

基于 LCA 的工业过程碳排放建模和环境评价

袁 泽, 李 琦

(北京大学 数字地球工作室, 北京, 100871)

摘 要: 针对我国化工类企业在生产过程中排放大量温室气体和污染物, 造成气候变暖和区域重度雾霾事件频发的现状, 该文提出了基于生命周期的工业过程碳排放计量和环境影响评价方法。采用生命周期分析方法对工业过程进行碳排放清单分析, 较好地理清了工艺流程中各单元的碳排放当量; 同时借助 GaBi 软件, 采用环境影响势分析方法对工业过程进行了进一步的环境影响评价, 实现了复杂工艺流程中重污染单元的精确定位。基于内蒙古苏尼特碱厂的两类碱产品工业过程的分析表明: 这两类方法运用于工业过程的生命周期分析都是可行的, 分析的结果对于工业过程整改解决方案的提出具有重要的参考价值。

关键词: 工业过程; 生命周期评价; GaBi; 环境影响

【中图分类号】 P208

【文献标志码】 A

【文章编号】 1009-2307(2017)05-0196-05

DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2017.05.034

Modeling and environmental assessment of industrial carbon emissions based on LCA

Abstract: Aiming at the current situation of climate warming and regional heavy haze events caused by the discharge of greenhouse gases and pollutants in the industrial process, the paper puts forward the carbon emission measurement and environmental impact assessment method based on LCA. The LCA method is used to analyze the carbon emissions of the industrial process, and the carbon equivalent of each unit in the process has been well calculated. Meanwhile, the GaBi software was used to evaluate the environmental impact of the industrial process, and the heavy pollution unit in the complex process has been located precisely. Based on the study of two kinds of alkali products in Sunite factory, it is shown that these two methods are both feasible for the analysis of industrial process and the results of the analysis are of great reference value for the industrial process improvement.

Keywords: industrial process; Life cycle assessment; GaBi; environmental assessment

YUAN Ze, LI Qi (Peking University Digital Earth Studio, Beijing 100871, China)

0 引言

近年来, 全球气候变暖带来的冰川融化、海平面上升、干旱、洪涝和病虫害等自然灾害增加的问题, 严重阻碍了社会经济持续发展甚至直接威胁到人类的生存^[1]。同时一些学者的研究表明在全球气候变暖的背景下, 北极涛动向正位相增强、东亚冬季风减弱、东亚大槽变浅以及近地表大气

增暖较快导致中低层大气更加稳定, 上述因素的共同作用导致了雾霾事件的增加^[2]。而全球气候变暖和频发的雾霾事件作为区域性的复合污染, 诸多因素中工业过程的大量温室气体排放首当其冲。尤其在当代中国的大部分工厂的工业过程中, 排放物中除大量温室气体外还含有大量氮氧化物, 会造成光化学烟雾污染, 也是空气中 PM_{2.5} 浓度上升的重要原因^[3]。因此中国政府这几年制定了一系列的方针政策来应对这种现象, 例如北京市政府实行的“蓝天计划”, 但是总的来说目前国内的大部分化工企业仍不清楚该从自身工业过程中的哪些工艺单元来进行改进。因此, 对这类企业的工业过程进行一次彻底的从“摇篮”到“坟墓”的生命周期评价, 找到污染产生的源头, 从而精准的对症下药来解决这类区域性污染事件, 就具有了重大的科学和现实意义。



作者简介: 袁泽 (1992—), 男, 安徽铜陵人, 本科, 主要研究方向为智慧城市。

E-mail: yz1036795260@163.com

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2012BAC20B06)

生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)是目前常用的工业过程分析方法,它属于系统分析方法之一,定义为对产品系统自原物料的取得到最终处置的生命周期中,投入和产出及潜在环境冲击数据的汇整与进一步评估。这几年 LCA 方法发展较快,常见的有编目分析方法和影响评价方法两类^[4],LCA 分析工具一般由基础数据库和评估软件两大体系构成,论文所采用的 GaBi 软件是由 PE-INTERNATIONAL 开发生命周期评价专业软件,具有海量的环境数据负荷数据库,包括 Buwal, Ecoinvent, PlasticsEurope 等,采取的评价方法有 CML, EI, UBP 等^[5]。

