

汽车涂装产品制造企业的生产过程 碳排放核算

孙 爽

天津工业大学, 天津

收稿日期: 2022年7月26日; 录用日期: 2022年8月25日; 发布日期: 2022年9月1日

摘 要

本文基于全碳排理论, 整体考虑了产品生产环节碳排放, 辅助生产环节碳排放以及废弃物源的碳排放, 构建了汽车保险杠制造企业的生产过程的碳排放模型, 并以A企业实际生产情况为例, 核算了该企业2021年的碳排放量, 结果表明能源产生的碳排放占比最大, 其中外购电力产生的碳排放为企业最主要的碳排放源。

关键词

汽车制造企业, 碳排放核算, 全碳排

Carbon Emission Accounting Based on Production Process of Coating Products in Automobile Manufacturing Enterprise

Shuang Sun

Tiangong University, Tianjin

Received: Jul. 26th, 2022; accepted: Aug. 25th, 2022; published: Sep. 1st, 2022

Abstract

Based on the total carbon emission theory, this paper considers the carbon emission of product production, auxiliary production and waste sources, constructs the carbon emission model of the production process in automobile bumper manufacturing enterprises, and takes the enterprise A as an example to calculate the carbon emissions of the enterprise in 2021. The results show that

the carbon emissions generated by energy account for the largest proportion. Among them, the carbon emissions generated by purchased electricity are the main sources of carbon emissions for enterprises.

Keywords

Automobile Manufacturing Enterprises, Carbon Emission Accounting, Total Carbon Emission

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

从人类的生存和发展角度来看, 温室效应带来的负面效应很严重, 因此当务之急是寻找可持续发展的低碳经济模式。目前来看, 能源短缺和全球气候变暖是中国面临的两个主要问题。我国作为制造业大国, 生产过程中各个阶段都消耗了大量的能源。尤其对于汽车行业来说, 生产过程中的耗能巨大, 是城市碳排放的主要来源之一。据统计, 在汽车产业成熟的发达国家, 汽车行业的碳排放量占全部碳排放量的 25%~28% [1]。根据清华大学气候变化与可持续发展研究院和二氧化碳信息分析中心(Carbon Dioxide Information Analysis Centre, CDIAC)的统计数据, 2020 年我国汽车的碳排放量为 7.5 亿吨, 占全年各行各业总碳排放量的 7.5%。未来我国汽车保有量预计将持续走高, 汽车产业的生产规模也逐步加大, 碳排放量大的问题需要引起重视。由此可见, 汽车制造类相关企业应着手发展低碳生产模式以适应未来需要。因此, 准确核算这类企业在生产过程中产生的碳排放量是未来可持续发展的重要前提。

目前在汽车制造企业碳排放核算的研究方面, 大部分还只是停留于将全年能耗折算成标准煤再进一步转换成碳排放, 这样来看计算方法过于粗糙, 也不精确[2]。核算范围往往只涵盖了能源消耗部分的碳排放, 实际上企业在生产过程中除了消耗能源外, 还有大量的废弃物产出, 这些不可资源化的废弃物排放到环境中, 对环境造成影响, 直接或间接释放温室气体, 造成环境消耗。只有全方面考虑到企业生产过程中的碳排放量才能为后续企业实施节能减排提供理论依据。因此, 针对汽车制造企业的实际碳排放量核算的研究相对较少、核算范围过小的现实, 本文采用全碳排核算方法, 考虑生产全过程的排放源, 把能源消耗直接碳排放、废弃物处理间接碳排放和废弃物排放潜在碳耗用纳入“全碳排”核算账户, 把不同种类的物质进行归一化处理并折算成碳排放量, 为企业发展低碳生产模式提供依据。

2. 理论依据

2.1. 低碳经济与低碳管理理论

目前, 研究人员普遍将低碳经济的核心定义为低能耗、低污染、低排放和高效能、高效率以及高效益, 能够以较少的能耗和污染排放实现较大产出的新经济发展模式。低碳经济是一场全球性的革新, 这涉及到国家权益权衡、价值观和生产方式的改变。

