响评价方法, 该方法提供国家、大陆、全球层面的汇总数据, 空间差异范围从 0.05°×0.05°到 16 个次大陆, 提供端点级别的特征因子, 但是没有提供与特征因子空间变异性相关的不确定性^[19]。LIME 2 是为日本开发的区域化 LCIA 方法, 以良好的本地分辨率进行清单区域化并计算区域化特征因子, 然后计算聚合的特征因子, 结合区域化的清单进行影响评价, 但是该方法仅适应于日本^[20]。

2 区域生命周期评价方法的实施

2.1 区域 LCA 的原理方法

LCA 是一种为环境评价和管理提供决策支持的方法, 需要根据决策者所期望获取信息的精确度来考虑是否需要区域化。LCA 区域化的目标是减少由于空间变异性带来的不确定性, 以增加结果的相关性和代表性, 因此需要进行清单区域化和影响评价区域化。但是执行 LCA 的区域化会给 LCA 从业者带来额外的工作量, 特别是数据收集和集成到 LCIA 模型中, 因此在进行 LCA 时必须优先考虑区域化工作^[21]。为了降低工作量, 有必要优先考虑空间变异性最大的清单数据进行区域化。为此研究人员提出一个逻辑图 (见图 1), 该逻辑图可以与 SimaPro 软件、Ecoinvent 数据库、Impact World + 影响评价方法等一起实施 LCA 区域化。该逻辑图的目的是帮助 LCA 从业人员优先考虑区域化和空间化的工作, 优先考虑需要区域化的过程、影响类别、基本流。该逻辑图是迭代的, 某些阶段的区域化程度取决于研究目标、可用的技术和数据等。

第 1 阶段是确定减少空间不确定性的需求。决策者对 LCA 结果的置信度反映在结果的不确定性水平上。目前没有定量评估空间不确定性的工具, 实践者可以根据专家陈述对研究系统内地理变异性的风险和影响进行定性分析。根据生命周期评价实践