论文为了验证传统的生命周期碳排放清单分析方法和这几年兴起的借助 GaBi 软件的生产单元环境影响评价方法在工业过程分析中的可行性,选取了内蒙古苏尼特碱业从天然碱的开采到碱产品加工成型的整个工业过程为分析对象,将该厂两种成熟碱产品的工业过程分别对应于上述两种方法来进行研究,最终目的都是为了找到工业过程中对环境冲击最严重的工艺单元,为企业的清洁生产改造和产业升级转型提供方向和途径,同时进一步来说也可以有效比较两类方法各自的优势,为以后进行类似企业的分析工作时方法的选择提供一些参考。

1 数据

本文所使用的数据来自苏尼特碱厂 2013 年全年的生产数据,主要包括两部分,其中物料能源消耗和碳排放的计算所采用的是日均烧碱生产数据,而基于 GaBi 软件的环境影响评价采用的是碱厂的纯碱日均生产量,为 550 t。

在碳排放计算中所使用的排放因子主要包括:
①全球增温潜势(GWP):定义为瞬间释放单位质量的温室气体在一定时间段产生的辐射强迫与对应于单位质量的 CO₂辐射强迫的比值,用于评价各种温室气体相对气候效应^[6]。文中所用的 GWP 来自 IPCC2007,取 CO₂、CH₄、N₂O 的 GWP 分别为 1、25、298;
②电力排放因子:采用国家发改委应对气候变化司 2009 年公布的数据,取华北地区电网每 1 kW·h 电量排放 CO₂ 当量 1.006 9 kg;
③燃料煤的排放因子:取 1 kg 煤燃烧排放 CO₂ 当量为 2.53 kg;
④原油排放因子:取 1 L 原油燃烧排放 CO₂ 当量为 2.76 kg;
⑤公路运输排放因子:货车的载货量以 8 t 计算,取每 100 km 的耗油 15 L。

基于 GaBi 软件的环境影响评价中,对采集得

到的原始数据进行当量换算所使用的是 CML2001 方法的特征化因子^[7],主要包括:
①全球增温潜势(GWP),单位为 kg CO₂-当量;
②光化学烟雾氧化反应潜势,单位为 kg C₂H₄-当量;
③不可再生资源消耗,单位为 kg Sb-当量。

2 工业过程建模清单分析

对化工类企业工业过程的建模清单分析,首先要明确工业过程的整体边界,接着对产品系统进行建模,找到将一种或多种确定功能的中间产品联系起来的单元过程的集合,这些单元过程之间通过中间产品流或待处理的废物流相联系起来,然后明确每个单元过程的功能,对各单元过程的物质、能量的输入输出进行量化,最后对量化后的数据进行碳当量的转换。

论文以苏尼特碱厂的烧碱产品工业过程为例进行建模清单分析,考虑的烧碱产品工业过程实例是从原材料开采、消耗能源进行生产、产品的包装和储存再到商品运输到用户的整个过程,并不包括最终的产品销售和消费者的使用情况^[8]。其中可利用的废物不算入最终排放中,气体的逸散不予考虑。按以上要求构建的工业过程流程图如图 1 所示。

