

DOI:10.11784/tdxbz202312013

## 典型高耗能工业园区碳排放特征及影响因素研究

邱顺添, 张铭哲, 王天志

(天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350)

**摘要:** 如期实现碳达峰碳中和目标已成为我国重大国家战略, 工业园区是工业发展的重要载体, 是我国控碳减碳的重要靶点。目前工业园区面临巨大的减排需求, 开展工业园区碳排放核算研究, 可以有效指导园区低碳减排实践。首先在传统的排放因子法的基础上, 提出以工业园区为边界的碳排放量核算方法, 将园区碳排放类型分为燃料燃烧的排放( $E_1$ )、工业生产过程的排放( $E_2$ )、购入和输出的电力产生的排放( $E_3$ )、购入和输出的热力产生的排放( $E_4$ )和固碳产品的排放( $E_5$ )5种排放类型, 然后以高耗能工业园区为研究对象, 计算并分析了2016—2021年园区碳排放变化规律。结果表明: 碳排放总量(以 $\text{CO}_2$ 计)基本逐年下降, 从 $1507.83 \times 10^4 \text{ t/a}$ 降至 $671.82 \times 10^4 \text{ t/a}$ , 年均降幅15%, 园区低碳减排控制初见成效; 不同碳排放类型中,  $E_2$ 是园区主要碳排放源, 占实际总排放量70%以上; 进一步分析不同行业类型排放量的特点, 得到行业C25和C26的碳排放量占全行业总排放量99%以上, 其中行业C26的排放量与 $E_1$ 相关性最高, 为0.88, 行业C25的排放量与 $E_2$ 、 $E_4$ 、 $E_5$ 相关性最高, 均为0.99。因此, 针对化学原料及化学制品制造业中燃料燃烧节能降碳工艺和石油、煤炭及其他燃料加工业中生产节能降碳工艺与固碳产品进行优化与升级, 帮助该高耗能工业园区实现降碳减排目标。本研究提出的碳排放核算方法可为全国其他地区典型工业园区提供技术支持。

**关键词:** 工业园区; 碳排放核算; 高耗能企业; 行业特征

中图分类号: X32; TE99

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2024)11-1111-13

## Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of a Typical Energy-Intensive Industrial Park

Khu Soon Thiam, Zhang Mingzhe, Wang Tianzhi

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** Achieving the goal of carbon peak and carbon neutrality as scheduled has emerged as a major national strategy in China. Industrial parks are important carriers of industrial development and critical targets for carbon emission reduction. At present, these parks are under considerable pressure to reduce their carbon footprint. Carbon emission accounting can effectively guide the low-carbon emission reduction practices of industrial parks. Based on the traditional emission factor method, this paper proposed a carbon emission accounting method with industrial parks as the boundary and divided the carbon emission types into five types: fuel combustion emissions( $E_1$ ), industrial production process emissions( $E_2$ ), purchased and exported electricity emissions( $E_3$ ), purchased and exported thermal emissions( $E_4$ ), and carbon sequestration products( $E_5$ ). Focusing on an energy-intensive industrial park, this study calculated and analyzed the carbon emission change law of the park from 2016 to 2021. The results show a consistent year-on-year decline in total carbon emissions(in terms of  $\text{CO}_2$ ) of the park, decreasing from  $1507.83 \times 10^4 \text{ t/a}$  to  $671.82 \times 10^4 \text{ t/a}$ , with an average annual decrease of 15%. This demonstrates that the low-carbon emission reduction controlling strategies implemented in the park have achieved an initial success. Among the five types,  $E_2$  is the main source of carbon emissions in the park, accounting for more than 70% of the actual total emissions. After analyzing the emission characteristics from different sectors, it is concluded that the carbon

收稿日期: 2023-12-11; 修回日期: 2024-01-22.

作者简介: 邱顺添(1966—), 男, 博士, 教授, soon.thiam.khu@tju.edu.cn.

通信作者: 王天志, wangtianzhi@tju.edu.cn.

基金项目: 天津大学自主基金资助项目(2022XZT-0012).

Supported by the Tianjin University Independent Foundation (No. 2022XZT-0012).

emissions of sectors C25 and C26 account for more than 99% of the total emissions. The emission of sector C26 has the highest correlation with  $E_1$  (0.88), while that of sector C25 has the highest correlation with  $E_2$ ,  $E_4$ , and  $E_5$  (all correlations are 0.99). Therefore, the park should optimize and upgrade the energy-saving and carbon reduction processes in terms of fuel combustion in the sector manufacture of raw chemical materials and chemical products and in the carbon sequestration production in the sector processing of petroleum, coal, and other fuels to meet its carbon reduction objectives. The carbon emission accounting method proposed in this study can provide technical support to typical industrial parks in other parts of the country.

**Keywords:** industrial park; carbon emission accounting; energy-intensive enterprise; industry characteristics

气候变化是国际社会长期关注的热点问题,人类活动产生的短期内温室气体的大量排放是导致其发生的最主要因素<sup>[1]</sup>. 工业领域占全国碳排放的 68%<sup>[2]</sup>, 是重要的碳排放源. 工业园区作为工业发展的载体,是实现二氧化碳减排的重要战场. 2015 年我国工业园区碳排放总量为  $28.2 \times 10^4$  t(CO<sub>2</sub>), 约占当年全国排放总量的 31%<sup>[3]</sup>, 二氧化碳减排潜力明显. 随着碳达峰碳中和战略的提出<sup>[4]</sup>, 工业园区面临巨大的减排需求. 开展工业园区碳排放核算研究,可以明确园区碳排放水平,识别减排控制关键点,从而针对性地指导园区低碳减排实践.

我国工业园区数量多、种类广,不同类型工业园区产业结构存在差异,但是多以第二产业为支柱产业. 园区由多主体多系统叠加组成,局部企业间存在上下游供应链关系,从而产生多样的物质能量流动模式. 所以,园区实际边界缺乏统一界定. 工业园区的上述特点使得其碳排放具有以下典型特征:①排放边界界定不清晰、不统一,排放数据统计口径多样;②排放主体以生产企业为主,碳排放源流网络复杂;③排放类型以能源消费为主,电力消耗排放比重逐渐上升<sup>[3]</sup>;④排放气体种类以 CO<sub>2</sub> 为主. 由于工业园区温室气体排放的独特性,不能简单套用国家、城市、行业等层面的核算方法进行碳排放计算,需在其基础上,结合工业园区自身的产业结构和实际需求,构建能有效指导园区绘制减碳路线的核算方法.

温室气体碳排放核算在国家<sup>[5-9]</sup>、省市<sup>[10-14]</sup>、行业<sup>[15-19]</sup>层面已有研究,且陆续出台标准<sup>[20-23]</sup>,但目前针对工业园区层面的研究还处于起步阶段,在核算边界、范围、方法上存在较大差异.

(1) 核算边界. 大部分研究外部核算边界为园区的地理边界<sup>[24]</sup>或行政边界<sup>[25]</sup>,以各排放部门<sup>[25]</sup>或企业边界<sup>[24]</sup>作为单一核算单元. 该方法仅从数据统计口径角度将单一企业或排放部门划分为核算单元,未体现园区产业间的生产共生关系,可能会严重低估园区运行期间的间接碳排放<sup>[26]</sup>. 少数研究考虑了部门间的相互作用,卢伊<sup>[27]</sup>应用生态网络分析方法构

建了北京经开产业园区的碳代谢框架,以产业链为单元进行碳排放核算. 不过生态网络分析法需要在投入产出法基础上才能构造碳流量矩阵,其核算精度仍然受限.

(2) 核算范围. Liu 等<sup>[28]</sup>、徐涵等<sup>[29]</sup>、靳婧等<sup>[30]</sup>和贺艳丽等<sup>[31]</sup>基于 IPCC2006 核算了工业园区燃料燃烧、电力、热力消费产生的碳排放. 为更完整地核算工业园区碳排放, Liu 等<sup>[32]</sup>将核算范围扩展至能源消费、工业过程. 在此基础上, Wang 等<sup>[33]</sup>、魏康霞等<sup>[34]</sup>分别增加了农业部门、居民生活的能源消费. 齐静等<sup>[35]</sup>和陈彬等<sup>[36]</sup>将园区建设与拆除阶段纳入碳排放核算范围,构建了较为全面的碳排放清单. 可以发现,大部分研究只涉及能源消费(燃料燃烧、电力热力消费)、工业生产等直接碳排放类型,忽视了固碳产品等隐含碳排放. 代旭虹<sup>[37]</sup>核算福建荔城工业园区碳排放发现隐含碳排放占该园区总碳排放量近 40%,说明隐含碳排放不可忽视.

