

# 中国化石能源生命周期清单分析

丁 宁,杨建新\* (中国科学院生态环境研究中心,城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085)

**摘要:** 利用生命周期评价方法,建立了我国化石能源的生命周期清单模型,详述了模型相关因子的确定方法,计算了原煤、原油、天然气等初级能源及汽油、焦炭等几类主要次级能源的生命周期清单,揭示了我国能源生产的环境负荷,为工业系统分析和材料、产品的生命周期评价提供基础数据.清单分析表明我国化石能源清单的主要特点为能源消耗的 97%以上主要来自生产过程,运输占到 3%左右的比例;通过与 2002 年清单相比,我国化石能源生产的总能耗和排放出现不同程度变化;通过与国外能源清单相比,我国能源投入及排放整体处于较高水平.

**关键词:** 生命周期评价; 生命周期清单; 化石能源; 能耗; 污染物排放

**中图分类号:** X820.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6923(2015)05-1592-09

**Life cycle inventory analysis of fossil energy in China.** DING Ning, YANG Jian-xin\* (State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research center of Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). *China Environmental Science*, 2015,35(5): 1592~1600

**Abstract:** This paper makes the life cycle inventory analysis of fossil energy in China by implementing the calculation model in context of such primary energy as coal, oil and natural gas, as well as second energy like petrol oil, coke. It will be helpful to identify the environmental performance of energy production in China and to make a life cycle assessment of other industrial processes and products. The inventory analysis shows that 97% of energy consumption in China is contributed by industrial process, only 3% by transportation. Based on the comparison of the results of referenced literature in 2002, it shows that the inventory of China's fossil energy varies to some extent. The fossil energy input and environmental emissions from energy production is higher than that of advanced countries.

**Key words:** life cycle assessment; life cycle inventory; fossil energy; energy consumption; emissions

能源是经济增长和社会发展的重要物质基础,人类所需初级能量的 80%以上来自化石能源<sup>[1]</sup>.化石能源供应做为整个工业系统中的重要环节,要经过开采、处理、运输等一系列流程,需要投入大量的资源和能量.同时,化石能源使用过程中排放各类污染物,对环境造成巨大压力.

目前,我国是世界第一大能源生产国和消费国.2010 年,我国一次能源消费量 32.5 亿 t 标准煤,化石能源占 91.4%,煤炭占 68%<sup>[2]</sup>.煤炭消费比重过大已造成严重环境污染,全国 SO<sub>2</sub> 排放量的 80%、烟尘排放量的 70%、氮氧化物排放量的 67%及 CO<sub>2</sub> 排放量的 85%都来源于煤炭燃烧<sup>[3]</sup>.环境污染成为阻碍能源系统可持续发展的重要因素.

利用生命周期评价方法,一些国家建立了详细的能源系统生命周期清单,揭示了本国能源供

应系统的环境负荷<sup>[4-6]</sup>.针对我国能源系统问题,有些研究对我国能源系统的经济效率进行不同行业或者区域的分析<sup>[7-9]</sup>.部分学者对我国的煤电链进行分析,主要集中在碳排放方面<sup>[10-12]</sup>,部分研究主要针对发电部分进行生命周期分析<sup>[13-14]</sup>.而对上游的化石能源生命周期评价清单研究正处在初级阶段,目前的研究应用生命周期评价方法,计算了我国化石能源生产的初级资源的投入和污染物排放<sup>[15-16]</sup>.相比之前的研究,本文建立了化石能源生命周期清单模型;在清单的建立环节,应用生命周期评价专业软件 Simapro 建

收稿日期: 2014-09-25

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”(XDA05140200)

\* 责任作者, 研究员, yangjx@rcees.ac.cn

模实现了能源互相利用的迭代运算;实现了重要参数中国本土化;并考虑了能源开采及转化过程的效率和运输过程的能源损耗。

本文对我国化石能源供应系统进行的生命周期评价模型建立及清单分析,为工业系统分析和材料、产品的生命周期评价提供基础数据,并阐明我国能源生产的环境负荷,为节能减排提供依据。

### 1 方法与数据

生命周期评价(LCA)是通过确定和量化与评估对象相关的能源、物质消耗及其环境排放,来评估某一产品、过程或事件整个生命周期过程的环境总负荷;辨别和评估改善环境的机会。根据

ISO14040 定义的技术框架,生命周期评价包含目标与范围的确定、生命周期清单分析、生命周期影响评价和生命周期解释 4 个部分<sup>[17]</sup>。

#### 1.1 目的与范围的确定

本研究模型包括的范围有原煤、原油、天然气的开采、加工,以及下游的炼焦、制气和炼油工业。建立的化石能源供应模型主要包括三部分:初级能源生产、主要次级能源生产和能源运输,基础设施的建设与运行不包括在系统边界之内,研究范围如图 1 所示。研究目的为建立能源系统的生命周期清单,并进行初步分析。本文所研究的能源系统供应包括能源生产和运输两部分。

