

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20151795

生命周期评价的发展新方向：基于 GIS 的生命周期评价

田亚峻¹, 邓业林², 张岳玲³, 谢克昌^{4,5}

(¹北京低碳清洁能源研究所, 北京 102209; ²Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee 53211, USA; ³华北电力大学环境与化学工程学院, 北京 102206; ⁴太原理工大学煤科学与技术教育部和山西省重点实验室, 山西 太原 030024; ⁵清华大学热能工程系, 北京 100084)

摘要: 综述了生命周期评价(LCA)区域化研究的进展, 论述了将空间信息数据引入LCA的必要性与可行性, 以及GIS(geographical information system)在LCA地域化的重要作用。综述表明GIS能系统有效地组织和管理空间数据, 能够管理LCA明细的地域信息、LCA影响的地域信息, 从而实现GIS与LCA的结合。在此基础上, 进一步提出了基于地理信息的LCA的架构, 分析了基于GIS的LCA发展的机遇和挑战。基于地理信息的LCA将突破传统LCA缺乏空间信息的致命缺陷, 其结果将更具准确性和科学性, 基于地理信息的LCA的绿色设计和管理对企业以及政府将更具可操作性, 是生命周期评价方法发展的新方向。

关键词: 生命周期评价; 地理信息; GIS; 数据库; 可持续性; 环境; 能源

中图分类号: X 823

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157(2016)06—2195—07

New direction of life cycle assessment: GIS-based life cycle assessment

TIAN Yajun¹, DENG Yelin², ZHANG Yueling³, XIE Kechang^{4,5}

(¹National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102209, China; ²Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee 53211, USA; ³School of Environment and Chemical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; ⁴Laboratory of Coal Science and Technology, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China; ⁵Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The study presents an overview on the development of regionalization of life cycle assessment (LCA). The results of the paper indicate that incorporating spatial information into the process of the life cycle assessment is both necessary and feasible. The GIS (geographical information system), on the other hand, is an important platform to serve the purpose. The paper shows that GIS can effectively align and manage the spatial data in a flexible way, and thus promote the application of regionalized LCA study. The paper proposes a framework for the design of GIS based LCA. By integration GIS and LCA, the accuracy and representativeness of LCA results can be upgraded, which lays a solid foundation for policy making process.

Key words: life cycle assessment; geographic information; GIS; database; sustainability; environment; energy

2015-11-30 收到初稿, 2016-02-18 收到修改稿。

联系人及第一作者: 田亚峻(1972—), 男, 教授。

基金项目: 中国工程院工程科技知识中心能源专业知识服务系统建设项目。

Received date: 2015-11-30.

Corresponding author: Prof. TIAN Yajun, tianyajun@nicenergy.com

Foundation item: supported by the China Knowledge Center for Engineering Science and Technology: Professional Knowledge Service System for Energy.

引 言

伴随着中国经济快速发展和工业化进程的不断推进,中国的环境负担变得愈发严峻。大气污染、土壤污染、地下水污染、气候变化、资源枯竭等问题越来越成为制约中国可持续发展的重要因素。由于中国能源高度依赖煤炭,中国二氧化硫、氮氧化物、烟尘以及可吸入颗粒物排放总量高居世界之首,严重威胁到人民的健康^[1]。2002年以来中国的二氧化碳排放以年均9%的增速激增,2012年中国二氧化碳排放量占全球总排放量的26.7%,远超排名第二的美国(16.8%)^[1]。为应对不断恶化的环境和气候问题,中国政府相继推出了一系列严厉的环保政策和措施法规,如2013年颁布《大气污染防治行动计划》^[2]以及2015年颁布《水污染防治行动计划》^[3]等。此外,2014年中国还与美国达成中美气候变化联合声明,承诺2030年前停止增加二氧化碳排放,表达了中国保护环境和减缓气候变化的决心^[4]。