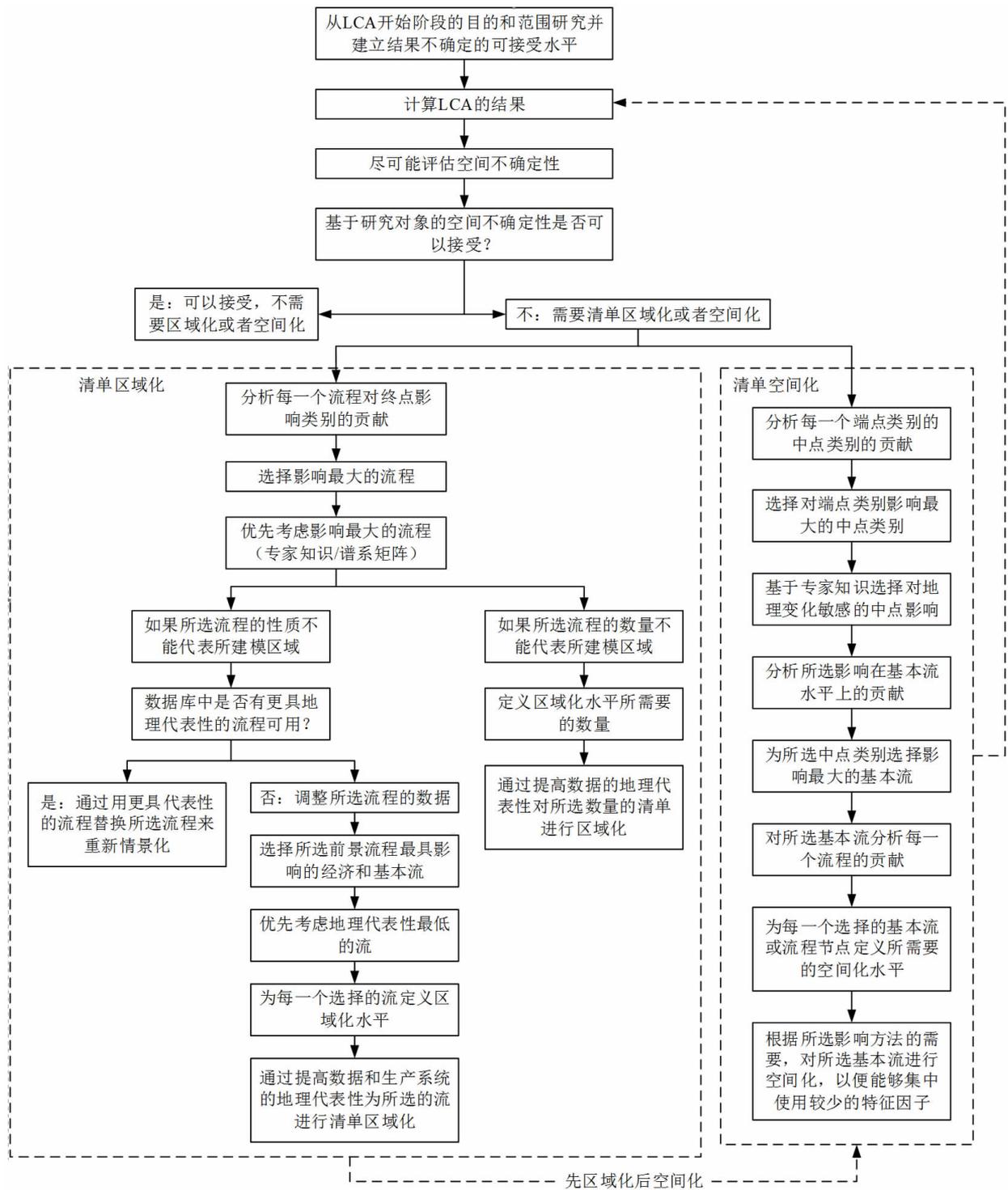


图 1 实施 LCA 空间化和区域化的逻辑图

者和决策者之间的对话，设定研究结果可接受的不确定性水平。执行生命周期评价，将研究结果的不确定性与可接受的不确定性水平进行对比，确定是否需要执行区域化来努力降低结果的不确定性。

第 2 阶段清单区域化。该阶段基于对研究结果的影响贡献最大的流程的识别。REINHARD J 等^[22]学者建议基于影响贡献分析来确定清单区域化工作的优先顺序，分析每个流程对端点影响类别的贡献，

以确定优先区域化的流程。但是该方法没有考虑空间不确定性，如果对影响分数有显著贡献的过程其空间变异性较低，则不需要执行清单区域化。因此，实践中通过影响贡献分析选择对端点影响贡献最大的中点影响类别进行进一步研究，重点关注对选定的影响类别有较大贡献的流程上。然后进行方差贡献分析或计算 sobol 指数等敏感性分析方法，识别对空间不确定性最大的数据以优先执行清单区域化。

清单区域化工作的详细程度取决于流程的类型和研究目标,需要根据专家判断和数据的可用性评估所需的区域化程度。清单空间化主要有2种方法:1)将清单区域化过程中产生的地理信息属性化添加到基本流中;2)在不进行清单区域化的情况下,将基本流在相关流程中空间覆盖范围内的地理信息属性化添加到基本流中^[23]。在实践中,如果研究中需要为很少的基本流实施空间化或在低分辨率的水平上实施空间化,可以利用 SimaPro 或 GaBi 软件在基本流名称中手动添加地理信息来空间化基本流;如果研究中需要为大量基本流实施空间化或在更高分辨率的水平上实施空间化,则优先考虑应用 Open LCA 或 Brightway LCA 软件中集成的地理信息来属性化添加到基本流中。目前 Open LCA 是 LCA 从业人员处理 LCA 中空间维度最合适的工具,在该软件中每个基本流都继承了相关活动的地理描述符所给出的位置信息,有利于实施清单空间化。

第3阶段影响评价区域化。该阶段涉及对同一基本流在给定区域内不同区域化特征因子的计算,然后将区域化的基本流与区域化的特征因子相乘计算影响分数。在过去的20多年里,许多区域化的影响评价模型已经被开发出来,并且有由越来越精细的空间尺度向基于网格单元的特征因子发展的趋势^[24]。影响评价区域化意味着需要修改传统的 LCA 矩阵计算结构,使用与基本流的地理信息相匹配的特征因子进行影响计算。但为了降低工作量,只有在需要进行清单空间化的情况下,才优先考虑使用本地分辨率的区域化特征因子,否则可以优先考虑使用聚合的特征因子进行环境影响评价。若结果的不确定性程度没有达到决策者设定的可接受的不确定性水平,则迭代该过程。

