

中国再制造产业的碳减排效应和经济影响分析

于仲觉^{1,2}, 朱庆华¹

(1. 上海交通大学安泰经济与管理学院, 上海 200030;

2. 上海交通大学—联合国工业发展组织绿色增长联合研究院, 上海 200030)

摘要: 发展再制造有助于推动碳减排, 但不同再制造产业规模下的碳减排效应和经济影响仍不明确。将再制造产业作为一个部门引入一般均衡模型, 结合结构路径分析法, 解析再制造如何影响碳排放和经济发展, 并量化评估再制造带来的碳减排效应和经济影响。结果表明, 再制造能够减少对电力生产和供应、金属冶炼的需求, 从而带动碳排放总量下降 0.02% ~ 0.31%, 但造成 GDP 0.003% ~ 0.043% 的小幅下降; 地方再制造产业的发展能够通过区域间贸易影响其他地区的生产活动, 并进一步带动其他地区的碳减排; 随着产业规模的扩大, 再制造能创造更多就业岗位, 但未来劳动力价格上升也可能制约其进一步发展。

关键词: 再制造; 循环经济; 双碳目标; 汽车零部件; CGE 模型

中图分类号: X196

文献标识码: A

文章编号: 1005-0566(2024)04-0056-11

Analysis of the carbon emission reduction effects and economic impacts of China's remanufacturing industry

YU Zhongjue^{1,2}, ZHU Qinghua¹

(1. Antai College of Economics and Management, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

2. SJTU-UNIDO Joint Institute of Inclusive and Sustainable Industrial Development,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Developing remanufacturing can drive carbon emission reduction, but the carbon emission reduction effects and economic impacts at different scales of the remanufacturing industry are still unclear. By introducing the remanufacturing industry as a sector into a general equilibrium model and combining it with structural path analysis, this study analyzes how remanufacturing affects carbon emissions and economic development, and quantitatively evaluates the carbon emission reduction effects and economic impacts brought about by remanufacturing. The results indicate that remanufacturing can reduce the demand for electricity production and supply, as well as metal smelting, driving a decrease in total carbon emissions of 0.02% ~ 0.31%, but causing a slight decrease in GDP of 0.003% ~ 0.043%. The development of local remanufacturing industries can impact the production activities of other regions through inter-regional trade, further driving carbon emission reduction in other regions. As the industry scales up, remanufacturing can create more job opportunities, but the future rise in labor costs may constrain its further development.

Key words: remanufacturing; circular economy; dual-carbon goals; automobile parts; CGE model

收稿日期: 2023-12-20 修回日期: 2024-03-07

基金项目: 国家自然科学基金创新群体(72221001); 国家自然科学基金重大项目(72192833/72192830); 中国博士后面上基金项目(2023M1742266); 国家自然科学基金青年基金项目(72304182)。

作者简介: 于仲觉(1995—), 男, 上海人, 上海交通大学安泰经济与管理学院博士后, 博士, 研究方向为能源和环境经济政策。通信作者: 朱庆华。

为应对日益严峻的气候变化问题,中国提出了“双碳”目标。再制造作为循环经济的一种重要形式,是将废旧汽车零部件、工程机械、机床等进行专业化修复,达到与原有新品相同的质量和性能的批量化生产过程;与原生制造相比,再制造可以节省各类资源的投入,显著减少经济系统的碳排放^[1]。再制造在发达国家是比较成熟的产业。美国的再制造产业总产值在 2011 年就达到了 430 亿美元^[2],欧盟的再制造产值在 2015 年达到约 300 亿欧元^[3]。中国的再制造产业仍处于起步阶段,但产业规模增长迅速。目前,中国再制造企业接近千家,获得工信部再制造认定的产品超过百种,再制造产值在“十三五”末期达到约 1 000 亿元人民币^[4]。为推动再制造产业的发展,中国政府推出了一系列政策。2010 年 5 月,国家发展改革委等 11 部委下发了《关于推进再制造产业发展的意见》,明确了汽车零部件、工程机械等再制造发展的重点领域。《2030 年前碳达峰行动方案》明确要深入开展“循环经济助力降碳行动”,促进汽车零部件、工程机械、办公设备等再制造产业高质量发展,加强资源再生产品和再制造产品推广应用。《“十四五”循环经济发展规划》提出,到 2025 年实现再制造产值达到 2 000 亿元。由此可见,我国政府高度重视再制造产业的培育和发展,但发展再制造产业能够多大程度上促进中国实现“双碳”目标,以及带来何种经济影响,还缺少深入的研究。

以往大量研究从自下而上的视角评估了再制造的碳减排效应和经济性。在碳减排方面,一是使用全生命周期评价(life cycle assessment, LCA)典型方法,对新品和再制造品的环境影响进行核算和对比,如发动机^[5]、机械装备^[6]等。在经济性方面,部分研究通过对典型废旧汽车发动机的案例分析,预测了未来再制造产业发展带来的经济效益^[7];二是模拟通过政府补贴、碳定价等市场化手段推动再制造企业发展的过程^[8]。这些研究往往聚焦于某一种产品的经济性和减排效应,忽略了再制造产业和其他产业的复杂供需关系,难以反映再制造产业发展带动其他产业经济活动变化从而对整个经济系统产生影响的过程。

从宏观或产业视角对再制造经济影响和碳减排效应的评估相对较少。Ferrer 等^[9]在投入产出表中分解了再制造部门,分析了再制造产业的发展对劳动力的需求和行业间竞争的影响。Feng 等^[10]在投入产出表中分解了设备再制造和汽车再制造部门,结合 DEMATEL 方法分析了再制造部门和其他部门的关联性,并评估了再制造产业带来的节能减排效益。Peng 等^[11]基于对投入产出表的分解,使用一般均衡模型刻画了再制造汽车引擎对新品的替代,评估了汽车引擎再制造产业对其他产业的影响,及其带来的二氧化碳和污染物减排效益。然而,以往使用投入产出法的研究大多假设经济系统 GDP 总量不变,难以刻画经济规模变动带来的影响。以往使用一般均衡模型的研究则聚焦于政府干预和技术进步如何推动再制造产业规模的扩大,而非再制造的发展如何影响经济和碳减排。此外,以往研究大多为静态建模分析,难以准确评估未来实现“双碳”目标进程中的系统性变化(如产业结构和能源结构变化)以及未来要素稀缺性的变动(如劳动力成本)对再制造减排效应和经济影响的作用。

