

DOI: 10.5846/stxb201507281584

丁宁 杨建新, 吕彬. 中国省级火电供应生命周期清单分析. 生态学报 2016, 36(22): 7192–7201.

Ding N, Yang J X, Lu B. Life cycle inventory analysis of provincial thermal electricity in China. Acta Ecologica Sinica 2016, 36(22): 7192–7201.

中国省级火电供应生命周期清单分析

丁 宁, 杨建新*, 吕 彬

中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点室, 北京 100085

摘要: 应用生命周期评价方法, 建立了我国各省区的火电供应生命周期清单。清单分析结果表明, 我国各省区单位火电供应的生命周期清单之间, 及与全国单位火电供应的生命周期清单之间均存在一定差异, 以总能源投入和全球变暖潜值为例进行了分析。在全球变暖潜值方面, 我国单位火电供应的平均值为 1.05 kg/kWh。云南等 15 个省区的单位火电全球变暖潜值与全国平均水平相差 $\pm 10\%$ 以上。如果基于全国单位火电供应的平均全球变暖潜值计算各省火电总量全球变暖潜值, 与基于各省单位火电全球变暖潜值计算的结果相比, 也存在一定的差距。15 个省区与基于全国平均值计算的结果相差 $\pm 10\%$ 以上, 表明了核算各省区火电清单的必要性。中国省级火电供应生命周期清单为省区级别的材料、产品、产业等生命周期评价提供数据支撑, 也为各省区电力节能减排提供了理论基础。

关键词: 火电; 生命周期评价; 生命周期清单; 全球变暖潜值

Life cycle inventory analysis of provincial thermal electricity in China

DING Ning, YANG Jianxin*, LU Bin

State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Based on the life cycle assessment method, this paper developed the life cycle inventory of thermal electricity at provincial level in China. In this study, the data source and accounting method for thermal electricity were described in consideration of varies of primary energy and conversion technologies at each province. The inventory results indicated that, there are large differences between the provinces in context of energy requirements and Global Warming Potential (GWP) for production of 1 kWh thermal power. Averagely, 1.05 kg CO_{2-eq} of GWP was produced to provide 1kWh thermal electricity. The GWP values in 15 provinces were higher or lower more than $\pm 10\%$ compared with the national average level. GWP is nearly entirely caused by thermal power the discrepancies are more than $\pm 10\%$ in 15 provinces between based on the national average GWP and provincial GWP. This discrepancy shows that it is necessary to develop the life cycle inventory database of thermal electricity at provincial scale. This provincial database can provide better data for life cycle assessment of products and industry, which also promotes the energy conservation and emissions reduction in electricity sectors at both provincial and national level.

Key Words: thermal electricity; life cycle assessment; life cycle inventory; global warming potential

电力生产是资源耗竭和环境污染的重点行业^[1]。我国以煤为主的能源结构决定了火电在我国长期占据主导地位。2013 年, 我国火力发电量占总发电量的 78.6%, 并且大陆 31 个省、自治区、直辖市中 20 个省区火力发电比例达到了 70% 以上^[2]。火电是消耗化石能源的主要领域, 2012 年, 火力发电消耗煤炭 178531 万

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05140200)

收稿日期: 2015-07-28; 修订日期: 2016-04-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangjx@rcees.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

吨,占全国煤炭消耗总量的 50.6%。电力行业也是我国污染物减排的关键领域,电力行业的二氧化硫排放量占全国排放量的比例为 47%,烟尘排放量占全国排放量的 21%^[3]。

生命周期评价是国际通用并认可的环境影响评价工具,是一种客观评价产品、工艺过程或活动环境负荷的方法。该方法通过识别和量化所有物质和能量的使用以及环境排放,来评价由此造成的环境影响,评估和实施相应的改善环境表现的机会。生命周期评价包括产品、过程或活动从原材料获取和加工、生产、运输、销售、使用、再循环到最终处置的各个阶段^[4]。

国内外许多学者对电力进行了生命周期评价研究。这些研究主要在国家尺度展开,如日本^[5],葡萄牙^[6],毛里求斯^[7],丹麦^[8]等学者利用生命周期评价方法,计算了本国电力供应的温室效应、不可再生资源耗竭等环境影响。另有学者以节能减排为目标,评价了不同发电方式的减排潜力^[9-13],以及评价了不同发电技术的环境影响^[14],为节能减排提供技术支撑。

近年来,一些学者对我国电力进行了生命周期评价。在国家尺度,狄向华等^[15]利用生命周期评价方法,建立了 2005 年我国火力发电生命周期清单,揭示了我国单位火电的燃料消耗与污染物排放。Ou 等人^[16]对我国煤炭发电、原油发电和天然气发电进行了生命周期能耗和温室气体排放进行了评价。Liang 等人^[17]对我国清洁煤发电技术进行了评估,分析了超临界发电技术、整体煤气化联合循环发电等技术的减排潜力。在区域尺度,候萍等^[18]以我国电网为基本区域单位,计算了华北电网、东北电网、华东电网等七大电网单位售电碳排放因子。还有一些学者对我国火电供应的全国平均碳排放进行了研究^[19]。

这些研究从全国平均水平,解析了我国火力发电的生命周期碳排放。但是我国省区电力生产由于装机容量、技术水平、发电投入能源结构不同,在环境排放方面存在差异,所以非常有必要对各个省区火电供应进行生命周期评价研究。从生命周期方法的发展方向看,清单数据库的本地化是一个重要的研究方向。

基于我国省级层次的火电供应生命周期评价,能够明确我国省区火力发电的环境负荷,为火电行业节能减排提供依据,为省区的电力环境管理提供支撑,为下游的材料、产品等生命周期评价提供基础数据。

