

中国化石能源生产的生命周期清单(I) ——能源消耗与直接排放

袁宝荣, 聂祚仁, 狄向华, 左铁镛

(北京工业大学材料学院, 新型功能材料教育部重点实验室, 北京 100022)

摘要:化石能源生产的生命周期清单不仅是开展化工工业及其产品生命周期分析的基础, 也能阐明化石能源生产的基本环境行为。通过计算得到了 2002 年我国原煤、原油和天然气开采过程中直接相关的能源消耗和污染物排放, 涉及到的污染物排放包括液态污染物、固体废弃物和 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、 CO 、 CH_4 、烟尘等气态排放物。

关键词:化石能源; 生命周期清单; 化学工业

中图分类号: TQ-9

文献标识码: C

文章编号: 0253-4320(2006)03-0059-04

Life cycle inventories of fossil fuels in China(I):

Energy sources consumption and direct pollutant emissions

YUAN Bao-rong, NIE Zuo-ren, DI Xiang-hua, ZUO Tie-yong

(Key Laboratory for Advanced Functional Materials of the Ministry of State Education, College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The life cycle inventories of fossil fuels can not only provide reference data for the life cycle assessment of the chemical industry and its products, but can also show the environment performance of fossil fuels production. The energy sources consumption and direct pollutant emissions due to production and transportation of raw coal, crude oil and natural gas in China in 2002 were calculated. The emissions of water pollutants, solid wastes and gaseous state pollutants such as CO_2 , SO_2 , NO_x , CO , CH_4 and dust were included.

Key words: fossil fuel; life cycle inventory; chemical industry

化石能源一直是人类社会发展的主要动力, 人类所需初级能量 80% 以上均来自化石能源^[1]。化石能源的生产和使用是整个工业生产系统中的必需环节。在未来的几十年里, 化石能源仍将处于能源结构的主导地位。但是, 随着经济发展和人口增长对能源需求的不断增加, 化石能源大规模的开采与消耗已导致能源的资源基础在逐渐削弱和退化, 并在化石能源开采和利用过程中造成了严重的环境污染与生态破坏。如何以最低的环境代价确保化石能源安全、有效地可持续利用, 已成为人类社会在经济发展过程中所面临的重大课题。

目前, 我国是世界第二大能源消费国和第三大能源生产国。2003 年, 我国一次能源产量为 1 603 Mt 标准煤^[2]。其中原煤产量 1 667 Mt, 原油产量 170 Mt, 分别居世界第 1 位和第 5 位; 发电量 1 911 TWh,

居世界第 2 位^[3]。能源工业的发展有力地保证和促进了国民经济的快速增长, 在我国可持续发展战略中起着越来越重要的地位。但与此同时, 诸如能源供应总量不足、石油供应紧缺、环境污染严重、能源利用效率低下等长期存在的根本问题依然存在, 亟待解决^[4]。

本研究开展中国化石能源生产相关生命周期清单的编制与分析, 旨在阐明我国初级能源生产的资源消耗和环境污染的基本状况, 为相关工业产业及其产品的生命周期清单或生命周期评价提供基础数据, 并为宏观决策及相关法规的制定提供依据。本文主要介绍生命周期清单分析方法和本研究的基本问题, 计算 2002 年我国原煤、原油和天然气开采过程中直接相关的能源消耗和污染物排放, 构成化石能源生产生命周期清单的最主要部分。

收稿日期: 2005-12-10

基金项目: 国家“863”计划项目(2001AA320201); 北京市自然科学基金重点项目(2011001)

作者简介: 袁宝荣(1967-), 女, 博士生, 从事能源工业和化学工业的生命周期评价研究; 聂祚仁(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事生态环境材料方面的研究, 通讯联系人, 010-67391567, zmie@bjut.edu.cn。