综上所述,现有研究缺乏对再制造不同产业规模下碳减排效应的量化评估,再制造产业如何带动经济系统碳减排仍不明晰。针对上述问题,本研究以再制造产业为研究对象,首先将中国多区域动态一般均衡模型进行拓展,通过调整生产部门成本结构的方式引入了再制造生产部门。以国内第一个建立省级再制造专业委员会的山东省为例,量化评估了再制造产业在不同规模和市场份额下的碳减排效应和经济影响,并结合结构路径分析识别了地方再制造产业发展带动经济系统其他产业、其他区域碳排放变动的主要途径。

本研究的主要贡献在于:①通过构造生产函数而非分解投入产出表的方式在一般均衡模型中构建了再制造部门;②从宏观视角量化评估了再制造产业的不同发展规模带来的碳减排效应;③从产业和区域层面解析了再制造带动经济系统碳减排的途径。本文研究的结论有助于解析再制造发展带动前端产业链脱碳的传导过程,探究再制造产业发

展影响经济活动的规律,为国家和地方政府在“双碳”背景下制定再制造产业的发展规划和支持政策提供科学依据。

一、研究方法

(一)一般均衡模型构建

1. 一般均衡模型基础框架构建

一般均衡模型通过描绘经济系统中各经济主体之间的复杂供需关系,在生产成本最小化和居民福利最大化的约束下,模拟外生政策干预对经济系统的影响。一般均衡模型被广泛应用于气候变化和循环经济政策评估,相比自下而上的生命周期核算,一般均衡模型可以内生模拟各生产部门间的供需关系变化,从而反映引入再制造对经济系统整体的作用;相比自上而下的投入产出方法,一般均衡模型将价格变动机制纳入建模,从而可以模拟未来原材料(如钢铁)、能源(如电力)、要素(如劳动力)等投入价格变动对新品制造部门和再制造部门异质化的影响。综上所述,一般均衡模型可以更准确地评估再制造产业发展为经济系统带来的经济影响和碳减排。

本文使用的模型基于 Yu 等^[12] 开发的中国多区域动态一般均衡模型。这个模型包含全国 30 个主要省份(由于数据缺失,模型暂未包含香港、澳

门、台湾、西藏)。每个区域包含 15 个生产部门,其中电力部门进一步细分为化石能源(燃煤、燃气、燃油)和可再生能源(水电、风电、光伏、核能、生物质)发电部门和一个电力传输部门。对每一个区域,模型的基本框架如图 1 所示,每一个地区有独立的生产(包含一般生产和电力生产)和支出模块,各区域间的贸易由贸易模块连接,直接和间接的碳排放核算由排放核算模块完成。模型通过常替代弹性生产函数描绘经济系统中各部门的生产过程、居民对各生产部门产品的消费,以及各区域间的贸易。这个模型的区域贸易和国际贸易遵循阿明顿假设,即本地商品和进口商品非完全替代。劳动力和资本同样是分省的,且不存在省间转移。这个模型通过动态递归描绘经济系统未来的动态增长过程,以一年为步长模拟中国经济系统 2015—2030 年的发展轨迹,其中 2015 年为基年,模型模拟的时间跨度为 2016—2030 年。构建上述基本一般均衡模型所需的相关数据来自于全国和地方统计年鉴、能源和电力统计年鉴、财政和税务统计年鉴等,基年投入产出表来自于 CEADs 数据库^[13]。该模型通过 GAMS 软件和其内置的 MPSGE 子系统编写,通过 PATH 求解器进行求解。

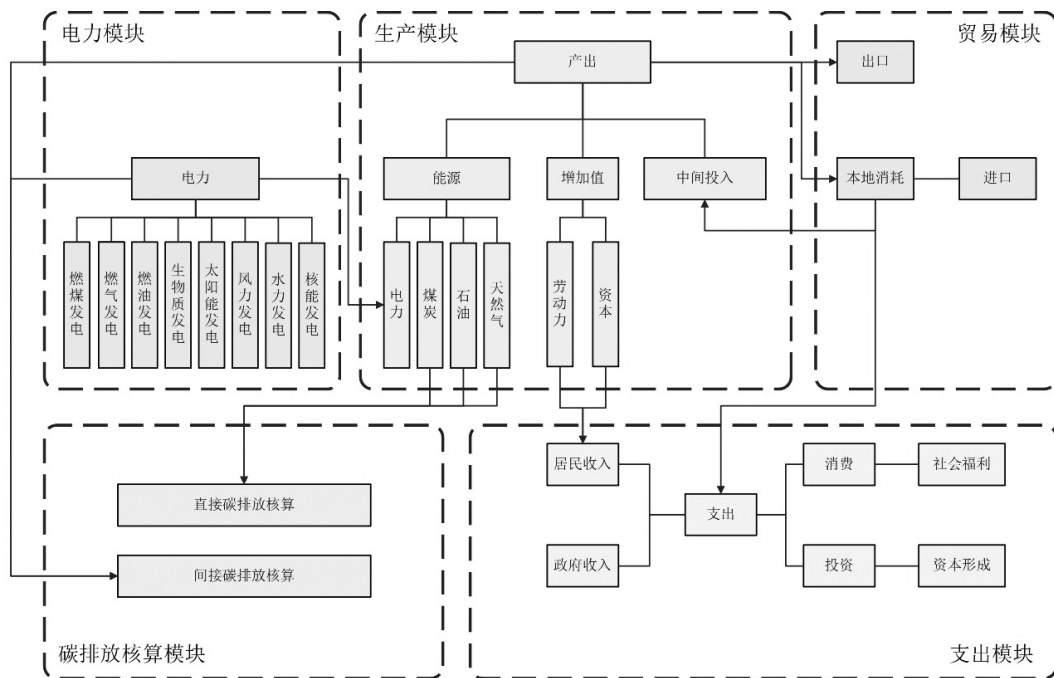


图 1 一般均衡模型框架

2. 再制造部门构建

本文在上述基本一般均衡模型框架内进行拓展,针对山东省汽车零部件再制造产业进行建模。首先,汽车产业链碳排放在全社会碳排放占有重要地位^[14],而汽车零部件再制造是产业化最早、规模最大的再制造产业。2015年汽车零部件再制造的全球产业规模已达850亿~1000亿美元,在美国机动车维修市场70%以上的配件都是再制造产品^[15]。而在中国,2021年的汽车零部件再制造生产企业约为700家,占全国再制造企业数量的35%;汽车零部件再制造产值达到200亿元,占全国再制造产业产值的1/3^[16]。因此,汽车零部件再制造在中国未来有较大的发展空间。其次,未来中国再制造产业将会向部分省份聚集。其中,山东省的汽车零部件再制造产业具有较好的发展潜力。根据公安部的统计数据,2022年山东省汽车保有量为2525万辆,位居全国第二,具有较高的回收利用潜力。山东省2021年10月在国内率先成立了循环经济协会再制造专委会,3家企业入选发改委汽车零部件首批和第二批再制造企业试点名单,具有成规模发展再制造的产业基础。而从山东省的低碳转型现状来看,山东省产业结构以重工业为主,能源结构以化石能源为主,亟需推动产业结构转型以应对“双碳”目标的要求。从全国层面来看,个别省份再制造产业的发展会通过省间贸易影响其他省份产业的生产活动,因此分析个别省份再制造带动其他省份碳排放变化的过程是有必要的。综