1 方法与数据

1.1 目的与范围的确定

开展省区火电供应生命周期清单分析旨在量化我国各省区的火电供应生命周期环境影响,提供省区水平的生命周期评价基础数据,为其它产品开展生命周期评价提供更加精准的数据。

本研究系统边界包括火力发电及配送过程以及上游能源的供应,不包括发电设备及电厂等基础设施建设(图 1)。电力供应的生命周期清单计算,考虑了电力输送过程中的损耗。电力生命周期评价的功能单位确定为 1kWh 火电供应。

本研究基于生产端的生命周期评价,不涉及跨省调用。本文考虑配送过程,只是为了突出输电损耗,以及在损耗基础上增加的发电端的投入。由于缺乏西藏的火电统计数据,所以本研究包括除西藏之外的大陆 30 个省、自治区及直辖市。

1.2 生命周期清单计算方法

火力发电的生命周期清单包括两部分,直接部分和间接部分。在火力发电厂的能源投入及污染物排放属于直接部分。输入端投入能源的生命周期清单属于间接部分。计算公式如下:

$$\text{Input} = \sum_{j=1}^n DI_j + \sum_{j=1}^n II_j$$

$$\text{Output} = \sum_{j=1}^n DO_j + \sum_{j=1}^n IO_j$$

式中,Input 表示清单输入端;Output 表示清单输出端; DI_j 表示第 j 类能源的直接投入; II_j 表示第 j 类能源的间接投入; DO_j 表示第 j 类污染物的直接排放; IO_j 表示第 j 类污染物的间接排放。

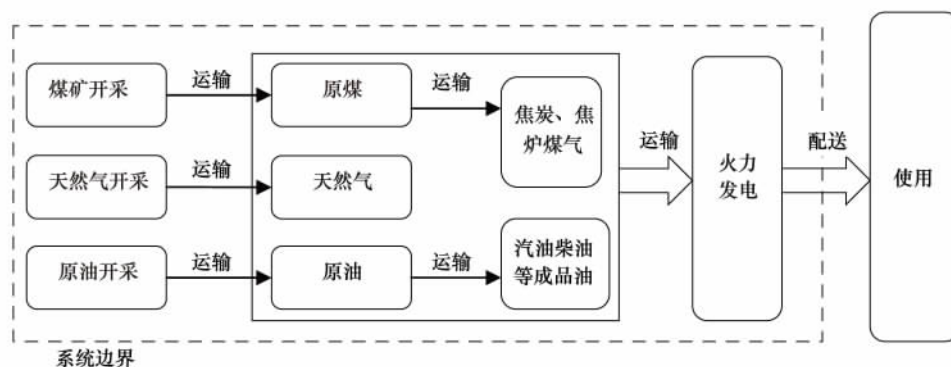


图1 研究系统边界

Fig. 1 The system boundary

1.3 数据来源

本研究涉及的数据,主要来源于能源统计年鉴中的各省市及全国火力发电平衡表^[20]。由于可获得数据的局限性,未考虑不同省区使用能源(煤炭)种类差异。研究所涉及到的能源燃烧排放因子均采用本土化的统一数据,来自于文献^[21]。上游的原材料、能源等基础数据则来源于生命周期评价数据库 RCEES2012(中国科学院生态环境研究中心开发)。

1.4 模型建立

本文在数据收集和处理的基础上,在生命周期评价专业软件 SimaPro7.3 中建立火电生命周期评价模型。此模型包括输入端和输出端两部分。输入端主要包括各类能源的直接投入以及这些能源生产所需的间接投入。输出端包括发电过程能源燃烧产生的排放以及投入的能源生产过程的间接排放。

2 生命周期清单分析

通过数据收集、处理,建立了不同省区火力发电生命周期清单。不同省区的火电清单输入端如表1所示。火力发电是大气污染物排放的主要来源,所以本文选取关注度较高的几类主要大气污染物进行研究,如表2所示。

2.1 各省区单位火电供应生命周期能耗分析

为了对比不同省区火力发电能源消耗的差异,利用平均低位发热量因子^[19]对单位电力供应的生命周期总能耗进行计算。我国单位火电供应的平均能源投入为 13.05 MJ/kWh。根据各省单位火电供应能耗及与我国火电供应平均生命周期能耗的差距,将我国省区分为五类,如图2所示。我国各省单位火电供应的能耗相差悬殊,分布在 8—24 MJ/kWh。云南等四个省区单位火电供应的能耗大于 18 MJ/kWh,比国家平均水平高出 40%—80%;吉林等 7 个省区能耗在 14—18 MJ/kWh 之间,比国家平均水平高出 5%—40%;新疆等 10 个省区能耗在 13—14 MJ/kWh,比国家平均水平高出 0%—5%;贵州等 4 个省区能耗在 11—13 MJ/kWh,低于国家平均水平 0%—10%;广东等 4 个省区能耗在 8—11 MJ/kWh,低于国家平均水平 10%—35%。能耗最大和最小的省区分别为云南省和北京市,分别为 8.7 MJ/kWh 和 24.7 MJ/kWh。

2.2 各省区单位火电供应生命周期全球变暖潜值分析

在污染物输出端,不同省区火力发电的主要污染物排放也存在一定差距。本文选取温室气体 CO₂, CH₄, N₂O 为例进行分析,按照 IPCC 的全球变暖潜值计算方法折算二氧化碳当量,CH₄ 和 N₂O 的当量因子分别为 25 和 298^[22]。图2所示为各省区的单位火电供应全球变暖潜值(本省因子)。我国单位火电供应的平均全球变暖潜值为 1.05 kg CO_{2-eq.}/kWh(全国因子)。根据本省因子的大小及与全国因子的差距,将我国省区分为五类。云南等 3 个省区的各省因子在 1.5—2.0 kg CO_{2-eq.}/kWh 之间,比全国因子高出 30%—46%;内蒙古等 7 个省区各省因子在 1.2—1.5 kg CO_{2-eq.}/kWh 之间,比全国因子高出 10%—30%;青海等 8 个省区各省因子在