化工是人类活动中最重要的过程之一。人类离不开化工,化工过程的发展促进了人类生活水平的提高。如能源主要通过化工过程转化得以利用,煤炭通过燃烧产生电力和热力、通过热解生产焦炭、通过气化等过程生产化肥、电石、甲醇、烯烃等化学产品,而石油更是通过化工过程转化成人类生活所必需的各种化学品。然而,化工过程必然会对环境产生影响。中国对化工过程的环境影响评价方法存在明显缺陷,造成所有的项目环境评价合格但环境却越来越差的尴尬现象。其原因在于中国的评价方法仅以工厂所形成的厂界为边界,没有采用全生命周期的方法,问题常常被转移,各种政策也因此失效。

为了使以上的种种政策较好地达到目的,必须首先发展能够科学和合理评估产品环境性能的方法和数据库。对于一个产品来说,其所涉及原材料的开采、生产、使用和废弃过程伴随着资源、能源的消耗和各种污染物的排放,要完整地反映这一系列过程对生态环境的影响,需要对产品的全生命周期过程进行评价,才能得到客观和全面的结果,防止问题发生转移。

1 生命周期评价方法的发展

1.1 生命周期评价方法

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)是

被当前科学界广泛接受的定量评估产品全生命周期的环境影响的工具。根据ISO14040-44标准(图1)^[5],LCA分析开始于目标和范围定义,需要明确LCA的目的、对象、时间、地理和技术范围等^[6]。LCA覆盖某产品包括原材料获取、加工、制造、使用以及最后报废处理的全部生命周期。LCA总结和归纳产品各个生命周期阶段的材料/能量的消耗以及排放,并编制该产品对应的生命周期清单(life cycle inventory, LCI),最后从产品的生命周期清单数据出发,依据环境影响特征因子(characterization factors)计算不同类型的环境影响(life cycle impact assessment, LCIA)^[7]。产品生命周期内对环境的影响越小,则产品的环境性能越好。产品生命周期内对环境产生影响的类别众多,常用的环境影响类别有全球气候变暖、平流层臭氧损耗、光化学烟雾形成、大气酸化、人类致癌性、水生生物毒性、陆地生物毒性、栖息地破坏、不可再生资源损耗和富营养化等。

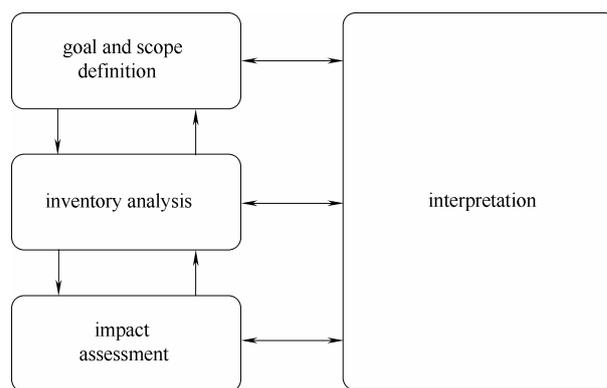


图1 生命周期评价的执行框架

Fig.1 Framework of life cycle assessment

LCA作为一种科学的产品环境影响评价方法,在欧美已经有广泛应用。美国的建筑标准LEED v4里面明确把建筑产品、材料是否进行过LCA作为一项重要的评分标准^[8]。在更大范围上,美国政府要求(executive orders 13514)所有的联邦机构评估自身的碳排放水平并且要求为政府采购制定相应的碳排放政策^[9]。预计未来美国LCA相关的就业岗位将高达67000人,包含LCA学者、公司雇员、咨询人员、软件开发人员等。欧盟在LCA及相关领域活动更为活跃,法国2007年通过Grenelle环境法令要求所有的大众消费品提供产品环境影响声明(EPD)^[10]。欧盟从2011年开始研发基于LCA的Product Environmental Footprint(PEF)规范,目前

已经进入第 2 阶段。PEF 旨在促进全欧盟范围内实行统一的产品环境影响评价方法，以便有效提高产品环境影响计算的可靠性和不同产品之间环境影响数据的可比较性^[11]。这些举措都极大地促进了 LCA 在全球的应用和发展。