合以上原因,本文针对山东省汽车零部件再制造产业进行建模。

汽车零部件制造在国民经济行业分类中属于交通设备制造业,主要产品类别包括发动机、变速器、传动装置、离合器、起动机等,其产值占交通设备制造业总产值的40%左右。图2描述了汽车零部件制造和再制造的流程、本研究一般均衡模型中的部门分类、生命周期影响评价中的资源消耗这三者之间的对应关系。

新品制造流程中,矿石开采指各类铁矿、有色金属矿和其他非金属矿的开采过程;冶炼指通过熔炼、电解等方法从矿石中将铁、铜、铝等原材料还原出来的过程,压延成型指将铁、铜、铝等各类配料通过铸造、锻造、冲压等方式制成所需形状和尺寸的过程;机械加工指通过切削使工件得到所需形状、尺寸和表面粗糙度的过程;装配和检测指将各类零部件组装成最终成品,并进行性能测试的过程。再制造流程中,旧件预处理指对旧件进行检测、拆解、清洗,加工和修复指对损坏的零件进行修复、换新使其恢复到新品标准,装配和检测及入库流程和新品制造类似。图2同时给出了以往生命周期评价研究中涉及的和碳排放相关的主要资源投入,包含能源投入(煤炭、燃油、电力等)和金属资源投入(原矿和原材料等),在本研究使用的一般均衡模型中,煤炭由“煤炭开采”部门提供,电力由“电力生产和供应”部门提供,焦炭、燃油等属于“其他燃料”,由“精炼油和煤炭加工品”部门提供。

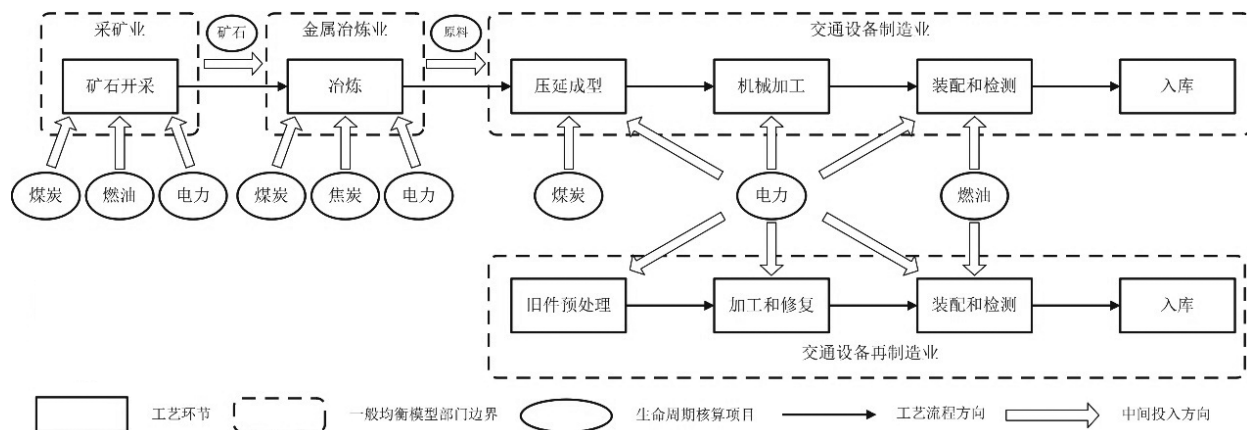


图2 汽车零部件制造/再制造流程、模型部门分类、各项投入对应关系

由于基年时期再制造产品在国内市场上的占比仍然较小^[15],在一般均衡模型的建模中,可以将再制造产业的发展过程视作一种尚未成规模的新技术逐步进入市场的过程。本文在一般均衡模型中新增一个再制造生产部门,并假设其和新品制造部门使用相同的生产函数嵌套结构。在此基础上对各类投入的占比进行调整,从而构造出再制造生产部门的生产函数。当模型涵括再制造生产部门时,模型将调整各部门的投入产出关系从而达到新的均衡,从而模拟再制造产业发展对经济系统的影响。如图 3 所示,交通设备制造和再制造部门的生产函数由四层嵌套关系构成。本文的建模聚焦新品制造和再制造对各项投入的不同需求引起的碳排放差异,为避免部门直接碳排放受到新品和再制造各项能源投入间的不合理替代的影响,交通设备制造和再制造部门生产函数中和能源投入相关的替代弹性均固定为零。

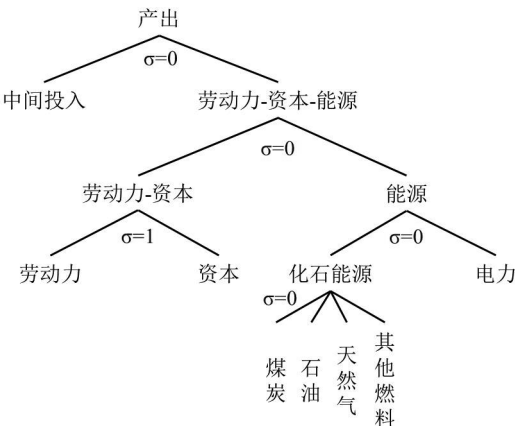


图 3 交通设备制造部门新品和再制造生产函数嵌套结构

3. 再制造部门参数假设

再制造对经济系统中各类产品和要素的需求与新品制造有显著的差异,这种需求差异经过投入产出关系传导至整个经济系统,从而导致两者经济和环境的影响不同。因此,确认再制造和新品生产部门在投入结构上的差异对本研究十分重要。不同于包含产品从原材料开采、加工、制造、使用、废弃环节的全生命周期评价研究,一般均衡建模所需的投入数据仅为再制造品和新品生产环节的各项投入数据。根据文献检索结合实地调研,本研究对再制造生产函数中各部门投入占总投入的比值提出如下假设。

