

# 基于 EIO-LCA 的青海省行业隐含 碳排放及碳减排潜力分析

祁登菊 胡西武

(青海民族大学,青海 西宁 810007)

**摘要:**通过采用 IPCC 温室气体清单指南中的温室气体排放量核算方法和投入产出生命周期碳减排评价方法对青海省各行业直接和间接碳排放量进行估算,并通过碳减排潜力模型测算其碳减排潜力。结果表明:青海省直接碳排放最大的行业为金属冶炼和压延加工业,占总体能源消费碳排放的 35.93%,化学原料和化学制品制造业(17.60%)以及非金属矿物制品业(7.63%);从生产链视角,间接碳排放较高的行业依次为:化学原料和化学制品制造业(18.17%),石油、炼焦产品和核燃料加工品业(10.44%)和非金属矿物制品业(7.53%);从消费需求视角,间接碳排放主要贡献来自于出口隐含碳排放(40.25%),其中金属冶炼和压延加工业占比 15.77%,化学原料和化学制品制造业占比 13.76%,石油、炼焦产品和核燃料加工品业占比 10.92%;第一减排潜力梯队部门多为能源供应类部门;第二减排潜力梯队部门多为服务业和交通业等生产链下游部门;第三减排潜力梯队部门多为传统行业。

**关键词:**碳排放;碳减排潜力;碳达峰;EIO-LCA 模型;青海省

碳达峰碳中和是国家重大战略需求,打造青藏高原生态文明高地和加快产业“四地”建设是新时代青海省全力推进的重要目标。2023 年 3 月 20 日,政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布第 6 次评估报告《气候变化 2023》,再次明确了工业化以来人类活动对全球气候的影响。2021 年 10 月中共中央、国务院颁布的《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》强调要加快产业结构升级,促进碳减排,推进“碳中和”“碳达峰”双重目标。2022 年 3 月《“十四五”现代能源体系规划》要求推进能源产业链碳减排,加快能源结构绿色转型。2022 年 12 月《青海省碳达峰实施方案》指出要赋能产业“四地”建设。2023 年 3 月青海省生态环境保护工作会议进一步强调要打造生态文明高地和建设产业“四地”,推动经济社会发展低碳化,建设“洁净青海”。

青海省是清洁能源产业高地,碳排放总量全国排名较低<sup>[1]</sup>,总体清洁能源储量大、大型固碳资源丰富,是巨大的碳汇盈余地,需要从供给端、消费需求端、固碳端这“三端”协同发力打造青海省产业“四地”。青海省冰川固碳持碳功能极为突出,拥有森林、草原、湿地、冻土、冰川等多种大型固碳资源,为省内碳汇资源的主要来源。其中,省内森林碳汇潜力预计每年在 3000 万吨,青藏高原土壤生物碳储量达到 267 亿吨,冻土区碳汇潜力最大,冻土土壤有机碳储量达到 1600 亿吨。因此,排除固碳端青藏高原特殊地理区位因素,加快供给端和消费需求端碳减排对实现“双碳”目标显得尤为重大。

本文采用 IPCC 能源碳排放核算方法和 EIO-LCA 模型,分别测算青海省直接碳排放和隐含碳排放

**基金项目:**本文系青海省哲学社会科学重点项目“青海省科学有序推进碳达峰碳中和研究”(批准号:22ZD001)、青海民族大学大学生创新创业训练计划项目“聚落景观基因重构下三江源生态移民发展压力及适应策略研究”(批准号:DCXM-2023-18)、青海民族大学研究生创新项目“青海省行业碳减排潜力分析——基于产业结构视角”(批准号:65M2022204)阶段性成果。

