

# 煤制天然气碳排放全生命周期分析及横向比较

付子航

中海石油气电集团有限责任公司技术研发中心

付子航.煤制天然气碳排放全生命周期分析及横向比较.天然气工业,2010,30(9):100-104.

**摘要** 在中国天然气市场需求旺盛、供需缺口快速扩大的大背景下,煤制天然气(SNG)迎来了大规模的投资与发展热潮。然而,随着“低碳经济”发展模式的转变预期,SNG又面临着“低碳”与否的争议。为此,采用全生命周期(LCA)评价方法对SNG项目从原煤开采到转化为煤制天然气、直至进入终端消费全过程的直接和间接二氧化碳排放及其温室气体排放进行了清单分析。同时,对SNG与煤层气、液化天然气、管输天然气的全生命周期二氧化碳排放清单进行了横向比较,将相关产业链划分为国外和国内两个环节并进行分析,结果认为LNG在国际贸易中具有明显的碳减排优势。结合美国大平原SNG工厂碳减排对我国的启示,提出中国发展SNG的“低碳”途径与选择,并呼吁应从多方面谨慎对待具体SNG项目的前期规划和研究。

**关键词** 煤制天然气 液化天然气 煤层气 管输天然气 生命周期分析 横向比较 二氧化碳捕捉与封存

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2010.09.025

## 1 “低碳经济”与中国煤制天然气的发展

2009年11月国务院常务会议决定,“到2020年我国单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%~45%”作为约束性指标纳入国民经济和社会发展中长期规划。近期的研究表明<sup>[1]</sup>,即使实施“低碳约束”,传统化石能源仍是我国能源构成主体,煤炭居各类能源之首的情况到21世纪中叶仍难以根本改观。

由于国产天然气的总量和年增长率无法满足中国天然气市场的需求和增长(见表1),LNG进口规模迅速增加,中亚、中缅、中俄等管道天然气(PNG)进口也将逐步引入,因此我国煤制天然气(Synthetic Natural Gas,SNG)迎来了投资和发展的热潮。截至2010年3月,国家发改委已经分别核准了大唐国际克什克腾、内蒙古汇能及大唐辽宁阜新3个总计 $96 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的煤制天然气项目。2010年8月5日,新疆伊犁年产 $55 \times 10^8 \text{ m}^3$ 煤制气项目获批,成为第4个经国家核准的煤制天然气项目。

应该承认,从保障我国天然气供应安全、平抑进口天然气价格波动、多元化供应角度看,发展SNG有积极的意义。但另一方面,有观点认为SNG是在一次能

表1 中国天然气生产、消费量统计与预测表<sup>1)</sup>  $10^8 \text{ m}^3$

年份	产量	消费量	进口量	能源消费结构比例	
				天然气	煤炭
2008	761.0	807.0	44.4	3.8%	68.7%
2009	830	874.5	44.5	3.95%	68.7%
2010	900	1 000	100	4.2%	67.5%
2020	1500	2 210	710	7.4%	53.8%~58.1%
国际原油、天然气、煤比价:1/0.6/0.2					
中国原油、天然气、煤比价:1/0.24/0.17					

注:1)本表数据依据本文参考文献[1-2],2010、2020年数据取中间值。

源之间进行转换,成本高昂且过程并不“低碳”,不符合“低碳经济”的大方向。其实,煤制天然气的过程是否“低碳、高效”、是否值得大规模发展,不应仅以某一个环节的能效作为评价基准。只有采用全生命周期评价(Life Cycle Assessment,LCA)的方法测算、评价SNG从煤炭开发、煤制气生产和最终利用全过程的能量消耗和环境排放,并通过与目前发展势头良好的煤层气(Coal bed methane,CBM)、LNG、PNG进行横向比较,才能系统、客观地认识这些产业的优劣,准确把握SNG产业化过程中的突出问题,设法进行绩效改善。

**作者简介:**付子航,1979年生,工程师,硕士;2002年毕业于原石油大学(北京)并获硕士学位,主要从事LNG项目建设和技术研发工作。地址:(100027)北京市朝阳区东三环北路甲2号京信大厦2837室。电话:(010)84522951。E-mail:fuzh@cnooc.com.cn