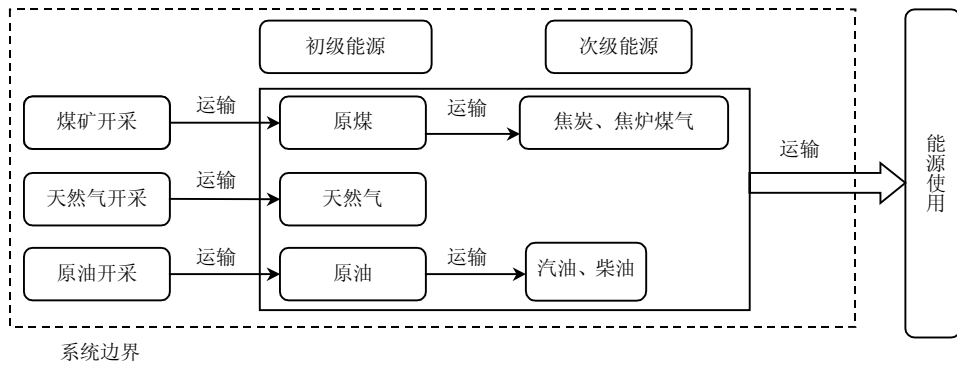


图 1 化石能源系统生产的系统边界

Table 1 System boundary of fossil fuel energy supply

#### 1.2 生命周期清单计算方法

针对化石能源生产的特点,生命周期清单的建立选取基于流程的计算模型,以一定的功能单位为基础,将与功能单位相关的各生产流程的直接、间接资源消耗或排放进行加和,便可得到产品的生命周期清单。本研究的数学模型如下:

$$E = \sum_{i=1}^n (e_i / f_i) \tag{1}$$

$$G = \sum_{i=1}^n g_i \tag{2}$$

式中:  $E$  为总能源消耗量;  $e_i$  为第  $i$  个生产流程的能源消耗量;  $f_i$  为第  $i$  个生产流程的能源效率;不同处理过程的能源转化效率如表 1 所示<sup>[2,18]</sup>。 $G$  为

某种污染物的总排放; $g_i$  为第  $i$  个生产流程的某种污染物的排放量。

表 1 能源开采转化效率

Fig.1 Energy extraction and conversion efficiency

类别	效率(%)	类别	效率(%)
原煤开采效率	97	柴油生产效率	91.46
洗选效率	95	天然气开采效率	96
原油开采效率	91.28	天然气处理效率	94
汽油生产效率	90.79	炼焦效率	97.05

#### 1.3 数据来源

进行生命周期评价研究,需要大量数据作为支撑,数据的准确性是确保研究结果可靠的基础。与本研究有关的数据主要来源于我国国

家层次的统计数据<sup>[2]</sup>,非统计数据则来源于公开发表的行业报告及能源类文献,各项数据质量较高,基本上反映我国化石能源工业技术的平均水平。

#### 1.4 分配方法

部分能源生产是典型的多输出系统,要对生产过程产出的多种产品进行能耗和排放的分配,首先要选定分配基准.根据化石能源产品的主要性质和用途,本研究以产出的各种能源产品在总热量中所占比重作为分配原则,热值的计算采用平均低位发热量<sup>[19]</sup>.

#### 1.5 能源交叉供应的处理

能源的生产供应过程,涉及到各类能源交叉使用,比如煤的生产需要油的消耗,油类的生产同样需要煤的供应,由此产生迭代使用.本文将原始数据输入生命周期评价专业软件 Simapro 建立模型,迭代在软件模型里实现,以保证数据清单的精确性。

#### 1.6 重要因子的确定

1.6.1 化石能源运输我国能源资源与能源需求逆向分布的国情,决定了能源大规模、远距离运输不可避免.我国 70%以上的煤炭资源主要集中在华北、西北地区;90%的石油资源分布在西北、华北、东北地区和海洋大陆架;天然气资源主要分布在四川、西北和海洋大陆架.而从经济发展情况看,东部沿海的经济相对比较发达,GDP、人口和用电量分别占全国的 57%、41%和 54%,这些地区能源资源相对贫乏,煤炭资源比重只有 8%左右.因此,我国能源运输方向集中(自西向东、自北向南)、运输距离长(2010 年铁路煤炭平均运输距离为 622km、油品平均运输距离为 917km)的局面将长期存在<sup>[3]</sup>.

煤炭的长距离运输主要依靠铁路和公路完成,石油和天然气的主要运输通道是管道、铁路、公路等其他运输则作为重要的补充方式.表 2 和表 3 分别为我国主要能源的运输距离比例及各类交通运输工具的能耗<sup>[20-21]</sup>.在能源的运输过程中,不可避免要产生损耗,国家煤炭送货办法实施细则中规定了煤炭运输和换装的物理损失上限,各损耗参数如表 4 所示<sup>[22]</sup>.

表 2 我国能源运输状况(%)

Table 2 Transportation of fossil energy (%)

运输类别	原煤	原油	天然气
公路	27	0	2
水路	18	16	0
铁路	55	55	0
管道	0	29	71

表 3 我国各类交通运输的能耗

Table 3 The energy consumption of transportation

运输方式	单位	能源消耗量	
		汽油货车	柴油货车
公路	L/100(t·km)	8.3	6.3
		内燃机车	电力机车
铁路	kg/100(t·km)	0.264	
	kW·h/100(t·km)	1.024	
水运	kg/100(t·km)	小型机动船	大型船舶
		1.17	0.226
原油管道	kJ/100(t·km)	300	
天然气管道	kJ/100(t·km)	372	