1 研究方法

1.1 生命周期清单分析方法

化石燃料消耗的污染与控制问题已经得到长期研究但并不成熟,多数研究仅考虑能源燃烧与转换环节,而未从生命周期的角度系统来评价其总体作用。如果考虑化石燃料开采、加工和运输过程,则在整个生命周期内均会产生污染物的排放,不可忽略不计。生命周期评价(Life Cycle Assessment,简称 LCA)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^[5-6]。生命周期是指产品系统中前后衔接的一系列阶段,从原材料的获取或自然资源的生成,直至最终处置。目前,LCA 及其分析方法已逐渐成为对资源、能源、材料及其产品进行环境协调性评价的主导方法,广泛应用于国际社会的各个层次与领域^[7-10]。

生命周期清单分析是 LCA 中对所研究产品系统整个生命周期中输入和输出进行汇编和量化的阶段,主要包括数据的收集和计算程序。根据 LCA 的目的和范围需要,清单分析阶段可以依据量化数据做出解释,也可以将其作为生命周期影响评价输入的组成部分。能源生产的相关生命周期清单不仅是开展工业及其产品 LCA 分析的基础,其结果本身也能阐明能源生产的基本环境行为。

1.2 研究目标与系统边界

研究目标为计算 2002 年中国原煤、原油和天然气开采的生命周期资源消耗和环境排放数据,所有数据均为全国平均水平,涉及到的环境性排放包括液态污染物、固体废弃物和 CO₂、SO₂、NO_x、CH₄、CO、烟尘等气态排放物。

系统边界为化石燃料生产的生命周期过程,包括开采过程的能源消耗、工艺过程直接排放、相关工业锅炉排放、运输过程排放以及主要原燃料的生命周期消耗与排放。由于缺乏各种设备和厂房的制造及退役的数据,因此在生命周期没有纳入这一环节。

1.3 数据来源与计算方法

由于本清单所研究的是我国化石能源生产的平均水平,因此以我国国家层次的统计数据为主要参考源,所得到的各项数据质量可信度比较高,基本上能反映我国化石能源工业技术水平现状。但统计数据所提供的信息覆盖面尚有欠缺,不足以涵盖本研究的全部需求,因此有必要对部分数据进行补充。补充方法包括我国大型重点企业的实际检测数据替代、总量平衡计算和经验计算方法。

在本研究中,首先对原煤、原油和天然气开采的资源消耗、开采过程直接排放和运输过程相关排放进行统计或计算,得到初步清单结果;然后对其上游过程进行环境负荷的追溯,以得到最终的生命周期清单。

2 原煤生产的初步清单

原煤开采过程中的环境负荷主要包括 4 个方面:①开采和运输过程相关的资源和能源消耗,包括原煤储量的减少和燃煤、燃油的消耗;②原煤开采过程中产生的瓦斯、矿井水和煤矸石等污染物的排放;③采煤相关工业锅炉的燃烧排放;④原煤运输工具运行过程中产生的污染物排放,主要以废气为主。

2.1 采煤过程中的污染物直接排放

工业废水和固体废弃物排放是国家环境统计的主要内容之一,因此相关数据可得到总体产生与排放的官方统计数据。2002 年,中国煤炭开采业废水排放量为 48 571 万 t,其中化学需氧量(COD)排放量为 7.74 万 t;固体废弃物排放总量为 6 439 万 t,其中煤矸石的排放量为 5 661 万 t,尾矿 531 万 t,粉煤灰 68 万 t^[11]。下面主要计算原煤开采过程中的气态污染物排放。

在煤炭开采过程中,一般都把矿井瓦斯作为有害气体,大多直接排放到大气中,仅有少量从井下抽放利用。瓦斯的主要成分是 CH₄,而 CH₄ 是除 CO₂ 以外最主要的温室气体之一。在我国目前技术经济条件下,矿井瓦斯的利用率仅占 15%~20%。

本研究用采煤量、采煤过程的 CH₄ 排放系数和 CH₄ 的回收率来计算 CH₄ 的总排放量。其中,采煤方式分为矿井采煤和露天采煤,矿井开采又分为高瓦斯矿和低瓦斯矿 2 种情况,计算过程中需区别对待。根据资料^[12],露天采煤的 CH₄ 排放因子为 2.50 m³/t,高瓦斯矿井和低瓦斯矿井的 CH₄ 排放因子分别为 21.83 m³/t 和 4.53 m³/t。目前,我国矿井采煤量占到采煤总量的 95%^[13],根据 2002 年我国原煤总产量^[14]可计算得到 2002 年矿井采煤量和露天采煤量,分别为 13.11 亿 t 和 6 900 万 t。据国家煤矿安全监察局 2001 年对全国 576 个重点国有煤矿的瓦斯鉴定结果,有低瓦斯矿 300 处,占 52%,高瓦斯矿和瓦斯突出矿 276 处,占 48%^[15]。