**作者简介:**祁登菊,女,青海西宁人,青海民族大学经济与管理学院硕士研究生,主要从事民族地区经济与社会发展研究。

胡西武,男,湖北荆州人,天津大学—青海民族大学双碳研究院执行副院长 教授,主要从事生态经济与可持续发展研究。

及其强度,通过碳减排潜力模型,从生产者视角和最终消费视角深入剖析各部门隐含碳排放情况,对实现青海省高质量发展和推进生态友好的现代化建设具有重大意义。

## 一、文献综述

刘卫东等<sup>[2]</sup>的研究表明碳排放强度与产业结构之间呈现倒“U”字形曲线关系,在全球气候不断变暖的新形势下,产业结构绿色升级是实现“碳中和”和“碳达峰”目标的重要前提。学者们对于碳排放及碳强度的测算主要基于两种视角:第一种基于生产者视角,即利用 IPCC 核算方法对各部门化石能源直接消耗碳排放量进行核算,主要用于各省、各地区内部直接碳排放估算<sup>[3]</sup>。另一种基于消费者视角,主要对隐含碳排放进行测算,其计算过程较为复杂,现多用于国际贸易中的碳泄露问题研究<sup>[4][5][6]</sup>。投入产出分析法可以追溯整个经济系统的全过程碳排放,目前多用于“碳足迹”核算<sup>[7]</sup>。

随着产业结构绿色转型升级的不断推进,学者们对于产业结构,经济增长及碳排放的研究逐渐增多。徐成龙等<sup>[8]</sup>采用 LMDI 模型探讨山东省产业结构调整对其碳排放的影响,指出产业结构升级会显著降低碳排放量。袁毅军等<sup>[9]</sup>基于 GTAP-E 模型分析对碳排放的主要影响因素,同样发现优化产业结构能明显降低碳排放量。陶长琪等<sup>[10]</sup>利用 PVAR 模型发现碳排放随着产业结构的调整发生变化,并且产业结构变化能够对碳排放造成显著影响。以上研究表明产业结构低碳化转型对于降低碳排放量发挥着至关重要的作用,但方法上较为单一,没有进行全过程测算。

Lave 等创建了经济投入产出生命周期评价模型(EIO-LCA)<sup>[11]</sup>。EIO-LCA 是经济投入产出模型与生命周期理论的结合,其主要运用于碳足迹核算框架下分析产品或服务在整个生产链和消费链上隐含碳排放的研究,通过对隐含碳排放的核算,能更加准确地从微观层面观察产业结构对碳排放的影响。吴常艳等<sup>[12]</sup>、袁长伟等<sup>[13]</sup>和曲英等<sup>[14]</sup>采用 EIO-LCA 模型对省域地区隐含碳排放进行测算,并对其减排潜力进行测算。翁世梅等<sup>[15]</sup>也对安徽省碳减排潜力进行分析,认为能源产业的碳减排潜力较大。王家明等<sup>[16]</sup>进行市级化碳减排潜力研究,探讨更为精细准确化。通过文献梳理发现从生产链和消费链两个视角对隐含碳进行全面综合性地分析能更好的其真实碳排放情况,因此本文基于 2017 年青海省投入产出表采用 EIO-LCA 模型对青海省行业隐含碳(生产链和最终消费)及减排潜力进行分析,从而提出产业结构调整升级的相关对策建议。

99

## 二、研究方法及模型构建

### (一)碳排放量和直接碳排放强度

在全球气候变化的进程中,化石能源燃烧为主要碳排放来源,本文采用 IPCC 温室气体清单指南中的温室气体排放量核算方法对青海省化石能源燃烧产生的 CO<sub>2</sub> 排放量进行测算。具体计算公式如下:

$$E_i = \sum (F_{c_{ij}} \times L_{c_{ij}} \times C_{pc_{ij}} \times Cor_{ij} \times 44/12) \quad (1)$$

式中, $E_i$  为  $i$  行业 CO<sub>2</sub> 排放总量(万 t); $F_{c_{ij}}$  为  $i$  行业  $j$  能源的消费量(万 t); $L_{c_{ij}}$  为  $i$  行业  $j$  能源的低位发热量(Tj/t); $C_{pc_{ij}}$  为  $i$  行业  $j$  能源的单位热值含碳量(t/Tj); $Cor_{ij}$  为  $i$  行业  $j$  能源的碳氧化率;44/12 为碳转换系数。其中,能源品种包括煤炭、焦炭、原油、汽油等,共 9 种。

碳排放强度  $R_i$  是为单位地区生产总值(万元)增长所带来的 CO<sub>2</sub> 排放量, $X_i$  为部门总产出(万元),其公式为:

$$R_i = E_i / X_i \quad (2)$$

### (二)隐含碳排放估算

本文参照吴常艳等<sup>[17]</sup>核算方法,构建青海省 2017 年行业隐含碳排放矩阵,模型用公式表示为:

$$B = R \cdot (I - A^d)^{-1} \cdot Y^d \quad (3)$$

其中, $B$  为隐含碳排放矩阵(28×28); $R$  为元素是各行业直接碳排放系数的对角矩阵(28×28); $(I - A^d)^{-1}$  为列昂惕夫逆矩阵(28×28); $I$  为单位矩阵(28×28); $A^d$  为省内投入直接消耗系数矩阵(28×28); $Y^d$  为对角元为除去进口的最终需求量的对角矩阵(28×28)。