表 4 能源运输损耗

Table 4 The quality loss during transportation

煤炭运输各环节的损耗	损失率(%)
集运站装卸运输损失率	0.20
铁路干线运输损失率	1.20
中转港口装卸损失率	1.00
海运损失率	1.50
受端港口装卸损失率	1.00
受端煤炭运输损失率	-
合计	4.90

1.6.2 能源燃烧排放因子化石能源使用产生的各类排放物是环境污染的主要来源,准确计算这些能源燃烧的排放因子至关重要.长期以来,我国相关燃料燃烧排放中较重要的温室气体都采用 IPCC 的推荐因子,而我国煤炭分类与 IPCC 存在较大差异.同时,我国的煤炭分类所对应的低位发热量与 IPCC 同类煤炭的低位发热量也存在较大差别,如果利用 IPCC 基于热值的排放因子,会造成较大误差<sup>[23]</sup>.所以,采用本土化的排放因子才能准确反应我国化石能源系统的环境负荷状况。

本研究采用我国环保部颁布的《燃料燃烧排放大气污染物物料衡算办法》<sup>[24]</sup>对排放因子

CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、CO、NO<sub>x</sub> 进行计算,相关参数均为我国实测因子,更能反映我国的真实情况,对另外两种重要的气体 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O,则参考了文献[25].

### (1) CO<sub>2</sub> 排放因子

CO<sub>2</sub> 是重要的温室气体,在温室效应中贡献很大.计算公式如下:

$$G_{CO_2} = 3.67 \times F \times Q \times k \times \alpha \quad (3)$$

式中:G<sub>CO<sub>2</sub></sub> 表示 CO<sub>2</sub> 的排放量,kg;F 表示煤炭的消耗量,kg;Q 表示燃料的发热量,MJ/kg;k 表示煤炭的排放系数,kg-C/MJ;α 表示燃料的碳氧化率.CO<sub>2</sub> 的排放根据我国实测的碳排放因子计算<sup>[26]</sup>,主要能源的排放因子和碳氧化率如表 5 所示.

表 5 各类能源的碳排放因子及碳氧化率

Table 5 The main factors for CO<sub>2</sub> emission

能源名称	平均低位发热量	单位热值含碳量 (tC/TJ)	碳氧化率
原煤	20 908kJ/kg	25.74	0.94
原油	41 816kJ/kg	20.1	0.98
天然气	38 931kJ/m <sup>3</sup>	15.3	0.99

### (2) SO<sub>2</sub> 排放因子

SO<sub>2</sub> 是形成酸化效应的主要气体.

燃煤 SO<sub>2</sub> 的排放因子计算公式:

$$G_{SO_2} = 1600 \times B \times S \quad (4)$$

燃油 SO<sub>2</sub> 排放因子计算公式:

$$G_{SO_2} = 2000 \times B \times S \quad (5)$$

燃天然气 SO<sub>2</sub> 排放因子计算公式:

$$G_{SO_2} = 2.857 \times V \times C_{H_2S} \quad (6)$$

式中:G<sub>SO<sub>2</sub></sub> 表示 SO<sub>2</sub> 排放量,kg;B 表示燃料量,T;S 表示燃料全硫分含量,%;V 表示燃气耗量,m<sup>3</sup>;C<sub>H<sub>2</sub>S</sub> 表示燃气中 H<sub>2</sub>S 体积含量,%;天然气 H<sub>2</sub>S 体积含量 0.05.

### (3) CO 排放因子

煤炭燃烧排放和燃油排放 CO 计算公式为:

$$G_{CO} = 2330 \times B \times S \times Q \quad (7)$$

天然气燃烧 CO 排放因子计算公式:

$$G_{CO} = 1.25 \times V \times Q \times (V_{CO} + V_{CH_4} + 13V_{CmHn}) \quad (8)$$

式中:G<sub>CO</sub> 表示 CO 排放量,kg;B 表示耗煤(油)

量,T;C 表示燃料中碳含量,%;煤炭:51.64%,油:90%;Q 表示燃煤燃烧不完全值,%;煤炭:3.5%,油:2%;V 表示燃气耗量,m<sup>3</sup>;Q 表示燃气燃烧不完全值,%;2%;V<sub>CO</sub> 表示燃气中 CO 体积含量,%;5%;V<sub>CH<sub>4</sub></sub> 表示燃气中 CH<sub>4</sub> 体积含量,%;95%;V<sub>CmHn</sub> 表示燃气中其他烷烃类体积含量,%.

### (4) NO<sub>x</sub> 排放

燃煤 NO<sub>x</sub> 排放计算公式:

$$G_{NO_x} = 1630 \times B \times (0.015 \times \beta + 0.000938) \quad (9)$$

燃油 NO<sub>x</sub> 排放计算公式:

$$G_{NO_x} = 1630 \times B \times (N \times \beta + 0.000938) \quad (10)$$

式中:G<sub>NO<sub>x</sub></sub> 表示 NO<sub>x</sub> 排放量,kg;B 表示耗煤量,T;β 表示燃煤中氮的转化率,%;N 表示耗油中氮含量,%;0.14%.

1.6.3 工艺排放在产品生产过程中,非能源燃烧引起的,由相关工艺引起的污染物排放称为工艺排放,煤矿开采过程中会有直接的 CH<sub>4</sub> 排放.由于油气系统的复杂性,且油气系统的甲烷逃逸排放的数量非常小,只占 0.1%,因此该部分对能源领域排放的影响可以忽略<sup>[27]</sup>.

