

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2023.06.002

我国化工行业碳排放评价核算问题与建议

张立杰¹ 范娜¹ 郭森²

(1. 中国寰球工程有限公司北京分公司; 2. 生态环境部环境工程评估中心)

摘要 在环境影响评价中开展建设项目碳排放核算,建立完善的评价指标体系,可以有效控制新增碳排放,推动企业尽早实现碳达峰。我国尚未建立国家层面统一的建设项目碳排放评价核算方法。文章以某乙烯项目为例,选用“国标方法”“发改委方法”“广东省方法1”“广东省方法2”“北京市方法”“上海市方法”6种温室气体核算方法,核算出CO₂排放量分别为 399.49×10^4 , 359.02×10^4 , 345.65×10^4 , 357.09×10^4 , 375.33×10^4 , 298.7×10^4 t/a。6种方法在燃料燃烧、火炬燃烧、工业过程、净外购电力、热力等方面的核算内容、量化公式、排放因子上均有所不同,导致核算结果差异较大。考虑到环评阶段活动数据和排放因子等可获得性低、准确性差的特点,建议企业工业过程和装置层面碳排放核算统一采用碳质量平衡法,将委托第三方处置废弃物产生的碳排放纳入间接排放,增加装置层面的碳排放评价指标。

关键词 化工行业; 碳排放核算; 环境影响评价; 碳排放评价指标

中图分类号: X22

文献标识码: A

文章编号: 1005-3158(2023)06-0005-07

Problems and Advices on Carbon Emission Assessment and Accounting of Chemical Industry in China

Zhang Lijie¹ Fan Na¹ Guo Sen²

(1. China Huanqiu Contracting & Engineering Co., Ltd., Beijing Branch;

2. Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Ecology and Environment)

ABSTRACT In environmental impact assessments, conducting carbon emission accounting for construction projects and establishing a comprehensive evaluation indicator system are crucial for effectively controlling new carbon emissions and promoting early peak carbon achievements by enterprises. Currently, China has not established a unified national method for carbon emission evaluation and accounting of construction projects. This paper uses an ethylene project as a case study, applying six different greenhouse gas accounting methods: “National Standard Method” “National Development and Reform Commission Method” “Guangdong Province Method 1” “Guangdong Province Method 2” “Beijing Method” and “Shanghai Method”. The calculated CO₂ emissions are 399.49×10^4 , 359.02×10^4 , 345.65×10^4 , 357.09×10^4 , 375.33×10^4 , and 298.7×10^4 t/a, respectively. These methods differ in their accounting of fuel combustion, flare combustion, industrial processes, net purchased electricity, and heat, resulting in significant variations in the calculated emissions. Considering the low availability and poor accuracy of activity data and emission factors at the environmental assessment stage, it is recommended that enterprises uniformly adopt the carbon mass balance method for carbon emission accounting at the industrial process and equipment level. Additionally, carbon emissions from waste disposal entrusted to third parties should be included in indirect emissions, and carbon emission evaluation indicators at the equipment level should be enhanced.

KEYWORDS chemical industries; carbon emission methods; environmental impact assessment; carbon emission assessment index

0 引言

共同应对温室气体导致的全球气候变暖^[1]已是

世界各国共识。在环境影响评价(简称“环评”)中开展建设项目碳排放核算、建立碳排放评价指标体系,

可以充分发挥环评的源头控排作用^[2-3],也是实现“减污降碳”源头管控的重要抓手和有效途径。

化工行业是我国 CO₂ 排放的主要来源行业之一,2020 年我国化工行业 CO₂ 排放量占全国碳排放总排放量的 4.9%~5.9%^[4]。我国化工行业碳排放核算主要依据为《中国石油化工企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》(简称“发改委方法”)和 GB/T 32151.10—2015《温室气体排放核算与报告要求 第 10 部分:化工生产企业》(简称“国标方法”),均适用于履约阶段。已有的研究主要集中在碳排放核算边界^[5]、排放源识别^[6-7]、影响因素^[8]、能源效率^[9-12]、减排措施和潜力^[13-15]、估算模型^[16-17]及减污降碳协同效应^[18]等方面,针对环评阶段的碳排放核算研究较少。