1.2 生命周期评价方法的缺陷

虽然传统 LCA 在目标与范围的定义中要求明确地理范围，在相应的清单数据收集也需要使用代表与指定范围吻合的数据，但是由于没有明确的方法论指导和数据库做支撑，大量的 LCA 计算实际往往采用某个国家或者地区的平均数据^[12]。平均数据虽极大地简化了计算和数据收集工作，但其缺陷之一是抹平了地理空间上的差异，导致结果不能有效地反映实际情况^[13]。以发电为例，同样生产 1 kW·h 的电能，不同的地区由于不同的一次能源发电比例导致所排放的温室气体截然不同，这在中国的南方和北方表现尤其明显^[14]。其次，传统的 LCA 方法论中环境影响评价过程对地理范围的定义更加模糊，实际中的 LCA 环境影响评价过程中一般仅附带地理位置，然而环境评价必须与地理信息包含人口密度、经济水平、地质、地貌等结合起来，对 LCA 的影响评价结果的诠释才有现实意义。举例来说，排放同样数量的颗粒物或者消耗相同数量的水资源，在人口稠密的地区或者是水资源匮乏的地区造成的环境影响大不相同^[15]。而酸雨化的环境影响对碱性地区和酸性地区的影响却是相反的^[16]。以上情景说明 LCA 结果与其发生的区域有密切的关系，这种区域化的影响包含两大类：第 1 类是生命周期清单数据的区域化，相同的工业过程在不同的地区生命周期的清单数据可能差异很大，计算结果差别也很大^[17]；第 2 类是环境影响的区域化，由于 LCA 的核心目的之一是将计算的数据反映到实际的地理环境中，因此相同的计算数据在不同的地域上影响结果可能也完全不同。表 1 所列的环境影响类别中，很多终端影响（endpoints）是局部性的，这就要求 LCA 必须与特定地理信息结合，否则评价结果将失去实际意义，而这正是传统 LCA 所缺乏的^[18]。

现有的著名的生命周期清单数据库的数据大多数都是针对某个区域的平均数据，如 Ecoinvent 主要针对欧洲^[19]。目前主流的环境影响评价方法包含 CML2001^[20]、ReCiPe^[21]和 IMPACT2002+^[22]，仅考虑了欧洲和全球的大致区分。

表 1 不同环境影响类别的时间和空间尺度^[7]

Table 1 Different environmental impact categories and their corresponding spatial scale^[7]

Category	Spatial scale	Temporal scale
global warming	global	decades/centuries
ozone depletion	global	decades
photochemical oxidation formation	regional	hours/days
human toxicity	regional	hours(acute)/decades(chronic)
acidification	regional	years
freshwater ecotoxicity	regional	years
terrestrial ecotoxicity	regional	hours(acute)/decades(chronic)
inhabitation damage	regional	years/decades
non-renewable resource depletion	global	decades/centuries
eutrophication	regional	years
water depletion	regional	years

1.3 区域化生命周期评价的进展

Potting 等^[23]在 1997 年对 LCA 的区域化做了深入的论述，由于早期计算机的计算性能和数据储备能力非常有限，他们仅将区域化 LCA 的尺度简化为 3 类：第 1 类是通用 LCA（generic LCA），这类 LCA 使用从典型区域获得的数据作为通用数据，对不同地点可能存在的差异不做考虑；第 2 类是定点 LCA（site-specific LCA），定点 LCA 类似于项目的环境风险评估，数据完全来自采集点，结果完全反映其特定条件下的工业活动对当地的影响；第 3 类是区域 LCA（site dependent LCA），区域 LCA 介于通用 LCA 和定点 LCA 之间，它把地理环境划分为多个类别，每个区域类别的空间尺度可能有数千公里。Potting 等^[24]建立了 RAINS（regional air pollution information and simulation）模型，可计算不同欧洲国家区域大气酸化环境影响特征因子，计算表明不同国家大气酸化环境影响特征因子差异巨大，最大的特征因子比最小的特征因子高约 1000 倍。EDIP（environment-dependent interatomic potential）是第一个用于估算不同环境影响类别地域特征因子的系统化方法^[25]。除了 EDIP 方法以外，其他环境影响类别也有各自在不同区域的环境影响特征因子的计算模型，但绝大多数的方法仅适用于欧洲国家的地理情况^[26]。