表1 我国各省级火电发电能源输入

Table 1 The energy input of unit thermal electricity supply for provinces

能源输入 Energy input	北京	天津	河北	山西	内蒙古	辽宁	吉林	黑龙江	上海	江苏	浙江
原煤 Raw coal/(kg/kWh)	2.28×10^{-1}	4.45×10^{-1}	4.30×10^{-1}	4.44×10^{-1}	6.68×10^{-1}	4.66×10^{-1}	6.15×10^{-1}	5.52×10^{-1}	3.51×10^{-1}	3.99×10^{-1}	3.80×10^{-1}
洗精煤 Cleaned Coal/(kg/kWh)	—	—	—	6.64×10^{-4}	3.50×10^{-5}	—	2.14×10^{-3}	—	—	—	—
其他洗煤 Other washed coal/(kg/kWh)	—	—	4.00×10^{-3}	2.84×10^{-2}	1.13×10^{-3}	4.85×10^{-2}	—	1.37×10^{-2}	—	6.14×10^{-3}	—
焦炭 Coke/(kg/kWh)	—	—	—	—	—	2.91×10^{-4}	—	—	—	—	—
焦炉煤气 Coke Oven Gas/(m ³ /kWh)	—	1.78×10^{-3}	7.84×10^{-3}	8.31×10^{-3}	2.03×10^{-3}	7.20×10^{-3}	8.52×10^{-4}	3.42×10^{-3}	1.22×10^{-3}	2.63×10^{-3}	3.04×10^{-4}
高炉煤气 Blast Furnace Gas/(m ³ /kWh)	—	1.89×10^{-2}	1.45×10^{-1}	1.83×10^{-2}	1.68×10^{-2}	7.67×10^{-2}	1.09×10^{-2}	4.25×10^{-3}	—	—	1.46×10^{-2}
转炉煤气 Converter Gas/(m ³ /kWh)	—	3.78×10^{-3}	8.13×10^{-3}	5.20×10^{-4}	—	3.84×10^{-3}	7.52×10^{-4}	1.94×10^{-4}	—	—	6.69×10^{-4}
原油 Crude oil/(kg/kWh)	—	$1.3 \times 2 \times 10^{-3}$	—	—	—	3.05×10^{-5}	—	—	—	—	9.90×10^{-5}
柴油 Diesel Oil/(kg/kWh)	3.51×10^{-5}	—	5.93×10^{-5}	—	2.35×10^{-5}	3.20×10^{-5}	8.86×10^{-5}	4.40×10^{-5}	7.76×10^{-5}	4.31×10^{-5}	3.78×10^{-5}
燃料油 Fuel Oil/(kg/kWh)	4.57×10^{-5}	—	—	—	—	5.46×10^{-4}	9.36×10^{-5}	1.74×10^{-4}	7.84×10^{-4}	—	5.68×10^{-5}
石油焦 Petroleum Coke/(kg/kWh)	2.00×10^{-3}	2.83×10^{-3}	—	—	—	—	—	—	1.85×10^{-3}	6.85×10^{-6}	1.59×10^{-3}
天然气 Natural Gas/(m ³ /kWh)	7.45×10^{-2}	9.89×10^{-4}	1.21×10^{-4}	2.13×10^{-3}	4.30×10^{-5}	—	3.38×10^{-3}	1.53×10^{-3}	—	1.11×10^{-2}	1.11×10^{-2}
热力 Heat/(MJ/kWh)	—	—	1.27	—	3.91×10^{-1}	7.77×10^{-1}	2.63×10^{-1}	—	5.95×10^{-3}	—	1.45
能源输入 Energy input	安徽	福建	江西	山东	河南	湖北	湖南	广东	广西	海南	重庆
原煤 Raw coal/(kg/kWh)	4.27×10^{-1}	4.03×10^{-1}	4.34×10^{-1}	4.10×10^{-1}	4.54×10^{-1}	4.00×10^{-1}	4.32×10^{-1}	3.79×10^{-1}	4.27×10^{-1}	3.81×10^{-1}	4.03×10^{-1}
洗精煤 Cleaned Coal/(kg/kWh)	—	—	—	1.70×10^{-4}	9.06×10^{-4}	—	—	—	—	—	—
其他洗煤 Other washed coal/(kg/kWh)	1.69×10^{-2}	—	—	6.43×10^{-2}	5.06×10^{-3}	—	—	—	—	—	3.96×10^{-2}
焦炭 Coke/(kg/kWh)	—	—	—	—	—	5.68×10^{-5}	—	—	—	—	—
焦炉煤气 Coke Oven Gas/(m ³ /kWh)	3.15×10^{-3}	2.50×10^{-4}	6.07×10^{-4}	5.23×10^{-3}	1.69×10^{-3}	3.48×10^{-3}	2.00×10^{-4}	0.00	5.70×10^{-3}	—	4.56×10^{-3}
高炉煤气 Blast Furnace Gas/(m ³ /kWh)	1.03×10^{-2}	8.65×10^{-3}	2.85×10^{-2}	7.14×10^{-2}	2.88×10^{-2}	1.44×10^{-1}	8.80×10^{-2}	6.20×10^{-3}	8.10×10^{-2}	—	1.75×10^{-1}
转炉煤气 Converter Gas/(m ³ /kWh)	1.96×10^{-3}	9.93×10^{-4}	4.23×10^{-3}	5.27×10^{-3}	6.02×10^{-4}	—	4.26×10^{-3}	5.76×10^{-4}	5.35×10^{-3}	—	2.03×10^{-3}
原油 Crude oil/(kg/kWh)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
柴油 Diesel Oil/(kg/kWh)	2.32×10^{-5}	9.12×10^{-5}	5.41×10^{-5}	6.35×10^{-5}	5.38×10^{-5}	9.85×10^{-5}	8.41×10^{-5}	8.97×10^{-5}	1.31×10^{-4}	1.65×10^{-5}	2.44×10^{-4}
燃料油 Fuel Oil/(kg/kWh)	—	5.54×10^{-5}	—	1.54×10^{-5}	3.27×10^{-5}	2.90×10^{-5}	1.38×10^{-4}	7.04×10^{-4}	1.24×10^{-5}	—	—
石油焦 Petroleum Coke/(kg/kWh)	—	—	—	4.80×10^{-4}	2.28×10^{-4}	—	2.96×10^{-4}	9.80×10^{-4}	—	—	—
天然气 Natural Gas/(m ³ /kWh)	—	1.91×10^{-2}	1.80×10^{-4}	4.01×10^{-5}	3.99×10^{-3}	1.98×10^{-3}	—	1.11×10^{-2}	—	3.77×10^{-2}	1.43×10^{-4}
热力 Heat/(MJ/kWh)	6.60×10^{-1}	1.01	8.92×10^{-1}	7.49×10^{-1}	4.91×10^{-1}	7.04×10^{-1}	5.05	7.32×10^{-1}	4.45	1.28	3.54×10^{-1}