化工行业碳排放评价指标体系的研究主要集中在行业^[19]、企业或项目^[2]层面。陈亮等^[20]提出了以能源活动温室气体排放为主的行业,以能耗限额标准进行温室气体排放控制的建议,并建议给出单位产品温室气体排放限定值及先进值。

与履约阶段碳排放核算可获得实测活动数据和排放因子不同,环评阶段上述数据可获得性和准确性均较低。为有效控制新增碳排放量、推动产业结构优化调整,亟需探索、建立环评阶段国家层面统一的碳排放核算方法和评价指标体系,为碳达峰、产业结构优化转型提供理论基础和数据支撑。

1 研究方法

1.1 现状研究

加拿大、英国、澳大利亚、美国、欧盟等制定了相关指南和法案,将温室气体年排放量纳入环评^[21]。另外,亚洲开发银行、世界银行等国际金融组织也要求其提供贷款或资金的项目,考虑温室气体排放的影响^[22]。澳大利亚、英国、加拿大等每年会更新电力 CO₂ 排放因子^[23],以更真实地反映碳排放情况。

2021 年生态环境部要求 7 个省市开展重点行业建设项目碳排放环境影响评价试点,建立行业碳排放水平评价标准和方法。各试点地区和其他地区陆续发布了化工行业碳排放环境影响评价技术指南,见表 1。

表 1 我国石化化工行业碳排放评价核算方法及评价指标

| 区域 | 文件名 | 核算方法 | 评价指标 | | | | | |
|-----------|---|---------------------------------------|----------|----------|---------------------|----------------------|----------|----------|
| | | | 单位原料碳排放量 | 单位产品碳排放量 | 万元工业增加值(单位工业产值)碳排放量 | 万元工业增加值(单位工业增加值)碳排放量 | 单位能耗碳排放量 | 单位用地碳排放量 |
| 全国(生态环境部) | 《关于开展重点行业建设项目碳排放环境影响评价试点的通知》(环办环评函[2021]346号) | 参考“国标方法”“发改委方法” | √ | √ | √ | √ | | |
| 广东省 | 《广东省石化行业建设项目碳排放环境影响评价编制指南(试行)》 | “发改委方法”优先 | | √ | | √ | √ | |
| 重庆市 | 《重庆市建设项目环境影响评价技术指南——碳排放评价(试行)》(渝环[2021]15号) | “发改委方法” | | √ | | | | √ |
| 河北省 | 试点行业:钢铁行业 | / | | | / | | | |
| 试点地区 | 吉林省 | 《吉林省建设项目碳排放评价编制指南(试行)》(吉环环评字[2022]4号) | √ | √ | √ | √ | | |
| 浙江省 | 《浙江省建设项目碳排放评价编制指南(试行)》(浙环函[2021]179号) | “国标方法”优先,也可参照“发改委方法” | | √ | √ | √ | √ | |
| 山东省 | 《山东省化工行业建设项目温室气体排放环境影响评价技术指南(试行)》 | “国标方法” | | √ | | | | |
| 陕西省 | 《陕西省煤化工行业建设项目碳排放环境影响评价技术指南(试行)》(陕环环评函[2021]65号) | “国标方法”或“发改委方法” | √ | √ | √ | | | |

续表 1

| 区域 | 文件名 | 核算方法 | 评价指标 | | | | |
|------|--|--|------------------------|----------|---------------------|----------------------|----------|
| | | | 单位原料碳排放量 | 单位产品碳排放量 | 万元工业增加值(单位工业产值)碳排放量 | 万元工业增加值(单位工业增加值)碳排放量 | 单位能耗碳排放量 |
| 海南省 | 《海南省建设项目碳排放环境影响评价技术指南(试行)》(琼环函[2021]260号) | “国标方法” | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 江苏省 | 《江苏省重点行业建设项目碳排放环境影响评价技术指南(试行)》 | 参考“发改委方法” | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 山西省 | 《山西省重点行业建设项目碳排放环境影响评价编制指南(试行)》(晋环函[2021]437号) | “国标方法” | | ✓ | | ✓ | |
| 其他地区 | 上海市 《上海市建设项目环评碳排放评价编制技术要求(试行)》(沪环评[2022]143号) | 引用 SH/MRV-004-2012《上海市化工行业温室气体排放核算与报告方法(试行)》 | 优先各层面公开发布的碳排放强度标准或考核目标 | | | | |
| 北京市 | 《建设项目环境影响评价技术指南 碳排放》(征求意见稿) | 参照 DB11/T 1783—2020《二氧化碳排放核算和报告要求 石油化工生产业》 | 优先各层面公开发布的碳排放强度考核目标 | | | | |