有研究指出使用通用的 LCA 数据会造成数据的严重失真，得到的结果与区域 LCA 得到的结果有显著的差异^[27]。区域 LCA 虽然在一定程度上提高了结果的精确度，但本质上还是采用了平均化的

方法，得到的结果仍然无法得到企业的认可。随着全球环境的不断恶化，包括中国在内的主要工业大国对于环境保护和气候变化的问题越加重视，正在研究包括市场机制在内的各种应对策略。希望发挥市场作用，让更多的企业、团体甚至个人自觉参与环境改善，然而这需要能基于具体地点、路径来进行 EPD 或者 PEF 等“精算”的方法论和数据库，这样的结果对于企业或者政府开展核算、设计或者优化才具有现实的指导和商业价值，这就要求必须将 LCA 和具体的地理信息 (geographic information, GI) 结合起来。

1.4 基于 GIS 系统的生命周期评价

地理信息系统 (geographic information system, GIS) 是计算机技术与地理信息数据相结合的产物，是在计算机硬件、软件及网络支持下，对有关空间数据进行数字化处理、输入、存储、查询检索、运算、分析、显示、更新并提供应用的技术体系^[27]。随着地理信息系统的发展，GIS 能够通过强大的可视化技术、有效的地图系统将复杂的空间数据和属性数据以地图的形式进行描述，从而实现了文本、图形和图像信息的结合。科学准确的 LCA 必须与其发生所在的地理位置紧密关联才可能更具实际意义，而 GIS 为 LCA 的精细化提供了可能性。

有研究尝试利用 GIS 收集和管理特定区域数据，并结合通用生命周期清单数据库进行 LCA 研究。Keisuke 等^[28]首先利用 GIS 为环境影响评估提供空间支持。Saad 等^[29]为加拿大不同生态区的土壤生态系统建立了区域化的环境影响特征因子。Civit 等^[30]为阿根廷的大气酸化影响划分了 16 个区域，并分别计算了特征因子。Impact2002+环境影响评估模型把欧洲的大气和水域划分为网格，并把每个网格细胞的环境背景信息输入 GIS 系统建立影响因子

特征数据库^[22,31]。类似的模型目前也被加拿大和美国用于环境影响评估^[32]。Mutel 等^[27]基于 GIS 工具计算了美国不同位置的发电厂所产生的生态毒性影响的不同。此外，GIS 已被用于在全球范围内创建基于不同空间尺度的环境影响评估方法，Pfister 等^[33]在流域基础上建立了淡水资源消耗的环境影响特征因子的地图。Pfister 等^[34]还分别计算了 10 类气候特征下的土地使用对土壤有机碳含量的影响。

2 基于 GIS 的 LCA 系统架构设计

2.1 基于 GIS 的 LCA 的必要性

LCA 区域化是一项非常重要的工作，对于像中国这样人口、地理环境和经济发展水平相差巨大的国家来说，以整个国家为空间尺度所得到的结果不具有现实意义。以水消耗的环境影响评价指标来说，由于中国各地的人口、经济结构还有水资源储量分布差距较大，不同的区域水消耗的环境影响指标 (DALY, disable adjusted life year, 伤残调整寿命年) 可以有高达 2 个数量级的差异^[35]。为了客观判断产品的环境性能，在中国发展基于 GIS 的 LCA 显得尤其必要。然而基于 GIS 的 LCA 在架构和方法论上还没有完善，在 GIS 化的生命周期清单数据库建设、GIS 化的影响类别特征因子建设等方面还少有报道。

2.2 基于地理信息的 LCA 架构

LCA 的区域化包含生命周期清单数据的区域化和环境评估影响因子的区域化两个方面。基于地理信息的架构可以通过如图 2 所示的典型产品生命周期的阶段来说明。从原材料的获取，到产品的设计制造，最后到终端用户的使用和报废都可能发生在不同的地域，而不同地域对应不同的地理环境、人口密度、资源分布和经济发展水平等，因此不同