续表

能源输入 Energy input	四川	贵州	云南	陕西	甘肃	青海	宁夏	新疆	全国平均 National average
原煤 Raw coal/(kg/kWh)	4.36×10^{-1}	3.76×10^{-1}	6.43×10^{-1}	3.28×10^{-1}	4.80×10^{-1}	5.05×10^{-1}	4.86×10^{-1}	4.96×10^{-1}	4.59×10^{-1}
洗精煤 Cleaned Coal/(kg/kWh)	—	—	—	—	—	—	—	—	1.50×10^{-4}
其他洗煤 Other washed coal/(kg/kWh)	1.60×10^{-2}	1.26×10^{-1}	8.35×10^{-3}	1.20×10^{-1}	—	—	3.69×10^{-2}	8.43×10^{-4}	6.74×10^{-3}
焦炭 Coke/(kg/kWh)	—	—	—	—	—	—	—	—	0.00
焦炉煤气 Coke Oven Gas/(m ³ /kWh)	7.82×10^{-3}	1.91×10^{-3}	4.77×10^{-3}	1.31×10^{-2}	6.97×10^{-4}	—	1.29×10^{-3}	2.63×10^{-3}	3.41×10^{-3}
高炉煤气 Blast Furnace Gas/(m ³ /kWh)	8.91×10^{-2}	1.46×10^{-2}	1.18×10^{-1}	1.85×10^{-2}	5.24×10^{-3}	—	6.83×10^{-4}	4.21×10^{-3}	2.47×10^{-2}
转炉煤气 Converter Gas/(m ³ /kWh)	1.43×10^{-2}	—	7.48×10^{-3}	—	1.41×10^{-3}	—	—	1.77×10^{-3}	2.46×10^{-3}
原油 Crude oil/(kg/kWh)	—	—	—	—	—	—	—	—	2.79×10^{-5}
柴油 Diesel Oil/(kg/kWh)	2.72×10^{-4}	1.76×10^{-4}	1.81×10^{-4}	3.55×10^{-5}	4.74×10^{-5}	2.26×10^{-4}	2.00×10^{-5}	6.78×10^{-5}	9.15×10^{-5}
燃料油 Fuel Oil/(kg/kWh)	—	—	—	—	9.76×10^{-6}	5.86×10^{-5}	4.20×10^{-5}	—	1.11×10^{-4}
石油焦 Petroleum Coke/(kg/kWh)	—	—	2.90×10^{-4}	—	—	—	—	—	—
天然气 Natural Gas/(m ³ /kWh)	3.59×10^{-4}	—	—	7.42×10^{-4}	—	3.68×10^{-2}	5.88×10^{-4}	9.00×10^{-3}	5.25×10^{-3}
热力 Heat/(MJ/kWh)	1.66×10^{-3}	1.62	2.56	5.13×10^{-1}	2.45×10^{-1}	—	1.80×10^{-1}	—	9.61×10^{-1}

表2 我国各省区单位火电供应主要污染物排放清单
Table 2 The main emissions of unit thermal electricity supply for provinces