能源投入在本研究使用的一般均衡模型中体

现为煤炭开采部门、石油和天然气开采部门、精炼油和煤炭加工品部门、电力生产和供应部门这 4 个部门对交通设备制造部门的投入。多数产品层面的 LCA 环境影响研究认为汽车发动机和零部件再制造的能耗相比新品低 20% ~ 90%^[17]。然而,这些数据不能直接用作再制造部门能源投入参数的依据。首先,上述研究的能耗结果往往不区分原料开采、冶炼、成型、加工装配等生产环节,而这些环节在一般均衡模型中往往分散在不同的部门当中(见图 2)。其次,上述研究的能耗结果并未区分能源品种(如煤炭和电力投入)。目前仅有少数相关研究对汽车发动机再制造全生命周期的不同环节分别进行了核算。Smith 等^[18]的研究表明汽车发动机的零部件加工和装配环节相比新品制造仍然节能约 65%。同时,根据对山东省相关再制造企业的调研,汽车零部件再制造的主要能耗品种为电力和燃油,本文据此假设交通设备再制造部门单位产值所需的“电力生产和供应”部门投入和“精炼油和煤炭加工品”部门投入相比新品制造降低 65%,而煤炭开采部门、石油和天然气开采部门对再制造部门的投入为零。

金属原材料的开采在本研究使用的一般均衡模型中归属于采矿部门,此部门的产品不直接投入交通设备制造部门,而是经过金属冶炼部门的熔炼后,再投入交通设备制造部门进行加工。和能源投入不同的是,这些原材料经过一系列加工流程后,会以存量的形式停留在最终产品中,因此以往基于 LCA 的研究中得出的关于再制造节省原材料的相关结果可以直接被用于估算一般均衡建模中金属冶炼部门对再制造和新品制造部门投入的差异。Smith 等^[18]的研究表明,根据再制造程度的不同,汽车发动机再制造相比新品节省的钢铁约在 34% ~ 88%。本文据此假设交通设备再制造部门单位产值所需的金属冶炼部门的投入相比新品降低 60%。

另外,再制造生产过程中的拆解、清洗以及更换零部件等工序对劳动力投入和相关零部件产品的需求更高。根据 UNEP^[19]的估计,再制造相比新品制造可以创造约 2.2 倍的就业岗位,本文据此假设交通设备再制造部门的劳动力投入相比新品增加 120%。此外,再制造对交通运输、仓储物流等的需求相比新品高 5%^[20],本文据此假设交通

运输部门对交通设备再制造部门的投入相比新品增加 5%。

在经过上述调整后,为保持一般均衡模型规模不变生产函数的假设,上述各项投入调整带来的投入缺口由交通设备制造部门自身对自身的投入填补^[21],这一设定可以在现实中得到印证,例如发动机再制造企业使用再制造的零件制造发动机的情形。

针对上述主要的投入系数假设,本文通过上下浮动的形式对其进行了敏感性分析,以展示研究主要结果对上述假设变动的敏感程度。

(二)碳排放核算与结构路径分析

本文通过各项化石能源的投入量和对应的排放因子计算交通设备制造业的直接碳排放,再次基础上通过列昂惕夫逆矩阵计算间接碳排放,并进一步通过结构路径分析将间接碳排放分解到中间投入需求的每一层级。需要注意的是,在传统基于投入产出法的间接碳排放核算的过程中,仅当需求 Y 为最终需求时(即居民消费、政府消费、资本形成和净出口),各类需求 Y 的间接碳排放之和才会和经济系统的总直接碳排放相等。当需求 Y 为中间投入需求时,各部门的间接碳排放核算将产生重复计算,各部门的间接碳排放之和将大于经济系统的总直接碳排放。但是,上述重复计算并不影响针对经济系统中某一个部门的间接碳排放分析,也有研究表明上述重复计算的比例越高,意味着经济系统各生产部门的联系越紧密^[22]。

(三)情景设定

本文聚焦于量化评估再制造产业不同发展规模下的碳减排效应,故将再制造产品的市场份额设定为外生,由情景设置给定。这种设定对应现实中政府为鼓励循环经济的发展而强制规定相关再生产品所占比例的政策,如欧盟《包装与包装废弃物法规》规定了塑料包装中再生成分的强制比例。

本文分别设定了一个基准情景(businesses as usual, BaU)和 3 个代表未来再制造产业不同规模的再制造情景(B01、B12、B24),情景设定汇总表 1。

基准情景下 2015—2030 年再制造产值占比固定为零,模拟了不存在再制造时经济发展的情况,

表 1 情景设定

情景代码	2030 年山东省交通设备再制造业产值占比/%	对应 2030 年山东省汽车零部件再制造产品市场份额/%	情景描述
BaU	0	0	不存在再制造的基准情景
B01	1	2.5	再制造汽车零部件的市场份额占比维持当前水平
B12	12	30	再制造汽车零部件的市场份额占比达到发达国家水平的一半
B24	24	60	再制造汽车零部件的市场份额占比达到发达国家水平

该情景将作为各再制造情景比较的基准。3 个再制造情景分别对应 2030 年山东省交通设备再制造业产品的市场份额达到 1%、12%、24%。在汽车后市场,欧美等发达国家的再制造汽车零部件占维修的份额比例约为 60% ~ 70%,而在中国目前这一份额仅为 3% ~ 5%^[16]。根据中国投入产出表和山东省统计年鉴等数据,山东省汽车零部件制造业产值占交通设备制造业总产值约 40%。本文据此假设再制造情景中 2016 年山东汽车零部件再制造产品市场份额为 2.5%,对应再制造产值占交通设备制造业总产值 1%。对于 2030 年,本研究假设在 B01 情景中汽车零部件再制造产品的市场份额维持不变;在 B24 情景中汽车零部件再制造产品的市场份额达到发达国家水平,即 60%;在 B12 情景中汽车零部件再制造产品的市场份额为 B01 和 B24 情景的中间值,即 30%。在此基础上,假设 3 个再制造情景中汽车零部件再制造产品的市场份额在 2016—2030 年间线性增长。