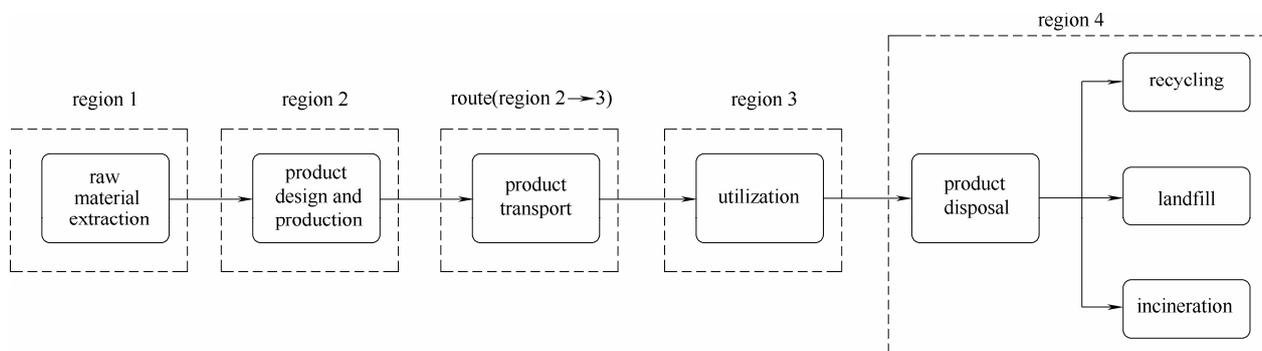


图 2 基于区域的产品生命周期

Fig. 2 Illustration of regionalized product life cycle assessment

地域对应不同的生命周期清单数据的同时也对应不同的环境影响特征因子。所以对于经历区域差异较大的产品来说，LCA 的计算必须反映其生命周期内的地理进程，结果才能够更加准确反映产品在生命周期内对环境的影响，而且对环境影响的地理足迹亦一目了然。

可见，将空间信息与 LCA 相结合可以突破传统 LCA 方法中地理信息缺失的问题。针对这个问题，本文提出在 LCA 方法中引入空间数据，并构建图 3 所示基于空间信息的 LCA 的方法执行框架。

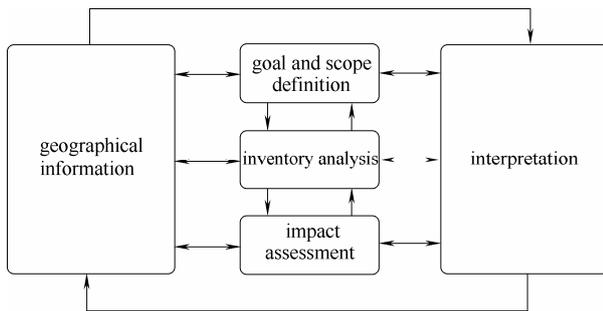


图 3 基于空间信息的 LCA 执行框架

Fig.3 Framework of LCA based on spatial information

可以分为以下几个步骤：

(1) 定义对象生命周期评价的目的、功能单位、范围以及对象的全生命周期内供应链对应的地理区域；

(2) 整理编制对应于区域的对象的生命周期清单和数据；

(3) 将计算结果和对应区域内的环境影响特征因子相结合进行影响评价；

(4) 结合地理信息的结果诠释。

基于图 3 的框架，基于空间信息的 LCA 可细分为两个部分：第 1 个部分为区域化的生命周期清单数据，也就是为生命清单数据中的材料的损耗、能量的使用及排放指定相应的区域；第 2 个部分是环境影响评价的区域化。这个部分可以包含以下步骤：第 1 步是确定影响范围，这一步往往针对的是生命周期清单数据中的排放数据，对于某个区域记录的排放（例如 SO_2 、 NO_x 、颗粒物、重金属离子），计算其扩散的范围和路径，从而确定其潜在的影响范围；第 2 步是根据暴露影响模型计算环境影响，这一步结合大量的空间信息收集如排放影响区域中河流、土壤、物种、人口、饮食习惯等相关信息，从而确认这些生态物种或者是人体针对该排放的暴露度是多少；最后一步根据暴露健康模型计算最终