排放 Emissions	北京	天津	河北	山西	内蒙	辽宁	吉林	黑龙江	上海	江苏	浙江	安徽	福建	江西	山东	河南
CO ₂ /(g/kWh)	6.59 × 10 ²	9.58 × 10 ²	1.38 × 10 ³	9.73 × 10 ²	1.48 × 10 ³	1.25 × 10 ³	1.36 × 10 ³	1.16 × 10 ³	7.37 × 10 ²	8.60 × 10 ²	1.04 × 10 ³	1.00 × 10 ³	1.04 × 10 ³	1.09 × 10 ³	1.11 × 10 ³	1.08 × 10 ³
CH ₄ /(g/kWh)	1.10 × 10 ⁻²	1.44 × 10 ⁻²	1.84 × 10 ⁻²	1.46 × 10 ⁻²	2.24 × 10 ⁻²	1.77 × 10 ⁻²	2.06 × 10 ⁻²	1.79 × 10 ⁻²	1.14 × 10 ⁻²	1.34 × 10 ⁻²	1.59 × 10 ⁻²	1.52 × 10 ⁻²	1.60 × 10 ⁻²	1.62 × 10 ⁻²	1.57 × 10 ⁻²	1.62 × 10 ⁻²
N ₂ O/(g/kWh)	8.85 × 10 ⁻³	1.09 × 10 ⁻²	1.38 × 10 ⁻²	1.11 × 10 ⁻²	1.71 × 10 ⁻²	1.33 × 10 ⁻²	1.57 × 10 ⁻²	1.36 × 10 ⁻²	8.64 × 10 ⁻³	1.02 × 10 ⁻²	1.21 × 10 ⁻²	1.15 × 10 ⁻²	1.23 × 10 ⁻²	1.23 × 10 ⁻²	1.19 × 10 ⁻²	1.23 × 10 ⁻²
CO/(g/kWh)	1.28 × 10 ¹	2.07 × 10 ¹	2.62 × 10 ¹	2.11 × 10 ¹	3.26 × 10 ¹	2.53 × 10 ¹	2.98 × 10 ¹	2.59 × 10 ¹	1.64 × 10 ¹	1.90 × 10 ¹	2.23 × 10 ¹	2.20 × 10 ¹	2.23 × 10 ¹	2.33 × 10 ¹	2.25 × 10 ¹	2.32 × 10 ¹
SO ₂ /(g/kWh)	4.45	8.27	1.04 × 10 ¹	8.40	1.30 × 10 ¹	1.01 × 10 ¹	1.18 × 10 ¹	1.03 × 10 ¹	6.56	7.46	8.80	8.76	8.72	9.29	8.97	9.21
NO _x /(g/kWh)	2.12	3.78	4.82	3.87	5.97	4.66	5.46	4.74	3.02	3.44	4.06	4.03	4.03	4.28	4.14	4.25
PM/(g/kWh)	4.91	9.43	1.20 × 10 ¹	9.64	1.49 × 10 ¹	1.16 × 10 ¹	1.36 × 10 ¹	1.18 × 10 ¹	7.52	8.53	1.01 × 10 ¹	1.00 × 10 ¹	9.95	1.07 × 10 ¹	1.03 × 10 ¹	1.06 × 10 ¹
排放 Emissions	湖北	湖南	广东	广西	海南	重庆	四川	贵州	云南	陕西	甘肃	青海	宁夏	新疆	全国平均 National average	
CO ₂ /(g/kWh)	1.23 × 10 ³	1.74 × 10 ³	9.28 × 10 ²	1.64 × 10 ³	1.05 × 10 ³	1.26 × 10 ³	1.14 × 10 ³	1.02 × 10 ³	1.93 × 10 ³	7.91 × 10 ²	1.05 × 10 ³	1.15 × 10 ³	1.04 × 10 ³	1.07 × 10 ³	1.04 × 10 ³	
CH ₄ /(g/kWh)	1.63 × 10 ⁻²	2.52 × 10 ⁻²	1.43 × 10 ⁻²	2.38 × 10 ⁻²	1.66 × 10 ⁻²	1.61 × 10 ⁻²	1.55 × 10 ⁻²	1.55 × 10 ⁻²	2.75 × 10 ⁻²	1.19 × 10 ⁻²	1.60 × 10 ⁻²	1.81 × 10 ⁻²	1.60 × 10 ⁻²	1.64 × 10 ⁻²	1.56 × 10 ⁻²	
N ₂ O/(g/kWh)	1.23 × 10 ⁻²	1.89 × 10 ⁻²	1.09 × 10 ⁻²	1.79 × 10 ⁻²	1.29 × 10 ⁻²	1.21 × 10 ⁻²	1.17 × 10 ⁻²	1.18 × 10 ⁻²	2.07 × 10 ⁻²	9.01 × 10 ⁻³	1.22 × 10 ⁻²	1.40 × 10 ⁻²	1.22 × 10 ⁻²	1.26 × 10 ⁻²	1.19 × 10 ⁻²	
CO/(g/kWh)	2.32 × 10 ¹	3.57 × 10 ¹	2.02 × 10 ¹	3.38 × 10 ¹	2.24 × 10 ¹	2.29 × 10 ¹	2.22 × 10 ¹	2.23 × 10 ¹	3.93 × 10 ¹	1.71 × 10 ¹	2.32 × 10 ¹	2.47 × 10 ¹	2.32 × 10 ¹	2.35 × 10 ¹	2.23 × 10 ¹	
SO ₂ /(g/kWh)	9.19	1.42 × 10 ¹	7.94	1.34 × 10 ¹	8.58	9.09	8.85	8.87	1.56 × 10 ¹	6.81	9.26	9.51	9.25	9.30	8.85	
NO _x /(g/kWh)	4.25	6.55	3.67	6.20	3.99	4.20	4.08	4.08	7.21	3.13	4.25	4.41	4.25	4.28	4.08	
PM/(g/kWh)	1.05 × 10 ¹	1.63 × 10 ¹	9.07	1.54 × 10 ¹	9.74	1.04 × 10 ¹	1.02 × 10 ¹	1.02 × 10 ¹	1.79 × 10 ¹	7.81	1.06 × 10 ¹	1.08 × 10 ¹	1.06 × 10 ¹	1.06 × 10 ¹	1.01 × 10 ¹	