由此可计算得到 2002 年我国煤炭开采过程中 CH₄ 的总排放量为 1 218.41 万 t。

2.2 采煤工业锅炉燃烧的污染物排放

2002 年我国煤炭采选业共消耗原煤 8 921.14

万 t^[14],扣除掉洗选损耗 1 717.5 万 t^[16],煤炭开采业作为燃料所消耗的原煤量为 7 203.64 万 t。原煤开采过程还消耗少量原油、焦炭、燃料油和天然气等,但由于消耗数量和污染物排放量与原煤燃烧相对而言份额很小,故可忽略不计。

本研究中采煤工业锅炉燃烧的污染物排放种类包括 CO₂、SO₂、NO_x、CH₄、CO、烟尘和固体废弃物,液态污染物的排放由于数据可得性问题而未予考虑。

(1)CO₂。燃料燃烧所产生 CO₂ 的排放量与燃料消耗量有关,也与燃料本身的属性和特征有关,还与燃烧设备和技术有关,可通过碳排放系数和碳氧化率两项指标来表征。原煤燃烧的碳排放系数取自中国实际测定值^[17],为 24.74 t/TJ,碳氧化率取 90%。

(2)SO₂。根据化石燃料中的硫含量和硫排放因子来计算燃烧过程中的 SO₂ 排放量。根据文献^[18-19],中国煤炭资源中动力煤的平均含硫量在 1.15%左右,SO₂ 排放因子取 81.3%。

(3)NO_x。NO_x 的排放量可以根据燃料消耗量和 NO_x 排放因子估算。我国各类燃料燃烧排放的 NO_x 基本上均未加控制,尚无系统的排放因子集可以利用。本研究采用欧洲 20 世纪 70 年代末采取 NO_x 排放控制措施的燃烧设备排放状况而确定的排放因子^[20],其中,原煤燃烧的 NO_x 排放因子为 9.95 kg/t。

(4)CO 和 CH₄。化石燃料燃烧时 CO 和 CH₄ 的排放量可根据燃料消耗量、燃料发热量及相应排放因子来分别估算。根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)推荐的缺省值^[21],原煤燃烧过程中 CO 和 CH₄ 的排放因子分别为 106 kg/TJ 和 0.8 kg/TJ。

(5)烟尘。燃煤锅炉的烟尘排放量可根据燃料消耗量、烟尘排污系数和除尘设备的情况来计算。中国动力煤的灰分含量大约为 25%^[22],由资料^[23]可以查到燃煤工业锅炉烟尘产污系数为 35.72 kg/t。根据实际调查,目前我国燃煤锅炉的收尘设备覆盖率大约为 60%,除尘效率约为 90%。

由上述各计算公式及其参数,可以得到 2002 年我国采煤工业锅炉燃烧的污染物排放情况。其中,CO₂、SO₂、NO_x、CO、CH₄、烟尘的排放量分别为 1.23 × 10⁴、135、71.7、16.0、0.12、118 万 t。

2.3 采煤过程中运输相关的污染物排放

根据资料^[13,16],2002 年我国采煤工业中的汽油和柴油主要用于煤运输(从矿山到周边铁路站),分别消耗 30.10 万 t 和 54.80 万 t。原煤开采过程还消

耗少量煤油和原油等,可忽略不计。由于国内公路运输生命周期清单数据的缺乏,本研究采用荷兰 Pre 公司^[24]SimaPro 5.1 数据库中载重 28 t 柴油大货车的相关参数估算车用柴油燃烧的环境排放。同样由于数据原因,此处将汽油视为柴油计算。在西欧平均技术水平情况下,1 t·km 公路运输消耗柴油 5.30 × 10⁻² kg,污染物排放情况如表 1 所示。由此可推算得到 2002 年我国采煤过程中运输工具产生的污染物排放量,列入表 1。