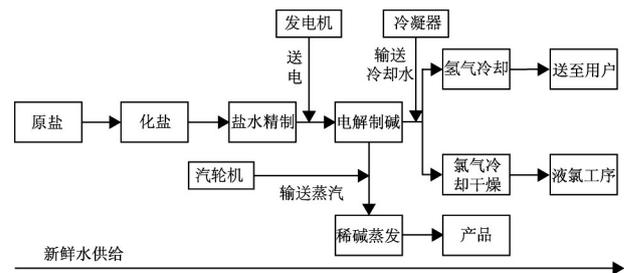


图 1 生产烧碱的工业过程流程图

Fig. 1 Flow Chart for Production of Caustic Soda

2.1 物料消耗量化

该厂生产过程中来自外界的物料输入主要有两部分:
①用作生产原料的初始输入物料,包括原盐、新鲜水、纯碱、氯化钡、三氯化铁、亚硫酸钠等等,如图 2 所示;
②制备冷凝水所用的液氨、液体氯化钙、去离子水等等,如表 1 所示。

2.2 能源消耗量化

该厂生产过程中所使用的电力有一部分为厂内热电厂自发电,自发电所使用的能源主要为煤和柴油,因为自发电会供给其他部门使用,因此在计算碳排放时无需重复计算,但在统计能源消耗时还是一起列出,更加直观。生产烧碱的工艺流程日均能源消耗量见表 2。

因为该碱厂毗邻天然碱开采地,原料运输的能

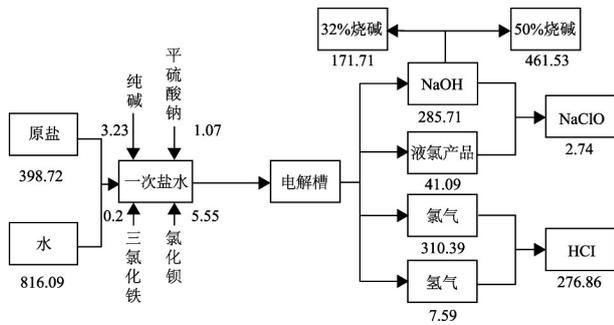


图 2 生产烧碱的物料平衡图(单位: t)

Fig 2 Material Balance Diagram for Production of Caustic Soda (unit: t)

表 1 制备冷凝水所需的原料消耗

Tab 1 Material Consumption for Preparation of Condensed Water

原料名称	脱盐水	一次水	液氨	液体氯化钙	去离子水
消耗量/t	22.59	382.60	0.04	365.75	374.64

表 2 生产烧碱的工艺流程日均能源消耗量

Tab 2 Daily Energy Consumption in the Process of Caustic Soda Production

生产流程	自发电力/(kW·h)	外购电力/(kW·h)	重油/kg	蒸汽/t	燃料煤/t	柴油/t	冷冻油/kg
制碱	658 429	9 268	1.1	330	—	—	—
发电机	—	—	60	—	909	5 220	—
汽轮机	6 603	1 942	1.4	—	—	—	—
凝结器	64 468	13 982	—	—	—	—	37
给水泵	10 400	2 877	0.55	—	—	—	—

源消耗可以忽略不计,那么运输过程中的主要能源消耗就来自于煤、原油、重油等发电用能源的运输,根据厂方给出的数据,日均运输量为 276 736.9 t·km,折算后汽油耗油量为 5 193.5 L。

2.3 碳排放计量

利用数据里给出的排放因子,结合表 1、表 2 中的消耗量,我们可以计算出整个烧碱生产过程中消耗原料、能源和运输过程所排放的 CO₂ 当量,如表 3 所示。

表 3 烧碱生产排放的 CO₂ 当量分布

Tab 3 CO₂ Equivalent Distribution in the Process of Caustic Soda Production t

生产流程	原料消耗	能源消耗	运输
制碱	5 982	891 716	—
发电	15 528	—	14 334
汽轮机	—	9 861	—
凝结器	1 663	93 629	—
给水泵	—	15 848	—
总计	23 247	1 011 055	14 334

3 基于 GaBi 软件的环境影响分析

在完成清单分析之后,利用 GaBi 软件进行环境影响评价,首先要特征化,将清单分析结果根据分类转化为相应的环境影响,接着对资源使用的相关类别按数据库中所提供的负载值进行打分排序,然后利用软件数据库提供的等价因子采用物质当量法评价各类别的环境影响,对每一种环境影响指定一种物质作为指示物。