(3) 核算方法. 主要有排放因子法、投入产出法和生命周期法. Zhang 等<sup>[38]</sup>、Zhang 等<sup>[39]</sup>、Liu 等<sup>[28]</sup>和 Xue 等<sup>[40]</sup>根据 IPCC2006 将活动数据与排放因子相乘,核算了园区能源消费(燃料燃烧、电力)、工业生产过程引起的排放. 排放因子法具有操作简单、易标准化、便于推广等优点,是目前应用最广、相关研究最多的方法,但大部分研究选取的排放因子是缺省值,不能完全体现园区碳排放特点. 代旭虹<sup>[37]</sup>基于投入产出表,对福建荔城工业园区的案例研究表明隐含碳排放占该园区总碳排放量近 40%,说明碳排放核算时也要考虑隐含碳排放. 投入产出法可以补充排放因子法在碳排放类型的局限性,但是投入产出表编制工作通常仅在较大尺度开展,因此相关研究多集中于行业、区域<sup>[41-42]</sup>、国家<sup>[43]</sup>等,在工业园区层面仅有少量应用<sup>[37]</sup>. 郭扬等<sup>[3,44]</sup>、Tan 等<sup>[45]</sup>和 Chen 等<sup>[46]</sup>从生命周期视角全面分析了园区建设、运行、拆除阶段的碳排放量,发现运行阶段是主要的碳排放来源. 生命周期法可以全面考虑从原料输入到生产加工、运输、消费使用以及废弃物处置整个生命周期的总碳排放

量,但其需要的基础数据搜集比较复杂,核算成本高且耗时长,更多适用于个人或单一产品的碳足迹分析.

为了解决工业园区传统碳排放计算中存在的核算边界内部划分不当、碳排放类型不完整、核算方法不准确的问题,本文首先在传统的排放因子法基础上,基于工业园区行业分布特征、生产工艺流程特点等因素,提出以工业园区为边界的碳排放量核算方法;然后选取典型高耗能工业园区,通过研究碳排放量的结构趋势及不同类型碳排放量的变化特征,分析不同碳排放类型的影响因素,得到各行业类型与不同碳排放类型热力分布图;最后针对工业园区行业碳排放特点提出该园区实现降碳减排目标的方案,为高耗能工业园区低碳化发展路径研究提供技术支持.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

选取典型高耗能工业园区,园区位于河北省西南部,占地面积为  $2183 \times 10^4 \text{ m}^2$  (见图 1). 该园区是河北省人民政府确认的首批省级工业聚集区,目前共有 31 家企业入驻该园区,以石油化工、煤化工、氯碱化工等重工业为主,根据国民经济分类<sup>[47]</sup>将园区内企业分为化学原料及化学制品制造业、橡胶和塑料制品业、医药制造业、设备制造业、石油、煤炭及其他燃料加工业、造纸和纸制品业、非金属矿物制品业七类 (见图 1,行业类型以代码简称),其中超过半数属于

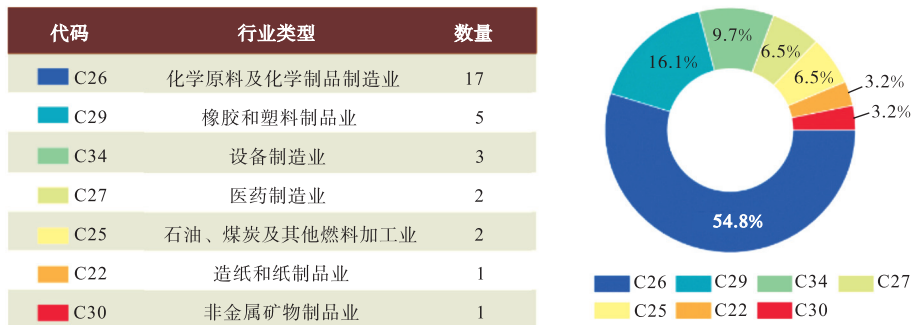


图 1 高耗能工业园区行业类型分布情况

Fig.1 Sector-type distribution in the energy-intensive industrial park

化学原料及化学制品制造业,橡胶和塑料制品业 (16.1%)、设备制造业 (9.7%) 为第二、三大类行业 (见图 1).

### 1.2 工业园区碳排放核算方法

本文中的工业园区碳排放核算方法 (见图 2) 是

在传统的排放因子法基础上,增加了工业园区行业分布特征、生产工艺流程特点等因素,得到以工业园区为边界的碳排放量. 计算步骤如下: ①确定园区核算边界; ②分析全区排放源; ③获取各类排放源的活动数据和排放因子; ④计算汇总温室气体排放量.

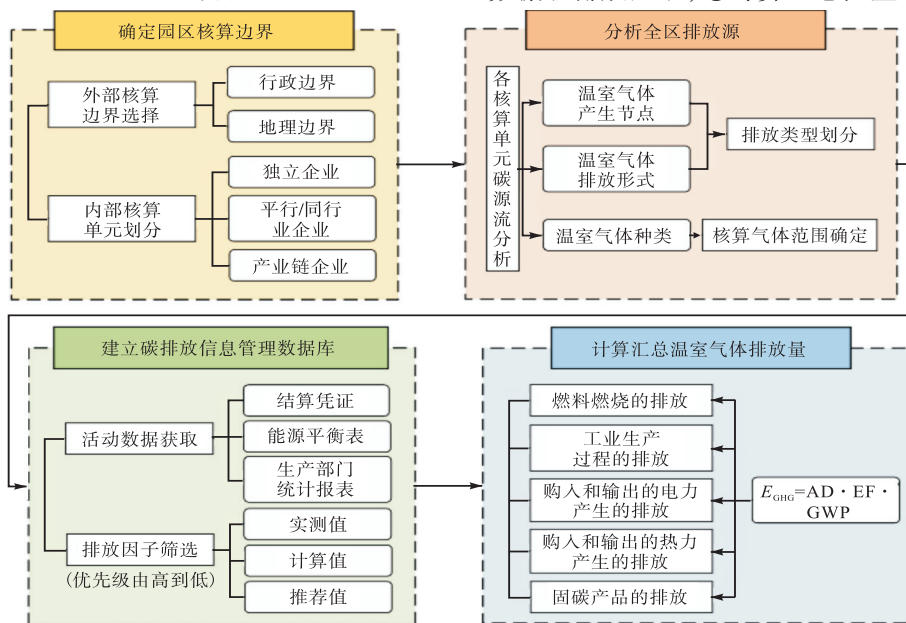


图 2 工业园区碳排放核算方法流程

Fig.2 Flow chart of carbon emission accounting method for an industrial park

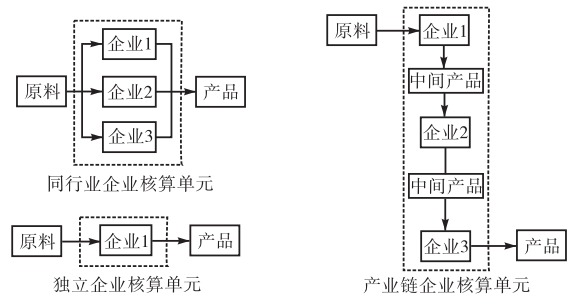
### 1.2.1 确定园区核算边界

首先确定园区核算边界,外部核算边界分为行政区划边界和实际地理边界两种.行政区划边界即园区所属地的管理边界,实际地理边界即建设初期批准的范围及后续发展的扩展空间(详细划分见图 3(b)).研究区域内设管委会,为便于经营管理和责任划分,本研究选择行政边界为外部核算边界,而不是实际地理边界<sup>[48]</sup>.关于内部核算边界,企业层面统计数据口径往往为企业自身,为体现园区内企业上下游产业链和共生相互作用,防止计算重复和缺漏,所以需要划分核算单元.依据产业活动不同,核算单元共有 3 种类型(见图 3(a))分别适用于独立企业、同行业企业、产业链企业.综合考虑组织管理结构、厂房建筑分布、产业聚集情况后,本园区核算单元分布情况见图 3(b).