## 2 LCA方法及其在本研究中的应用方式

LCA是一种重要的环境管理工具,用于评价产品、工艺过程或活动从原材料的采集和加工到生产、运输、销售、使用、回收和最终处理的整个生命周期系统环境负荷的完整过程。上世纪早期一个著名案例是美国中西部资源研究所(MRI)对可口可乐饮料包装瓶进行全生命周期评价,其结果促使可口可乐公司抛弃了长期使用玻璃瓶转而采用塑料瓶包装<sup>[3]</sup>。

ISO 14040将生命周期评价分为互相联系的、不断重复进行的4个步骤:目的与范围确定、清单分析、影响评价和结果解释。其中,清单分析是LCA的基础,对产品、工艺或活动在其整个生命周期阶段的资源、能源消耗和向环境的排放物进行数据量化分析,核心即建立以产品功能单位表达的产品系统的输入和输出清单。至于影响评价阶段由于在方法上存在较多争议,实际还处于概念化阶段<sup>[3]</sup>。因此不在本文讨论范围之内。本文对SNG的横向比较主要探讨ISO框架的第一、二、四3个步骤的结果。由于国内在LCA基础的清单研究部分总体程度较浅且侧重点各有不同,援用数据来源各有不同且中间过程忽略较多,本研究中尽可能地进行的文献和数据追溯,同时参考国内和国际两个口径的相关数据指标,同时对于最终输出结果进行比对和衡量。由于实际援用资料较多,本文仅列出较重要的参考文献。

## 3 SNG碳排放的LCA分析

全面进行LCA分析是一个非常复杂的系统工程,包括能耗、排放等多个方面,本文研究目标和评价指标仅以CO<sub>2</sub>为主的温室气体进行数据输出。为适当简化工作量并便于直观比较,涉及运输载体、厂房设备等基础设施的生命周期能耗和排放等所占比例甚低的部分均不计入。此外,温室气体主要成分包括CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>及N<sub>2</sub>O,而CH<sub>4</sub>的温室效应达到CO<sub>2</sub>的21倍,N<sub>2</sub>O的温室效应为310倍,较多研究采用“当量碳排放”的输出指标。但不同研究往往采用数据源不同,CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的实际输出结果经常差别较大,而其当量值较高,影响最终输出的准确度。为便于从结构上清晰比较,本文采用CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>及N<sub>2</sub>O三种输出结果。

根据SNG终端消费方式的不同,SNG系统边界在终端也有所不同。为了便于后面与CBM、LNG、PNG进行横向比较和分析,根据SNG的消费结构,这里考虑发电作为能源消费终端。SNG从原料获取到作为燃料的终端消费,其评价系统边界包括:煤炭开

采、煤炭洗选排矸、煤炭运输、SNG工厂加工转换、SNG管道运输、SNG发电。其中,在煤炭的开采、洗选及运输阶段,主要环境负荷包括燃煤、燃油的消耗,开采过程中的瓦斯、矸石等污染物排放,采煤相关工业锅炉的燃烧排放,运输过程的损耗及污染物排放。基于LCA生命周期清单,可以对SNG生产流程供应链进行管理,以改善SNG的生命周期对环境的负面影响。

### 3.1 煤炭上游开采、洗选及坑口短距离运输

根据本文参考文献[4]的统计,煤炭在开采、洗选(包括坑口附近的短距离运输)阶段的排放清单如表2。

表2 煤炭开采、洗选阶段排放清单表

环境负荷项目	CO <sub>2</sub> / g · MJ <sup>-1</sup>	CH <sub>4</sub> / g · MJ <sup>-1</sup>	N <sub>2</sub> O / mg · MJ <sup>-1</sup>
原煤开采	4.259	0.422	0.062
洗煤	5.733	0.425	0.172

### 3.2 煤炭运输

运输阶段的污染物排放主要来自于燃料燃烧(汽油和柴油)的排放。不同的运输方式,其燃料种类、能源强度及燃料燃烧排放系数均不同。其中,汽车、油轮、货船和火车的单位载重单位里程燃料消耗量分别为0.102 67、0.100 62、0.100 30、0.100 72 kg/(t · km),燃油的生命周期温室气体排放<sup>[5-6]</sup>见表3。

表3 燃油(含上游和使用过程)与管道运输的环境排放因子表

排放因子	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
柴油/g · MJ <sup>-1</sup>	90.4	5.80 × 10 <sup>-2</sup>	2.50 × 10 <sup>-2</sup>
管道运行能耗/ kg · (kWh) <sup>-1</sup>	9.94 × 10 <sup>-1</sup>	5.00 × 10 <sup>-6</sup>	3.18 × 10 <sup>-6</sup>