煤矿开采及矿后活动的 CH<sub>4</sub> 排放估算主要包括 3 个方面:煤炭开采(井下开采和露天开采)、矿后活动以及甲烷回收利用,煤炭开采排放总量计算公式<sup>[28]</sup>:

$$EC_{CH_4} = (UM_{CH_4} + SM_{CH_4}) + AMA_{CH_4} - R_{CH_4} \quad (11)$$

式中:EC<sub>CH<sub>4</sub></sub> 为煤炭生产工艺的 CH<sub>4</sub> 排放总量;UM<sub>CH<sub>4</sub></sub> 为井下开采排放;SM<sub>CH<sub>4</sub></sub> 为露天开采排放;AMA<sub>CH<sub>4</sub></sub> 为矿后活动排放;R<sub>CH<sub>4</sub></sub> 为回收利用量.

我国煤炭开采以井工开采为主,原煤产量的 95% 左右来自地下,高瓦斯和突出矿井在全国亦占有相当比例,因而煤矿开采 CH<sub>4</sub> 排放量大,是重要的排放源.露天煤矿开采深度小,煤层瓦斯含量也较低,无 CH<sub>4</sub> 排放的实测数据.在估算其 CH<sub>4</sub> 排放系数时,沿用发改委的方法取全国重点煤矿低瓦斯矿井 CH<sub>4</sub> 排放系数的 50%.矿后活动 CH<sub>4</sub> 排放因子根据中国矿后活动煤产量加权平均排放系数选定,据研究,我国加权平均排放系数 1.3m<sup>3</sup>/t<sup>[29]</sup>.露天煤炭的煤层气含量非常低,其矿后活动排放忽略不计.目前国内煤矿 CH<sub>4</sub> 回收利用率仍然处于较低水平,同时没有可供使用的权威

统计数据,所以回收利用率为零。

## 2 生命周期清单

### 2.1 原煤生产

原煤生产过程中的环境负荷主要包括 3 部

分:开采和处理过程相关的资源消耗和燃料燃烧排放;原煤开采过程的工艺排放;原煤运输工具运行过程中产生的污染物排放.通过以上几个方面的链接和计算,得到原煤生产过程的能源投入及主要排放如表 6 和表 7 所示。

表 6 化石能源供应的能源输入

Table 6 Resource and energy input of fossil energy supply

输入端	原煤(MJ/MJ)	原油(MJ/MJ)	天然气(MJ/MJ)	汽油(kg/kg)	柴油(kg/kg)	焦炭(MJ/MJ)	焦炉煤气(MJ/m <sup>3</sup> )
原煤	1.050	$2.792 \times 10^{-3}$	$2.792 \times 10^{-3}$	$3.743 \times 10^{-3}$	$3.706 \times 10^{-3}$	0.118	0.851
洗精煤	$7.271 \times 10^{-4}$	-	-	$3.053 \times 10^{-3}$	$3.023 \times 10^{-3}$	1.037	1.997
焦炭	$1.050 \times 10^{-4}$	$4.000 \times 10^{-6}$	$4.000 \times 10^{-6}$	-	-	$3.186 \times 10^{-4}$	0.202
焦炉煤气	$4.000 \times 10^{-6}$	-	-	-	-	-	-
原油	-	1.113	$1.705 \times 10^{-2}$	1.371	1.358	-	-
汽油	$3.461 \times 10^{-3}$	$8.460 \times 10^{-4}$	$5.072 \times 10^{-3}$	-	-	-	-
柴油	$8.175 \times 10^{-3}$	$7.439 \times 10^{-3}$	$1.442 \times 10^{-2}$	-	-	-	-
煤油	-	-	-	$8.700 \times 10^{-5}$	$8.600 \times 10^{-5}$	-	-
燃料油	$1.400 \times 10^{-5}$	$1.166 \times 10^{-3}$	-	$3.372 \times 10^{-2}$	$3.339 \times 10^{-2}$	-	-
液化石油气	$1.000 \times 10^{-6}$	$8.700 \times 10^{-5}$	$8.700 \times 10^{-5}$	$1.860 \times 10^{-3}$	$1.840 \times 10^{-3}$	-	-
热力	$6.400 \times 10^{-5}$	-	-	-	-	-	-
天然气	$9.200 \times 10^{-5}$	$3.273 \times 10^{-3}$	1.111	-	-	$1.280 \times 10^{-4}$	$8.080 \times 10^{-2}$
电力	$0.455 \times 10^{-2}$	$1.081 \times 10^{-3}$	$1.197 \times 10^{-3}$	-	-	-	-