表 1 2002 年我国采煤过程中运输工具产生的污染物排放

环境负荷项目	1 t·km 公路运输污染物排放量/kg	2002 年中国采煤工业污染物排放量/万 t
CO ₂	0.135	216
SO ₂	1.12 × 10 ⁻⁴	0.179
NO _x	1.72 × 10 ⁻³	2.76
CO	3.74 × 10 ⁻⁴	0.60
CH ₄	5.59 × 10 ⁻⁶	8.91 × 10 ⁻³
烟尘	9.46 × 10 ⁻⁵	0.15

2.4 原煤生产的初步清单

通过对原煤开采过程中各项环境负荷的考察,可以得到原煤生产的初步清单。2002 年我国生产原煤 1.38 × 10⁷ 万 t,使原煤储量减少 1.38 × 10⁷ 万 t,消耗汽油 30.1 万 t,消耗柴油 54.8 万 t。同时,CO₂、SO₂、NO_x、CO、CH₄、烟尘、液态废弃物、固体废弃物的排放量分别为 1.25 × 10⁴、135、74.4、16.6、1.22 × 10³、119、4.86 × 10⁴、6.44 × 10³ 万 t。

3 石油天然气开采过程的环境负荷

根据统计资料^[11],2002 年中国石油和天然气开采业废水排放量为 9 226 万 t,其中 COD 排放量为 2.43 万 t,石油类污染物排放量 2 668.6 t;固体废弃物排放总量为 93 万 t,其中危险废物的排放量为 6.16 万 t。油气开采过程中柴油和燃料油燃烧所产生的气态污染物排放则需进行估算。

由资料^[13]可知,2002 年我国油气开采业共消耗柴油 187.36 万 t,燃料油 196.30 万 t。油气开采过程中汽油和煤油的消耗量很少,此处忽略不计。由于很难得到用于运输工具的柴油消耗量,此处将所有柴油和燃料油的燃烧状况简化为工业锅炉燃烧,计算方法类似于采煤工业锅炉燃烧污染物排放的计算。

其中,燃油的碳排放率取 IPCC 推荐的缺省值^[21],为 20.00 t/TJ,而碳氧化率取 0.98,这是在中国钢铁工业、工业锅炉、化学行业、铁路蒸汽机等燃烧设备碳平衡分析计算的基础上确定的^[17]。根据相关资料与研究^[25-27],取柴油和燃料油的硫含量分别为 0.20% 和 0.556%,燃油燃烧的 SO₂ 排放因子取 93%^[28]。根据文献^[20],取油料的 NO_x 排放因子为 7.24 kg/t。燃油燃烧过程中 CO 和 CH₄ 排放量的排放因子采用 IPCC 推荐的缺省值^[21],分别为 4 kg/TJ 和 2 kg/TJ。油料的烟尘排放因子取 2.12 kg/t^[23]。

根据统计资料^[16],2002 年我国原油的产量为 16 700 万 t,天然气产量为 327 亿 m³。扣除掉石油和天然气开采业中原油和天然气的自消费量 3 377.69 万 t 和 79.97 亿 m³,可得到原油和天然气的净产量分别为 13 322 万 t 和 247 亿 m³。采用发热量作为分配基准,可以计算得到原油开采和天然气开采相对应的初步清单,如表 2 所示。

表 2 2002 年我国油气开采的初步清单 万 t

	原油	天然气
输入项目		
原油	16700	—
天然气	—	327 亿 m ³
柴油	160	27.6
燃料油	167	28.9
输出项目		
原油	13322	—
天然气	—	247
CO ₂	993	171
SO ₂	2.33	0.40
NO _x	2.37	0.41
CO	558	9.64 × 10 ⁻³
CH ₄	279	4.82 × 10 ⁻³
烟尘	0.69	0.12
液体废物	7.87 × 10 ³	1.36 × 10 ³
固体废物	79.3	13.7