### 3.3 SNG工厂加工

根据本文参考文献[7]及其他资料,采用主流的碎煤加压鲁奇气化技术时,SNG工厂以产品计量的工艺和公用工程(锅炉、发电等)CO<sub>2</sub>排放数据为0.126 t/GJ,排放的CH<sub>4</sub>及N<sub>2</sub>O基本为0。褐煤热值为14.4 MJ/kg。

### 3.4 SNG运输

SNG运输同常规的天然气管道运输。根据本文参考文献[8],中国钢材生产的环境排放因子:CO<sub>2</sub>为8 200 g/kg,CH<sub>4</sub>为18.008 g/kg。SNG管道运输的能耗指标,参照国内近年来的新建工程数据,即0.556 8 MJ/(10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> · km)。这里把能耗折合成电

力,来源以煤电为主,其环境排放指标取值参照本文参考文献[5],结果见表3。

### 3.5 SNG发电

SNG发电同常规的天然气发电。由于所占比例甚小,在忽略电厂建设用材、电厂建设及退役产生的气体排放后,参照本文参考文献[5,9]可得出天然气联合循环发电的环境排放清单,见表4。

表4 天然气联合循环发电的环境排放清单表 kg/(kWh)

温室气体排放	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
天然气发电	0.371	4.51×10 <sup>-5</sup>	1.25×10 <sup>-5</sup>

### 3.6 SNG全生命周期的碳排放清单汇总

根据中国资源与市场分布的实际情况,这里考虑3种方案:①SNG工厂建址于煤矿坑口附近,通过1000 km的长输管道运输至目标市场(SNG1);②SNG工厂建目标市场附近,通过1000 km火车货运煤炭至SNG工厂(SNG2);③基本情况同②,但采用船运(SNG3)。SNG工厂的加工转换效率取52.6%,SNG发电效率取52%。SNG项目作为煤化工的一种,在CO<sub>2</sub>捕集方面具有天生的优势,如果按照可实现的捕集效率95%计算,则对SNG生命周期内的碳排放带来重大影响。SNG的LCA碳排放清单汇总结果见表5。

表5 SNG的LCA碳排放汇总清单表

kg/(kWh)

生命周期阶段	环境排放	CO <sub>2</sub>	SNG工厂捕集CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
煤炭上游	SNG1、2、3	1.32×10 <sup>-1</sup>	1.32×10 <sup>-1</sup>	1.11×10 <sup>-2</sup>	3.08×10 <sup>-6</sup>
	SNG1	0	0	0	0
煤炭运输	SNG2	3.58×10 <sup>-1</sup>	3.58×10 <sup>-1</sup>	2.30×10 <sup>-4</sup>	9.91×10 <sup>-5</sup>
	SNG3	3.57×10 <sup>-1</sup>	3.57×10 <sup>-1</sup>	2.29×10 <sup>-4</sup>	9.87×10 <sup>-5</sup>
SNG工厂加工	SNG1、2、3	8.72×10 <sup>-1</sup>	4.36×10 <sup>-2</sup>	—	—
	SNG1	2.88×10 <sup>-2</sup>	2.88×10 <sup>-2</sup>	1.45×10 <sup>-7</sup>	9.20×10 <sup>-8</sup>
SNG运输	SNG2	0	0	0	0
	SNG3	0	0	0	0
SNG发电	SNG1、2、3	3.71×10 <sup>-1</sup>	3.71×10 <sup>-1</sup>	4.51×10 <sup>-5</sup>	1.25×10 <sup>-5</sup>
	SNG1	1.40	0.58	1.11×10 <sup>-2</sup>	1.57×10 <sup>-5</sup>
LCA汇总	SNG2	1.73	0.90	1.11×10 <sup>-2</sup>	1.14×10 <sup>-4</sup>
	SNG3	1.73	0.90	1.11×10 <sup>-2</sup>	1.14×10 <sup>-4</sup>

注:符号“—”表示无法取得数据,下同。

## 4 SNG与LNG、CBM及PNG碳排放的LCA横向比较

由于LNG、PNG为同一上游开采过程,为了统一测算标准,根据本文参考文献[4]和美国NETL(国家能源技术实验室)对天然气开采、处理阶段排放清单进行综合处理后,见表6。天然气开采效率取96%,处理率取96%。