表 7 化石能源供应的主要污染物排放

Table 7 The main emissions of fossil energy supply

排放端	原煤(g/MJ)	原油(g/MJ)	天然气(g/MJ)	汽油(g/MJ)	柴油(g/MJ)	焦炭(g/MJ)	焦炉煤气(g/m <sup>3</sup> )
CO <sub>2</sub>	4.097	3.073	3.331	12.56	12.51	16.20	41.64
CH <sub>4</sub>	$4.530 \times 10^{-4}$	$1.740 \times 10^{-4}$	$1.890 \times 10^{-4}$	$4.440 \times 10^{-4}$	$4.430 \times 10^{-4}$	$6.930 \times 10^{-4}$	$1.817 \times 10^{-3}$
N <sub>2</sub> O	$8.740 \times 10^{-5}$	$6.175 \times 10^{-5}$	$4.890 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-4}$	$1.462 \times 10^{-4}$	$2.510 \times 10^{-4}$	$0.430 \times 10^{-4}$
SO <sub>2</sub>	$2.672 \times 10^{-2}$	$2.584 \times 10^{-2}$	$2.730 \times 10^{-2}$	$4.416 \times 10^{-2}$	$4.386 \times 10^{-2}$	0.133	0.521
CO	$6.958 \times 10^{-2}$	$3.714 \times 10^{-2}$	$4.050 \times 10^{-2}$	$5.800 \times 10^{-2}$	$5.700 \times 10^{-2}$	0.335	0.395
NO <sub>x</sub>	$1.563 \times 10^{-2}$	$7.313 \times 10^{-3}$	$6.850 \times 10^{-3}$	$2.970 \times 10^{-2}$	$2.950 \times 10^{-2}$	$6.542 \times 10^{-2}$	0.250
PM	$2.974 \times 10^{-2}$	$8.910 \times 10^{-3}$	$8.380 \times 10^{-3}$	$1.616 \times 10^{-2}$	$1.605 \times 10^{-2}$	0.151	0.203

### 2.2 原油和天然气生产

石油和天然气勘探、钻井、开采及运输的各个环节都对环境产生影响.本研究主要包括油气开采、处理和运输过程的资源投入和环境排放.石油和天然气的生命周期清单如表 6 和表 7 所示。

### 2.3 炼油

原油通过精炼得到汽油、柴油等成品油,以平均低位发热量为分配准则,计算得到原油精炼的基本物质流(表 8),即原油裂解后得到的单位产品所需原油数量,如下表所示.通过链接原油生产和运输,得到主要成品油的周期清单,以汽油和柴油为例。

表 8 成品油基本物质流

Table 8 Material flow of oil products

项目	燃料油	汽油	柴油	煤油	炼厂干气	液化石油气
所需原油量(kg/kg)	1.33	1.37	1.35	1.37	1.47	1.6

### 2.4 炼焦和制气

在炼焦和制气工业中,通常消耗洗精煤和其他洗煤.由于洗煤属于二次能源,是由原煤经过洗选得到的,因此在对炼焦和制气工业进行分析前,需要对洗精煤过程进行分析,以建立洗煤和原煤之间的分配关系.在以低位发热量作为分配基准的基础上,计算得到每生产 1kg 洗精煤需要消耗 1.36kg 原煤.通过洗精煤、炼焦和制气 3 个过程的综合分析,得到焦炭和焦炉煤气之间的分配系数为 0.892 和 0.108.从而计算生产单位焦炭和焦炉煤气的生命周期清单(表 6,表 7).

## 3 结果分析

### 3.1 清单分析

本文建立了我国化石能源生命周期清单,明确了单位能源产出的资源投入和环境排放.对于能源产出的投入端,主要以煤炭基能源为主,我国电力供应也以煤电为主,这与我国以煤炭为主的能源结构是相符的.从工艺过程的构成分析,能源消耗的 97%以上主要来自生产过程,运输占到 3%左右的比例.对于排放端,主要污染物为 CO<sub>2</sub>,主要贡献也来自于生产过程.另一种重要的温室气体 N<sub>2</sub>O 排放,原煤和原油运输过程占到了 70%以上的份额,主要原因为运输过程中水运占了一定的比例,而水运船舶行驶中 N<sub>2</sub>O 排放量达到 0.0127kg/(t·1000km)<sup>[30]</sup>.对于工艺排放温室气体 CH<sub>4</sub>,在原煤生产过程中的工艺排放占到了 57%的比例.

### 3.2 对比分析

为了反映我国化石能源生产的资源消耗和环境排放的发展与变化,将本研究结果与 2002 年我国化石能源的生命周期清单<sup>[15-16]</sup>以及国内外能源生产情况进行对比分析.

**3.2.1 与 2002 年国内比较** 为了多方位揭示 2010 年我国化石能源清单相较 2002 年发生的变化,将投入端各类能源追溯到原煤、原油、天然气三类初级能源,本文对单位能源供应的总能源投入及各类主要输入输出因子分别进行比较.

将生产单位初级能源及汽油的 2010 年的总能源投入与 2002 年进行对比,如图 2 所示.2010 年,生产单位原煤、汽油的能耗总投入分别有 12%和

4%左右的升高.原煤的生命周期能源消耗量有所增加.一方面,本文详细考虑的原煤的运输过程、运输损耗及开采效率.另一方面,近年来,我国重点产煤区的浅部煤炭资源已开采殆尽,开采深度以每年 8~12m 的速度向下延伸<sup>[31]</sup>,导致能源投入增加.这表明我国煤炭工业除了继续重视节能技术的推广外,煤炭生产与应用的地域差异问题也应该受到重视.对于次级能源的生产,炼油工业能耗增加的原因除了本文考虑了成品油的运输过程外,能源转换效率下降了约 1%<sup>[2]</sup>.与 2002 年相比,我国天然气和原油生产总能耗投入均有 10%~20%的下降,这与近年来原油和天然气的生产比重增加及生产技术提升是相辅相成的.