1.2 核算方法

本文选取“发改委方法”“国标方法”、《广东省石化企业二氧化碳排放信息报告指南(2023年修订)》(简称“广东省方法1”)、《广东省石化行业建设项目碳排放环境影响评价编制指南(试行)》(简称“广东省方法2”)、DB11/T 1783—2020北京市《二氧化碳排放核算和报告要求 石油化工生产业》(简称“北京市方法”)、SH/MRV-004-2012《上海市化工行业温室气体排放核算与报告方法(试行)》(简称“上海市方法”)6种方法开展案例项目的碳排放核算。

1.3 数据来源

本文核算中数据主要来源于“案例项目”环境影响评价报告书。

2 案例分析

2.1 案例概况

2010—2020年,炼油、乙烯、丙烯、对二甲苯产品的碳排放总量约占石化行业碳排放总量的55.06%。我国是全球第二大乙烯生产国和最大乙烯消费国^[24]。选取我国某100万t/a乙烯项目(简称“案例项目”)为本文核算对象。案例项目以丙烷等轻烃为

主要原料,经蒸汽裂解、分离后生产乙烯、丙烯、混合碳四等及燃料气、氢气中间产物,下游配套建设环氧乙烷、聚乙烯、聚氯乙烯、环氧丙烷、苯乙烯等装置。剩余副产燃料气、氢气外送。除工艺装置外,工业过程碳排放还包括线性低密度聚乙烯地面火炬、环氧丙烷/苯乙烯尾气催化氧化炉、环氧丙烷/苯乙烯废液焚烧炉。

2.2 核算方法差异性分析

2.2.1 燃料燃烧排放

“国标方法”中规定“核算单元内产生又全部在核算单元内被直接用作燃料或生产原料的那部分副产品不视为碳源流”,“案例项目”无外购燃料,因此在“国标方法”中燃料燃烧排放量为0。

“发改委方法”“广东省方法1”“上海市方法”中均给出两种核算方法:含碳量法和低位热值法,并以含碳量法优先。“案例项目”已获取燃料含碳量,故上述方法均采用含碳量法。“北京市方法”仅给出低位热值法,“广东省方法2”优先采用“发改委方法”。“上海市方法”中,乙烯、聚氯乙烯、环氧丙烷装置内燃料燃烧排放已包含在工业过程排放中,故虽同样采用含碳量法,其燃料燃烧排放量最小。

本文核算不考虑移动燃烧设施排放。

2.2.2 火炬燃烧排放

火炬燃烧排放包括正常工况和非正常工况排放。

“国标方法”中火炬碳排在工业过程排放中核算。“发改委方法”分别给出了正常工况和非正常工况火炬燃烧核算方案;“广东省方法 1”“北京市方法”“上海市方法”将火炬列为固定焚烧设施或燃料燃烧排放;“广东省方法 2”则明确规定不考虑事故工况火炬排放。“案例项目”正常工况无连续火炬气,故正常工况排放均为 0。

2.2.3 工业过程排放

“国标方法”是以独立法人企业为核算边界,采用碳质量平衡法,不单独计算各装置的“过程排放”。其他 5 种方法均采用各装置过程排放量之和,且分别给出各装置的核算方法,主要有排放因子法、物料平衡、烟气浓度法等。

1) 乙烯裂解装置工业过程排放

乙烯裂解装置工业过程排放来自于炉管内壁结焦后的烧焦排放,“发改委方法”“广东省方法 1”“广东省方法 2”“北京市方法”的核算方法相同,由烧焦尾气的平均流量及其中的 CO₂、CO 浓度计算获得。