从低碳发展的角度来看, 发展低碳经济应遵循市场经济的规则, 在制度约束下合理发展, 不能以降低人民群众的生活水平为代价; 从低碳技术的角度看, 要在能源使用效率不断提升的同时, 逐步降低温室气体排放; 从低碳生活的角度看, 必须实现人与自然的和谐, 这就要通过发展低碳经济把温室气体的排放量保持在相对稳定的状态, 避免温室效应对人类的生存和发展的影响。

国内学者陈军首次将低碳管理概念引入中国,提出并阐述了低碳管理的内涵、原则与本质。他在《低碳管理》一书中指出,低碳管理是一种基于低排放、低污染、低能耗为基础的管理模式,实质是资源高效利用,其目的是实现生态效益、社会效益与经济效益的共赢[3]。同时,他提出了低碳管理的7R原则,即再思考、转变观念、低碳排放、低碳研究、再开发、再循环节约资源、保护、恢复。祝福冬[4]在此基础上将低碳管理拓展为提供低碳产品或服务的管理模式。因此,可以看出低碳管理是企业实施可持续发展战略的具体手段与方法,是适应未来社会发展的创新管理模式。

2.2. 可持续发展理论

可持续发展的概念是基于现实的社会经济发展中资源环境制约问题提出的从经济-社会-环境相和谐的发展路径。目前最具权威性的定义是由 Brundtland 提出的“可持续发展是既满足当代人的需求,又不对后代人满足其自身需求的能力构成伤害的发展”。通常在可持续发展经济学中用经济、社会、环境的三重结构来阐述涉及人类与自然关系。

2.3. 碳排放核算

目前关于碳排放核算方法的研究内容,根据国内外学者的成果来看,碳排放核算方法可大致分为宏观和微观两个方面。宏观的核算模型一般是从广义的角度提供碳排放核算的理论,着重于整体系统的碳排放变化,而微观估算模型则直接细分至排放源类型的不同来计算碳排放量。目前,主流的方法有排放因子法、质量平衡法和实测法3种,这三种方法都能兼具宏观与微观的特点。排放因子法是 IPCC (联合国政府间气候变化专门委员会)提出的碳排放估算方法。基本思路是根据碳排放清单,构建出不同碳排放源的活动数据与排放因子,并将二者相乘得到的结果作为该项目的碳排放估算值[5]。该方法目前是学术界应用最为广泛的方法[6] [7] [8],把各类能源消耗量直接换算为碳排放量,核算较为简便,在各行各业的实际操作中得到广泛应用,如张莉[9]提出了电力行业二氧化碳排放因子值核定方法,对燃煤电厂进行案例分析预测其碳排放量,并评估了不同情景下的环境效益。

从碳排放的核算范围来看,首先,在社会-经济-环境复合系统中,碳排放不仅来源于能源消费过程,而且来源于物质生产和消耗的整个过程。其次,技术水平也是影响排放量差异的原因之一。废弃物排放也是一种重要的潜在碳耗用。自然环境的再生能力有限,大量的污染物排放会导致环境质量下降,为了维持生态系统平衡,就要投入人力、物力、财力进行降低污染程度,在这种改善环境的活动中,投入的材料以及生产活动同样会产生碳排。

因此本文从整体观视角,应用系统学方法,综合考虑碳排放与潜在碳耗用,将传统碳排放核算范围加以拓展,不仅考虑直接或间接能源消耗所产生的碳排放,还将废弃物治理与排放所引起的潜在碳耗用也纳入碳排放计算范围,以体现生产水平与消费方式对碳排放和碳平衡所产生的影响,提出“全碳排”概念。

2.4. 碳排放控制

国内外学者对碳排放控制方面也做了不少的研究,选取的角度不同,研究方法也各有千秋。在微观企业视角中,杨李宁[10]以重庆市水泥行业为研究对象,结合 IPCC 法提出了水泥出厂前碳足迹的计算方法以及四种降低水泥出厂前碳足迹的方法以及控制策略。在宏观视角中,苏凯[11]以福建省域为研究对象,应用 STIRPAT-PLS 模型进行分析,明确碳排放控制的主要领域,得出总人口、城镇化率以及第二产业比重对碳排放量增长的贡献最大并据此建议福建当前及未来时期减碳重点应是采取优化能源结构和促进产业结构升级,加速发展清洁、再生能源与提高能源效率。