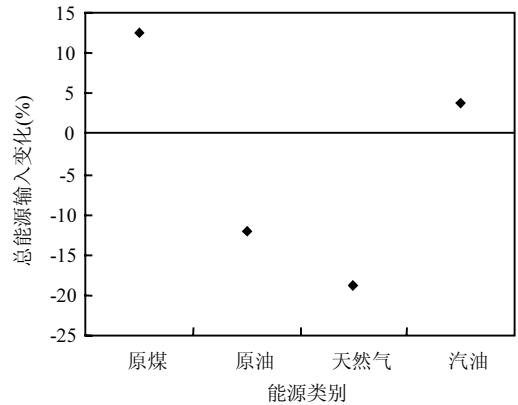


图 2 原煤、原油、天然气和汽油生产总能源投入对比图  
Fig.2 Comparative analysis of energy input for raw coal, crude oil, natural gas and gasoline between 2010 and 2002

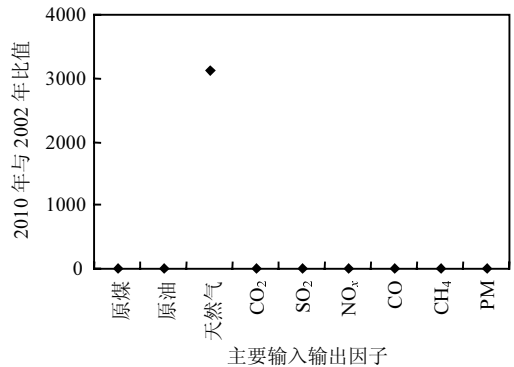


图 3 2010 年与 2002 年原煤生产主要因子对比  
Fig.3 Comparative analysis of raw coal production between 2010 and 2002

选取生命周期清单中几种重要因子,将我国2002年的清单数值设为1,2010年与之比值分别表示单位能源产出,原煤、原油、天然气的投入量比值以及CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、CH<sub>4</sub>、PM排放量比值.图3~图6分别表示了原煤、原油、天然气、汽油的各类比值情况.

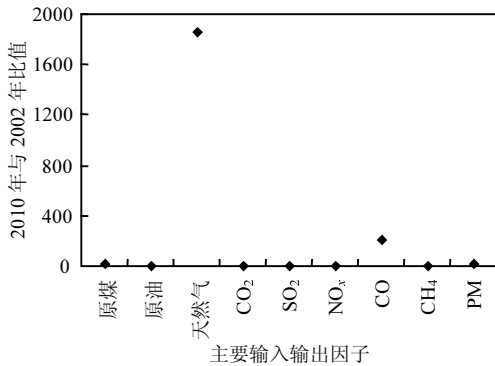


图4 2010年与2002年原油生产主要因子对比  
Fig.4 Comparative analysis of crude oil production between 2010 and 2002

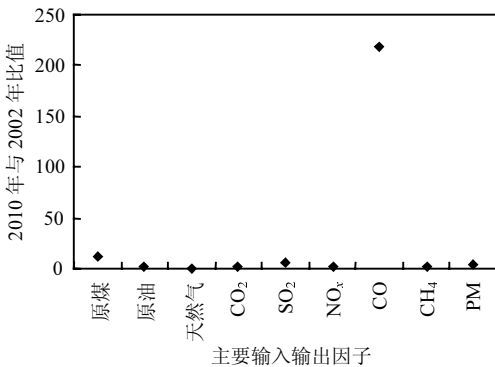


图5 2010年与2002年天然气生产主要因子对比  
Fig.5 Comparative analysis of nature gas production between 2010 and 2002

对四类能源的输入端分析可得,单位原煤和原油供应的输入因子与2002年对比可得,天然气输入比值较高,这说明在能源投入结构方面,天然气的使用在初级资源投入中的比例有所上升.对天然气供应而言,能源投入总量是减少的,但原煤投入都有所升高,这与我国煤炭资源相对丰富,原油对外依存度的不断上升有关.对于次级能源代表汽油而言,初级能源投入与2002年相比,天然

气增加较为明显,由于原油生产的天然气投入有所增加,导致后端产品的天然气投入也是增加的.

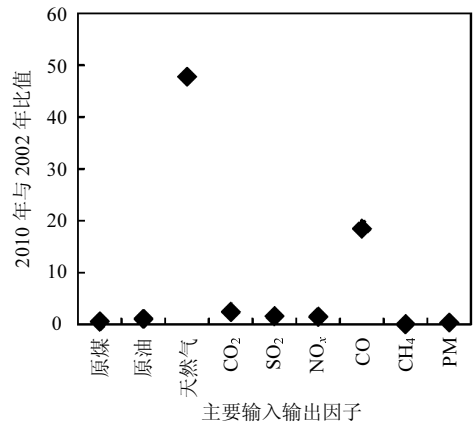


图6 2010年与2002年汽油生产主要因子对比  
Fig.6 Comparative analysis of gasoline production between 2010 and 2002

对于各类化石能源的排放而言,温室气体排放均有一定程度的下降.而上升最明显的是CO的排放,2002年的生命周期清单,CO的排放因子参考了IPCC的缺省值,本文根据环保部的计算公式对排放因子进行了本土化的修订,导致排放较高.