第4阶段是区域 LCA 的结果解释。结合区域化的清单进行影响分析,为决策者提供决策信息。该阶段可以应用 Open LCA 软件在地图上可视化影响的来源,有助于产品生产过程的优化和改进^[25]。

目前已发表的区域 LCA 的成果应用中,较大部分使用了与上述区域 LCA 方法相同或者相似的方法。例如 HERNANDEZ-PADILLA F 等^[26]学者将上述区域 LCA 方法应用于评估拉丁美洲和加勒比海地区的污水处理厂(WWTP)的环境影响,比较了两种污水处理技术(延时曝气(EA)和池塘系统(PS))在所有环境影响类别中的环境绩效。他比较了22个国家的污水处理厂的 LCA 结果,根据其对人体健康和生态系统质量造成的损害分析,发现若

污水处理厂43%~80%的电力是由化石燃料生产的国家,选择池塘系统(PS)污水处理技术最有利于降低对环境的影响;若污水处理厂电力混合比例超过60%的国家,选择延时曝气(EA)污水处理技术有利于显著降低全球变暖的影响,从而缓解对环境产生的影响。通过区域 LCA 确定了哪些国家的重点是通过使用更清洁的电力来减少对环境的影响,哪些国家的重点是减少富营养化物质的排放。

2.2 空间化领域 LCA

根据少数已发表的区域 LCA 文献记载,除了上述区域化方法外还有其他学者提出了不同的区域化方法。例如,在农业领域土地利用的变化影响农业环境造成的影响,而且有些影响取决于污染物排放的生物物理环境,例如天气、土壤类型等。因此 TIAGO G M 等^[27]学者通过考虑农业领域内排放和影响的空间变异性,提出了空间化领域 LCA (spatialized territorial life cycle assessment, STLCA)。该方法主要分为6个步骤。

1) 确定研究的目标和范围:界定领域边界和功能。农业领域的边界被定义为一个地理上划定的区域,在这个区域内农场处于同一个地方政府的管辖之下。功能单位取决于主要领域功能,可以是1 hm²农业表面积或牲畜的肉质量(kg)。从而确定了哪些农业活动被考虑,哪些排放和影响将被研究。

2) 定义人类活动类型(如农场和土地利用类型)以及排放和影响的环境类型。在农业区域的前景活动中土地利用类型对应于田地类型,包括作物、作物轮作、牧场、牲畜建筑物;而农场类型为土地利用类型的总和。在 STLCA 方法中背景活动包括农业活动的上游过程,如向某一区域内的农场运输投入物。为了研究农业领域的空间变异性,将一个地区划分为具有相同生物物理特征的环境区域。进一步确定该区域内农业活动使用的主要资源和排放的主要污染物,从而结合排放物的特性和接收环境确定哪些排放物需要在空间上加以区分。

3) 通过结合活动类型和环境类型来生成空间化的清单 LCI。在计算排放量时使用包括前茬作物和后茬作物的模型,尤其要注意硝酸盐等污染物的排放会因作物轮作顺序的不同清单结果有很大差异。

4) 进行空间化的影响评价 LCIA。该阶段涉及区域化特征因子的计算,区域化特征因子等于归宿因子、暴露因子和影响因子的乘积。空间化的环境影响是通过将某一特定环境影响区域的排放与相应的区域化特征因子相乘来估计的。

5) 在地图上可视化有代表的影响。影响的空间分辨率取决于影响类别、受众的期望以及数据的可用性等,在农业领域使用与给定影响相等的最小空间分辨率。

6) 通过影响贡献分析、敏感性分析和不确定性分析来解释结果,以帮助利益相关者做出决策。

综上所述,通过以上空间化领域 LCA 方法可以准确的评估农业地区的环境影响,从而支持利益相关者做出的相关决策,进而有利于利益相关者实现效益最大化。

2.3 生物能源系统的区域生命周期评价

为了应对能源危机寻求化石能源的替代品,生物能源在最近几年里得到了快速发展,但是许多与生物能源生产有关的环境负荷都发生在区域层次。因而为了评估其造成的环境影响,SINEAD O 等^[28]学者提出了一种区域化清单建模的方法 RELCA (a regional life cycle inventory assessment),从而使评估结果更具区域性和空间代表性。该方法主要用于评估“在区域范围内”生产生物能源产品的环境负荷,通过将区域生物能源技术与其相关的整个区域的生物量相结合,生成两个区域性分布清单来进行更精确的影响评价。RELCA 清单建模可以利用 Excel 来建模和计算不同步骤的基本流,主要包括以下 5 个步骤。