2.5. 碳减排决策

在碳减排决策方面。Abdel [12]提出核电站是埃及满足未来电力需求和碳减排目标的最佳长期替代发电选择。Lash J [13]表示碳排放影响着每一个人，任何人皆不能独善其身。王文举[14]等提出在产业层面进行结构调整，探索碳减排潜力，促进产业结构向低碳结构方向转型。杨花[15]等研究了火电行业碳减排的主要技术与措施，提出提高能源管理水平，推动科技创新，调整产业结构和开拓碳交易市场的建议。

3. 涂装产品制造企业特点

汽车保险杠类产品是汽车的外饰件之一。它是装配在汽车最前端和最后端两个位置的零部件，其材质统称为塑料制品。其兼具装饰与保护功能，在车声收到碰撞是能够吸收冲击能量保护车内人员安全。目前国内的保险杠生产过程涉及注塑、涂装、烘烤等高碳排放环节，尤其在涂装环节上，是污染物排放与碳排放的重点，因此，必须把握好企业生产的各个环节，建立碳排放核算模型。

3.1. 工艺介绍

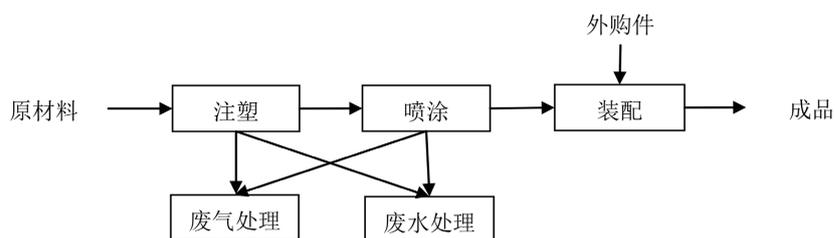


Figure 1. Production process flow
图 1. 生产工艺流程

图 1 为汽车保险杠生产工艺流程。原料由集中供料系统自动送至注塑机料仓，通过电加热烘干至干燥状态，由注塑机注塑成型。喷涂工艺可分为前处理系统和喷涂系统：注塑成型得到的胚件需进行前处理，去除表面灰尘油污，同时对表面进行火焰处理，保证在喷涂前表面的洁净度；注塑件经前处理后进入喷涂系统，塑料件输送到全封闭喷漆室，该喷漆室由底漆喷漆室、色漆喷漆室、清漆喷漆室组成，由自动控制的喷涂机器人完成喷涂作业后烘干。烘干室均采用外购天然气能源燃烧形成的热风循环。喷涂完成后进行装配，检验后入库。整个生产过程各个环节均会有废水和废气的不间断产生。

3.2. 废弃物处理

传统的“三废”是指废水、废气和固废，在该企业生产过程中，废气与废水是通过处理后直接排放环境中，而生产过程中产生的一般固废如冲压件边角料，废包装材料等，收集后统一出售给物资回收单位回收利用，不向环境排放；危险固废储存在企业厂房危废暂存间内，委托第三方企业定期处理，不向环境排放。因此本项目不考虑固废物的碳排放。

3.2.1. 废水处理流程

前期均质均量：废水经过管道重力排入生产废水集水井，后由集水井提升泵泵入废水调节池，在此池内充分混合均匀。在废水调节池内投加调节剂将废水的 PH 值调整至中性。

物化处理系统：投加絮凝剂 PAC、助凝剂 PAM，进行气浮、混凝反应，增大了水的表面积，反应后的废水自流进入高密沉淀池沉淀区，在高密沉淀池内使生成的沉淀和有机物絮凝体进行固液分离。

生化处理系统：主处理单元主要采用生化处理。在水解酸化池中的厌氧型微生物的作用下，废水中

5. 碳排放核算

5.1. 核算气体类型

根据 IPCC 第五次评估报告, 人为源辐射强迫可归因于稳定的温室气体、短寿命周期温室气体及气溶胶。稳定的温室气体在大气中混合均匀, 在较长时间范围内产生持续的环境影响, 包括 CO₂、N₂O、CH₄ 及卤代烃等。因此本文根据该企业实际生产情况, 确定核算的气体类型为 CO₂ 和 CH₄。