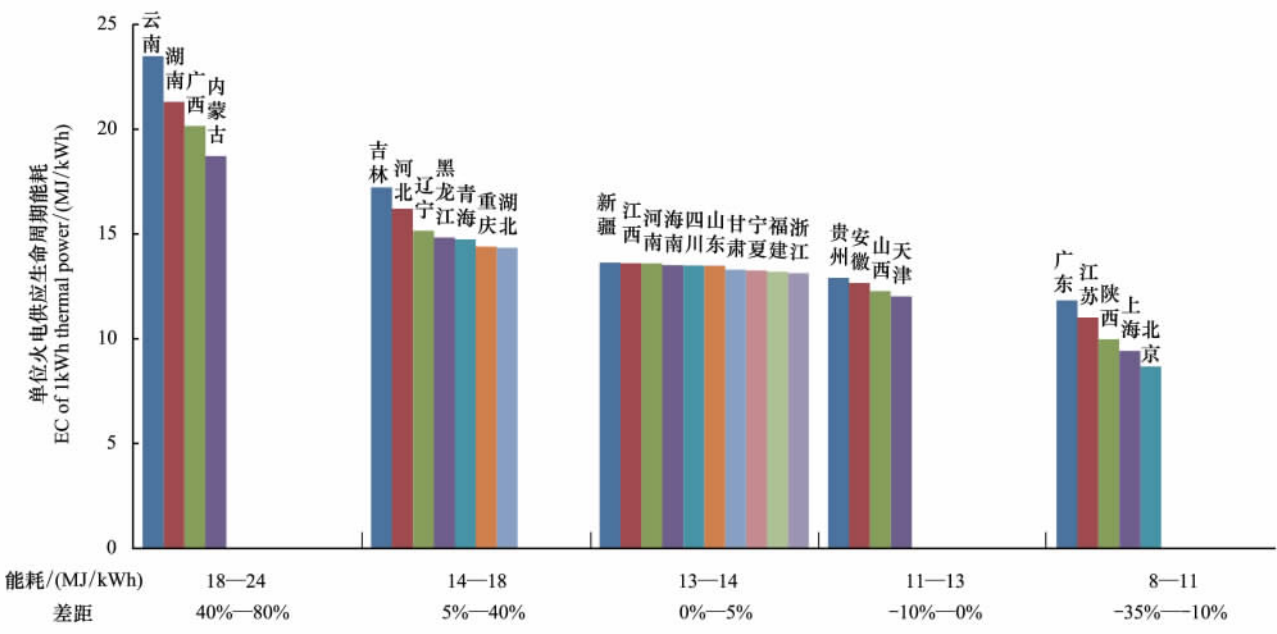


图2 我国各省区单位火电供应生命周期能耗

Fig. 2 The life cycle energy consumption of 1 kWh thermal electricity supply
差距为各省单位火电供应生命周期能耗与全国平均水平的差异, 计算公式为 $(E_{\text{省}} - E_{\text{国}}) / E_{\text{省}}$

1.05—1.2 kg CO_{2-eq.}/kWh 之间,比全国因子高出 0%—10%;宁夏等七个省区各省因子在 0.95—1.05 kg CO_{2-eq.}/kWh 之间,低于全国因子 0%—10%;广东等 5 个省区各省因子在 0.66—0.95 kg CO_{2-eq.}/kWh 之间,低于全国因子 10%—59%。

1kWh 火电供应的全球变暖潜值最大和最小的省区和能耗对应,依然是云南和北京,分别为 1.9kg CO_{2-eq.}/kWh 和 0.66kg CO_{2-eq.}/kWh。全球变暖潜值的差异除了与投入端能源投入多少有关以外,与发电投入能源结构紧密相连。例如:单位火电供应北京与上海对比,初始能源投入北京比上海高 3% 左右,而全球变暖潜值,北京却比上海低 12% 左右,这是因为北京火电能源投入中天然气占到了 37% 的份额,这表明增加天然气火电厂的比例可以降低温室气体排放。

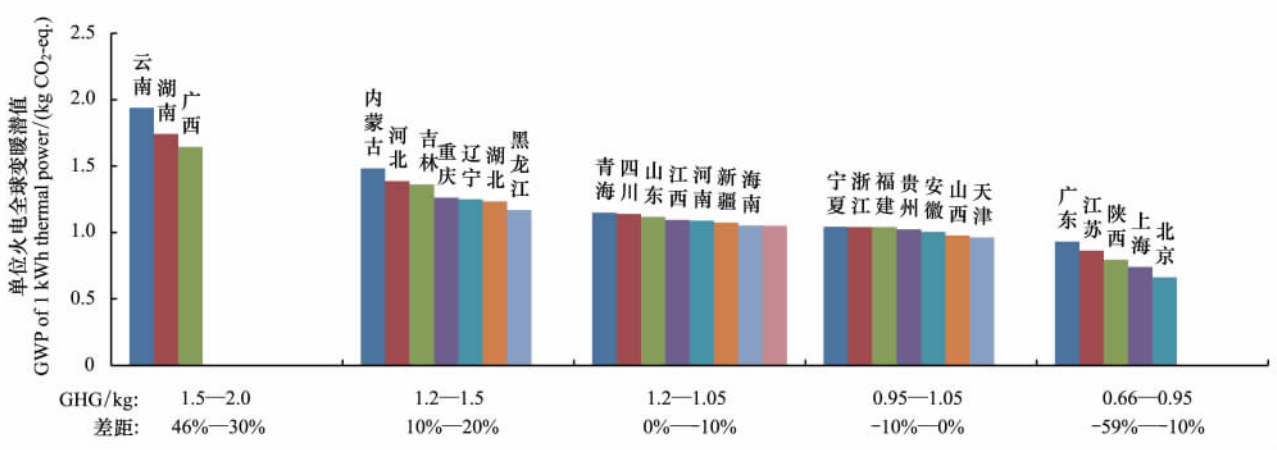


图3 我国各省区单位火电供应生命周期全球变暖潜值

Fig. 3 The life cycle Global Warm Potential of 1 kWh thermal electricity supply
差距为各省单位火电供应全球变暖潜值与全国单位火电供应平均全球变暖潜值之间的差异, 计算公式为 $(G_{\text{省}} - G_{\text{国}}) / G_{\text{省}}$