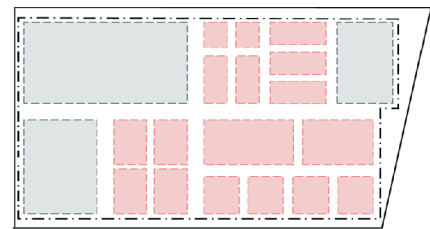
### 1.2.2 分析全区排放源

在划分核算单元的基础上,分别识别每个核算单元的碳源流,全面分析园区内各企业温室气体产排情况,并根据温室气体产生节点和形式划分出燃料燃烧的排放( $E_1$ )、工业生产过程的排放( $E_2$ )、购入和输出的电力产生的排放( $E_3$ )、购入和输出的热力产生的排放( $E_4$ )、固碳产品的排放( $E_5$ )等 5 种排放类型.园区

企业均属于制造业下级分支行业,因此按照制造业生产系统部门及工艺流程做出每个核算单元碳源流图来帮助后续计算(见图 4).



(a) 工业园区核算单元类型



(b) 工业园区核算单元分布

图 3 工业园区核算单元类型及分布情况

Fig.3 Accounting unit types and their distribution in the industrial park

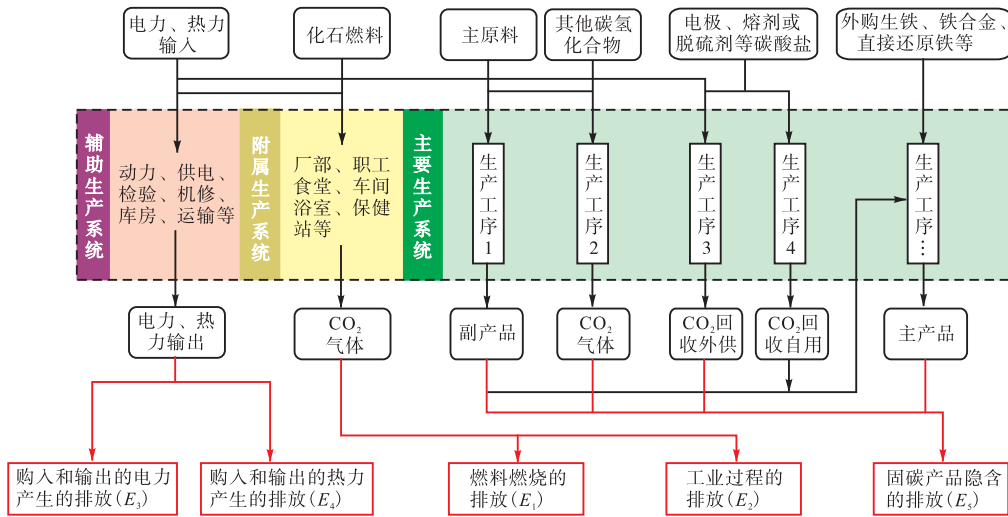


图 4 工业园区核算单元碳源流

Fig.4 Carbon flow of an accounting unit for an industrial park

对于核算气体种类,《京都议定书》<sup>[49]</sup>和《多哈修正案》<sup>[50]</sup>规定了  $CO_2$ 、 $CH_4$ 、 $N_2O$ 、 $HFCs$ 、 $PFCs$ 、 $SF_6$  和  $NF_3$  7 种温室气体.不过我国工业园区中温室气体排放量中, $CO_2$  贡献占比在 90% 以上<sup>[51]</sup>,因此本高耗能工业园区排放气体种类按  $CO_2$  计算.

#### 1) 燃料燃烧的排放 $E_1$

园区共计 43 台固定燃烧设备(详见表 1),近七

成为工业窑炉,燃料主要包括无烟煤、燃油、天然气

表 1 高耗能工业园区燃烧设备统计

Tab.1 Combustion equipment in the energy-intensive industrial park

燃烧设备	数量/台	设备类型
工业锅炉	12	固定源
工业窑炉	30	
内燃机	1	

等,此部分产生 CO<sub>2</sub> 按 E<sub>1</sub> 计。

### 2) 工业生产过程的排放 E<sub>2</sub>

E<sub>2</sub> 主要指园区企业外购化石燃料或其他碳氢化合物作为生产原料产生的 CO<sub>2</sub> 排放以及碳酸盐使用过程中分解产生的 CO<sub>2</sub> 排放等。

### 3) 购入和输出的电力产生的排放 E<sub>3</sub>

E<sub>3</sub> 主要来自生产用电及少量办公用电。

### 4) 购入和输出的热力产生的排放 E<sub>4</sub>

园区采用集中供热方式,6 家企业作为热源,其锅炉产热和装置副产的余热满足自用外可提供园区其他企业生产用蒸汽及建筑采暖。

### 5) 固碳产品的排放 E<sub>5</sub>

生产过程中部分碳固化在外销产品中,该类产品对应的 CO<sub>2</sub> 按 E<sub>5</sub> 计予以扣除。

## 1.2.3 获取各类排放源的活动数据和排放因子

针对活动数据需求,搜集园区内不同企业各生产部门统计报表、能源平衡表、结算凭证等,根据实测值、计算值、推荐值的优先顺序确认不同排放类型适合的排放因子取值,必要时选择与该产品生产过程相近、生产部门相同或者原材料相同、功能相近的产品的排放因子作为替代。燃料消耗量、原料用量、产品产量、用电量和蒸汽量数据分别来自园区环境统计数据。平均低位发热量、燃料单位热值含碳量采用企业对应行业国标推荐值,碳氧化率取 99%,原料和产品排放因子由纯度和理论摩尔质量比计算得到。电力排放因子来源于生态环境部发布的《关于做好 2023—2025 年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知》<sup>[52]</sup>,选取 2022 年度全国电网平均排放因子为 0.570 3 t CO<sub>2</sub>/(MW·h)。热力排放因子选取 0.11 t CO<sub>2</sub>/GJ<sup>[23]</sup>。利用上述数据建立碳排放信息管理数据库(见表 2),为后续碳排放核算提供数据

表 2 碳排放信息管理数据库

Tab.2 Carbon emission information management database

排放类型	活动数据		排放因子	
	名称	来源取值	名称	来源取值
E <sub>1</sub>	燃料消耗量	企业能源平衡表	燃料单位热值含碳量	国标推荐值
	平均低位发热量	国标推荐值	碳氧化率	取 99%
E <sub>2</sub>	原料消耗量	采购单	排放因子	原料纯度和分子质量计算
E <sub>3</sub>	购入和输出的电量	电表记录	区域电网排放因子	0.570 3 t CO <sub>2</sub> /(MW·h)
E <sub>4</sub>	购入和输出的热力	蒸汽质量换算	热力消费排放因子	0.11 t CO <sub>2</sub> /GJ
E <sub>5</sub>	固碳产品产量	结算凭证	排放因子	理论摩尔质量比计算

支持。

## 1.2.4 计算汇总温室气体排放量

根据 IPCC<sup>[53]</sup>提供的碳核算基本方程式(1),温室气体排放量为活动数据与排放因子的乘积,不同排放类型分别计算碳排放量,最后汇总得到总温室气体排放量。

$$E_{\text{GHG}} = \text{AD} \cdot \text{EF} \cdot \text{GWP} \quad (1)$$

式中: E<sub>GHG</sub> 为温室气体排放量,单位为吨二氧化碳当量(t CO<sub>2</sub>e); AD 为温室气体活动数据,单位根据具体排放源确定; EF 为温室气体排放因子,单位与活动数据的单位相匹配; GWP 为全球变暖潜势,数值可参考政府间气候变化专门委员会(IPCC)提供的数据,本研究取 1。

由上文排放来源分析,园区企业的温室气体排放为各个核算单元的燃料燃烧产生的二氧化碳排放、生产过程中的二氧化碳排放、消耗电力、热力产生的二氧化碳排放之和,同时扣除固碳产品对应的二氧化碳的量,计算式为

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 \quad (2)$$

式中: E 为温室气体二氧化碳排放总量, t CO<sub>2</sub>; E<sub>1</sub> 为燃料燃烧排放产生的二氧化碳排放量, t CO<sub>2</sub>; E<sub>2</sub> 为工业生产过程的二氧化碳排放量, t CO<sub>2</sub>; E<sub>3</sub> 为购入和输出电力所产生的二氧化碳排放量, t CO<sub>2</sub>; E<sub>4</sub> 为购入和输出热力所产生的二氧化碳排放量, t CO<sub>2</sub>; E<sub>5</sub> 为固碳产品的二氧化碳排放量, t CO<sub>2</sub>。