3.2.2 与国内其他研究对比分析 为显示本研究的可靠性,选取部分清单结果与国内相关研究进行对比分析,如表9所示.由于选取年限、研究范围的不同,导致能源投入端各类输入有所差距,但总能源投入基本类似.在排放端,选取最主要排放CO<sub>2</sub>为例,由于选取排放因子不同,导致排放有一定的差距.

3.2.3 与国外研究对比分析 将本研究与国外综述及生命周期清单数据库ecoinvent中数据进行对比分析发现(表9),排除年限选取的差距,我国能源投入及排放整体处于较高水平.一方面是能源结构问题,我国以煤炭为主的能源供应体系.另一方面是技术水平问题,我国的化石能源供应先进与落后生产能力并存,整体技术水平低.以煤炭行业为例,我国煤炭行业的科技贡献率仅为24.2%,低于世界60%的先进水平<sup>[31]</sup>.所以我国在化石能源资源消耗和排放控制方面还是需要进一步提高.

表 9 生命周期清单与国内外相关研究对比分析

Table 9 Comparative analysis of life cycle inventory

燃料种类	数据来源	研究地区	研究年份	原煤(MJ/MJ)	原油(MJ/MJ)	天然气(MJ/MJ)	总能源强度(MJ/MJ)	CO <sub>2</sub> (g/MJ)
原煤	本研究	中国	2010	1.1108	0.0182	0.0004	1.1279	4.0960
	文献[11]	中国	2007	1.1061	0.1100	0.0010	1.1720	5.7300
	文献[32]	中国	2009	1.2300	0.0080	0.0003	1.2300	2.5157
	文献[33]	中国	2008	-	-	-	-	4.3210
	文献[34]	澳大利亚	2005	1.3700	0.0146	0.0051	-	4.1000
天然气	本研究	中国	2010	0.0084	0.0354	1.0580	1.1018	3.3310
	文献[18]	中国	2007	0.0810	0.0650	1.0115	1.1575	13.5400
原油	本研究	中国	2010	0.0092	1.1288	0.0042	1.1422	3.0730
	文献[18]	中国	2007	0.0970	1.0470	0.0230	1.1670	3.0000
	文献[32]	中国	2009	0.0435	1.0600	0.0010	1.1045	-
	文献[34]	欧洲	2005	0.0004	1.0068	0.0420	1.0492	-
汽油	本研究	中国	2010	0.0148	1.3200	0.0067	1.3415	12.5600
	文献[18]	中国	2007	0.1640	1.1300	0.0490	1.3430	25.3300
	文献[32]	中国	2009	0.0500	1.2524	0.0009	1.3033	11.1670
	文献[35]	加拿大	2006	-	-	-	1.1800	-
	文献[36]	全球	2005	-	-	-	1.09-1.23	-

## 4 结论

4.1 详述了中国化石能源生命周期清单的基本计算方法,通过调查和收集相关的技术参数和生产数据,计算得到 2010 年中国原煤、原油和天然气及下游单位产品生产的生命周期清单,涉及到主要资源、能源消耗和污染物排放,并对化石能源的生命周期清单结果进行了初步的分析。

4.2 进行了完整的生命周期清单分析,不仅解释了我国化石能源的环境负荷状况,还可以为其他材料及产品的生命周期评价提供必要的基础数据.另外,本研究将能源的生命周期清单做了对比分析,通过与 2002 年我国化石能源清单对比发现,我国能源供应的资源总投入有 5%~20%左右的变化,能源投入比例有所变化,初级能源天然气投入增加;通过与国内相关研究对比发现,由于研究范围、所选参数有所不同,清单结果有所出入,但整体在一个水平线,证明本研究的可靠性;通过与国外相关研究数据对比发现,我国能源生产的资源投入和污染物排放比较高,所以从生命周期角度,我国能源系统在节能减排技术方面还需一定程度的提高。

## 参考文献:

- [1] Zoran K. Morvay, Dusan D. Gvozdenac. 工业能源与环境实用管理方法 [M]. 北京:人民邮电出版社, 2010.
- [2] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2011 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [3] 刘振亚. 中国电力与能源 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [4] Alian Dubreuil. Inventory for energy production in Canada [J]. International journal of Life cycle assessment, 2001,6(5):281-284.
- [5] Callie W. Babbitt, Angela S. Lindner. A life cycle inventory of coal used for electricity production in Florida [J]. Journal of Cleaner production, 2005,13:903-912.
- [6] Petroleum energy center. Life cycle inventory of petroleum products including transport [R]. 1998.
- [7] 夏建德,任玉珑,史乐峰. 中国煤电能源链的生命周期碳排放系数计量 [J]. 统计研究, 2010,8(2):82-89.
- [8] 刘 韵,师华定,曾贤刚. 电力企业碳足迹的生命周期核算技术体系研究 [J]. 中国人口资源与环境, 2011,21(12):321-324.
- [9] 师永定,齐永青,梁海超. 电力行业温室气体减排核算方法体系研究 [J]. 气候变化研究进展, 2010,6(1):40-46.
- [10] 余晓泓,张 超. 中国工业部门的能源效率与减排潜力分析 [J]. 产经评论, 2012,2:5-14.
- [11] 汪克亮,杨宝臣,杨 力. 考虑环境效应的中国省际全要素能源效率研究 [J]. 气候变化研究进展, 2010,6(1):40-46.
- [12] 曾 胜,刘朝明,涂 瑞. 我国能源消耗的效率评价 [J]. 科技进步与对策, 2008,25(11):201-205.
- [13] 狄向华,聂祚仁,左铁铺. 中国火力发电燃料消耗的生命周期排