表 2 所得到油气生产的初步清单中,汽油、柴油和燃料油均非初级能源,尚不能满足生命周期清单的基本要求。前面计算得到的原煤生产初步清单同样存在类似问题。因此,为得到最终的生命周期清单,还需要对各类成品油的上游,即原油炼制过程进行追溯,以得到原煤、原油和天然气生产的基础物质

流及其相应生命周期排放。

从生命周期的角度来分析,计算得到的原煤、原油和天然气的初步清单中,电力、汽油、柴油和燃料油均为次级能源,其生产过程中都消耗初级资源并产生环境排放。因此,下一步的研究工作是,考察原油炼制过程的能源消耗和环境排放,并结合电力相关生命周期清单,从而计算我国化石能源生产的完整生命周期清单。

4 小结

本文是中国化石能源生产相关生命周期清单编制的前部分工作,介绍了生命周期清单分析方法和本研究的基本问题,计算得到我国主要化石能源生产过程中直接相关的能源消耗和污染物排放,包括开采过程的能源消耗、工艺过程直接排放、相关工业锅炉排放、运输过程排放以及主要原燃料的生命周期消耗与排放。这些能源消耗和直接排放是计算化石能源生产生命周期清单的必要数据,也将构成最终生命周期环境负荷的最主要部分。

参考文献

- [1] 霍雅勤. 化石能源的环境影响及其政策选择[J]. 中国能源, 2000 (5): 17 - 21.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴 2004[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004.
- [3] 王庆一. 中国能源现状与前景[J]. 中国煤炭, 2005, 31(2): 22 - 27.
- [4] 中国能源发展报告编辑委员会. 中国能源发展报告(2003)[M]. 北京: 中国计量出版社, 2003.
- [5] ISO International Standard 14040. Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework[S]. Geneva: International Organization for Standardization(ISO), 1997.
- [6] 中华人民共和国国家标准 GB/T 24040—1999. 环境管理 生命周期评价 原则与框架[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [7] Adisa A. Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation[J]. Chemical Engineering Journal, 1999, 73 (1): 1 - 21.
- [8] Arnold T. Life cycle assessment as a tool in environmental impact assessment[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2000, 20(4): 435 - 456.
- [9] Khan F I, Raveender V, Husain T. Effective environmental management through life cycle assessment[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2002, 15(6): 455 - 466.
- [10] 孙启宏. 生命周期评价在清洁生产领域的应用前景[J]. 环境科学研究, 2002, 15(4): 5 - 7.
- [11] 中国环境年鉴编辑委员会. 中国环境年鉴 2003[M]. 北京: 中国环境年鉴社, 2003.

土石油的生产,而是更多的进口原油。然而,美国原油进口依赖性对世界原油供应紧张并无大碍。

在此背景下,有 2 个政策目标意义重大:鼓励供应多元化来分散风险和增大石油储备以应对可能带来的危机。近年来,美国在增加战略石油储备方面有较大幅度的提高。新的能源政策法案授权政府将战略石油储备由目前的 7 亿桶提高至 10 亿桶。然而,立法当局并没有为提高战略石油储备增加预算资金。除此之外,还有何时增加储备以及何时利用储备的问题没有得到落实。当石油价格高涨(比如目前),以及世界石油生产能力不足和全球石油需求增加甚至大幅增加时,美国增加战略石油储备是否适当。

其他石油进口快速增加的国家(如印度和中国)也高度关注原油供应安全问题,均有意建立各自的战略石油储备,当然其战略石油储备的起点均远低于美国。建立战略石油储备是应对国际石油市场波动的有效手段。目前,国际能源机构的成员国在战略石油储备方面展开了协作。除美国之外,其他发达国家的石油进口也在增加。既然美国战略石油储备即将增加,那么何时和如何使用储备的问题也应当加以考虑。尽管 2003 年底伊拉克战争局势并不明朗,对于应对委内瑞拉石油供应减少给美国带来的冲击,美国仍没启用战略石油储备。2004 年,由于“伊万”飓风给墨西哥湾石油生产造成了不利影响,使得美国国内石油供应吃紧,美国政府动用了 170 万桶的战略石油储备。2005 年,由于“卡特里