表6 天然气及煤层气开采、处理阶段排放清单表

环境负荷项目	CO <sub>2</sub> /g·MJ <sup>-1</sup>	CH <sub>4</sub> /g·MJ <sup>-1</sup>	N <sub>2</sub> O/mg·MJ <sup>-1</sup>
天然气开采、处理	11.909	0.118	0.154
天然气上游(美国NETL)	8.122	0.102	—
CBM上游	8.122	2.270	0.154

煤层气(CBM)现阶段总体利用率不高,分为地面抽采和井下抽采两种。这里主要考虑具有大规模开发价值的地面抽采,典型的CBM中CH<sub>4</sub>含量普遍在95%左右,取地面抽采利用率为70%。由于普遍缺乏CBM开采与处理过程中的排放资料,这里参照天然气的开采阶段清单,但甲烷排放量有所提高。参见表6。

根据国外相关文献<sup>[10-11]</sup>,天然气在大型液化厂液化、LNG海运(按4000 km考虑)、LNG在接收终端重新气化为天然气这3个阶段的碳排放清单见表7。液化工厂的液化率取92%。

考虑到实际情况和可比性,LNG气化后的运输距离按200 km考虑,CBM和PNG仍按1000 km的运距。由此可以按统一基准编制出LNG、CBM、PNG的LCA碳排放汇总清单,见表8~10。

表 7 LNG 液化、海运及再气化阶段排放清单表 g/m<sup>3</sup>

环境负荷项目	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
天然气液化	280.22	17.02	—
LNG 海运	41.35	0.03	—
LNG 再气化	8.88	0.03	—

表 8 LNG 的 LCA 碳排放汇总清单表 kg/(kWh)

生命周期阶段	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
天然气开采、处理	0.101	1.00×10 <sup>-3</sup>	1.31×10 <sup>-6</sup>
天然气液化	6.00×10 <sup>-2</sup>	3.64×10 <sup>-3</sup>	—
LNG 海运	1.73×10 <sup>-3</sup>	5.85×10 <sup>-6</sup>	—
LNG 再气化	1.70×10 <sup>-3</sup>	5.73×10 <sup>-6</sup>	—
NG 运输	5.75×10 <sup>-3</sup>	2.89×10 <sup>-8</sup>	1.84×10 <sup>-8</sup>
NG 发电	0.371	4.51×10 <sup>-5</sup>	1.25×10 <sup>-5</sup>
LCA 汇总	0.541	4.70×10 <sup>-3</sup>	—

表 9 CBM 的 LCA 碳排放汇总清单表 kg/(kWh)

生命周期阶段	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
CBM 上游	8.28×10 <sup>-2</sup>	2.32×10 <sup>-2</sup>	1.57×10 <sup>-6</sup>
NG 运输	2.88×10 <sup>-2</sup>	1.45×10 <sup>-7</sup>	9.20×10 <sup>-8</sup>
NG 发电	0.371	4.51×10 <sup>-5</sup>	1.25×10 <sup>-5</sup>
LCA 汇总	0.483	2.32×10 <sup>-2</sup>	1.42×10 <sup>-5</sup>

表 10 PNG 的 LCA 碳排放汇总清单表 kg/(kWh)

生命周期阶段	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
天然气开采、处理	8.95×10 <sup>-2</sup>	6.86×10 <sup>-4</sup>	1.16×10 <sup>-6</sup>
NG 运输	2.88×10 <sup>-2</sup>	1.45×10 <sup>-7</sup>	9.20×10 <sup>-8</sup>
NG 发电	0.371	4.51×10 <sup>-5</sup>	1.25×10 <sup>-5</sup>
LCA 汇总	0.489	7.31×10 <sup>-4</sup>	1.38×10 <sup>-5</sup>

将表 5 与表 8~10 进行比较分析,可以得出如下结论(见图 1、2):

1)在 SNG 工厂建址选择和原料、产品运输方案的基本选择中,相对于临近市场择址建厂同时远距离运输原料而言,坑口建厂而 SNG 产品通过长距离管道输送至下游市场带来的 CO<sub>2</sub> 排放最低。该方案符合国内大多数 SNG 项目的安排,也作为本文中的代表方案。

2)对于 SNG,其 CO<sub>2</sub> 排放总量中占主要权重的阶段是 SNG 工厂加工和 SNG 发电,分别占 62%、26%。在以天然气联合循环发电作为能源终端时,SNG 全生命周期内 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 及 N<sub>2</sub>O 三种温室气体的排放指标均为常规天然气的 2~3 倍。其中,SNG 工厂阶