论文以苏尼特碱厂纯碱产品工业过程^[9]为例,对各单元过程的环境影响进行评价,利用 GaBi 软件建立该厂纯碱生产中各单元间的系统连接如图 3 所示。

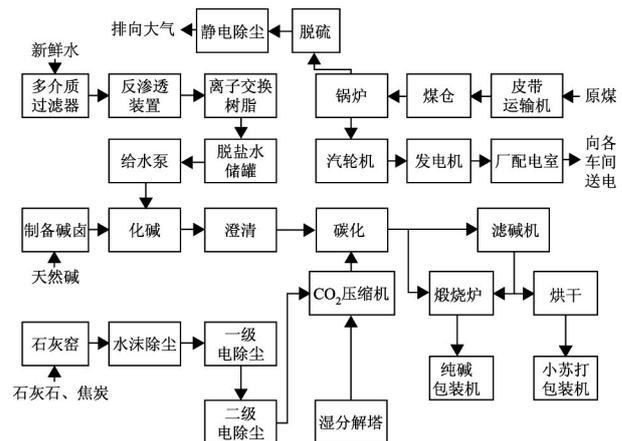


图 3 苏尼特碱厂纯碱产品工艺流程图

Fig 3 Flow Chart of Soda Production

以图 3 为基础,将搜集到的生产过程中消耗和排放的原始数据进行编目整理,选取了全球增温潜势、光化学烟雾氧化反应潜势和不可再生资源消耗 3 个有代表性的环境影响指标进行评估。全球增温潜势,如式(1)所示。

$$(ISGW)_i = EFGWP \times AMTGG \quad (1)$$

式中:(ISGW)_i表示每功能单位温室气体全球变暖影响指标;EFGWP表示物质的 GWP 系数,AMTGG 表示每功能单位排放该物质的数量。

光化学烟雾氧化反应潜势,如式(2)所示。

$$(ISGW)_i = (EFPOCP \times AmtPOC)_i \quad (2)$$

式中:(ISGW)_i表示每功能单位的光化学影响;EFPOCP 表示物质的光化学烟雾氧化反应能力的相关系数;AmtPOC 表示每功能单位产生光化学烟雾的物质向大气的排放量。

不可再生资源消耗如式(3)所示。

$$(IRrr)_i = \omega_i [AMTrri \times (1 - RC_r)] \quad (3)$$

式中:(IRrr)_i表示每功能单位消耗的不可再生资源的影响;AMTrri 表示每功能单位消耗的不可再

生资源; RC_r 表示资源回收或重复使用率; ω_i 表示资源的稀缺系数。

按照上述公式计算后对纯碱产品工业过程进行环境影响评价, 结果如表 4。

表 4 纯碱产品工业过程中各生产单位的环境影响占比
Tab 4 Environmental impact of each production unit in the process of soda production (%)

环境影响	工艺单元						
	纯碱包装机	小苏打包装机	澄清	煅烧炉	多介质过滤器	二级电除尘	反渗透装置
不可再生资源消耗	17.12	17.12	0.01	0.13	0.00	0.07	0.08
全球增温潜势	0.81	0.81	0.01	0.02	0.00	0.13	0.16
光化学臭氧合成潜力	6.91	6.91	0.13	2.24	0.00	1.18	1.41
给水泵	锅炉	过滤机	静电除尘	离子交换树脂	滤碱机	凝汽器	皮带输送机
0.21	36.22	0.08	1.35	0.03	0.09	0.10	0.05
0.40	89.84	0.16	2.58	0.06	0.17	0.19	0.09
3.68	21.35	1.41	23.55	0.59	1.59	1.77	0.82
湿分解塔	石灰窑	水沫除尘	脱硫	一级电除尘	制备碱卤	主供水管网	
0.27	16.98	0.01	0.97	0.07	0.10	8.94	
0.52	1.74	0.03	1.86	0.13	0.18	0.09	
4.73	1.52	0.24	16.95	1.18	1.67	0.17	