“广东省方法 1”还可使用碳质量平衡法。“上海市方法”采用排放因子法,由乙烯产品产量和单位乙烯 CO₂ 排放因子计算获得,结果中包含装置内的燃料燃烧排放。

2) 环氧乙烷、聚氯乙烯装置工业过程排放

“发改委方法”“广东省方法 1”“广东省方法 2”“北京市方法”均采用碳质量平衡法;“上海市方法”仍采用排放因子法,结果中包含装置内的燃料燃烧排放。

3) 其他设施工业过程排放

“发改委方法”“广东省方法 1”“广东省方法 2”“北京市方法”“上海市方法”均采用碳质量平衡法。

4) 委托第三方处置废弃物排放

“上海市方法”明确将委托第三方进行危险废弃物焚烧处理的排放纳入项目的过程排放,其他 5 种方法均作为碳流出,不计入项目的排放总量。

2.2.4 外购电力、热力间接排放

6 种方法均采用排放因子方法。2023 年生态环境部统一了电力 CO₂ 排放因子为 0.570 3 t CO₂/(MW·h)。2022 年上海市更新了热力排放因子为 0.06 t CO₂/GJ。“案例项目”6 种核算方法的差异性分析见表 2。

表 2 “案例项目”6 种核算方法差异性分析

| 类型 | 国标方法 | 发改委方法 | 广东省方法 1 | 广东省方法 2 | 北京市方法 | 上海市方法 |
|----------|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
| 燃料燃烧 | 无外购燃料 | 含碳量法 碳氧化率 99% | 含碳量法 碳氧化率 100% | 含碳量法 碳氧化率 99% | 低位热值法 碳氧化率 99% | 含碳量法 碳氧化率 99% |
| 正常工况无火炬气 | | | | | | |
| 火炬燃烧 | 含在工业过程中 | 事故工况 含碳量法 碳氧化率 100% | 事故工况 含碳量法 碳氧化率 100% | 不考虑事故工况 | 事故工况 含碳量法 碳氧化率 98% | 事故工况 含碳量法 碳氧化率 99% |
| 直接排放 | | 清焦气量 CO ₂ +CO 体积浓度 | 清焦气量 CO ₂ +CO 体积浓度 | 清焦气量 CO ₂ +CO 体积浓度 | 清焦气量 CO ₂ +CO 体积浓度 | 1.04 t CO ₂ /t 乙烯 (含燃料燃烧) |
| 工业过程 | | 质量平衡法 | 质量平衡法 | 质量平衡法 | 质量平衡法 | 0.302 t CO ₂ /t 氯乙烯 |
| | 环氧乙烷 (含催化氧化炉) | 质量平衡法 | 质量平衡法 | 质量平衡法 | 质量平衡法 | 0.663 t CO ₂ /t 环氧乙烷 |
| | LLDPE 地面火炬 | 含碳量法 碳氧化率 99% | 含碳量法 碳氧化率 100% | 含碳量法 碳氧化率 99% | 含碳量法 碳氧化率 99% | 含碳量法 碳氧化率 99% |
| | PO/SM 催化氧化炉 | 含碳量法 碳氧化率 97% | 含碳量法 碳氧化率 97% | 含碳量法 碳氧化率 97% | 含碳量法 碳氧化率 97% | 含碳量法 碳氧化率 97% |
| | PO/SM 焚烧炉 | 质量平衡法 | 质量平衡法 | 质量平衡法 | 质量平衡法 | 质量平衡法 |
| | 外委废弃物焚烧 | 排放量计入 第三方 | 排放量计入 第三方 | 排放量计入 第三方 | 排放量计入 第三方 | 含碳量法 碳氧化率 99% |

续表 2

| 类型 | | 国标方法 | 发改委方法 | 广东省方法 1 | 广东省方法 2 | 北京市方法 | 上海市方法 |
|------|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 间接排放 | 净购入电力/ ($t CO_2 \cdot (MW \cdot h)^{-1}$) | 0.570 3 | 0.570 3 | 0.570 3 | 0.570 3 | 0.570 3 | 0.570 3 |
| | 净购入热力/ ($t CO_2 \cdot GJ^{-1}$) | 0.11 | 0.11 | 0.10 | 0.11 | 0.11 | 0.06 |

2.3 核算结果

6种核算方法工业过程排放的核算结果见表3。由表3可见,6种核算方法总排放量核算结果“国标方法”最大,“上海市方法”最小。二者差值为 $100.79 \times$

$10^4 t CO_2/a$,占最大核算结果的25.23%。其中直接排放核算结果最大差值为 $42.4 \times 10^4 t CO_2/a$,占最大核算结果的22.2%;间接排放核算结果最大差值为 $73.37 \times 10^4 t CO_2/a$,占最大核算结果的35.1%。