1) 建立作物分配模型 CRAMod (crop allocation modelling)。通过将地理数据划分为网格单元,然后与所有相关信息(如作物种类、产量、土壤类型、气候)一起作为 CRAMod 方法的输入,结合 Python 或 Matlab 以及地理信息系统(GIS)等支持工具,生成潜在的能源作物的区域分布。

2) 建立生物量清单模型 BioMod (biomass inventory modelling)。由于能源作物的排放量取决于一个区域内的生产地点,因此相关的区域差异会对相关能源系统的环境绩效产生重大影响。该步骤的主要目的是确定区域管理实践和区域内生产能源作物相关的直接排放。结合前两步可生成区域分布的生物量清单,包含与区域内生物量生产活动相关的直接前景流(例如,营养、活性成分、土壤排放等)。

3) 建立转换工厂模型 CPMoD (conversion plant modelling)。该步骤的目的是为生物能源系统确定具有代表性的生物能源工厂或模型工厂。利用生物能源工厂清单为转换系统开发转换工厂模型(例如厌氧消化模式沼气工厂、酯交换模式生物柴油工厂),这些模型代表了区域情况。根据每个生物能源工厂

的位置进行地理编码转换为 GIS 兼容文件格式,从而有助于将生物能源工厂数据进行空间化。该步骤可以生成按区域分布的生物能源技术清单。

4) 建立流域分配模型 CAMod (catchment modelling)。将区域分布的生物能源技术清单与区域分布的生物量清单结合生成,每个生物能源配置的生命周期清单。

5) 非区域清单建模 NoRIMod (non-regional inventory modelling)。该步骤将区域外产生的上游间接排放量与区域边界内产生的直接排放量联系起来,估算非区域污染的排放量。

通过 RELCA 清单建模方法确定了前景活动所产生的污染物排放的区域分布,以及非区域活动产生的间接排放,生成与生物能源生产有关的区域化的生命周期清单,从而使影响评价结果更具地理代表性。

以上 3 种是比较典型的区域化影响评价方法。与常规的 LCA 不同,目前还没有统一的区域 LCA 方法,需要生命周期评价从业人员和影响评价方法开发人员的共同努力来不断完善,并将上述方法多应用于实践从而有助于形成统一的区域生命周期评价方法。

3 部分区域化背景数据

在进行区域生命周期评价时,区域化背景数据是一个难点,下面是一些常用的获取区域化数据的来源。

1) 蔚蓝地图是由马军等建立的环境监测数据库,包含对国内 1 121 511 家企业进行污染排放的监管,而且提供全国每日空气质量监测数据,其网址为:<http://www.ipe.org.cn/index.html>。

2) 此外比较常用的环境监测数据库是由中国科学院地理科学与资源研究所研发的资源环境数据云平台,包括各省市的统计年鉴数据,其网址为:<http://www.resdc.cn/DataSearch.aspx>。

3) 由中国工程院研发的能源专业知识服务系统数据库,包含煤炭企业的生产、销售数据,以及中国燃煤发电生命周期碳排放估算数据,其网址为:<http://www.energy.ckcest.cn>。

4) 戈达德地球观测系统可以获得特定位置和时间分辨率的混合高度和风速,进而推算出各区域主要空气污染物的摄入量比例,其网址为:<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/DataHoldings>。

5) Impact World + 影响评价方法中包含区域化

的背景数据, 官方网站时长放出更新的 CSV 文件, 可以直接导入 Simapro 软件中使用, 网址为: <http://www.impactworldplus.org/en/download.php>。

6) 此外, 欧洲天气预报中心, 可提供全球在 65 km 高度内 60 层的 40 km 网格密度共 20 911 680 个点的风、温、湿预报。网址为: <https://apps.ecmwf.int/datasets/>。