4 结果分析

上述两种方法应用于工业过程生命周期分析的最终目的都是为了准确的定位到生产单元中污染重, 消耗大和排放多的部分, 从而对这些部分进行工艺整改来有效提高企业整体产业结构升级与转型的效率, 节约时间与成本。

以对烧碱产品的传统工业过程建模清单分析为例, 可以发现生产原料的使用中新鲜一次水和经过去离子化、脱盐等处理的一次水消耗远超其他原料, 而且整个生产流程中没有二次水的重复使用, 造成了大量浪费。而在能源的使用中, 该厂的自发电可以解决厂内的大部分电力的供给来源, 所以消耗最大的能源就是用于自发电的煤和柴油, 并没有采用清洁能源作为补充, 仍然是全部采取传统的化石燃料, 产生了大量的污染。同时在烧碱产品的整个生命周期中, 能源消耗的碳排放当量总量最高, 占到了 90% 以上, 这与化石燃料的大量使用是分不开关系的^[10]。

以利用 GaBi 软件对于纯碱产品的工业过程环境影响评价为例, 结果显示整个生产线中锅炉工艺是温室气体排放的主要贡献者, 其主要原因是褐煤的使用, 这是为了获得生产线中加热用的蒸汽, 以及自发的覆盖 1/3 生产耗电的电力, 同时褐煤的使用、静电除尘和脱硫工艺还产生了大量的 NO_x , 形成了大量的光化学烟雾, 这些烟雾最终会生成大量的臭氧, 增加了大气的氧化性, 这导致大气中的 SO_2 、 NO_2 等被氧化并逐渐凝结成颗粒

物, 从而增加了 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度^[11]。

综合分析两种方法得出的计算结果, 我们可以针对该厂的生产提出一些可能的改进意见: ①如果条件允许, 可以把生产用的褐煤以及外购的火电, 替换或部分替换为较清洁的能源^[12]如天然气, 以及可再生能源^[13]如水电, 风电或光伏电; ②如果褐煤作为基础能源无法被替换, 可以考虑在褐煤进入锅炉系统前加入煤提质的工序, 提高燃料品质从而降低产品平均排放, 同时减少燃烧后氮氧化物的排放量; ③锅炉系统在产生生产用蒸汽的同时消耗了大量电力, 可以通过技改以及优化锅炉系统降低锅炉系统自身电耗, 这样多输出自产电力, 同时也降低了对外购电力的需求, 也能节约生产成本; ④提高蒸汽的循环使用效率, 从而降低锅炉系统对褐煤的需求与消耗, 从而降低产品的平均排放; ⑤在生产系统中节约电力的使用, 达到节省煤炭和外购电力的目的, 从而降低产品的平均排放。

5 结束语

论文采用了两种方法对化工类企业的工业过程进行了研究分析, 证明了这两种方法都达到了指导产品工艺流程改进的目的, 可以预见把它们用于企业的清洁生产转型进而解决该类区域性污染问题^[14]在实践上是可行的, 都为化工类企业实现减排目标和配合国家“蓝天计划”的实施提供了新的思路。其中第一种方法较为传统, 人工数据处理量稍大但并不复杂, 同时数据呈现较为直

观,但是由于人力物力所限不可能做到像第二种方法那样精确^[15],存在一定的误差与不确定性,整体结果比较概括。第二种方法则借助了 GaBi 软件,将整个生产流程中的每一个步骤间的输入输出清晰细致地展现出来,可以精确地定位到企业生产的流程中去找到相应的改进点,但是该软件的普及有一定困难,而且软件首次呈现的数据较为抽象,需要有经验的相关人士进行数据的整合和转化,想要直接推广并应用于企业生产的生命周期评估还比较困难。由此看来,选择何种方法去进行企业生产的生命周期评估也要视具体的问题和情形而定。

致谢:感谢内蒙古苏尼特碱厂提供的全年生产数据。

参考文献

[1] CHANGEI P O C. Climate change 2007: The physical science basis[J]. Agenda, 2007, 6(7): 333.