5.2. 建立企业碳排放核算模型

构建汽车保险杠生产企业二氧化碳排放量核算模型。对物质、活动产生的数据进行客观的量化处理。总碳排放量为各生产过程的碳排放量之和, 各工业过程包括天然气燃烧、电力热力源、废气、废水。

$$E_{\text{total}} = E_{\text{电力}} + E_{\text{天然气}} + E_{\text{废气处理}} + E_{\text{废水处理}} + E_{\text{CO}_2, \text{废气}} + E_{\text{CO}_2, \text{废水}} \quad (\text{公式 5-1})$$

其中 E_{total} 为企业年碳排放总量; $E_{\text{天然气}}$ 为年天然气消耗产生的碳排放量; $E_{\text{电力}}$ 为年电力消耗产生的碳排放量; $E_{\text{废气}}$ 为每年企业经过废弃物处理流程后向外界排放的废气造成的二氧化碳排放; $E_{\text{废水}}$ 为每年企业经过废弃物处理流程后向外界排放的废水造成的二氧化碳排放; $E_{\text{CO}_2, \text{废气}}$ 为每年企业废气处理过程中释放的碳排放量; $E_{\text{CO}_2, \text{废水}}$ 为每年企业废水处理过程中释放的碳排放量。单位均为 kg。

1) 电力消耗造成的碳排放

$$E_{\text{电力}} = \sum_i V_i \times \lambda_p \quad (\text{公式 5-2})$$

其中, $E_{\text{电力}}$ 为计算年份的电能转换成 CO₂ 的排放量, 单位 kg; V_i 为每个需用电工序的用电量, 单位 kW*h; λ_p 为企业所在地区电网温室气体排放系数, 单位 kg/kW*h。

2) 天然气消耗造成的碳排放

依据国家发改委发布的《综合能耗计算通则》和《省级温室气体清单编制指南》, 整理出单位天然气能源消耗 CO₂ 折算系数[16]。

$$E_{\text{天然气}} = \sum_i P_i \times \lambda_k \quad (\text{公式 5-3})$$

其中, $E_{\text{天然气}}$ 为计算年份的天然气转换成 CO₂ 的排放量, 单位 m³; P_i 为每个需用气工序的天然气用量, 单位万 m³; λ_k 为天然气(CH₄)消耗的碳排放系数, 根据指南取值 2162.2 kg/万 m³。

3) 废气处理过程造成的碳排放

VOCs 在 760℃ 以上发生热氧化反应, 生产 CO₂ 和 H₂O 等。处理过的气体经过另一蓄热体, 将温度降低, 达到国家排放标准后进行排放。本过程废气处理只涉及 VOCs 的削减处理, 因此只计算 RTO 焚烧炉将 VOCs 焚烧后产生的 CO₂ 量, 如下公式:

$$E_{\text{废气处理}} = M_q \times (T_q - S_q) \times EF_q \quad (\text{公式 5-4})$$

其中, $E_{\text{废气处理}}$ 为计算年份的废气处理工艺产生的 CO₂ 排放量, 单位 kg; M_q 为废气排放量, 单位 m³; T_q 为废气中挥发性有机物的总量, 单位 kg/m³; S_q 为有组织排放的挥发性有机物的浓度, 单位 kg/m³; EF_q 为处理挥发性有机物处理过程 CO₂ 排放比例。

4) 废水处理过程造成的碳排放

废水采用厌氧处理过程中会产生 CH₄, CH₄ 主要来自两个节: 某些处理流程需要形成厌氧环境, 废水中有机物在厌氧菌作用下分解产生的 CH₄, 会排放到大气中; 再通过表面曝气处理, 废水中溶解的 CH₄ 又会排入大气。已有研究表明[17] CH₄ 产生量主要取决于废水中可降解有机物量、温度及处理系统的类型和技术。