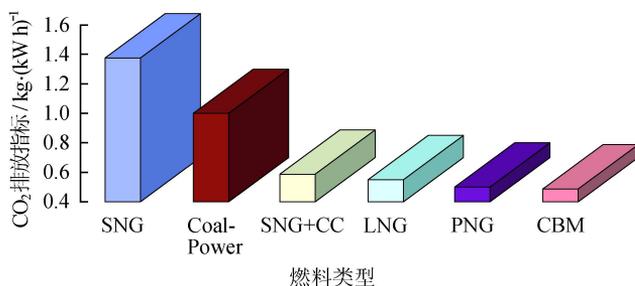


图 1 4 类燃料(含煤及 SNG 碳捕集对比)二氧化碳排放指标图

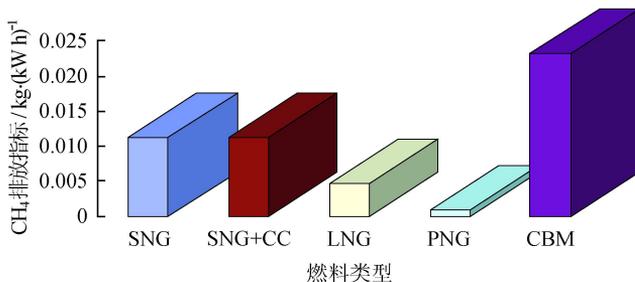


图 2 4 类燃料(含 SNG 碳捕集)甲烷排放指标图

段为煤化工过程,即固态碳转化为气态碳的过程,总体转化为 CH<sub>4</sub> 的效率偏低,其 CO<sub>2</sub> 排放量最高,与煤化工的特性是一致的。

如果在 SNG 工厂采取了 CO<sub>2</sub> 捕集措施后,CO<sub>2</sub> 排放总量仅有原来的 41% 左右,主要排放贡献调整为 SNG 发电(占 41%)和煤炭运输阶段(占 39%),CO<sub>2</sub> 排放指标与 LNG 和管输天然气非常接近。如果天然气联合循环发电厂紧邻 SNG 工厂,而 LNG 或管输天然气的供气距离进一步增加时,有可能出现“SNG+CC”模式的 LCA 二氧化碳排放指标低于后两者的情况。

3)在天然气联合循环发电为能源终端的情况下,SNG、SNG+CC(SNG 工厂阶段进行碳捕集)、LNG、PNG 及 CBM 全生命周期的 CO<sub>2</sub> 的排放比例为 2.90 : 1.20 : 1.12 : 1 : 1;CH<sub>4</sub> 的排放比例为 0.48 : 0.48 : 0.20 : 0.32 : 1。由于无法取得 LNG 部分阶段的 N<sub>2</sub>O 指标,但相关资料显示 LNG 与常规天然气全生命周期的 N<sub>2</sub>O 排放指标基本相同。因此,对应于上述 5 类能源形式的 N<sub>2</sub>O 排放比例为 1.11 : 1.11 : 0.97 : 0.97 : 1。

4)SNG 全生命周期内的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 及 N<sub>2</sub>O 三种温室气体的排放指标均为常规天然气的 2~3 倍。根据前面的分析,煤炭的上游生产过程和 SNG 工厂加工阶段在 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 排放量的总体权重最高。

5)从本文参考文献[5,9,12]提供的燃煤电厂 CO<sub>2</sub>

排放量范围 0.84~1.15 kg/(kWh)看,SNG 全生命周期的 CO<sub>2</sub> 排放指标甚至要高于燃煤电厂。这点可以从 SNG 工厂转换效率和燃气电厂能源效率的乘积与燃煤电厂的能源效率的关系得出一般意义上的相同结论。因此,无论是 SNG 的能源转换效率还是其“低碳”程度,确实难以得到积极的评价。这一点对于当前蜂拥而上的 SNG 大型项目具有参考意义。

6)从各生产阶段划分为国内和国外两个环节看:对于 SNG 而言,SNG 工厂生产和燃气电厂生产两个阶段的二氧化碳排放占其总量的 88.5%,因此,考虑其产业链划分国内与国外环节的必要性不大;对于 CBM 和 PNG 的情况类似。而对于大型 LNG 接收站项目而言,国内环节、国外环节的二氧化碳排放分别占 70%、30%。因此,对 LNG 接收站项目,其在国内环节的 CO<sub>2</sub> 排放指标仅有常规天然气 LCA 碳排放量的 77%,最“低碳”。该结论对于逆向指导能源原料或产品进口较为重要。