### 1) 燃料燃烧的排放 E<sub>1</sub>

E<sub>1</sub> 计算式为

$$E_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left( \text{NCV}_{i,j} \times \text{FC}_{i,j} \times \text{CC}_{i,j} \times \text{OF}_{i,j} \times \frac{44}{12} \right) \quad (3)$$

式中: NCV<sub>i,j</sub> 为核算单元 i 化石燃料品种 j 的平均低位发热量,对固体和液体燃料,单位为 GJ/t,对气体燃料,单位为 GJ/(10<sup>4</sup> Nm<sup>3</sup>); FC<sub>i,j</sub> 为核算单元 i 第 j 种化石燃料用作燃料燃烧的消费量,对固体或液体燃料,单位为 t,对气体燃料,单位为 10<sup>4</sup> Nm<sup>3</sup>; CC<sub>i,j</sub> 为核算单元 i 第 j 种化石燃料含碳量,对固体和液体燃料,单位为 t C/t,对气体燃料,单位为 t C/(10<sup>4</sup> Nm<sup>3</sup>); OF<sub>i,j</sub> 为核算单元 i 第 j 种化石燃料碳氧化率;  $\frac{44}{12}$  为二氧化碳折算系数,是二氧化碳与碳的相对分子质量之比。

### 2) 工业生产过程的排放 E<sub>2</sub>

E<sub>2</sub> 计算式为

$$E_2 = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{m=1}^n \left( \text{AD}_{i,m} \times K_{i,m} \times C_{i,m} \times \frac{44}{12} \right) \right) -$$

$$\sum_{q=1}^n \left( AD_{i,q} \times K_{i,q} \times C_{i,q} \times \frac{44}{12} \right) \quad (4)$$

式中:  $AD_{i,m}$  为核算单元  $i$  原料  $m$  的投入量,对固体或液体原料,单位为  $t$ ,对气体原料,单位为  $10^4 \text{ Nm}^3$ ;  $K_{i,m}$  为核算单元  $i$  原料  $m$  的纯度;  $C_{i,m}$  为核算单元  $i$  原料  $m$  的含碳量,对固体和液体原料,单位为  $t \text{ C/t}$ ,对气体原料,单位为  $t \text{ C}/(10^4 \text{ Nm}^3)$ ;  $AD_{i,q}$  为核算单元  $i$  产品  $q$  的产量,对固体和液体产品,单位为  $t$ ,对气体产品,单位为  $10^4 \text{ Nm}^3$ ;  $K_{i,q}$  为核算单元  $i$  产品  $q$  的纯度;  $C_{i,q}$  为核算单元  $i$  产品  $q$  的含碳量,对固体和液体产品,单位为  $t \text{ C/t}$ ,对气体产品,单位为  $t \text{ C}/(10^4 \text{ Nm}^3)$ .

3) 购入和输出的电力产生的排放  $E_3$

$E_3$  计算式为

$$E_3 = (AD_{\text{ine},i} - AD_{\text{oute},i}) \times EF_3 \quad (5)$$

式中:  $AD_{\text{ine},i}$  为核算期内核算单元  $i$  购入电量,  $\text{MW} \cdot \text{h}$ ;  $AD_{\text{oute},i}$  为核算期内核算单元  $i$  输出电量,  $\text{MW} \cdot \text{h}$ ;  $EF_3$  为区域电网年平均供电排放因子,  $t \text{ CO}_2/(\text{MW} \cdot \text{h})$ .

4) 购入和输出的热力产生的排放  $E_4$

$E_4$  计算式为

$$E_4 = (AD_{\text{inh},i} - AD_{\text{outh},i}) \times EF_4 \quad (6)$$

式中:  $AD_{\text{inh},i}$  为核算期内核算单元  $i$  购入热量,  $\text{GJ}$ ;  $AD_{\text{outh},i}$  为核算期内核算单元  $i$  输出热量,  $\text{GJ}$ ;  $EF_4$  为热力消费排放因子,  $t \text{ CO}_2/\text{GJ}$ .

5) 固碳产品的排放  $E_5$

$E_5$  计算式为

$$E_5 = \sum_{i=1}^n \sum_{w=1}^n \left( AD_{i,w} \times K_{i,w} \times C_{i,w} \times \frac{44}{12} \right) \quad (7)$$

式中:  $AD_{i,w}$  为核算单元  $i$  产品  $w$  的产量,对固体和液体产品,单位为  $t$ ,对气体产品,单位为  $10^4 \text{ Nm}^3$ ;  $K_{i,w}$  为核算单元  $i$  产品  $w$  的纯度;  $C_{i,w}$  为核算单元  $i$  产品  $w$  的含碳量,对固体和液体产品,单位为  $t \text{ C/t}$ ,对气体产品,单位为  $t \text{ C}/(10^4 \text{ Nm}^3)$ .

### 1.3 碳排放强度计算

碳排放强度即生产单位产值的二氧化碳排放量,可以反映行业技术发展水平和能源利用效率,计算式为

$$CI = E/P \quad (8)$$

式中:  $CI$  为单位产值二氧化碳排放量,  $t \text{ CO}_2/\text{万元}$ ;  $P$  为行业总产值,万元.

## 2 高耗能工业园区碳排放总量分布特征

### 2.1 高耗能工业园区碳排放总量趋势

园区 2016—2021 年碳排放总量和强度核算后发

现(见图 5),过去 6 年,园区整体碳排放量基本下降,从  $1507.83 \times 10^4 \text{ t CO}_2/\text{a}$  降至  $671.82 \times 10^4 \text{ t CO}_2/\text{a}$ ,年均降幅 15%,说明园区开始逐步实现低碳的发展模式.此外,该园区 2018—2021 年 4 年碳排放总量下降明显,降幅达到 25%.碳排放强度近年下降明显,2021 年仅为  $1.92 \text{ t CO}_2/(\text{万元} \cdot \text{a})$ ,较 2020 年降低 53%,园区从碳排放总量控制转向总量、强度双控.

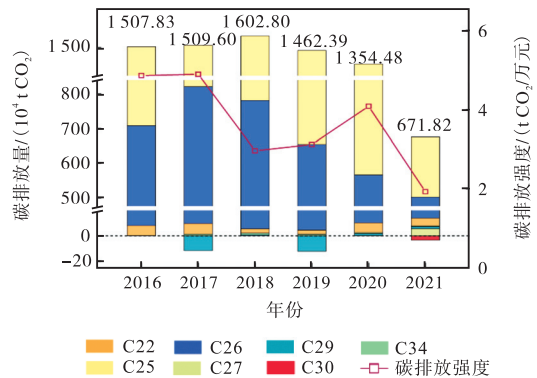


图 5 高耗能工业园区逐年碳排放量结构及碳排放强度变化

Fig.5 Year-by-year carbon emission structure and intensity change of the energy-intensive industrial park

此外,该园区中不同行业之间的碳排放量存在差异,2016—2021 年各行业碳排放总量由大到小依次为:  $C25 > C26 > C22 > C34 > C27 > C30 > C29$ ,极差近  $4000 \times 10^4 \text{ t CO}_2$ ,其中,  $C26$  和  $C25$  的碳排量总和占到园区总排放量的 99%,这与薛若雨<sup>[54]</sup>的结论一致,在本文所讨论的 7 个行业中,前者研究的工业园区碳排放量最高前两名行业同样是  $C26$  和  $C25$ ,说明  $C26$  和  $C25$  可能是高耗能工业园区降碳的关键行业,下文重点讨论这两个行业.

$C26$  的碳排放量基本逐年下降,从  $699.84 \times 10^4 \text{ t CO}_2/\text{a}$  降至  $487.78 \times 10^4 \text{ t CO}_2/\text{a}$ ,尤其 2017—2021 年以年均 11.93% 稳步下降.进一步分析,2016—2020 年该行业在园区总碳排放量比重逐年降低,从 46% 降至 41%,不过 2021 年其占比上升成为园区碳排放量最高来源(73%),可能是由于 2021 年新入驻的几家染料原料生产企业.