国内目前针对污水处理过程中的温室气体排放相关研究中,本文针对我国废水处理领域的排放特征,根据马占云等人[18]采用 2006 年《国家温室气体清单优良作法指南和不确定性管理》提供的计算方法核算废水处理产生的碳排放量,该方法可以概况为活动水平数据和排放因子的乘积。综合学者的研究成果,默认废水处理过程产生的含碳气体最终全部以 CH₄ 形式排入大气中,不考虑生物成因。通过核算废水处理过程的化学需氧量(COD)总量确定该排放源排放的 CH₄ 量。再采用 IPCC 的核算方法将 CH₄ 量转换为 CO₂ 的量,采用的度量标准为全球增温潜势(GWP),是基于充分混合的温室气体辐射特性的一个指数,即单位质量特定 GHGs 在特定时间段内所造成的辐射强迫相对于 CO₂ 的积分值。GWP 在目前碳排放政策研究中已应用较为成熟[19] [20] [21]。公式见下。

$$E_{\text{废水处理}} = (T_p - S_p) \times EF_p \times M \times GWP_i \quad (\text{公式 5-5})$$

其中, $E_{\text{废水处理}}$ 为计算年份的废水排放产生的 CO₂ 排放量,单位 kg; T_p 为废水中实际治理的可降解有机材料总量,单位 kg; S_p 为计算年份以污泥清除的有机成分,单位 kg; EF_p 为废水处理过程 CH₄ 排放系数,《IPCC 指南 2006》提供的缺省值为 0.25 kg CH₄/kg COD; M 为无氧处理的废弃物的比,即 CH₄ 修正因子,本文按 0.4674 计算; GWP_i 为 CH₄ 100 年全球暖化潜势值,取值 21,数据来源为 IPCC 第五次评估报告值。

5) 废气与废水排放造成的碳排放

废弃物账户中的废水、废气的原始数据,乘以各自太阳能能值换算系数,转化为太阳能值。废弃物的太阳能值转换系数参考美国生态学家奥德姆[22]和中国学者蓝盛芳[23]、朱燕燕等[24]的研究成果,取值如表 1 所示。

Table 1. Waste diversion rates

表 1. 废弃物转换率

废弃物名称	转换单位	转换率
废气	Sej/m ³	1.32 × 10 ⁹
废水	Sej/t	4.94 × 10 ¹²

借助电能的能值转换率,将太阳能值换算成电能;再由电能煤炭转化率,将电能转换为煤炭,进而根据煤炭的碳排放系数,计算出各类废弃物排放的潜在碳耗用量。计算公式如下:

$$E_{\text{CO}_2,w} = \sum_i \frac{Q_i \times \beta}{\gamma} \times \frac{0.8856}{3600000} \quad (\text{公式 5-6})$$

其中, $E_{\text{CO}_2,w}$ 为计算年份的第 w 类废弃物排放的潜在碳耗用总量,单位 kg; Q_i 为每个工序第 w 类废弃物排放量的原始数据,废气单位取 m³,废水单位取 t; β 为第 w 类废弃物的太阳能值转换率,取值如表 1 所示; γ 为电能的能值转化率,本文取值 1.05×10^5 sej/J [13]; 1 kW*h = 3,600,000 J; 每千瓦时供电排放 0.8856 kg CO₂ (根据国家发展和改革委员会公布的数据计算得到)。

本文中废气与废水的碳排放核算均使用该公式,进行核算。

5.3. 核算实例

5.3.1. 数据来源

以 A 企业为例计算 2021 年度该企业碳排放总量。A 公司为北京汽车集团有限公司下的汽车保险杠生产企业,北京汽车集团有限公司(简称“北汽集团”)是中国汽车行业的骨干企业,总部位于北京,现已发展成为产业链涵盖整车及零部件研发制造、汽车服务贸易、综合出行服务、金融与投资等业务,于 2014

年上市，年营业收入超 5000 亿元。2015 年北汽集团投资 28,532 万元在重庆市成立了 A 公司，主要年产 60 万套汽车彩色保险杠以及 200 万件车轮罩等小件产品。公司劳动定员 350 人，其中 216 人为直接生产工人，技术及管理人员 134 人。企业数据来源于发布的环境影响评价报告书和企业实际生产数据。

5.3.2. 生产数据

本项目生产过程电能年耗 980 万千瓦时，厂内自建箱式变电器，厂区电力由园区电网提供。本项目生产过程年消耗天然气 243.8 万立方米，场内建设燃气调压柜，厂区燃气有园区燃气管网供给。经核算，该企业废水每年废水产生量 60930.5 m³。年 COD 产生量为 47.06 t，治理后实际排放总量 2.255 t，污泥带走 1.96 t。