本文通过调整交通设备再制造部门的投入变动系数,评估该系数的浮动对主要结果的影响,分析主要结果对该系数变动的敏感性。以 B24 情景为基础进行敏感性分析,选择 B24 情景的原因是该情景对再制造产值占比的设定最为激进,结果受参数假设影响更大。分别对金属冶炼部门、电力生产和供应部门、劳动力这 3 项投入施加 $\pm 50\%$ 的浮动(见表 2)。

表 2 敏感性分析情景设定

敏感性分析情景代码	投入比例浮动范围/%	涉及的投入
B24_MTL	± 50	金属冶炼部门
B24_ELE	± 50	电力生产和供应部门
B24_LAB	± 50	劳动力

二、研究结果

(一)再制造产业经济影响和碳减排效应评估

根据模型模拟结果,2025 年山东省交通设备制造再制造的产值在 B01、B12、B24 情景下分别达到 139 亿元、1 110 亿元、2 156 亿元,2030 年则分别达到 177 亿元、2 097 亿元、4 123 亿元。考虑到本研究中的再制造仅包含了部分省份(仅山东省)的部分再制造产品(仅汽车零部件),未来中国的再制造产值增长潜力将会更大。

图 4 描述了各再制造情景下,山东省交通设备制造再制造业达到不同产值规模时,该产业为山东省全经济系统带来的碳减排量。结果显示,再制造的发展可以为山东省带来碳减排效益,且再制造的产值越大,碳减排效益越高。对模拟结果进行线性回归,得到的函数斜率为 -0.2019 ,即每 1 亿元的再制造产值可以带来约 2 000 t 的碳减排。

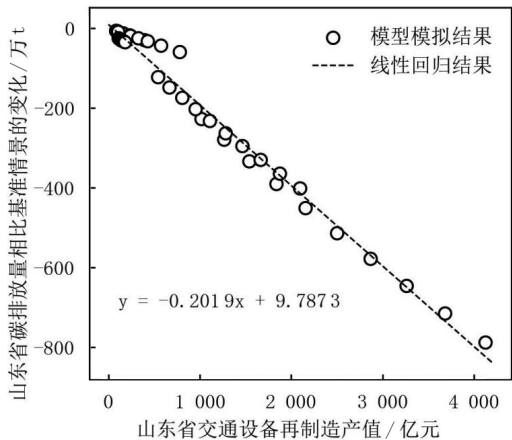


图 4 山东省再制造不同产值规模的碳减排效应
注:每一点表示某个情景某一年的模拟结果,包含 B01、B12、B24 情景。

表 3 描述了各再制造情景下山东省 2015—2030 年累积碳排放总量变化、累积 GDP 变化,以及五年单位 GDP 碳排放变化。从碳排放总量上来看,从 2015—2030 年,在 B01、B12、B24 情景中,山东省交通设备再制造带动全经济系统累积碳减排 328 万 ~ 5 070 万 t,占山东省总累积碳排放的 0.02% ~ 0.31%。从经济影响层面来看,再制造的

发展一定程度上减缓了山东省 GDP 增长的速度。模型结果显示,从 2015—2030 年,在 3 个再制造情景中山东省的累积 GDP 总量相比基准情景降低了 0.003% ~ 0.043%。综合来看,交通设备再制造业对 GDP 的负面影响小于对碳减排的正面效益,也因此带来了单位 GDP 碳排放的降低。在 3 个再制造情景中,山东省的单位 GDP 碳排放相比基准情景均有不同程度的降低,相比基准情景的额外下降幅度为 0.01 ~ 0.26 个百分点。这意味着再制造产业对地方实现 5 年规划中的碳强度下降目标具有实质贡献,对低碳转型和经济高质量发展有推动作用。

表 3 各再制造情景下山东省碳减排和经济指标相比基准情景的变化

指标	B01	B12	B24
累积碳排放总量变化/万吨	-328	-2 620	-5 070
累计碳排放总量变化率/%	-0.020	-0.159	-0.308
累积 GDP 总量变化/万亿元, 2015 年不变价	-40	-355	-695
累积 GDP 总量变化率/%	-0.003	-0.022	-0.043
五年单位 GDP 碳排放变化/百分点 ^①			
“十三五”(2015—2020 年)	-0.01	-0.03	-0.05
“十四五”(2021—2025 年)	-0.01	-0.13	-0.26
“十五五”(2026—2030 年)	< ±0.01	-0.07	-0.15

(二)再制造产业影响经济活动和碳排放的途径分析

从表 3 中已经得知,再制造情景下山东省 2015—2030 年 GDP 低于基准情景,有以下两个原因可能导致这一现象。第一,再制造节省了能源、材料的投入,从而减少了经济系统的生产活动。从图 5a 可以看出,不同再制造情景下山东省 2030 年大多数生产部门的产值均有下降,尤其是和再制造节能、节材的特性密切相关的电力生产和供应部门以及金属冶炼部门。第二,中国未来人口增速放缓,劳动力稀缺性可能逐步增加,造成劳动力价格迅速上升。模型结果显示,2030 年山东省劳动力价格指数达到 2.5,即劳动力价格相比 2015 年增长了 150%。再制造工艺流程中的拆解、清洗、维修等环节需要投入大量人力,因此在模型劳

^① 中国政府以五年为周期给地方下达碳强度(即单位 GDP 碳排放)下降目标。如根据《“十三五”控制温室气体排放工作方案》,国家给山东省下达的五年碳强度下降目标为 20.5%。表 3 中数据表示,在基准情景已有的碳强度下降的基础上,引入再制造可以额外带来的碳强度下降,用百分点表示。以“十五五”期间的模拟结果为例,基准情景下山东省“十五五”期间碳强度下降 13.98%,而 B24 情景引入再制造后碳强度下降 14.13%,即额外下降了 $14.13 - 13.98 = 0.15$ 个百分点。

动力供应总量给定的前提下,再制造需求更多劳动力投入的特征可能降低其未来的产业竞争力。从图 5a 也可以看出,交通设备制造部门的产值在 3 个再制造情景中相比基准情景均有不同幅度的下降,而模型中该部门产值为新品制造和再制造产值之和,这意味着再制造的引入也同样降低了交通设备制造业整体相比其他产业的竞争力。