表3 案例项目6种核算方法结果

 $10^4 t/a$

| 类型 | | 国标方法 | 发改委方法 | 广东省方法 1 | 广东省方法 2 | 北京市方法 | 上海市方法 | |
|------|-------------|------------|--------|---------|---------|--------|-------|--------|
| 直接排放 | 燃料燃烧 | / | 124 | 125.3 | 124 | 140.34 | 18.34 | |
| | 火炬燃烧 | / | 1.93 | 1.93 | / | 1.9 | 1.91 | |
| | 乙烯装置 | | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 104 | |
| | 聚氯乙烯装置 | | 1.59 | 1.59 | 1.59 | 1.59 | 12.08 | |
| | 环氧乙烷装置 | | 5.4 | 5.4 | 5.4 | 5.4 | 9.95 | |
| | 工业过程 | LLDPE 地面火炬 | 190.62 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 |
| | PO/SM 催化氧化炉 | 0.33 | | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | |
| | | PO/SM 焚烧炉 | | 16.5 | 16.5 | 16.5 | 16.5 | 16.5 |
| | | 外委废弃物焚烧 | | / | / | / | / | 0.008 |
| | | 工业过程小计 | | 24.22 | 24.22 | 24.22 | 24.22 | 142.95 |
| 间接排放 | 净购入电力 | 47.45 | 47.45 | 47.45 | 47.45 | 47.45 | 47.45 | |
| | 净购入热力 | 161.42 | 161.42 | 146.75 | 161.42 | 161.42 | 88.05 | |
| 合计 | | 399.49 | 359.02 | 345.65 | 357.09 | 375.33 | 298.7 | |

直接排放6种核算方法核算结果差异,主要是由排放源、核算方法和排放因子的差异造成。燃料燃烧核算结果差异是由核算方法和排放因子不同引起的:“国标方法”和“上海市方法”的燃料燃烧碳排放全部或部分在工业过程中计算;“发改委方法”“广东省方法1”和“广东省方法2”的核算方法相同、排放因子不同;“北京市方法”与上述3种方法的核算方法不同,采用的低位热值法。工业过程核算结果差异主要是由方法差异引起的,“国标方法”采用的是全厂碳质量平衡法,“上海市方法”采用的是装置排放因子法(包含装置的燃料燃烧碳排放)。

间接排放6种核算方法核算结果差异,主要是净外购热力排放量核算中排放因子的不同引起的。其中,“国标方法”“发改委方法”“广东省方法2”和“北

京市方法”中电力排放因子一致,“广东省方法1”的电力排放因子为 $0.10 t CO_2/GJ$,“上海市方法”的电力排放因子为 $0.06 t CO_2/GJ$ 。

3 分析与讨论

3.1 核算方法选取

“案例项目”建成投产后,该企业利用剩余乙烯、丙烯为原料,新建聚乙烯、聚丙烯装置。现行所有核算方法的报告主体均指“具有温室气体排放行为的独立法人企业或视同法人的独立核算单位”。根据生态环境部《关于加强企业温室气体排放报告管理相关工作的通知》(环办气候[2021]9号)附件1,“案例项目”碳排放核算应采用“发改委方法”。但单独新建聚乙烯、聚丙烯项目,根据“国标方法”的适用范围,应采用

“国标方法”。聚乙烯、聚丙烯为企业的改扩建项目，与“案例项目”属于同一报告主体，理论上应采用一种核算方法。企业是选择两种方法分别核算还是选用某一种方法核算存在争议，宜进行统一。

6种核算方法在核算内容、量化公式及排放因子选取上均有所不同，导致核算结果差异较大，造成环评阶段石化化工行业碳排放可对比性差。考虑到环评阶段碳排放核算活动数据和排放因子的可获得性和准确性低，宜选取核算结果较大的“国标方法”，在项目前期对碳排放量初步核算，有利于建设项目制定碳中和、碳达峰的路径和方案，同时避免对履约阶段碳排放核算造成困扰。