2.3 各省区火电总量生命周期全球变暖潜值分析

在各省区单位火电供应的全球变暖潜值的基础上,本文计算了各省区由发电总量引起的全球变暖潜值

(总量潜值)。将本省因子与本省的火力发电量相乘得到各省总量潜值 G_1 , 图 4 为我国各省区值的 G_1 值。总量潜值是各省因子及火电总量两个因素共同作用的结果。总量潜值最高的为山东省, 最低的为北京。山东是我国第二大火力发电省, 占全国火电总量的 8.3%; 而本省因子又高于全国因子 6%, 所以山东成为总量潜值最高的省区。北京市火电量在我国各省区中排倒数第四位, 本省因子又是全国最小的, 所以成为总量潜值最小的省区。

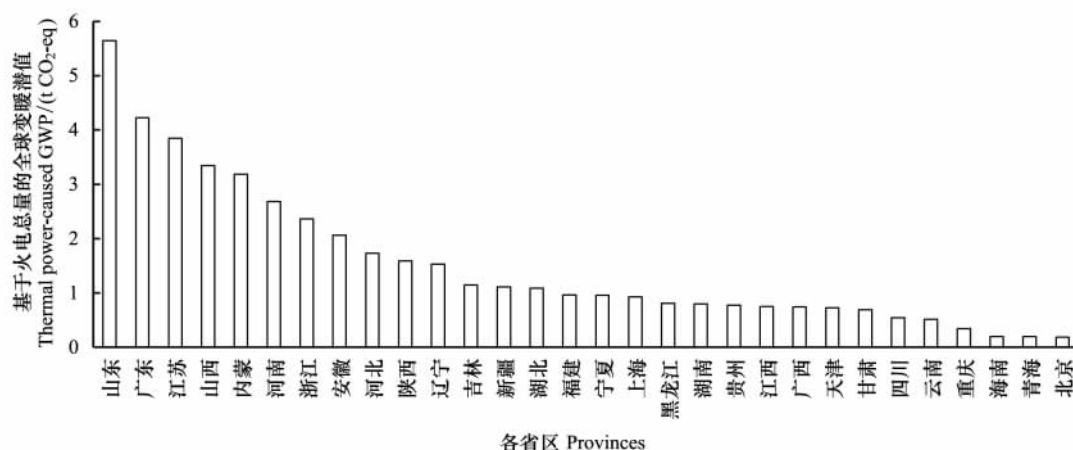


图 4 我国各省区火电总量全球变暖潜质

Fig. 4 The GHG of total thermal power in provinces

将全国因子与某个省区火电总量相乘为 G_2 , 将 $(G_2 - G_1)/G_1$ 设为 Q , 即为用全国因子计算本省总量潜值的误差。图 5 所示为我国不同省区的 Q 值, 在坐标轴以上为大于基于本省因子计算的总量潜值的百分比, 坐标轴以下为小于本省因子计算结果的百分比。结果显示, 误差在 20%—59% 的省区共 4 个; 误差在 0%—20% 的省份有 8 个; 误差在 -10%—0% 的省份有 9 个, 误差在 -10%—30% 的省份有 6 个, 误差在 -46%—-30% 的省份有 3 个。将各省的总量潜值相加得到全国的总量潜值。对于全国的总量潜值而言, 基于全国因子计算比基于本省因子计算少 4.5 亿 tCO_{2-eq} 。

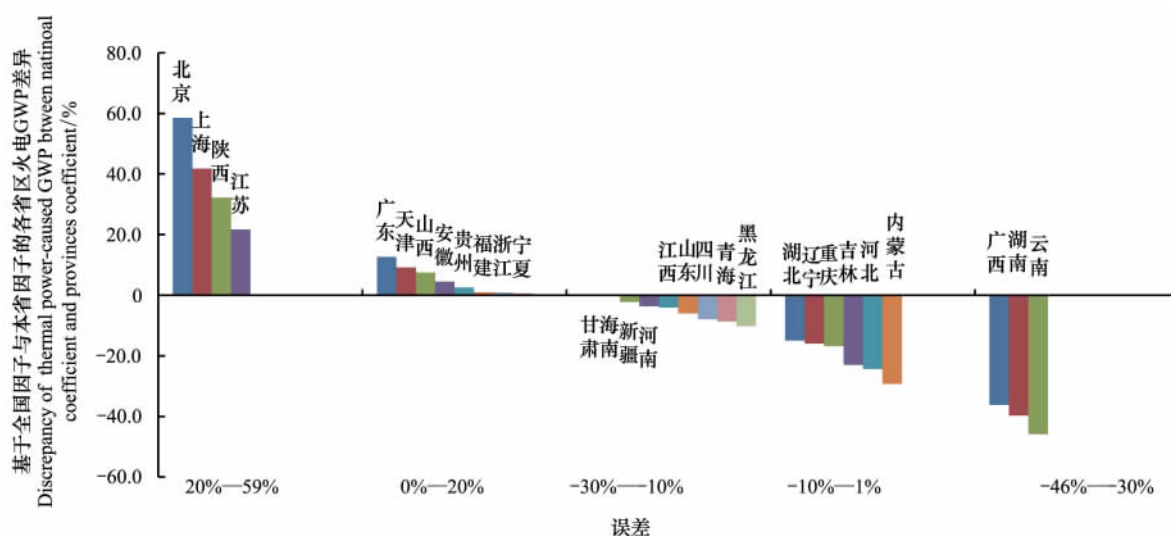


图 5 基于全国单位火电全球变暖潜值及各省区单位火电全球变暖潜值的各省区火力发电温室效应对比

Fig. 5 The comparative analysis of Global warm potential

北京、湖南等省区差距达到了 57%, -39% 等, 这意味着如果按照全国火电平均因子核算北京市由火电引起的全球变暖潜值, 将比实际情况高出 57%, 而湖南省则会比实际情况少 39%。这表明基于全国平均因子