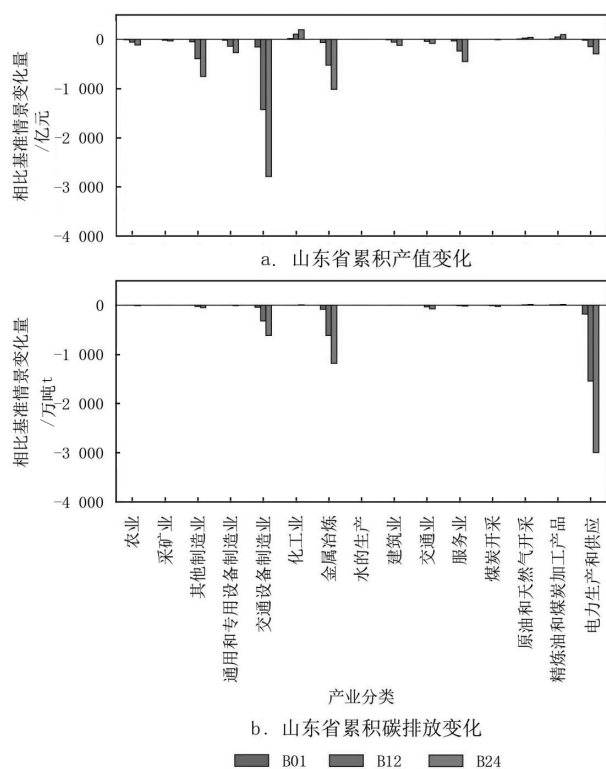


图5 2030年山东省分部门产值相比基准情景的变化

从碳减排来看,与传统高耗能、高排放产业通过自身能效提升或去产能等方式降低碳排放的特征不同,再制造通过减少对其上游高耗能、高排放产业的需求降低整个经济系统的碳排放,因此再制造带来的碳减排量存在部门间的放大作用。图 5b 描述了 2015—2030 年山东省分部门累积直接碳排放量相比基准情景的变化,结果表明各再制造情景下交通设备制造业自身的碳减排量为 45 万~614 万 t,而电力和金属冶炼两部门在各情景下的累积减排量分别为 180 万~2 996 万 t 和 85 万~1 183 万 t,远大于交通设备制造业部门自身的直接碳减排量。

从再制造带动产业链碳减排的路径来看,再制造带动产业链减排涉及的部门较为集中,但路径层级较为分散。再制造带动产业链碳减排涉及的部门集中在电力生产和供应部门、金属冶炼部

门和交通设备制造部门。以 B12 情景下 2015—2030 年山东省交通设备再制造带来累积碳减排量最大的 20 条结构路径为分析对象,其中 13 条和交通设备制造业自身相关,而这 13 条又是由交通设备制造业对自身的投入直接引起。这说明再制造带动经济系统减排的过程既包含对电力、金属资源这些高耗能、高排放产品直接使用的减少,也包含下游整机制造企业对上游零部件制造企业产品需求的减少。这一现象符合现实中汽车零部件制造业的产业链较长,涉及细分行业较复杂的情况。

山东省引入再制造产业带来的碳减排效益在全国区域层面同样存在放大作用,各情景下山东省交通设备再制造带动其他省的额外累积直接碳减排量为 107 万~1 143 万 t,占全国累积直接碳排放总量的 0.001%~0.007%。图 6 描述了 B12 情景各省各部门 2015—2030 年相比基准情景累积直接碳排放量变化,结果显示,山东省交通设备再制造产业的发展对其他省份的碳排放也造成了较显著的影响,其影响的主要部门仍然是电力生产和供应部门以及金属冶炼部门。

山东省再制造对其他省份的碳排放存在两种效果相反的影响。一方面,再制造具有节能、节材的效益,再制造产业的发展将降低交通设备制造业对电力生产和供应部门、金属冶炼部门的需求,从而带来碳减排。另一方面,山东省交通设备制造业的总产值降低(见图 5),为填补对交通设备制造业产品的需求缺口,其他省份交通设备制造业产值增加,从而带来更多碳排放。

图 6 的结果是上述两种影响综合作用的结果。对电力生产和供应部门来说,山东省再制造的发展使得交通设备制造业对电力的需求降低,而山东省的电力有相当一部分来自外部省份输入,因此这些省份的发电量减少,从而降低了电力生产和供应部门的碳排放。图 6 显示,山东省再制造主要带动了内蒙、山西等省份电力生产和供应部门的直接碳排放下降。对金属冶炼部门来说,各省份需要增加本地交通设备制造业的生产以填补山东省交通设备制造产品的缺口。这一变化导致了部分省份金属冶炼部门产值的明显增加,并进一步导致碳排放增加。图 6 显示,山东省再制造带动了河北、江苏等省份金属冶炼部门累积直接碳排放的上升。

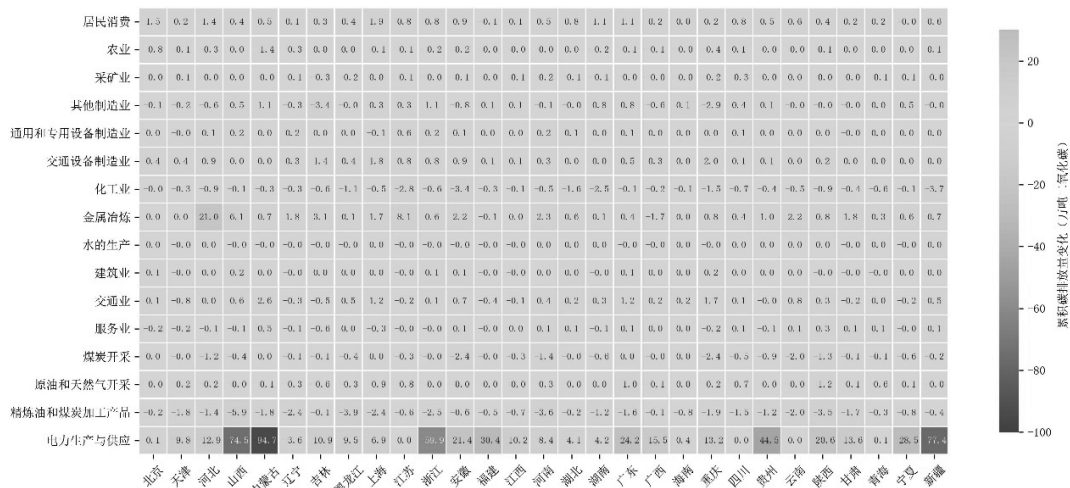


图6 B12 情景各省各部门 2015—2030 年相比基准情景累积直接碳排放量变化(不含山东省)