3.2 工业过程排放主要贡献源分析

案例项目6种核算方法结果见表3，由表3可见，“发改改方法”“广东省方法1”“广东省方法2”“北京市方法”中，工业过程排放占比前两位的分别为PO/SM焚烧炉、环氧乙烷装置，占比分别为68.13%、22.30%，合计90.43%；“上海市方法”中占比前四位的分别为乙烯装置、PO/SM焚烧炉、聚氯乙烯、环氧乙烷装置，占比分别为72.75%、11.54%、8.45%和6.96%，合计99.70%。可见，石化企业工业过程排放相对集中，识别工业过程的主要排放装置，有针对性的采取减排措施可取得较好的减排效益。

3.3 外委废弃物焚烧核算

目前仅有“上海市方法”将委托第三方对危险废弃物进行焚烧处理产生的碳排放单独列出，且纳入直接排放量。其他5种方法CO₂排放核算范围均不包含上述外委焚烧处置危险废弃物的碳排放。

《国家发展改革委办公厅关于印发省级温室气体清单编制指南(试行)的通知》(发改办气候〔2011〕1041号)明确了固体废物处置的CO₂排放纳入废弃物处理温室气体排放清单。因此，企业固体废物委托第三方处置导致的CO₂排放均纳入固废处置单位核算范围。“案例项目”自建焚烧炉处置固废排放的CO₂为 16.8×10^4 t/a。如委托第三方处置，这部分的CO₂排放量在其他5种核算方法中将不再核算，碳排放总量减少，这将会降低企业自建焚烧设施的积极性。与国家地方为不挤占公共环保资源和减少运输环节环境风险而鼓励的“危险废物产生量较大的钢铁、石化等企业自建危险废物处理处置设施”的要求存在冲突。

3.4 电力排放因子

“广东省方法1”“广东省方法2”“北京市方法”“上

海市方法”给出的电力CO₂排放因子分别为0.637 9, 0.610 1, 0.604, 0.42 t CO₂/MW·h。2023年生态环境部统一电力CO₂排放因子为0.570 3 t CO₂/MW·h。本文认为，统一电力CO₂排放因子有利于环评阶段项目CO₂排放核算的横向对比，但却无法准确反映项目所在地真实电力排放水平。

4 结论与建议

1) 建立统一的环评阶段碳排放评价核算方法

环评阶段建议以企业为核算边界，采用全厂碳质量平衡方法核算项目的工业过程碳排放。既可避免因不同核算方法导致的结果差异，也可免除同时有石油化工和化工产品生产的企业核算方法的选择困扰。同时，碳质量平衡法可以涵盖无组织源碳排放量，对我国碳达峰目标判断更具指导意义。对于改扩建项目，可采用改扩建前后企业碳排放量的差值作为改扩建项目新增碳排放量。

2) 建立装置层面碳排放评价指标

根据碳排放源识别结果选取重点碳排放装置，采用碳质量平衡方法进行装置层面的碳排放核算。并在项目层面碳评价指标基础上，增加装置层面碳排放评价指标。装置的碳排放核算边界参考国家已发布的强制性能耗限额标准。建立装置层面碳排放评价指标，可以从根源解析石化化工行业碳排放关键环节，对行业减排重点的确定及政策的制定有重要的意义。

炼油装置可分不同原油加工规模，给出单位原油碳排放基准值，化工装置据工艺技术特点或产品类型等，给出不同工艺或产品类型等的单位产品碳排放基准值，以考核生产装置碳排放强度。

3) 将外委废弃物焚烧产生碳排放纳入间接排放

建议将企业废弃物外委第三方焚烧处置产生的碳排放纳入企业的间接排放，计入企业碳排放总量。后续研究建立统一的废弃物外委焚烧处置的碳排放核算方法。

4) 动态更新电力碳排放因子

建议每年动态更新我国各区域电网电力排放因子，以反映各区域最新能源结构和碳排放水平。

参考文献

- [1] IPCC. Global warming of 1.5°C [R]. Geneva: IPCC, 2018.
- [2] 宋晓晖, 吕晨, 王丽娟, 等. 建设项目温室气体环境影响评价方法研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 405-413.
- [3] 匡舒雅, 曹颖. 在环境影响评价中考虑温室气体排放的可行性分析[J]. 环境影响评价, 2021, 43(5): 9-14.