$C25$  的排放量基本逐年下降,从  $799.97 \times 10^4 \text{ t CO}_2/\text{a}$  降至  $173.58 \times 10^4 \text{ t CO}_2/\text{a}$ ,2021 年达到碳排放量谷值,降幅同时达到最大(78%).同样,该行业占园区碳排放总量的比重逐年降低,2016—2020 年  $C25$  均在园区碳排放总量占比最大,在 53% 上下浮动,2021 年占比降至第 2 名(26%),与 2016 年相比,降低了 51%,说明该行业碳排放量总量控制初见成效.

另外,虽然2016—2021年园区整体产生碳排,不过2017年、2019年、2021年均出现碳负排,原因在于企业利用生产废料生产新的碳资源化产品,比如固碳工程塑料<sup>[55]</sup>和负碳混凝土<sup>[56]</sup>。

## 2.2 高耗能工业园区中不同类型碳排放量变化特征

核算园区 $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 、 $E_4$ 、 $E_5$  5种不同排放类型的碳排放量,结果如图6所示。首先比较实际增加碳排放量的各排放类型发现,2016—2021年6年排放总量由高到低依次为 $E_2 > E_4 > E_1 > E_3$ ,极差为 $10\,117.77 \times 10^4 \text{ t CO}_2$ ,其中 $E_2$ 在实际增加碳排放总量占比近70%,控制 $E_2$ 成为园区减碳的关键。 $E_2$ 基本呈下降趋势,从 $2\,167.13 \times 10^4 \text{ t CO}_2/\text{a}$ 降至 $241.80 \times 10^4 \text{ t CO}_2/\text{a}$ ,年均降幅36%。这与胡情等<sup>[24]</sup>的研究一致,“十二五”期间,园区对C25大力整改,如淘汰落后的生产工艺等。2021年,园区持续控制C25减排,关停了部分高碳排生产线,2021年 $E_2$ 降幅达到87%,在实际增加碳排放总量中占比明显下降,与2016年相比,比重减少了60%。 $E_4$ 、 $E_1$ 、 $E_3$ 作为与能源消费相关的排放类型,可以一起比较。2016—2018年, $E_1$ 增加(年均增长9.0%), $E_4$ 、 $E_3$ 降低(年均降低分别为66.0%、0.6%),原因是园区产业集群共生格局逐渐形成,工业循环用热、用电量增加,园区外购热力、电力逐渐减少,与严坤等<sup>[51]</sup>对全国203家工业园区的核算结果一致。2018—2020年, $E_1$ 逐年减少(年均降低29%), $E_4$ 、 $E_3$ 逐年增加(年均增长分别为2%、7%),说明由一次能源产生的碳排放量向以二次能源所产生的碳排放量方向转变,与邓娜等<sup>[57]</sup>计算的天津城市温室气体排放量变化分布趋势一致。2021年, $E_4$ 、 $E_1$ 、 $E_3$ 均出现下降趋势,说明能源消费相关碳排放总量得到控制。 $E_5$ 在2016—2020年稳步上升,年均增加7%,占实际增加碳排放量的比重基本呈现增加趋势,从43%上升到50%,在2021年出现下降趋势,降幅36%,可能是部分企业关停产品产量减少所致。下面纵向比较各排放类型里不同行业的变化特征。

$E_1$ 中各行业总排放量由高到低依次为 $C26 > C25 > C22 > C34$ ,主要来源为C26、C25,平均比重分别为70%、29%。C26、C25、C34、C22总排放量均呈现先上升再下降趋势,说明园区能源结构调整初见成效<sup>[57]</sup>,化石能源燃料消耗有所减少。

各行业类型均有 $E_2$ 产生,2016—2021年各行业的 $E_2$ 总量由高到低依次为 $C25 > C26 > C22 > C29 > C34 > C27 > C30$ ,其中,C25、C26占据超九成,平均比重分别为73%、26%。C26排放量2016—2020年基

本呈下降趋势,年均降幅16%,不过在2021年略有上升,增长了5%,可能是由于2021年新入驻的几家染料原料生产企业;C25排放量基本符合下降趋势,年均降幅2%,2021年下降明显,降幅达98%;C22前几年呈上升趋势,经过园区整改,近3年排放量开始呈现下降趋势,年均降幅15%;C34基本在 $0.06 \times 10^4 \text{ t CO}_2/\text{a}$ 上下浮动,可能是由于园区此时只有一家塑料企业,其生产已经基本处于稳定状态;C29在2016、2017、2019年3年排放为零,其余几年基本呈上升趋势,原因在于2016、2017、2019年3年该行业企业未投入生产;C27、C30仅在2021年有排放,原因是其在2021年才有企业入驻园区。

$E_3$ 除了非金属矿物制造业均有产生,各行业的总排放量由高到低依次为 $C26 > C25 > C27 > C34 > C22 > C29$ ,C26、C25为两大排放源,平均占比依次为54%、43%。C26、C25在2016—2018年总排放量持续增加,年均增长率分别为40%、12%,原因是C26、C25相关企业能源消费方式由化石能源使用向热力、电力使用转变<sup>[57]</sup>,2018年开始C26、C25总排放量开始下降,年均降幅分别为11%、5%;C29、C22、C34基本呈现下降趋势,年均降幅分别为29%、57%、18%;C27仅在2021年有排放,原因是其在2021年才有企业入驻园区。

$E_4$ 中各行业总排放量由高到低依次为 $C26 > C25 > C22$ ,C26、C25行业贡献显著,平均排放占比依次为71%、28%。C26在2016—2019年总量基本呈上升趋势,年均增长率2%,可能是由于该行业企业从煤炭、原油、天然气等传统能源向蒸汽供能转变,2019年开始C26排放量开始显著下降,年降幅为14%,可能是由于工业循环余热的大力推广;C25基本呈现下降趋势,年降幅为16%;C22在2018、2019年两年占比为零,前后几年总排放量稳定在 $3.9 \times 10^4 \text{ t CO}_2/\text{a}$ 上下浮动,可能是由于该行业企业在这两年达到热力平衡。

各行业类型均有 $E_5$ 产生,2016—2021年各行业的 $E_5$ 总量由高到低依次为 $C25 > C26 > C29 > C22 > C30 > C34 > C27$ ,C25、C26行业占据绝大部分排放量,平均比重分别为77%、21%。C26基本呈上升趋势,年均增长7%,2021年明显增加,变化率达86%;C29基本呈下降趋势;C25在2016—2018年稳步上升,年均增加18%,在2019年出现下降趋势,降幅14%;C22在2016—2020年小幅度增加,年均增长率为10%,2021年占比为零,可能是由于固碳产品停产;C34仅在2021年有排放,可能是由于2021年新