(三)敏感性分析和结果对比

如图 7 所示,投入系数变动导致结果浮动最大值均出现在 2030 年,而结果发现,再制造的投入系数变动对碳排放相关结果影响较小。B24 情景下 2030 年山东省 GDP 总量相比基准情景的变化为 -0.62% ,敏感性分析情景的浮动范围为 $-0.0648\sim 0.0788$ 个百分点。B24 情景下 2030 年山东省单位 GDP 碳排放相比基准情景的变化为 -0.524% ,敏感性分析情景的浮动范围为 $-0.0645\sim 0.0644$ 个百分点。然而,再制造的劳动力投入对经济指

标相关结果影响较大。B24 情景下 2030 年山东省 GDP 相比基准情景的变化为 -0.0963% ,敏感性分析情景的浮动范围为 $-0.0931\sim 0.0959$ 个百分点。B24 情景下 2030 年山东省交通设备制造业部门产出相比基准情景的变化为 -3.34% ,敏感性分析情景的浮动范围为 $-4.26\sim 4.5$ 个百分点。上述结果意味着再制造企业降低劳动力的投入占比可以显著减轻再制造对经济系统的负面影响,且碳排放量、单位 GDP 碳排放的增长幅度不大。

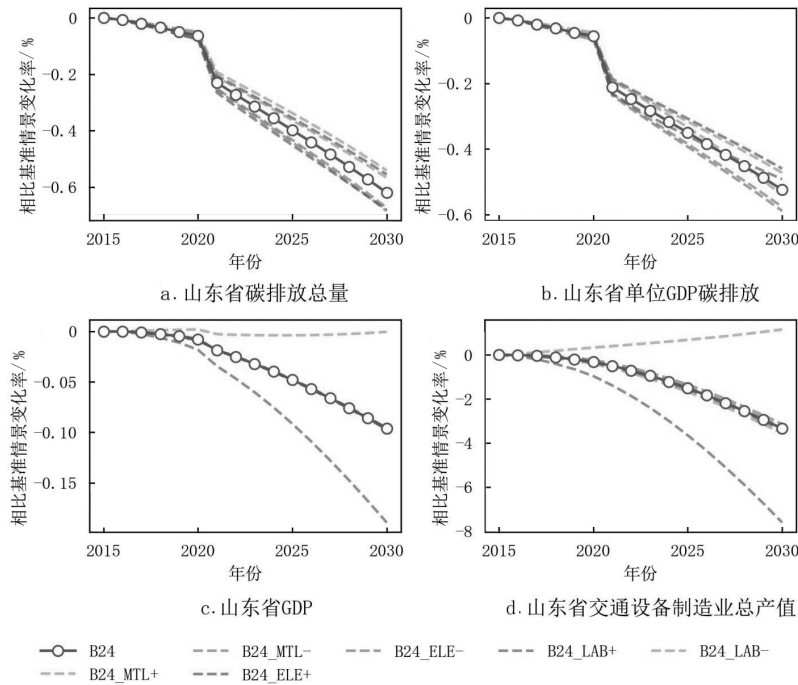


图7 山东省 B24 情景下再制造各项投入系数变动对结果的影响。

注:MAT,ELE,LAB 分别表示再制造生产过程中原材料、电力、劳动力的成本占比相比 B24 情景产生 $\pm 50\%$ 的浮动。

图8将本研究对再制造碳减排效益的计算结果和以往使用LCA的核算结果进行对比。本研究中用于表征再制造碳减排效益的指标计算方法如下。首先计算交通设备制造业的新品和再制造品制造部门各自单位产值带动的直接和间接碳排放总量,然后计算再制造相比新品带动的碳排放降低的比率。其他LCA相关研究结果选自Peng等^[17]对机电设备再制造节能和碳减排量核算相关研究的综述,选用的指标为全球变暖潜势(global warming potential, GWP),这个指标表示单位产品全生命周期带来的温室气体排放的多少。从图中可以看出,本研究得出单位再制造产值带动的碳排放相比新品低20%左右,而使用LCA方法得出的单位再制造产品的碳排放相比新品低40%~90%。造成这一差异的主要原因可能是两种方法的视角不同导致的碳排放核算对象和范围的不同。本文针对产业,计算再制造产业带动经济系统中其他产业的碳减排量,而以往基于LCA的研究针对再制造产品,计算再制造产品生产过程中的投入的其他产品带来的碳排放量。前者使用了产业的平均碳排放因子,而后者使用具体产品的碳排放因子,同一个产业可能包含多种不同的产品,从而使两种方法的核算结果产生差异^[23]。此外,LCA方法自下而上进行核算,往往不可避免地省略供应链中的一些过程,因此自上而下方法计算出的碳减排量可能大于LCA的核算结果^[24],从

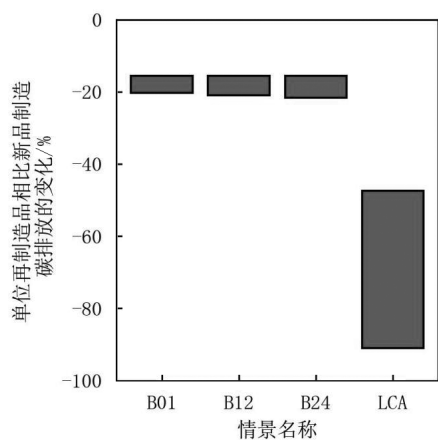


图8 单位再制造品相比新品的碳减排和LCA研究结果的对比

注:B01、B12、B24为本研究结果;LCA为其他使用LCA方法从产品视角核算再制造相比新品碳减排比率的研究结果^[17]。柱形图展示了结果的范围。

而稀释了再制造的碳减排效益。此外,LCA研究使用的全球变暖潜势指标包含了除二氧化碳外的其他温室气体排放和工业过程排放,这些排放未被纳入本研究的计算范围中。

三、研究结论和政策建议

本文聚焦中国再制造产业不同发展规模的碳减排效应和经济影响,以山东省交通设备制造部门中的汽车零部件再制造产业为研究对象,通过调整生产函数各项投入比例的方式在一般均衡模型中构建了再制造生产部门,并使用该模型模拟了引入再制造部门后经济系统发生的变化。在此基础上,结合碳排放核算和结构路径分析,对地方再制造产业带动经济系统各产业和其他地区产生碳减排效益和经济影响的途径进行了分析。以下为本文研究的主要结论。