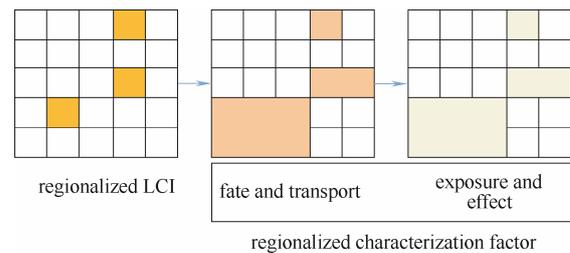


图 4 基于 GIS 的 LCA 系统工作原理

Fig. 4 Flowchart of GIS based LCA system

造成的健康损害（图 4）。

基于空间信息的 LCA 就是这一连串信息的乘积，最后以空间分布的形式把环境影响信息反映出来。

可见，在基于空间信息的 LCA 系统架构中，地理信息不再仅仅是目标和范围定义中关于地理位置的信息，而是一个基于空间位置的信息数据库。GIS 可把地理空间信息库与 LCA 的生命周期清单的数据库结合起来，形成基于 GIS 架构的 LCA 系统。该系统将基于地域定义的生命周期过程的生命周期清单数据和环境影响特征因子抽取出来，转化成一个新的 LCA 问题进行计算，然后将计算得到的区域化的影响结果再次与 GIS 结合进行分析，即可以得到可视化的、反映生命周期链的、反映地理位置变化的环境影响足迹，这对于国家产业布局、企业的绿色供应链优化设计等是十分有价值的。基于 GIS 的 LCA 的使用原理见图 5。

2.3 基于 GIS 的 LCA 的机遇与挑战

基于 GIS 的 LCA 能有效地把地理信息与环境影响信息整合在一起，能显著提高 LCA 结果的精确度、可靠度以及应用价值。中国地大物博，地区发展极不平衡，在中国开展基于 GIS 的 LCA 对于中国产业结构调整、产业升级以及产业布局而言具有非常主要的意义。近年来中国环境问题日益突出，中国对环境问题亦日益重视，而基于 GIS 的 LCA 能够为企业非常具体的指导和优化，因此潜在需求巨大。可喜的是，中国工程院作为政府权威的咨询机构已经意识到该重要性，由工程院领导的中国工程科技知识中心正在开展能源领域的基于 GIS 的 LCA 数据库建设，这为中国在 LCA 领域赶超发达国家，并引领全球 LCA 的发展方向提供了可能。