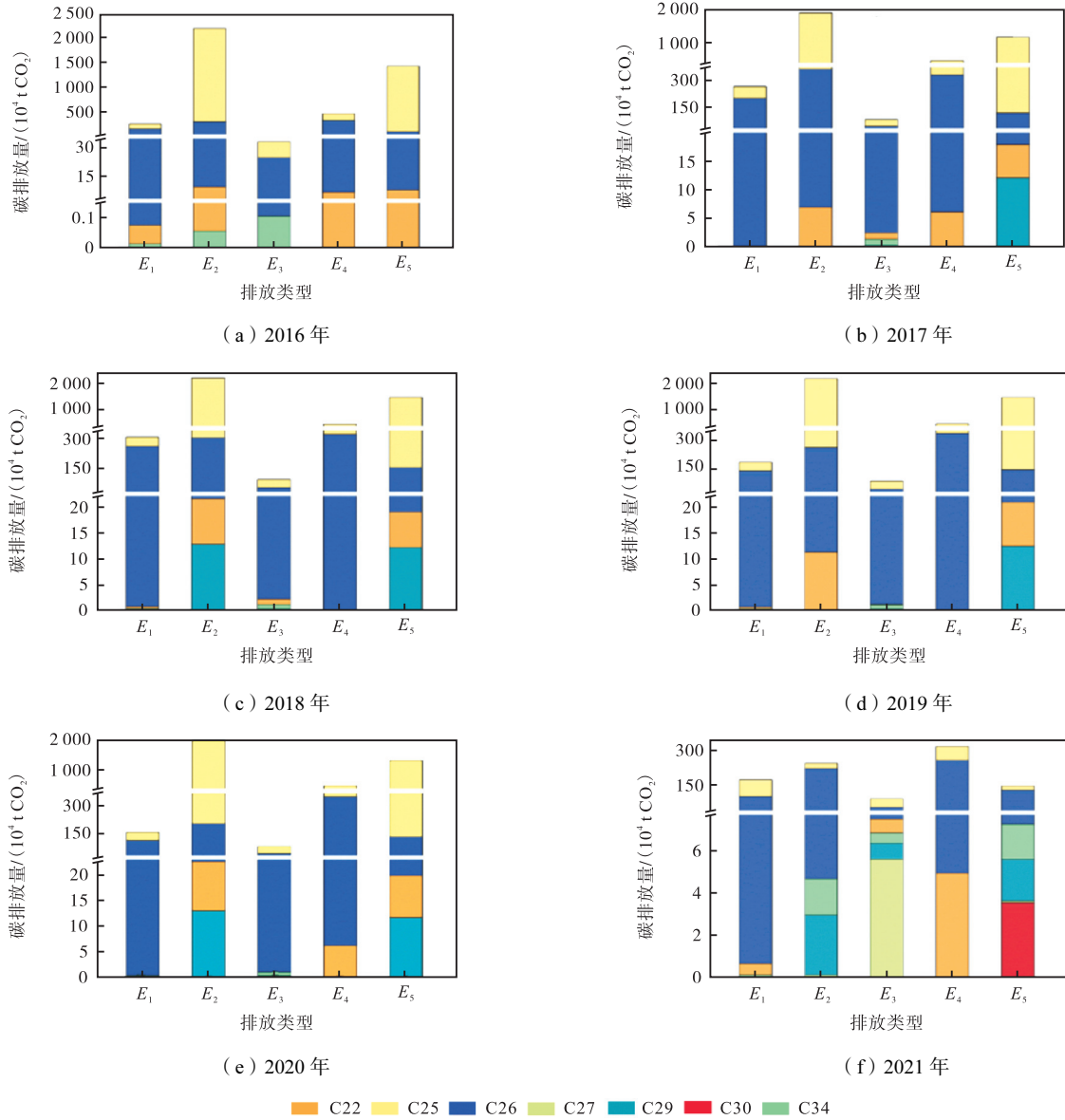


图 6 高耗能工业园区不同排放类型碳排放量的行业分布

Fig.6 Sector-wise carbon emissions of different emission types in the energy-intensive industrial park

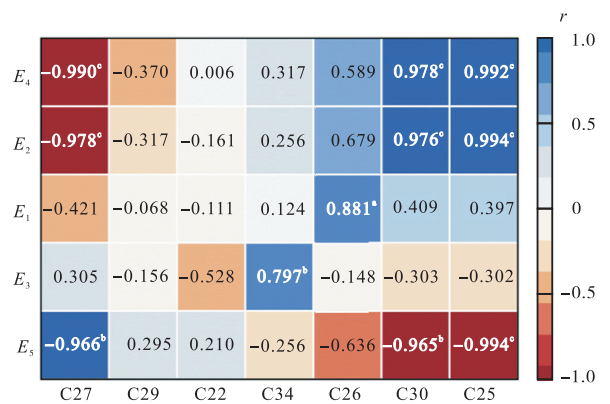
增了固碳产品生产线; C30、C27 仅在 2021 年有排放, 原因是其在 2021 年才有企业入驻园区。

### 2.3 高耗能工业园区中行业类型对碳排放类型的影响规律

可以发现, 各行业类型对不同碳排放类型影响存在差异, 为进一步量化前者对后者的影响规律, 将行业类型与排放类型做相关性分析, 结果如图 7 所示。

$E_1$  与 C26 呈显著正相关,  $r$  达到 0.881, 说明 C26 产生的碳排放量对  $E_1$  影响最大. 观察图 6, 发现 C26 占比逐年下降, 说明其对  $E_1$  变化贡献程度逐年降低. 为控制燃料燃烧的排放量, 园区可以优化 C26 企业的能源结构, 提高可再生能源、清洁能源利用比例。

$E_2$  与 C25、C30 显著正相关, 与 C27 显著负相关, 其中, C25 碳排放对  $E_2$  影响最大,  $r$  达到 0.994.



上标 a、b、c 分别代表  $p \leq 0.05$ ,  $p \leq 0.01$ ,  $p \leq 0.001$

图 7 高耗能工业园区行业类型与排放类型碳排放量相关性热力图

Fig.7 Correlation between the carbon emission of the sector types and emission types

由图 6 可知,2016—2020 年,C25 占比逐年增加,在 2020 年达最大值 89%,说明其对  $E_2$  变化影响逐渐增加,所以,当 2021 年 C25 排放量急剧下降时, $E_2$  也达到最大降幅 87%。因此,园区内 C25 企业应加快降碳升级改造,采用高效低碳工艺来降低生产过程的碳排放。

$E_3$  与 C34 显著正相关, $r$  达到 0.797,故减少 C34 碳排放量对控制电力产生的排放更为关键。由图 6 可知,C34 占比自 2017 年开始逐年降低,在 2021 年降至最低值 0.5%,说明该行业对电力碳排放的影响在逐步降低。C34 行业可以发挥产业共生优势分级供能,实现能源梯级利用。

$E_4$  与 C30、C25 显著正相关,与 C27 显著负相关,进一步比较,C25 的  $r$  达到 0.992,所以 C25 是控制热力排放的首要影响因素。由图 6 可知,C25 从 2018 年起比重基本呈下降趋势,2021 年占比最低为 19%,表明该行业对热力碳排放的影响在逐步降低。园区可以针对 C25 等热力需求高行业增加余热、余压回收系统,提高热能利用效率。

$E_5$  与 C27 显著正相关,与 C30、C25 显著负相关,其中,C25 对  $E_5$  影响最大, $r$  达到 -0.994。由图 6 可知,C25 在  $E_5$  比重逐年降低,年降幅为 33%,表明该行业对  $E_5$  的影响在逐步降低。C25 企业可以加强废物管理处置,利用生产废料等实现二氧化碳高效利用。

综上所述,从行业类型看,C25、C26、C34 均属于对碳排放类型有显著影响的行业,故对高耗能工业园区来说,降低 C25、C26、C34 碳排放至关重要。值得注意的是,有 3/5 碳排放类型都受到 C25 的影响,因此,控制 C25 碳排放是亟待解决的问题。

### 3 结 论

(1) 本文在传统的排放因子法基础上,基于工业园区行业分布特征、生产工艺流程特点等因素,提出以工业园区为边界的碳排放量核算方法。将该方法应用于典型高耗能工业园区,得到 2016—2021 年园区碳排放变化特征:碳排放总量(以  $\text{CO}_2$  计)基本逐年下降,从  $1\,507.83 \times 10^4 \text{ t/a}$  降至  $671.82 \times 10^4 \text{ t/a}$ ,年均降幅 15%,说明园区开始逐步实现低碳的发展模式。

(2) 根据园区内碳排放特点,可将园区碳排放类型分为燃料燃烧排放( $E_1$ )、工业生产过程排放( $E_2$ )、购入和输出的电力排放( $E_3$ )、购入和输出的热力排放( $E_4$ )、固碳产品( $E_5$ ) 5 种排放类型。比较实际增加碳排放量的各排放类型,2016—2021 年 6 年排放总量

由高到低依次为  $E_2 > E_4 > E_1 > E_3$ ,其中  $E_2$  是园区主要碳排放源,占总排放量 70%以上,控制  $E_2$  碳排放量是控制园区降碳减排的关键。2021 年, $E_2$  降幅明显,达到 87%,园区应监督企业继续工艺升级优化,保持  $E_2$  持续下降的良好发展趋势。

(3) 进一步分析不同行业类型碳排放量的特点,得到行业 C25 和 C26 的碳排放量占全行业总碳排放量 99%以上,其中行业 C26 的碳排放量与  $E_1$  相关性最高,为 0.880,行业 C25 的碳排放量与  $E_2$ 、 $E_4$ 、 $E_5$  相关性最高,均为 0.99。2016—2021 年,C25 和 C26 的碳排放量基本呈现逐年下降趋势,年均降幅分别为 26%、7%,因此,针对化学原料及化学制品制造业中燃料燃烧节能降碳工艺、石油、煤炭及其他燃料加工业中生产节能降碳工艺与固碳产品进行优化与升级,帮助该高耗能园区实现降碳减排目标。