4 区域生命周期评价的应用案例

JUERGEN R 等^[5] 利用区域化清单建模进行生命周期评价, 以德国油菜籽栽培为例, 研究了农产品生产过程中的氨、N₂O、硝酸盐和磷的排放量, 研究表明磷和硝酸盐的排放具有较高的空间敏感性。

JOHAN T 等^[29] 在研究中建立了一个印度电力系统参数区域化清单模型, 以评估电力生产过程中造成的环境影响, 结果显示与使用国家层面的平均数据相比, 那些考虑到技术组合和关键参数的局部变化的区域清单数据其影响评价结果更精确。

IVAN V S 等^[30] 为了评估铜基杀菌剂在欧洲葡萄园栽培中造成的陆地生态毒性影响的空间变异性, 收集了法国、葡萄牙、意大利以及西班牙等地区的葡萄栽培中铜基杀菌剂的区域化清单, 并进行区域化特征因子计算, 研究表明计算出的铜排放潜在的陆地生态毒性的特征因子比 IMPACT 2000+ 低了大约 3.5 个数量级, 且其影响评价结果的空间变异性更低。

SEYED MOHAMMAD H T 等^[31] 利用区域生命周期评价研究了美国西北地区的亚麻芥生物燃料生产过程中的土壤排放, 并评估了区域气候变化对亚麻芥生物燃料生产的生命周期影响, 结果表明不同地点的亚麻芥生物燃料生产造成的全球变暖潜势不同, 且对酸化、富营养化等环境影响类别的贡献较大, 由于气温和土壤有机碳的变化, 土壤排放的变化幅度达到 23%。

5 结论

区域化是生命周期评价中非常有意义的一项工作, 尤其对于像我国这样经济发展水平和地理环境相差巨大、人口众多的国家而言, 使用整个国家的平均数据进行环境影响评价, 所得到的结果不具有代表性。以水资源消耗的影响类别指标来说, 由于我国各个地方经济结构、人口密度和水资源的分布差距很大, 导致有些区域的水资源消耗的影响类别

指标 (伤残调整寿命年, disable adjusted life year, DALY) 存在 2 个数量级的差异。区域 LCA 可以弥补传统 LCA 缺乏空间信息的不足, 使环境影响评价的结果更准确, 因而生命周期评价的区域化是未来生命周期评价发展的重要方向, 有助于使决策者的决策更科学合理。进一步开发适合中国实际的区域 LCA 方法和建立中国的区域化背景数据库是在中国的生态建设中发挥区域 LCA 科学指导作用的关键因素。随着研究的不断深入, 区域 LCA 将更多的应用于指导各行业的清洁生产, 通过为各行业的清洁生产提供相关的参考依据, 进而为各行业实现绿色发展之路贡献力量。

参考文献

- [1] 田亚峻, 邓业林, 张岳玲, 等. 生命周期评价的发展新方向: 基于 GIS 的生命周期评价[J]. 化工学报, 2016, 67(6): 2195-2201.
- [2] 陈莎, 刘尊文. 生命周期评价与 III 型环境标志认证[M]. 北京: 中国质检出版社, 2014: 7-28.
- [3] POTTING J, HAUSCHILD M. Spatial differentiation in life cycle impact assessment: a decade of method development to increase the environmental realism of LCIA[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11: 11-13.
- [4] TURCONI R, BOLDRIN A, ASTRUP T. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: overview, comparability and limitations[J]. Renewable Sustainable Energy Reviews, 2013, 28: 555-565.
- [5] REINHARD J, ZAH R, HILTY L M. Regionalized LCI modeling: a framework for the integration of spatial data in life cycle assessment[J]. Advances and New Trends in Environmental Informatics, 2017, 9: 223-235.
- [6] MUTEL C L, HELLWEG S. Regionalized life cycle assessment: computational methodology and application to inventory databases[J]. Environmental Science and Technology, 2009, 43(15): 5797-5803.
- [7] VIGON B W, TOLLE D A, CORNABY B W, et al. Life cycle assessment: inventory guidelines and principles[J]. Trends in Food Science & Technology, 1995, 1(6): 30-31.
- [8] POTTING J, HAUSCHILD M. Predicted environmental impact and expected occurrence of actual environmental impact[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1997, 2(3): 171-177.
- [9] LESAGE P, SAMSON R. The quebec life cycle inventory database project[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2016, 21(9): 1282-1289.
- [10] MUTEL C L, PFISTER S, HELLWEG S. Gis-based regionalized life cycle assessment: how big is small enough? Meth-