然而，中国行业体量巨大，各地发展不平衡，各行业发展也不平衡，收集数据的任务量巨大。加之中国的数字化整体比较落后，中国的企业缺乏数

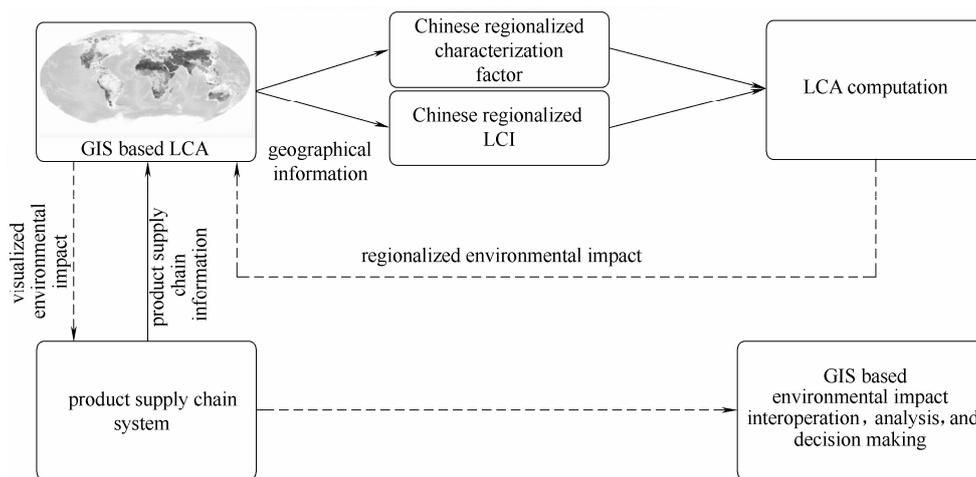


图 5 基于 GIS 的 LCA 系统工作原理

Fig. 5 Flowchart of GIS based LCA system

据共享的意愿，因此建设 GIS 系统和 LCA 系统面临的挑战巨大。

3 结 论

文献综述表明环境影响评估清单数据和特征因子在不同的区域有较大差异。LCA 的区域化是 LCA 未来发展的重要方向，而 GIS 是对 LCA 做区域化的核心工具。本文总结了 LCA 区域化的进展以及 GIS 技术用于 LCA 计算的研究，最后提出了基于地理信息的 LCA 的架构和基于 GIS 的 LCA 系统的工作原理。GIS 与 LCA 结合可以有效弥补传统 LCA 区域信息缺失的缺陷，能提供更加全面、准确和基于地理信息的 LCA 结果，这无论对于企业还是政府将更具有应用价值。未来 LCA 可以和一切可以用 GIS 表达的数据（如人口、经济等）相融合，LCA 所发挥作用的领域将更加广阔。

References

[1] 环境保护部环境规划院. 区域煤炭消费总量控制技术、方法与政策体系研究[R]. 北京: 环境保护部, 2012.
Chinese Academy for Environmental Planning. Study on technical methods and policy system for regional coal consumption cap[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, 2012.

[2] 国务院. 大气污染防治行动计划[OL]. [2015/08/22]. http://www.gov.cn/zwggk/2013-09/12/content_2486773.htm.
State Council. Air pollution prevention and control action plan [OL]. [2015/08/22]. http://www.gov.cn/zwggk/2013-09/12/content_2486773.htm.

[3] 国务院. 水污染防治行动计划[OL]. [2015/08/22]. http://zfs.mep.gov.cn/fg/gwyw/201504/t20150416_299146.htm.
State Council. Action plan for prevention and control of water pollution[OL]. [2015/08/22]. <http://zfs.mep.gov.cn/fg/gwyw/201504/>

t20150416_299146.htm.

[4] 外交部. 中美气候变化联合声明[OL]. [2015/08/22]. <http://www.mfa.gov.cn/chn/pds/ziliao/1179/t1030848.htm>.
Ministry of Foreign Affairs. China-US joint announcement on climate change[OL]. [2015/08/22]. <http://www.mfa.gov.cn/chn/pds/ziliao/1179/t1030848.htm>.

[5] International Organization for Standardization. Environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines: ISO 14044—2006 [S]. Geneva, 2006.

[6] GUINÉE J. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards [J]. *Int. J. LCA*, 2002, 7(5): 311-313.

[7] 韩明汉, 金涌. 绿色工程原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 1-281.
HAN M H, JIN Y. Principle and Application of Green Engineering [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 1-281.

[8] USGB Council. LEED V4 for building design and construction[S]. Washington DC: US Green Building Council, 2014.

[9] OBAMA B. Federal leadership in environmental, energy, and economic performance[Z]. Executive Order (13514) of October, 2009.

[10] BOY D, BRUGIDOU M, HALPERN C, *et al.* Le Grenelle de l'environnement: Acteurs, Discours, Effets[M]. Paris: Armand Colin, 2012.

[11] FINKBEINER M. Product environmental footprint—breakthrough or breakdown for policy implementation of life cycle assessment? [J]. *Int. J. LCA*, 2013, 19(2): 266-271.

[12] TILLMAN A, EKVAL T, BAUMANN H, *et al.* Choice of system boundaries in life cycle assessment [J]. *J. Clean Prod.*, 1994, 2(1): 21-29.

[13] REAP J, ROMAN F, DUNCAN S, *et al.* A survey of unresolved problems in life cycle assessment [J]. *Int. J. LCA*, 2008, 13(5): 374-388.

[14] HUO H, ZHANG Q, WANG M Q, *et al.* Environmental implication of electric vehicles in China [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2010, 44(13): 4856-4861.