## 5 结论和建议

应说明的是,本文基础数据均来自相关文献,并非直接依据国家相关行业最新统计数据计算而来(工作量太大),即并非经系统研究后的统计平均值,可视为可接受范围内的样本值。因此,本文相关数据结果的绝对值可用于参考,而对 SNG 各个阶段温室气体排放物的比例及 SNG、LNG 与常规天然气用于发电能源终端的碳排放比较结果,具有明显的意义,且与国内外更加系统的相关研究结果一致。

根据本文的分析和讨论,对我国发展煤制天然气的“低碳”问题和途径选择有如下结论和建议。

1)从 SNG 产品利用方向上看,可以认识到,SNG 本身作为一种不够“低碳”的煤化工能源产品,再进行二级能源间平行转换(如燃气发电),是造成能源浪费的。直接用于普通城镇燃气应是更加合理的选择。

2)世界上唯一在运行的美国北达科塔州的美国大平原 SNG 工厂<sup>[13]</sup>无论是其选址或多产品联产方面完全可以成为国内再建和筹建中的 SNG 项目的范例。但最重要的一点是,自 2000 年以来,美国大平原工厂在技术和经济上均成功地进行 CO<sub>2</sub> 捕集与封存,其重要意义在于:世界唯一在运行的 SNG 工厂同时还是 CO<sub>2</sub> 捕集和处理的技术与生产项目的样板。这对于我国当前蜂拥而上的大型 SNG 项目极富借鉴意义,在

条件合适的情况下其关键性思路甚至可以直接移植。在“低碳经济”的预期方向下,国内的 SNG 项目应充分发挥其高效碳捕捉的优势、积极设法进行 CO<sub>2</sub> 商业化利用和封存,转化 SNG 生命周期中过高的环境“碳负荷”劣势,甚至应把此作为 SNG 产业发展的必要途径;在此基础上,因地制宜,慎重、认真研究选址和关联产业的布局问题。

## 参 考 文 献

- [1] 国家发展和改革委员会能源研究所课题组.中国 2050 年低碳发展之路能源需求暨碳排放情景分析[M].北京:科学出版社,2009.
- [2] 余黎明,白颐.我国天然气工业发展的机会和条件探析[J].化学工业,2009,27(12):1-9,16.
- [3] 樊庆铤,敖红光,孟超.生命周期评价[J].环境科学与管理,2007,32(6):177-180.
- [4] 欧训民,张希良.中国终端能源的全生命周期化石能耗及碳强度分析[J].中国软科学,2009(增刊 2):208-214.
- [5] 刘敬尧,钱宇,李秀喜,等.燃煤及其替代发电方案的生命周期评价[J].煤炭学报,2009,34(1):133-138.
- [6] 郑元,桂萌.生命周期分析在能源技术比较中的应用[J].上海环境科学,2000,19(8):358-360.
- [7] 刘志光,龚华俊,余黎明.我国煤制天然气发展的探讨[J].煤化工,2009(2):1-5.
- [8] 杨建新,刘炳江.中国钢材生命周期清单分析[J].环境科学学报,2002,22(4):519-522.
- [9] 黄智贤,吴燕翔.天然气发电的环境效益分析[J].福州大学学报:自然科学版,2009,37(1):147-150.
- [10] TAMURA ITARU, TANAKA TOSHIHIDE, KAGAJO TOSHIMASA, et al. Life cycle CO<sub>2</sub> analysis of LNG and city gas[J].Applied Energy,2001,68(3):301-319.
- [11] OKAMURA TOMOHITO, FURUKAWA MICHINOBU, ISHITANI HISASHI. Future forecast for life cycle greenhouse gas emissions of LNG and city gas 13A[J]. Applied Energy,2007,84(11):1136-1149.
- [12] 晓斌,张阿玲,陈贵锋.中国洁净煤发电的生命周期清单分析[J].洁净煤技术,2005,11(2):1-4.
- [13] Office of Fossil Energy. Practical experience gained during the first twenty years of operation of the Great Plains Gasification and implications of future projects[R]. Washington, DC:U.S. Department of Energy,2006:1-66.

(收稿日期 2010-07-11 编辑 赵 勤)