- odology and case study of electricity generation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(2): 1096–1103.
- [11] PATOULLARD L, COLLET P, LESAGE P, et al. Prioritizing regionalization efforts in life cycle assessment through global sensitivity analysis: a sector meta-analysis based on ecoinvent v3[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24: 1–17.
- [12] MULLER S, LESAGE P, CIROTH A, et al. The application of the pedigree approach to the distributions foreseen in ecoinvent v3[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, 21: 1327–1337.
- [13] PATOULLARD L, SCHENCKER U, DAWSON D, et al. Spatialization of a tailored life cycle assessment database for specific agri-food business context[J]. *Materiaux Techniques*, 2017, 41(2): 139–160.
- [14] BOULAY A M, BARE J, BENINI L, et al. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE)[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2018, 23: 368–378.
- [15] HANS-JURGEN K. The revision of ISO standards ISO 14044: environmental management-Life cycle assessment-requirements and guidelines [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2005, 10(3): 165–165.
- [16] MUTEL C, LIAO Xun, PATOULLARD L, et al. Overview and recommendations for regionalized life cycle impact assessment[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24: 856–865.
- [17] VAN Z R, PREISS P, VAN G T, et al. Regionalized life cycle impact assessment of air pollution on the global scale: damage to human health and vegetation [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 44: 129–137.
- [18] BULLE C, MARGNI M, KASHEF-HAGHIGHI S, et al. Impact world +: a globally regionalized life cycle impact assessment method [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2017, 24: 1653–1674.
- [19] VERONES F, HELLWEG S, AZEVEDO L B, et al. LC-impact: overall frame version 0.5 [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, 20(13): 149–172.
- [20] ITSUBO N, INABA A. LIME 2-life cycle impact assessment method based on endpoint modeling[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2012, 19(2): 266–271.
- [21] BAITZ M, ALBRECHTI S, BRAUNER E, et al. LCA's theory and practice: like ebony and ivory living in perfect harmony[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013, 18(1): 5–13.
- [22] REINHARD J, MUTEL C L, WERNET G, et al. Contribution-based prioritization of LCI database improvements: method design, demonstration, and evaluation [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 86: 204–218.
- [23] YANG Yi. Toward a more accurate regionalized life cycle inventory[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 308–315.
- [24] PATOULLARD L, BULLE C, QUERLEU C, et al. Prise en compte de la dimension géographique en ACV: interets et mise en oeuvre [R]. Villeurbanne: SCORELCA, Janvier, 2015.
- [25] RODRIGUEZ C, GREVE S. Regionalized LCIA in open-LCA [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, 28(10): 555–565.
- [26] HERNANDEZ-PADILLA F, MARGNI M, NOYOLA A, et al. Assessing wastewater treatment in Latin America and the Caribbean: enhancing life cycle assessment interpretation by regionalization and impact assessment sensibility[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 2140–2153.
- [27] TIAGO G M, RICARDO FM T, TIAGO D. A step toward regionalized scale-consistent agricultural life cycle assessment inventories [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2017, 13: 939–951.
- [28] SINEAD O, WOCHHELMARX S, DANIELA T. RELCA: a regional life cycle inventory for assessing bioenergy systems within a region[J]. *Energy Sustainability & Society*, 2016, 6(1): 1–19.
- [29] JOHAN T, MUHAMMED N H, KARIN T, et al. Life cycle inventory of power producing technologies and power grids at regional grid level in India[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24: 824–837.
- [30] IVAN V S, CECILE B, ANNIE L. Regionalized terrestrial ecotoxicity assessment of copper-based fungicides applied in viticulture[J]. *Sustainability*, 2018, 10: 1–16.
- [31] SEYED MOHAMMAD H T, TAHAMI H, MURTHY G S. A regional life cycle assessment and economic analysis of camelina biodiesel production in the Pacific Northwestern US[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 2389–2400.