- [4] 张一峰,杨朋.“双碳”目标下炼化行业的挑战与应对[J].中国石油和化工,2021(11):29-31.
- [5] 张冰鑫,孙瑞瑞,任艳芬,等.炼化一体化企业温室气体排放核算研究[J].石油化工安全环保技术,2021,37(3):60-64.
- [6] AL-SALEM S M. Carbon dioxide (CO₂) estimation from Kuwait's petroleum refineries[J]. Process safety and environmental protection, 2015, 95:38-50.
- [7] 刘玲,赵婧.我国石化行业温室气体排放源识别[J].化工环保,2013,33(4):330-334.
- [8] 张建华,鞠晓峰.基于LMDI的中国石化产业CO₂排放的解耦分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2012,39(10):98-102.
- [9] 安铭.催化裂化装置用能优化及碳排放核算研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2017:24-47.
- [10] MORROW W R III, MARANO J, HASANBEIGI A, et al. Efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in the United States petroleum refining industry[J]. Energy, 2015, 93:95-105.
- [11] 姜晔,田涛.碳排放约束下石油石化产业全要素能源效率研究[J].当代石油石化,2011,19(11):21-28.
- [12] 沈浩.中国石化炼油企业能源效率研究[D].长沙:中南大学,2013:51-61.
- [13] 李雪静,乔明,潘元青,等.国外石化公司二氧化碳减排对策分析[J].中外能源,2009,14(8):90-96.
- [14] 罗胜.石化行业碳排放强度估算与减排对策研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2011:39-44.
- [15] 李小鹏.低碳经济下中国石化行业节能减排的实证研究[D].上海:华东理工大学,2012:22-26.
- [16] 孟宪玲.炼厂二氧化碳排放估算与分析[J].当代石油石化,2010,18(2):13-16.
- [17] 牛亚群,董康银,姜洪殿,等.炼油企业碳排放估算模型及应用[J].环境工程,2017,35(3):163-167.
- [18] 翟吉人,贾志慧,张汇.我国碳交易试点地区化工行业碳排放量核算方法比较分析[J].环境与可持续发展,2018,43(2):31-35.
- [19] 王佐仁,马越.关于碳排放评价指标体系构建的思考[J].统计与决策,2014(3):42-45.
- [20] 陈亮,林翎,郭慧婷,等.开展重点行业温室气体排放限额标准研究工作的建议[J].标准科学,2016(增刊):13-15.
- [21] 杨轶婷,徐鹤,张毅.将气候变化纳入我国环境影响评价体系的思考[J].环境保护,2021,49(12):11-16.
- [22] 王亚男,陈颖.战略环评控制温室气体排放的评价思路与指标体系[J].中国人口·资源与环境,2016,26(增刊):37-40.
- [23] 马翠梅.中国外购电温室气体排放因子研究[M].北京:中国环境出版社,2020:36-62.
- [24] 庞凌云,翁慧,常靖,等.中国石化化工行业二氧化碳排放达峰路径研究[J].环境科学研究,2022,35(2):356-367.

(修回日期 2023-09-12)

(录用日期 2023-10-10)

(编辑 王蕊)

(上接第4页)

- [15] MCALARY T, GROENEVELT H, NICHOLSON P, et al. Quantitative passive soil vapor sampling for VOCs-part 3: field experiments[J]. Environmental science: processes & impacts, 2014, 16(3):501-510.
- [16] KIM P G, KWON J H, HONG Y. Development of an expanded polytetrafluorethylene dosimeter for the passive sampling of volatile organic compounds in air[J]. Science of the total environment, 2021, 797:149026.
- [17] MCALARY T, WANG X, UNGER A, et al. Quantitative passive soil vapor sampling for VOCs-part 1: theory[J]. Environmental science: processes & impacts, 2014, 16(3):482-490.
- [18] 张蒙蒙,张超艳,郭晓欣,等.焦化场地包气带区土壤苯的精细化风险评估[J].环境科学研究,2021,34(5):1223-1230.
- [19] 李卫东.基于挥发通量检测土壤气中三氯甲烷及健康风险评估[D].天津:天津科技大学,2021:40-42.
- [20] 马杰.土壤气监测在污染地块调查评估中的优势、局限及解决思路[J].环境工程学报,2021,15(8):2531-2535.

(修回日期 2023-07-03)

(录用日期 2023-07-12)

(编辑 王蕊)