娜”和“丽塔”飓风对美国石油供应造成了巨大影响,美国政府开始动用战略石油储备以平抑市场。

2 2005 年美国能源政策法案对美国石油供需的影响

2.1 对美国石油生产的影响

为刺激石油和天然气生产,美国最新的能源政策免除某些石油和天然气的生产赋税,特别是石油生产能力低于 15 桶/天,天然气生产能力低于 90 MMBtu/天(Btu 为英热单位,1 Btu = 1 055 J)的小油气田,在水下 400 m 开采油气,使用二氧化碳注射开采以及从浅水深气井生产均免除开采使用费。但是,这些促进措施对美国石油生产的影响甚微。从 20 世纪 70 年代初期,美国石油生产一直走下坡路。2004 年,美国原油生产能力为 540 万桶/天,比 1973 年的生产能力下降了约 380 万桶/天。由于 1973 年阿拉伯国家石油禁运,世界油价大幅上扬,从而刺激美国石油生产创下了最高纪录。美国能源部最新的年度能源报告预测 2005—2025 年,美国石油生产能力年均下降 1%,这期间将于 2009 年出现石油生产增长,然后又下降。因此,美国通过增加石油生产来大幅降低石油进口成功的可能性几乎为零。即使在美国实施 2005 年能源政策法案等一系列刺激国内石油生产的措施之后,收效仍然微乎其微。尽管如此,供应导向性政策依然十分重要。如果没有实施有关建设阿拉斯加输油管道和开采墨西哥湾深水油气田等政策,那么自 20 世纪 70 年代初期出现的

(上接第 62 页)

- [12] 郑爽. 我国煤层甲烷类温室气体排放及清单编制[J]. 中国煤炭, 2002, 28(5): 37-40.
- [13] 国家统计局. 中国统计年鉴 2003[M]. 北京: 中国统计出版社, 2003.
- [14] 潘伟尔. 我国煤矿安全生产问题研究[J]. 中国能源, 2005, 27(7): 8-15.
- [15] 田山岗. 煤炭工业可持续发展下的不可持续增长[J]. 煤炭经济研究, 2003(8): 6-11.
- [16] 国家统计局工业交通统计司, 国家发展和改革委员会能源局. 中国能源统计年鉴(2000~2002)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004.
- [17] 吴宗鑫, 陈文颖. 以煤为主多元化的清洁能源战略[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [18] 王庆一. 中国煤炭工业: 演变及前景(上)[J]. 中国煤炭, 2001, 27(1): 6-12.
- [19] 王志轩. 中国火电厂二氧化硫排放控制综合对策建议[J]. 中国电力, 2002, 35(1): 60-63.
- [20] Kato N, Akimoto H. Anthropogenic emissions of SO₂ and NO_x in Asia: e-

mission inventories[J]. Atmospheric Environment, 1992, 26: 2997-3017.

- [21] Houghton J T, Meira Filho L G, Lim B, et al. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual (Volume 3)[M]. Bracknell: UK Meteorological Office, 1997.
- [22] 陈鹏. 中国煤炭性质、分类和利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [23] 王玉彬. 大气环境工程师实用手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- [24] Simapro Databases-inventory data[OL]. http://www.pre.nl/simapro/inventory_databases.htm, 2005-10-10.
- [25] 王文兴, 王玮, 张婉华, 等. 中国 SO₂ 和 NO_x 排放强度地理分布和历史趋势[J]. 中国环境科学, 1996, 16(3): 161-167.
- [26] 夏旭彬, 黄锡坚. 限制油料中的含硫量是确保烟气达标排放的有效途径[J]. 中国环境监测, 2001, 17(2): 47-49.
- [27] 侯美生. 创新炼油技术, 推动 21 世纪我国炼油工业的发展[J]. 石油炼制与化工, 2002, 33(1): 1-9.
- [28] 国家计划委员会项目组, 中国科学院能源研究所项目组, 清华大学技术经济和能源系统分析所项目组. 中国能源开发项目中的环境问题[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1993. ■