- 放清单 [J]. 中国环境科学, 2005,25(5):632-635.
- [14] 郭敏晓,蔡闻佳,王 灿,等.风电场生命周期 CO<sub>2</sub> 排放核算与不确定性分析 [J]. 中国环境科学, 2012,32(4):742-747.
- [15] 袁宝荣,聂祚仁,狄向华,等.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 [J]. 现代化工, 2006,3:59-62.
- [16] 袁宝荣,聂祚仁,狄向华,等.中国化石能源生产的生命周期清单 (II)—生命周期清单的编制结果 [J]. 现代化工, 2006,4:59-61.
- [17] ISO International Standard 14040. Environmental management—Life cycle assessment Principles and framework. International Organization for Standardization (ISO). 2006. Curran MA. Life cycle assessment: Principles and practice [S]. <http://www.epa.gov/nrmr/lcaccess/pdfs/600r06060.pdf>.2006.
- [18] 欧训民,张希良.中国终端能源的生命周期化石能耗及碳强度分析 [J]. 中国软科学, 2009,52:208-214.
- [19] 国家统计局能源统计司.中国能源统计年鉴 2011 [M]. 北京:中国统计出版社, 2011.
- [20] 国家统计局.中国统计年鉴 2011 [M]. 北京:中国统计出版社, 2011.
- [21] 林 路.铁路—绿色交通的骄傲 [J]. 铁路知识, 2009,2:4-11.
- [22] 煤炭部,铁道部.国家煤炭送货办法实施细则 [Z].
- [23] 蔡博峰.煤炭燃烧 CO<sub>2</sub> 排放因子研究进展 [J]. 煤炭经济研究, 2011,31(1):56-59.
- [24] 环保部.燃料燃烧排放大气污染物物料衡算办法(暂行) [Z].
- [25] Xunmin Ou, Xiliang Zhang, Shiyan Chang. Alternative fuel buses currently in use in China: life-cycle fossil energy use, GHG emissions and policy recommendations [J]. Energy Policy, 2010, 38:406-418.
- [26] 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.
- [27] 国家气候变化崔策协调小组办公室.中国温室气体清单研究 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2007.
- [28] 乐 群,张国君,王 铮.中国各省甲烷排放量初步估算及空间分布 [J]. 地理研究, 2012,31(9):559-1570.
- [29] 郑 爽,王佑安,王震宇,等.中国煤矿甲烷向大气排放量 [J]. 煤矿安全, 2005,36(2):29-33.
- [30] 张宇峰.材料生命周期分析之内河水路货物运输的基础研究 [D]. 北京:北京工业大学, 2011.
- [31] 中国能源中长期发展战略研究项目组.中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究 [M]. 北京:科学出版社, 2011.
- [32] Ebalance-LCA 分析软件 [Z/OL]. <http://www.ike-global.com/>
- [33] 王 婧,张 旭.基于生命周期的能源上游清单分析模型改进 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009,37(4):520-524.
- [34] Database ecoinvent version3.Simapro-LCA 分析软件.
- [35] Granovskii M, Dincer I, Rosen MA. Life cycle assessment of hydrogen fuel cell and gasoline vehicles [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006,31:337-352.
- [36] Neelis M L, Faaij A P C, Hekkert M P, et, al. Natural gas as an alternative to crude oil in automotive fuel chains well to wheel analysis and transition strategy development [J]. Energy Policy, 2005,33:579-594.

作者简介: 丁 宁(1986-),女,河北保定人,博士,主要从事产业生态学研究.发表论文 2 篇.

## 国外城市水体综合整治案例

韩国首尔清溪川:复原工程还原自然面貌

韩国清溪川全长 11km,自西向东流经首尔市,流域面积 51km<sup>2</sup>. 20 世纪 40 年代,随着城市化和经济的快速发展,大量的生活污水和工业废水排入河道,后来又实施河床硬化、砌石护坡、裁弯取直等工程,严重破坏了河流自然环境,导致流量变小、水质变差,生态功能基本丧失.20 世纪 50 年代,政府用 5.6km 长、16m 宽的水泥板封盖河道,使其长期处于封闭状态,几乎成为城市下水道.20 世纪 70 年代,河道封盖上建设公路,并修建了 4 车道高架桥,一度被视为“现代化”标志.

21 世纪初,韩国政府下决心对其开展综合整治和水质恢复,主要采取了 3 方面措施:一是疏浚清淤.2005 年,总投资 3900 亿韩元(约 3.6 亿美元)的“清溪川复原工程”竣工,拆除了河道上的高架桥,清除了水泥封盖,清理了河床淤泥,还原了自然面貌.二是全面截污.两岸铺设截污管道,将污水送入处理厂统一处理,并截流初期雨水.三是保持水量.从汉江日均取水 9.8 万 t,通过泵站注入河道,加上净化处理的 2.2 万 t 城市地下水,总注水量达 12 万 t,让河流保持 40cm 水深.

摘自中国环境报

2015-04-20