### 参考文献:

- [1] 方精云,朱江玲,王少鹏,等.全球变暖、碳排放及不确定性[J].中国科学:地球科学,2011,41(10):1385-1395.  
Fang Jingyun, Zhu Jiangling, Wang Shaopeng, et al. Global warming, human-induced carbon emissions, and their uncertainties[J]. Scientia Sinica Terrae, 2011, 41(10): 1385-1395(in Chinese).
- [2] 国家统计局.中国统计年鉴[EB/OL].<https://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2020/indexch.htm>, 2021-04-23.  
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook [EB/OL].<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2020/indexch.htm>, 2021-04-23(in Chinese).
- [3] 郭扬,吕一铮,严坤,等.中国工业园区低碳发展路径研究[J].中国环境管理,2021,13(1):49-58.  
Guo Yang, Lü Yizheng, Yan Kun, et al. Low-carbon development pathways of industrial parks in China[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(1): 49-58(in Chinese).
- [4] 姜旭朋,张强,赵文婷,等.西安高新区多情景碳达峰预测及减排路径分析[J].环境科学,2024,45(6):3412-3420.  
Jiang Xupeng, Zhang Qiang, Zhao Wenting, et al. Multi scenario carbon peak prediction and emission reduction path analysis of Xi'an hi-tech zone[J]. Environmental Science, 2024, 45(6): 3412-3420(in Chinese).
- [5] Banerjee S, Khan M A, ul Husnain M I. Searching appropriate system boundary for accounting India's emission inventory for the responsibility to reduce carbon

- emissions[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 295: 112907.
- [6] Liu Z, Sun T C, Yu Y, et al. Near-real-time carbon emission accounting technology toward carbon neutrality[J]. *Engineering*, 2022, 14: 44-51.
- [7] Yan H S, Tan X C, Zeng A, et al. China's carbon accounting system in the context of carbon neutrality: Current situation, challenges and suggestions[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2023, 14(1): 23-31.
- [8] 徐媛倩, 罗艺琳, 付广宇, 等. 中国高精度温室气体排放清单编制研究进展[J]. *中国环境监测*, 2023, 39(5): 52-59.
- Xu Yuanqian, Luo Yilin, Fu Guangyu, et al. Status of developing high-precision greenhouse gas emission inventory in China[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2023, 39(5): 52-59(in Chinese).
- [9] Cui C, Li S P, Zhao W C, et al. Energy-related CO<sub>2</sub> emission accounts and datasets for 40 emerging economies in 2010—2019[J]. *Earth System Science Data*, 2023, 15(3): 1317-1328.
- [10] Banhardt C, Hartenstein F. Uncertainties of estimating a town's carbon footprint—Case study EI Gouna, Egypt [J]. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 2019, 29(1): 28-38.
- [11] Xie P C, Wang W J, Liao C P, et al. Research on carbon emission inventory and emission reduction measures based on energy activities: A case study of Guangzhou[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, 43(5): 659-663.
- [12] 孟凡金, 樊兆宇, 王东方, 等. 生命周期视角下城市碳足迹核算及实现碳中和的路径建议——以深圳市为例[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 58(6): 878-885.
- Meng Fanxin, Fan Zhaoyu, Wang Dongfang, et al. Urban carbon footprint accounting and implications for carbon neutrality from a life cycle perspective: A case study of Shenzhen[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2022, 58(6): 878-885(in Chinese).
- [13] 郑屹, 吴玥玥, 杨俊宴. 基于高精度地表覆被类型数据的市域尺度碳收支核算[J]. *风景园林*, 2023, 30(9): 37-44.
- Zheng Yi, Wu Yueyue, Yang Junyan. Urban-scale carbon budget accounting based on high-precision land cover data[J]. *Landscape Architecture*, 2023, 30(9): 37-44(in Chinese).
- [14] 刘亚丽, 曹春霞, 张臻, 等. 山地城市碳排放时空格局与减碳路径研究——以重庆市为例[C]//中国城市规划学会. 人民城市, 规划赋能——2023 中国城市规划年会论文集(15 山地城乡规划). 重庆: 重庆市规划设计研究院, 2023: 14.
- Liu Yali, Cao Chunxia, Zhang Zhen, et al. Study on spatio-temporal pattern of carbon emission and carbon reduction paths in mountain cities—Taking Chongqing as an example[C]//Urban Planning Society of China. People's City, Planning Empowerment—Proceedings of the 2023 China Urban Planning Annual Conference. Chongqing: Chongqing Planning and Design Institute, 2023: 14(in Chinese).
- [15] He H J, Zhou S L, Zhang L P, et al. Dynamic accounting model and method for carbon emissions on the power grid side[J]. *Energies*, 2023, 16(13): 5016.
- [16] Sun L, Zhou M, Yu B. Research on carbon emission accounting and emission reduction measures for coal to methanol processes[J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2023, 43(4): 519-525.
- [17] Cui Q, Li X Y, Li Y. Accounting for the carbon emissions from domestic air routes in China[J]. *Heliyon*, 2022, 8(1): e08716.
- [18] Hu Y H, Zhang K Y, Hu N Y, et al. Review on measurement of agricultural carbon emission in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(2): 163-176.
- [19] Cheng S D, Zhou X, Zhou H. Study on carbon emission measurement in building materialization stage[J]. *Sustainability*, 2023, 15(7): 5717.
- [20] 国家发展改革委办公厅. 国家发展改革委办公厅关于印发首批 10 个行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)的通知[EB/OL]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201311/t20131101\\_963960.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201311/t20131101_963960.html), 2013-10-15.
- National Development and Reform Commission. Notice of the general office of the national development and reform commission on printing and distributing the first batch of greenhouse gas emission accounting methods and reporting guidelines for enterprises in 10 industries (for trial implementation)[EB/OL]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201311/t20131101\\_963960.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201311/t20131101_963960.html), 2013-10-15(in Chinese).
- [21] 国家发展改革委办公厅. 国家发展改革委办公厅关于

- 印发第二批 4 个行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)的通知[EB/OL]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201502/t20150209\\_963759.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201502/t20150209_963759.html), 2014-12-03.
- National Development and Reform Commission. Notice of the general office of the national development and reform commission on printing and distributing the second batch of greenhouse gas emission accounting methods and reporting guidelines for enterprises in 4 industries (for trial implementation)[EB/OL]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201502/t20150209\\_963759.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201502/t20150209_963759.html), 2014-12-03 (in Chinese).
- [22] 国家发展改革委办公厅. 国家发展改革委办公厅关于印发第三批 10 个行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)的通知[EB/OL]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/t20151111\\_963496.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/t20151111_963496.html), 2015-07-06.
- National Development and Reform Commission. Notice of the general office of the national development and reform commission on printing and distributing the third batch of greenhouse gas emission accounting methods and reporting guidelines for enterprises in 10 industries (for trial implementation)[EB/OL]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/t20151111\\_963496.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/t20151111_963496.html), 2015-07-06 (in Chinese).
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 32150—2015 工业企业温室气体排放核算和报告通则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 32150—2015 General Guideline of the Greenhouse Gas Emission Accounting and Reporting for Industrial Enterprises[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016 (in Chinese).
- [24] 胡情, 牛彦涛, 赵鹏, 等. 园区工业碳排放核算与减排策略分析[J]. 建筑技术, 2014, 45(11): 972-976.
- Hu Qing, Niu Yantao, Zhao Peng, et al. Carbon accounting and reduction strategy for industrial parks[J]. Architecture Technology, 2014, 45(11): 972-976 (in Chinese).
- [25] 王伟, 吴晓方, 罗斌华. 开发区碳排放核算及峰值预测——以某开发区为例[J]. 能源研究与管理, 2022, 14(4): 17-22.
- Wang Wei, Wu Xiaofang, Luo Binhua. Carbon emission accounting and peak forecasting in the development zone—Taking a development zone as an example[J]. Energy Research and Management, 2022, 14(4): 17-22 (in Chinese).
- [26] 陈彬, 杨维思. 产业园区碳排放核算方法研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(3): 1-10.
- Chen Bin, Yang Weisi. Carbon emission accounting methods for industrial parks[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(3): 1-10 (in Chinese).
- [27] 卢伊. 生态产业园区碳代谢研究[D]. 北京: 北京师范大学环境学院, 2016.
- Lu Yi. Carbon Metabolism of Industrial Parks[D]. Beijing: School of Environment, Beijing Normal University, 2016 (in Chinese).
- [28] Liu L X, Zhang B, Bi J, et al. The greenhouse gas mitigation of industrial parks in China: A case study of Suzhou industrial park[J]. Energy Policy, 2012, 46: 301-307.
- [29] 徐涵, 温日琨, 金力豪. 产业园区碳排放核算、回归与趋势——以杭州青山湖科技城为实证[J]. 绿色科技, 2019(20): 210-215.
- Xu Han, Wen Rikun, Jin Lihao. Carbon emission accounting, regression and trend in industrial park: Empirical study from Qingshan lake high-tech city in Hangzhou[J]. Journal of Green Science and Technology, 2019(20): 210-215 (in Chinese).
- [30] 靳婧, 马冀平, 黎水宝, 等. 工业园区碳排放核算方法体系研究——以宁夏某国家级工业园区为例[J]. 科技视界, 2019(33): 4-6.
- Jin Jing, Ma Jiping, Li Shuibao, et al. Research on carbon emission accounting methodology of industrial parks: A case study of a national industrial park in Ningxia[J]. Science & Technology Vision, 2019(33): 4-6 (in Chinese).
- [31] 贺艳丽, 叶郁, 孟凡奇, 等. 基于能耗采集的园区碳排放计算方法研究及示范[J]. 动感(生态城市与绿色建筑), 2017(2): 17-21.
- He Yanli, Ye Yu, Meng Fanqi, et al. Research and demonstration of the industrial park carbon emissions calculation based on energy acquisition[J]. Eco-City and Green Building, 2017(2): 17-21 (in Chinese).
- [32] Liu W, Tian J P, Chen L J. Greenhouse gas emissions in China's eco-industrial parks: A case study of the Beijing economic technological development area[J].