[15] BOULAY A, MOTOSHITA M, PFISTER S, *et al.* Analysis of water use impact assessment methods (part A): Evaluation of modeling

- choices based on a quantitative comparison of scarcity and human health indicators [J]. *Int. J. LCA*, 2015, **20**(13): 139-160.
- [16] ROY P, AZEVEDO L, MARGNI M, *et al.* Characterization factors for terrestrial acidification at the global scale: a systematic analysis of spatial variability and uncertainty [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **500**: 270-276.
- [17] ROSS S, EVANS D. Excluding site-specific data from the LCA inventory: how this affects life cycle impact assessment [J]. *Int. J. LCA*, 2002, **7**(3): 141-150.
- [18] BJÖRKLUND A. Survey of approaches to improve reliability in LCA [J]. *Int. J. LCA*, 2002, **7**(2): 64-72.
- [19] WEIDEMA B, BAUER C, HISCHIER R, *et al.* Overview and methodology: data quality guideline for the ecoinvent database version 3[R]. St. Gallen: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2013.
- [20] DREYER L C, NIEMANN A L, HAUSCHILD M. Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99 [J]. *Int. J. LCA*, 2003, **8**(4): 191-200.
- [21] GOEDKOOP M, HEIJUNGS R, HUIJBREGTS M, *et al.* ReCiPe 2008—a life cycle assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level[R]. Nederland: Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, 2008.
- [22] JOLLIET O, MARGNI M, CHARLES R, *et al.* IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology [J]. *Int. J. LCA*, 2003, **8**(6): 324-330.
- [23] POTTING J, HAUSCHILD M. Predicted environmental impact and expected occurrence [J]. *Int. J. LCA*, 1997, **2**(3): 171-177.
- [24] POTTING J, SCHÖPP W, BLOK K, *et al.* Comparison of the acidifying impact from emissions with different regional origin in life-cycle assessment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1998, **61**(1): 155-162.
- [25] HAUSCHILD M, POTTING J. Spatial differentiation in life cycle impact assessment—the EDIP2003 methodology[R]. Guidelines from the Danish EPA, Miljøstyrelsen, 2004.
- [26] HAUSCHILD M. Spatial differentiation in life cycle impact assessment: a decade of method development to increase the environmental realism of LCIA [J]. *Int. J. LCA*, 2006, **11**: 11-13.
- [27] MUTEL L, PFISTER S, HELLWEG S. GIS-based regionalized life cycle assessment: how big is small enough? Methodology and case study of electricity generation [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2011, **46**(2): 1096-1103.
- [28] KEISUKE N, YUICHI M A, SUZUKI N. Site-dependent life-cycle analysis by the SAME approach: its concept, usefulness, and application to the calculation of embodied impact intensity by means of an input-output analysis [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2005, **39**(18): 7318-7328.
- [29] SAAD R, MARGNI M, KOELLNER T, *et al.* Assessment of land use impacts on soil ecological functions: development of spatially differentiated characterization factors within a Canadian context [J]. *Int. J. LCA*, 2011, **16**(3): 198-211.
- [30] CIVIT B, ARENA A P, ALLENDE D. Determination of regional acidification factors for Argentina [J]. *Int. J. LCA*, 2014, **19**(9): 1632-1642.
- [31] PENNINGTON D, MARGNI M, AMMANN A C, *et al.* Multimedia fate and human intake modeling: spatial versus nonspatial insights for chemical emissions in Western Europe [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2005, **39**(4): 1119-1128.
- [32] HUMBERT S, MANNEH R, SHAKED S, *et al.* Assessing regional intake fractions in North America [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(17): 4812-4820.
- [33] PFISTER S, KOEHLER A, HELLWEG S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2009, **43**(11): 4098-4104.
- [34] PFISTER S, BAYER P, KOEHLER A, *et al.* Environmental impacts of water use in global crop production: hotspots and trade-offs with land use [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2011, **45**(13): 5761-5768.
- [35] KAHRL F, LI Y, SU Y, *et al.* Greenhouse gas emissions from nitrogen fertilizer use in China [J]. *Environmental Science & Policy*, 2010, **13**(8): 688-694.