[2] CAI W, LI K, LIAO H, et al. Weather conditions conducive to Beijing severe haze more frequent under climate change[J]. Nature Climate Change, 2017, 7: 257-262.

[3] HALLQUIST M, MUNTHER J, HU M, et al. Photochemical smog in China: scientific challenges and implications for air-quality policies[J]. National Science Review, 2016, 3(4): 401-403.

[4] ANEX R, LIFSET R. Life cycle assessment[J]. Journal of Industrial Ecology, 2014, 18(3): 321-323.

[5] HERRMANN I T, MOLTESEN A. Does it matter which life cycle assessment (LCA) tool you choose?—a comparative assessment of SimaPro and GaBi [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 86: 163-169.

[6] SHINEK P. The global warming potential: the need for an interdisciplinary retrieval[J]. Climatic Change, 2009, 96(4): 467-472.

[7] DREYERL C, NIEMANN A L, HAUSCHILD M Z. Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99 [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2003, 8(4): 191-200.

[8] 高旭东. 我国烧碱工业状况与发展趋势[J]. 氯碱工业, 2002(10): 1-8. (GAO Xudong. Development trend of caustic soda process in China[J]. Chlor-Alkali Industry, 2002(10):1-8.)

[9] 左艳梅,闵瑞高. 氨碱法纯碱生产工艺与设备的发展特点研究[J]. 广东化工, 2013, 40(13): 127-127. (ZUO Yanmei, MIN Ruigao. Study on the development characteristics of technology and equipment for the production of ammonia soda [J]. Guangdong Chemical Industry, 2013, 40(13):127-127.)

[10] ZHANG X, KARPLUS V J, QI T, et al. Carbon emissions in China: How far can new efforts bend the curve? [J]. Energy Economics, 2016, 54: 388-395.

[11] JIA M, ZHAO T, CHENG X, et al. Inverse relations of PM2. 5 and O₃ in air compound pollution between cold and hot seasons over an urban area of east China [J]. Atmosphere, 2017, 8(3): 59.

[12] DINCER I, ACAR C. A review on clean energy solutions for better sustainability[J]. International Journal of Energy Research, 2015, 39(5): 585-606.

[13] PANWAR N L, KAUSHIK S C, KOTHARI S. Role of renewable energy sources in environmental protection: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(3): 1513-1524.

[14] 丁峰,张阳,李鱼. 京津冀大气污染现状及防治方向探讨[J]. 环境保护, 2014(21): 55-57. (DING Feng, ZHANG Yang, LI Yu. Status of atmospheric pollution and its control path in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Environmental Protection, 2014(21):55-57.)

[15] 陈莎,李焱佩,曹磊,等. 产品碳足迹评价中不确定度与敏感度相结合的数据质量分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(4): 1067-1072. (CHEN Sha, LI Yanpei, CAO Lei, et al. Data quality analysis with combination uncertainty and sensitivity for carbon footprint assessment of products[J]. China Environmental Science, 2014, 34(4):1067-1072.)

(责任编辑:邓国臣)

《测绘科学》学术支持单位名录

- | | |
|--------------------|-----------------|
| ★浙江省测绘科学技术研究院 | 北京市测绘设计研究院 |
| ★广州南方测绘仪器有限公司 | 北京优艺康光学技术科技有限公司 |
| ★湖北省基础地理信息中心 | 浙江省第二测绘院 |
| (湖北省北斗卫星导航应用技术研究院) | 安徽省基础测绘信息中心 |
| ★北京四维远见信息技术有限公司 | 北京思行伟业数码科技有限公司 |
- (注:★为重点学术支持单位)