- Journal of Cleaner Production, 2014, 66: 384-391.
- [33] Wang H S, Lei Y, Wang H K, et al. Carbon reduction potentials of China's industrial parks: A case study of Suzhou industry park[J]. Energy, 2013, 55: 668-675.
- [34] 魏康霞, 廖兵. 工业园区温室气体排放核算及路径研究[J]. 能源研究与管理, 2014(4): 51-54.  
Wei Kangxia, Liao Bing. Accounting the path of greenhouse gas emissions industrial park[J]. Energy Research and Management, 2014(4): 51-54(in Chinese).
- [35] 齐静, 陈彬. 产业园区温室气体排放清单[J]. 生态学报, 2015, 35(8): 2750-2760.  
Qi Jing, Chen Bin. Greenhouse gas inventory of industrial parks in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2750-2760(in Chinese).
- [36] 陈彬, 王胜, 周世义, 等. 产业园区低碳核算与标准制定[J]. 中国科技产业, 2012(11): 76-81.  
Chen Bin, Wang Sheng, Zhou Shiyi, et al. Low-carbon accounting and standard-setting of industrial park[J]. Science & Technology Industry of China, 2012(11): 76-81(in Chinese).
- [37] 代旭虹. 基于碳足迹评估的工业园区低碳发展模式的研究与实证[D]. 厦门: 厦门大学, 2014.  
Dai Xuhong. Low-Carbon Development Model and Empirical in Industrial Park Based on the Carbon Footprint Evaluation[D]. Xiamen: Xiamen University, 2014(in Chinese).
- [38] Zhang M, Wang C, Wang S S, et al. Assessment of greenhouse gas emissions reduction potential in an industrial park in China[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2020, 22: 1435-1448.
- [39] Zhang J, Liu J Y, Li D, et al. CO<sub>2</sub> emissions inventory and its uncertainty analysis of China's industrial parks: A case study of the Maanshan economic and technological development area[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19: 11684.
- [40] Xue R Y, Wang S S, Long W Q, et al. Uncovering GHG emission characteristics of industrial parks in central China via emission inventory and cluster analysis[J]. Energy Policy, 2021, 151: 112191.
- [41] Qian Y K, Zheng H R, Jing M, et al. Large inter-city inequality in consumption-based CO<sub>2</sub> emissions for China's pearl river basin cities[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 176: 105923.
- [42] Zheng H R, Jing M, Mi Z F, et al. Linking city-level input-output table to urban energy footprint: Construction framework and application[J]. Journal of Industrial Ecology, 2019, 23(4): 781-795.
- [43] 许红周, 计军平. 基于 EIO-LCA 模型的中国 1992—2012 年碳排放结构特征研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(4): 727-737.  
Xu Hongzhou, Ji Junping. Carbon emissions by Chinese economy in 1992—2012: An assessment based on EIO-LCA model[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(4): 727-737(in Chinese).
- [44] Guo Y, Tian J P, Na Z, et al. The Role of industrial parks in mitigating greenhouse gas emissions from China[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52: 7754-7762.
- [45] Tan X C, Zeng Y, Gu B H, et al. The accounting for greenhouse gas emissions of a low-carbon industrial park in China: A case study in Chongqing[C]//9th International Conference on Applied Energy. Cardiff, UK, 2017: 3176-3181.
- [46] Chen B, He G X, Qi J, et al. Greenhouse gas inventory of a typical high-end industrial park in China[J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013: 1717054.
- [47] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 4754—2017 国民经济行业分类[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 4754—2017 Industrial Classification for National Economic Activities[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017(in Chinese).
- [48] 严坤, 高晗博, 冯则实, 等. 关于建立工业园区统一规范碳核算方法体系的思考[J]. 中国环境管理, 2023, 15(3): 5-16.  
Yan Kun, Gao Hanbo, Feng Zeshi, et al. Insights into establishment of unified and standardized carbon accounting method system for industrial parks[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2023, 15(3): 5-16(in Chinese).
- [49] United Nations Framework Convention on Climate Change. The Kyoto protocol[EB/OL]. <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol/kyoto-protocol-bodies>, 2020-11-15.
- [50] United Nations Framework Convention on Climate

- Change. The Doha amendment[EB/OL]. <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol/the-doha-amendment>, 2021-05-17.
- [51] 严坤, 吕一铮, 郭扬, 等. 工业园区温室气体核算方法研究[J]. 中国环境管理, 2021, 13(6): 13-23.  
Yan Kun, Lü Yizheng, Guo Yang, et al. Review on greenhouse gas accounting methods on China's industrial parks[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(6): 13-23(in Chinese).
- [52] 生态环境部办公厅. 关于做好2023—2025年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知[EB/OL]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk06/202302/t20230207\\_1015569.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk06/202302/t20230207_1015569.html), 2023-02-07.  
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Notice on the management of greenhouse gas emission reports of enterprises in the power generation industry from 2023 to 2025[EB/OL]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk06/202302/t20230207\\_1015569.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk06/202302/t20230207_1015569.html), 2023-02-07(in Chinese).
- [53] Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, et al. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Kanagawa, Japan; Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [54] 薛若雨. 基于高耗能产业共生耦合的河南省工业园区低碳发潜力研究[D]. 郑州: 郑州大学化学学院, 2022.  
Xue Ruoyu. Study on Low-Carbon Potential of Industrial Parks in Henan Province Based on Symbiotic Coupling of Energy-Intensive Industries[D]. Zhengzhou: College of Chemistry, Zhengzhou University, 2022(in Chinese).
- [55] 宝理塑料株式会社. 以CO<sub>2</sub>为资源的工程塑料[EB/OL]. [https://www.polycsr.com/cn/highlight/2022\\_01.html](https://www.polycsr.com/cn/highlight/2022_01.html), 2023-12-07.  
Polyplastics DAICEL Group. CO<sub>2</sub>-based engineering plastics[EB/OL]. [https://www.polycsr.com/cn/highlight/2022\\_01.html](https://www.polycsr.com/cn/highlight/2022_01.html), 2023-12-07(in Chinese).
- [56] Li Z P, Shi X M. Towards sustainable industrial application of carbon-negative concrete: Synergistic carbon-capture by concrete washout water and biochar[J]. Materials Letters, 2023, 342: 134368.
- [57] 邓娜, 陈广武, 崔文谦. 城市温室气体清单编制与分析——以天津为例[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(7): 635-640.  
Deng Na, Chen Guangwu, Cui Wenqian. Municipal greenhouse gases inventory and analysis: A case of Tianjin[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2013, 46(7): 635-640(in Chinese).

(责任编辑: 田 军)