废气排放情况见表 2。

Table 2. Exhaust emission statistics table

表 2. 废气排放统计表

污染源	排放量(m ³ /a)	治理措施
注塑废气	132,000,000	无
喷涂废气(包括三道喷涂干工序废气) 烘干废气(包括两道烘干工序废气)	193,430,769	RTO 焚烧
锅炉废气	5,760,000	无

挥发性有机物处理前浓度 65 mg/m³，经 RTO 焚烧炉燃烧后排放浓度为 5 mg/m³，处理效率，年处理量 193,430,769 m³。

5.3.3. 核算结果

根据 5.2 节所列的方法，计算出该汽车零部件制造企业在 2021 年的碳排放量，见表 3。

Table 3. 2021 corporate carbon emission accounting table

表 3. 2021 年企业碳排放核算表

排放类型	碳排放量
电力排放	9,745,120 kg
天然气排放	527,144 kg
废气处理过程排放	4758 kg
废水处理过程排放	105,135 kg
废气排放	1,024,231 kg
废水排放	705,192 kg

该企业的碳排放源可划分为能源排放、废弃物处理排放和废弃物排放等 3 大种类型。由表 3 可知，能源产生的碳排放占比最大，其中外购电力产生的碳排放为企业最主要的碳排放源。故该企业应积极制定相应的节能措施，以降低对电力的消耗量和天然气的消耗量，同时也应注意控制和减少其他排放源的排放量。

6. 低碳减排建议

6.1. 积极发展低碳技术

采用新材料、新工艺，积极发展绿色清洁生产。汽车涂装工艺占总生产过程所需能源的 70%以上，

因而是节能减排的重点环节。企业可通过设备改造与设备管理等手段降低能耗，如引进能源管理系统和变频系统，实时监测电能使用情况。典型的能源管理系统通过对企业变配电系统中主要用电设备的电能实时监控和主要用电指标的技术分析，为企业提供系统、完善的电能监控分析手段，以帮助企业实现精细化管理，降低单位产品/产值能耗水平。

6.2. 优化能源结构

鉴于我国能源类型结构不合理、化石能源消耗巨大，清洁可再生能源所占比重过低这一实际情况，能源供应商必须考虑发展再生资源。可再生能源的开发与利用，不仅能增加能源供应、清洁能源的使用对环境更加友好，更是解决目前以及未来的全球能源供需矛盾。大力发展非化石能源十分重要，着力培育能源新产业新模式，持续优化能源结构。因地制宜发展风能、太阳能、生物质能以及氢能等多种新能源，推进以水风光为主的可再生能源综合集约高效一体化开发，推进源网荷储一体化试点工程建设。

6.3. 健全管理制度

企业应建立健全节能减排管理机构以及管理制度，落实目标责任，培养或引进专业人才，开展能效水平对标活动，建立健全企业能源管理体系和碳排放管理体系，提高低碳管理水平。对于影响碳排放量核算的重要数据，企业应遵循相关标准和指南要求做好实时测试与记录统计，加强监管能力，将低碳管理落实到位。各中小型企业应加快获得环境管理体系认证，组建出内部审查小组，对企业内部的节能减排措施与管理效果有组织的进行定期审核，培养员工低碳管理意识与责任，加大节能减排研发力度。

7. 结论

本文构建了汽车涂装产品制造企业的碳排放模型，对各环节的 CO₂ 排放量量化。考虑了企业生产过程中各阶段的碳排放量，把能源消耗直接碳排放、废弃物处理间接碳排放和废弃物排放潜在碳耗用纳入“全碳排”核算账户，与以往的传统碳排放核算方法相比，核算范围更全面。

对于废弃物潜在碳耗用的核算方法，本文将以能量分析理论和能量转化定律为理论基础，将环境消耗与浪费的能量数值建立联系，计算不可资源化废弃物潜在的二氧化碳排放量，核算方法上更为创新。