(1)再制造可以降低经济系统的碳排放总量和强度。在本文研究的3个再制造情景中,山东省汽车零部件的再制造在2015—2030年为山东省带来了0.02%~0.31%的碳减排。综合各个情景的模拟结果来看,每1亿元的再制造产值可以带来约2 000 t的碳减排。

(2)再制造产业降低碳排放的主要路径和金属冶炼部门、电力生产和供应部门,以及交通设备再制造部门自身相关,并且部分地区的再制造可能通过区域贸易影响其他地区电力部门和金属冶炼部门的碳排放。

(3)再制造节省各类资源投入,降低了经济系统的生产活动,并略微降低了经济系统的GDP总量。在本文研究的3个再制造情景中,山东省2015—2030年的累积GDP总量相比基准情景下降了0.003%~0.043%。

(4)再制造需求较多劳动力投入的特征对经济发展的作用是具有两面性的。一方面,这一特征使得再制造产业具有吸纳低端劳动力、创造更多就业岗位潜力;另一方面,这一特征也可能成为制约再制造产业发展的原因。降低再制造对劳动力的需求可以在几乎不影响再制造减排效益的情况下,缓解经济活动水平下降导致的经济损失。

中国的再制造产业仍有较大的发展空间,为充分发挥再制造节能减排和推动高质量发展的作用,政府在制定再制造产业相关政策的过程中应

重点关注以下两个方面。第一,推动再制造产业的自动化和智能化发展。加大对再制造自动化和智能化拆解清洗、成形加工、在线监测等技术的研发支持,联合企业和行业协会推动自动化和智能化技术的产业化落地。通过推动再制造高端智能化的转型,缓解再制造未来对劳动力的需求。第二,研究出台再制造产品的碳减排量计算规则 and 标准,鼓励再制造产品自愿减排项目方法学的开发。加快区域电网碳排放因子的测算和发布,推进金属冶炼产品的碳足迹数据库建设,从而完善再制造产品节能、节材产生的碳减排量计算。

参考文献:

- [1] GUTOWSKI T G, SAHNI S, BOUSTANI A, et al. Remanufacturing and energy savings [J]. *Environmental science & technology*, 2011, 45(10): 4540-4547.
- [2] United States International Trade Commission (USITC). Remanufactured goods: an overview of the U.S. and global industries, markets, and trade[R]. United States International Trade Commission (USITC), 2012: xviii.
- [3] PARKER D, RILEY K, ROBINSON S, et al. Remanufacturing market study[R]. European Remanufacturing Network, 2015: 42.
- [4] 张伟. 再制造:助力“双碳”目标下的循环经济发展[M]. 北京:科学出版社, 2023: 34-35.
- [5] LIU Z C, LI T, JIANG Q H, et al. Life Cycle Assessment-based comparative evaluation of originally manufactured and remanufactured diesel engines: LCA of manufacturing and remanufacturing[J]. *Journal of industrial ecology*, 2014, 18(4): 567-576.
- [6] SHI J L, LI T, PENG S T, et al. Comparative Life Cycle Assessment of remanufactured liquefied natural gas and diesel engines in China[J]. *Journal of cleaner production*, 2015, 101: 129-136.
- [7] 徐滨士, 刘世参, 史佩京, 等. 汽车发动机再制造效益分析及对循环经济贡献研究[J]. *中国表面工程*, 2005, 18(1): 1-7.
- [8] 夏西强, 李梦雅, 路梦圆. 碳减排政策对授权再制造影响的对比研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2023, 43(5): 1380-1395.
- [9] FERRE R G, AYRES R U. The impact of remanufacturing in the economy [J]. *Ecological economics*, 2000, 32(3): 413-429.
- [10] FENG Y T, TIAN Y H, ZHU Q H. A combined input-output/decision making trial and evaluation laboratory method for evaluating effect of the remanufacturing sector development [J]. *Journal of cleaner production*, 2016, 114: 103-113.
- [11] PENG S T, YANG Y, LI T, et al. Environmental benefits of engine remanufacture in China's circular economy development[J]. *Environmental science & technology*, 2019, 53(19): 11294-11301.
- [12] YU Z J, GENG Y, CALZADILLA A, et al. Combining mandatory coal power phaseout and emissions trading in China's power sector[J]. *Energy economics*, 2023(122): 106694.
- [13] SHAN Y L, GUAN D B, ZHENG H R, et al. China CO₂ emission accounts 1997—2015 [J]. *Scientific data*, 2018, 5(1): 170201.
- [14] 乔英俊, 赵世佳, 伍晨波, 等. “双碳”目标下我国汽车产业低碳发展战略研究[J]. *中国软科学*, 2022(6): 31-40.
- [15] 罗健夫. 中国再制造产业发展报告[M]. 北京:机械工业出版社, 2020: 93-101.
- [16] 叶盛基. 践行“双碳”战略需重视汽车零部件再制造产业[J]. *表面工程与再制造*, 2022, 22(4): 27-30.
- [17] PENG S T, PING J F, LI T, et al. Environmental benefits of remanufacturing mechanical products: a harmonized meta-analysis of comparative life cycle assessment studies[J]. *Journal of environmental management*, 2022(306): 114479.
- [18] SMITH V M, KEOLEIAN G A. The value of remanufactured engines: life-cycle environmental and economic perspectives[J]. *Journal of industrial ecology*, 2004, 8(1/2): 193-221.
- [19] United Nations Environment Programme (UNEP), International Resource Panel. Re-defining value: the manufacturing revolution-remanufacturing, refurbishment, repair and direct reuse in the circular economy [R]. United Nations Environment Programme (UNEP), 2018: 83.
- [20] 朱庆华, 冯云婷, 田一辉. 基于投入产出法的中国再制造产业经济影响分析[J]. *中国软科学*, 2014(6): 34-43.
- [21] MCCARTHY A, DELLINK R, BIBAS R. The macroeconomics of the circular economy transition: a critical review of modelling approaches: 130 [R]. Paris: OECD, 2018: 28.
- [22] HERTWICH E G, WOOD R. The growing importance of scope 3 greenhouse gas emissions from industry[J]. *Environmental research letters*, 2018, 13(10): 104013.
- [23] JOSHI S. Product environmental life-cycle assessment using input-output techniques [J]. *Journal of industrial ecology*, 1999, 3(2/3): 95-120.
- [24] KOKONI S, SKEA J. Input-output and life-cycle emissions accounting: applications in the real world [J]. *Climate policy*, 2014, 14(3): 372-396.

(本文责编:润 泽)