计算各省区总量潜值会引起一定的误差,如果以全国火电平均因子来计算基于各省区的材料、产品以及行业的全球变暖潜值将会有更大的误差。所以建立我国省区级别的火力发电生命周期清单非常有必要。

3 讨论

本研究的数据主要来源于《中国能源统计年鉴》。《中国能源统计年鉴》是一部全面反映中国能源建设、生产、消费、供需平衡的权威性资料书。统计数据主要来源于国家统计局年度统计报表,也就是来自于各能源生产企业的报表。数据全面考虑了不同火电厂的不同装机容量、发电技术水平、能源投入结构等,所以本研究结果能够反映我国各省火力发电的平均水平。

生命周期评价研究的开展需要大量的基础数据。作为经济发展和人民生活的基础,电力的生命周期评价数据是必不可少的基础数据。近年来,随着研究的不断细化,生命周期评价也向本地化发展,例如北京市电动车生命周期环境影响评价研究,需要北京市电力生命周期评价数据。以温室气体排放为例,全国供应 1 kWh 火电比北京市高出 58%。所以只有区域化的生命周期评价数据才能支撑相关研究的发展。目前,我国电力结构中火电占主导地位,大部分省区也以火电为主。19 个省的火电量占总发电量的 80% 以上,所以本文建立了火电生命周期清单。随着新能源技术的发展和推广,风电、水电、太阳能发电等必将占到一定比例,所以在未来的研究中必须考虑风电、水电等新清洁能源发电技术的省区生命周期评价,进一步完善电力的省区生命周期评价研究。

4 结论

本研究所建立的省区电力生命周期清单分析结果表明,在单位火电供应的能源投入、污染物排放方面,我国不同省区之间,及不同省区与全国平均水平之间均存在一定差距。对于单位火电供应的全球变暖潜值和火电总量的全球变暖潜值,均有 15 个省区与全国水平相差 $\pm 10\%$ 以上,所以建立各省区的火电清单非常必要。该生命周期清单为我国进一步开展产品本地化生命周期评价提供了数据支撑,也为各省区电力节能减排提供了理论基础。

参考文献(References):

- [1] 刘振亚. 中国电力与能源. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴 2015. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [3] 国家统计局, 环境保护部. 中国环境统计年鉴 2014. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [4] ISO. ISO 14040:2006 Environmental management-life cycle assessment-principles and framework. ISO 14040:2006. Switzerland ISO, 2006.
- [5] Matsuno Y, Betz M. Development of Life Cycle Inventories for Electricity Grid Mixes in Japan. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2000, 5(5): 295-305.
- [6] Garcia R, Marques P, Freire F. Life-cycle assessment of electricity in Portugal. *Applied Energy*, 2014, 134: 563-572.
- [7] Brizmohun R, Ramjeawon T, Azapagic A. Life cycle assessment of electricity generation in Mauritius. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 106: 565-575.
- [8] Turconi R, Simonsen C G, Byriel I P, Astrup T. Life cycle assessment of the Danish electricity distribution network. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(1): 100-108.
- [9] Asdrubali F, Baldinelli G, D Alessandro F, Scrucca F. Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 1113-1122.
- [10] Hertwich E G, Gibon T, Bouman E A, Arvesen A, Suh S, Heath G A, Bergesen J D, Ramirez A, Vega M I, Shi L. Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(20): 6277-6282.
- [11] Gallagher J, Styles D, McNabola A, Williams A P. Life cycle environmental balance and greenhouse gas mitigation potential of micro-hydropower energy recovery in the water industry. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 99: 152-159.
- [12] Raadal H L, Gagnon L, Modahl I S, Hanssen O J. Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydro power. Re-

- newable and Sustainable Energy Reviews ,2011 ,15(7) : 3417-3422.
- [13] Arvesen A , Hertwich E G. Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs. Renewable and Sustainable Energy Reviews ,2012 ,16(8) : 5994-6006.
- [14] Hardisty P E , Clark T S , Hynes R G. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation: A Comparative Analysis of Australian Energy Sources. Energies ,2012 ,5(4) : 872-897.
- [15] Di X H , Nie Z R , Yuan B R , Zuo T Y. Life Cycle Inventory for Electricity Generation in China. The International Journal of Life Cycle Assessment ,2007 ,12(4) : 217-224.
- [16] Ou X M , Yan X Y , Zhang X L. Life-cycle energy consumption and greenhouse gas emissions for electricity generation and supply in China. Applied Energy ,2011 ,88(1) : 289-297.
- [17] Liang X Y , Wang Z H , Zhou Z J , Huang Z Y , Zhou J H , Cen K F. Up-to-date life cycle assessment and comparison study of clean coal power generation technologies in China. Journal of Cleaner Production ,2013 ,39:24-31.
- [18] 侯萍,王洪涛,张浩,范辞冬,黄娜. 用于组织和产品碳足迹的中国电力温室气体排放因子. 中国环境科学,2012 ,32(6) : 961-967.
- [19] 刘胜强,毛显强,邢有凯. 中国新能源发电生命周期温室气体减排潜力比较和分析. 气候变化研究进展,2012 ,8(1) : 48-53.
- [20] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴2013. 北京: 中国统计出版社,2013.
- [21] 丁宁,杨建新. 中国化石能源生命周期清单分析. 中国环境科学,2015 ,35(5) : 1592-1600.
- [22] IPCC. IPCC ,2007: Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge ,UK: University Press ,2007.