本文以 A 企业为例计算其不同类型的碳排放量，对于其他汽车制造企业有效开展节能减排、降低碳排放量、提高企业效率提供一定的科学依据。汽车保险杠生产企业进行碳排放核算时，应考虑到生产各个环节，识别各环节碳排放并进行科学的核算。根据核算结果发展低碳技术、优化能源结构和加强管理等手段减少碳排放，实现节能减排目标，将碳减排压力转化为企业更新工艺、提高能源利用效率和减少污染物排放量的动力。

参考文献

- [1] 张铁山, 陈小双. 汽车制造企业生产过程碳排放核算与策略[J]. 企业经济, 2014(10): 17-21.
- [2] 李兴虎, 唐乾. 汽车生产企业 CO₂ 排放评价方法研究[J]. 交通节能与环保, 2021, 17(3): 5-10.
- [3] 陈军. 低碳管理[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.
- [4] 祝福冬. 低碳经济时代企业碳管理探析[J]. 企业经济, 2011(7): 51-54.
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change, United Nations Environment Program, Organization for Economic Co-Operation and Development and International Energy Agency (1997) Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change, United Nations Environment Program, Organization for Economic Co-Operation and Development, International Energy Agency, Paris.
- [6] 吴文伶, 刘星, 冯建华, 石敬斌, 耿冬青, 周辉. 建筑工程施工机械碳排放研究[J]. 施工技术, 2021, 50(13): 118-122.

- [7] 李振宇, 廖凯, 崔占伟, 刘洋. 缓解城市交通拥堵的 CO₂ 减排效益评估方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(2): 8-12+19.
- [8] 那洪明, 高成康, 郭玉华, 田凡. “中国式”电炉炼钢流程碳排放特点及其源解析[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2019, 40(2): 212-217.
- [9] 张莉. 基于 LCA 的电力行业 CO₂ 排放预测及燃煤电厂实例分析[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [10] 杨李宁, 付祥判. 以重庆为案例的水泥碳足迹研究[J]. 中国水泥, 2016(8): 87-92.
- [11] 苏凯, 陈毅辉, 范水生, 张明如. 市域能源碳排放影响因素分析及减碳机制研究——以福建省为例[J]. 中国环境科学, 2019, 39(2): 859-867.
- [12] Abdel-Hameed, A., Kim, J., Hyun, J.-H., Ramadhan, H.H., Joseph, S.R. and Nandutu, M. (2021) Optimization of Electricity Generation Technologies to Reduce Carbon Dioxide Emissions in Egypt. *Applied Sciences*, **11**, Article No. 8788. <https://doi.org/10.3390/app11188788>
- [13] Lash, J. and Wellington, F. (2007) Competitive Advantage on a Warming Planet. *Harvard Business Review*, **85**, 94-102.
- [14] 王文举, 向其凤. 中国产业结构调整及其节能减排潜力评估[J]. 中国工业经济, 2014, 9(1): 44-56.
- [15] 杨花, 杜斌, 吕锋骅, 彭林, 刘凤娴, 史美鲜, 李玮. 基于 IPCC 排放清单和 LEAP 模型的山西省 CO₂ 排放研究[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(3): 103-109.
- [16] 赵桂慎, 生态经济学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [17] 张自杰. 排水工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [18] 马占云, 冯鹏, 高庆先, 卢延娜, 刘俊蓉, 李文涛. 中国废水处理甲烷排放特征和减排潜力分析[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(5): 343-352.
- [19] 郝千婷, 黄明祥, 包刚. 碳排放核算方法概述与比较研究[J]. 中国环境管理, 2011(4): 51-55.
- [20] 任佳雪, 高庆先, 陈海涛, 孟丹, 张阳, 马占云, 刘倩, 唐甲洁. 碳中和愿景下的污水处理厂温室气体排放情景模拟研究[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(4): 410-419.
- [21] 李海萍, 龙宓, 李光一. 基于 DMSP/OLS 数据的区域碳排放时空动态研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(7): 2777-2784. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2018.0291>
- [22] Odum, E.P. (1983) *Basic Ecology*. CBS College Publishing, New York, 1-80.
- [23] 蓝盛芳, 钦佩. 生态系统的能值分析[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 129-131.
- [24] 朱燕燕. 北京市环境-经济系统基于能量的协调发展评估——EMA 能值分析研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2002.