需要注意的是,青海省公布的投入产出表未区分进出口,为了避免隐含碳排量被高估核算偏离真实情况,除去进口影响。因此,直接消耗系数矩阵  $A^d$  的计算公式为:

$$A^d=(I-M) \cdot A \quad (4)$$

进口系数矩阵  $M(28 \times 28)$  中元素  $m_{ij}$  的计算方法为:

$$m_{ij}=IM_i/(Q_i+IM_i-RX_i)$$

$$i=1,2,3 \dots, n。当 i \neq j 时 m_{ij}=0 \quad (5)$$

其中,  $A^d$  为直接消耗系数矩阵;  $I$  为单位矩阵;  $M$  为进口系数矩阵;  $IM_i$  为  $i$  行业进口量;  $Q_i$  为  $i$  行业总产出;  $EX_i$  为  $i$  行业出口量。由此得到完全消耗系数矩阵  $B^d$ :

$$B^d=(I-A^d)^{-1}-I \quad (6)$$

### (三)碳减排潜力模型

本文以投入产出模型为基础,参照吴常艳等<sup>[18]</sup>构建的碳减排潜力模型,考虑产值变化带来的碳减排效应,公式推导如下。

$$\Delta X_j^d=X_j^d \lambda_j + \sum_{i=1}^n b_{ij} X_j^d \lambda_j \quad (7)$$

式中,  $\Delta X_j^d$  为  $j$  部门产值变化和它引起的其他行业产值变化总和;  $\lambda_j$  为  $j$  部门总产值的变化率(本文假设是 1%);  $X_j^d$  为  $j$  部门国内总产值;  $b_{ij}$  为  $j$  行业为产出单位产品需要  $i$  行业总投入。

$$\Delta C=R_j^d \lambda_j X_j^d + \sum_{i=1}^n R_j^d b_{ij} X_j^d b_{ij} X_j^d \lambda_j \quad (8)$$

式中,  $\Delta C$  为产值变化 1% 引起的碳排放总和, 为  $j$  部门直接碳排放强度系数, 其余含义同(7)

$$CRE=\frac{\Delta C}{\Delta X_j^d}=\frac{R_j^d \lambda_j X_j^d + \sum_{i=1}^n R_j^d b_{ij} X_j^d \lambda_j}{X_j^d \lambda_j + \sum_{i=1}^n b_{ij} X_j^d \lambda_j} \quad (9)$$

其中, CRE 表示碳减排效应

$$ACR=\lambda_j X_j^d (R_j^d + \sum_{i=1}^n b_{ij} R_j^d) \quad (10)$$

其中, ACR 表示碳减排总量。

## 三、实证研究

### (一)数据来源及处理

本文各部门能源消费量来源于《2018 青海统计年鉴》和《2018 中国能源统计年鉴》;各化石能源碳氧化率等参数分别来源于《2018 中国能源统计年鉴》和《中国温室气体清单研究》;42 部门投入产出表来源于《2017 年青海投入产出表》。由于 42 部门投入产出表和青海省终端能源消费表中的行业划分有所不同,因此参照王雅楠等<sup>[19]</sup>的划分方法,将 42 部门重新划分合并为 28 个行业,具体行业划分如表 1 所示。

表 1 青海省行业部门归类

编码	名称	编码	名称
a	农林牧渔业	o	金属制品业
b	煤炭开采和洗选业	p	通用及专用设备制造业
c	石油和天然气开采业	q	交通运输设备制造业
d	金属矿采选业	r	电气机械和器材制造业
e	非金属矿采选业和其他矿采选业	s	通信设备、计算机和其他电子设备制造业
f	食品和烟草业	t	仪器仪表制造业
g	纺织业	u	废弃资源综合利用业

续表:

编码	名称	编码	名称
h	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业	v	电力、热力的生产和供应业
i	木材加工品和家具制造业	w	燃气生产和供应业
j	造纸印刷和文教体育用品制造业	x	水的生产和供应业
k	石油、炼焦产品和核燃料加工品业	y	建筑业
l	化学原料和化学制品制造业	z	交通运输、仓储和邮政业
m	非金属矿物制品业	aa	批发零售和住宿餐饮业
n	金属冶炼和压延加工业	ab	其他行业

### (二)基于能源消费的直接碳排放计算

青海省分行业直接碳排放结果表明,各化石能源消费碳排放总量为 $42.39 \times 10^6 \text{t}$ ,其中金属冶炼和压延加工业(以下简称金属加工业)是最大的碳排放部门,占直接碳排放总量的35.93%( $15.23 \times 10^6 \text{t}$ )。此外,化学原料和化学制品制造业(以下简称化工业)和非金属矿物制品业(以下简称非金属制品业)分别排在第二和第三位,占比17.68%( $7.49 \times 10^6 \text{t}$ )和57.63%( $3.23 \times 10^6 \text{t}$ )。从图1可以看出,碳排放强度和碳排放总量呈现非线性的互动关系,如石油和天然气开采业(以下简称开采业)碳排放量较低,碳排放强度却是最高的,高达10.7456,其次是金属加工业为7.0058,化工业为5.9962(见表2)。上述分析可知,碳排放量和碳排放强度高的部门均属于制造业,需要加快产业结构向第三产业转型升级。直接碳排放量和碳排放强度无法直接全面地衡量该部门全过程碳排放情况,因此采用EIO-LCA模型对生产链和最终消费视角引起的隐含碳排放进行核算就显得极为重要。

### (三)生产链视角的隐含碳排放计算

采用EIO-LCA模型从生产者视角分析可知,间接碳排放总量为 $18.09 \times 10^6 \text{t}$ ,其中,排名前三的部门分别为部门l(化工业, $3.29 \times 10^6 \text{t}$ ),部门k(石油、炼焦产品和核燃料加工品业,以下简称燃料加工品业

表2 青海省细分部门直接和间接碳排放强度(t/万元)

编码	直接碳强度	间接碳强度	编码	直接碳强度	间接碳强度
a	0.4453	0.3653	o	0.1414	0.3203
b	0.4591	0.2075	p	0.1175	0.9647
c	10.7456	2.9509	q	0.0500	0.1776
d	1.3264	1.9999	r	0.2844	0.1779
e	1.3349	2.2510	s	0.1100	0.1513
f	0.0920	1.8585	t	1.8993	1.3954
g	0.1591	0.2823	u	2.2589	1.1093
h	0.1934	0.1426	v	0.2974	1.1331
i	0.0749	0.2325	w	1.4614	1.2005
j	0.0456	0.1954	x	1.6556	1.3072
k	0.8370	0.3343	y	3.8317	1.2712
l	5.9962	6.1043	z	2.3576	2.2400
m	3.4712	1.8411	aa	1.3749	1.2487
n	7.0058	8.6379	ab	0.7117	0.6991

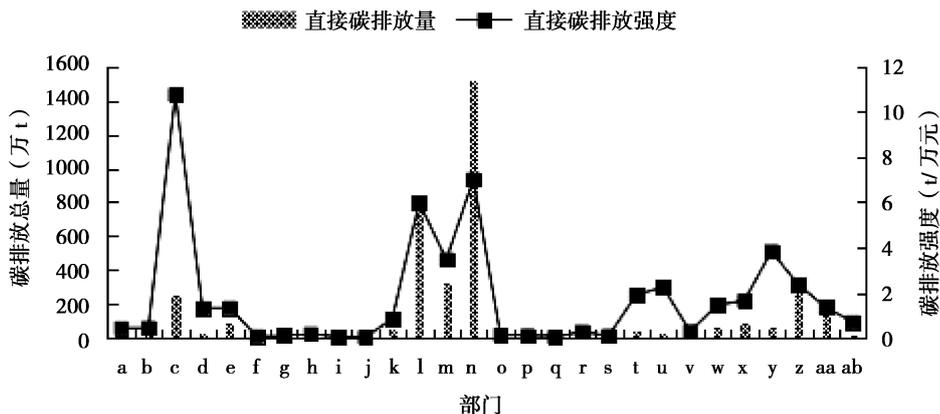


图 1 细分部门直接碳排放及碳排放强度

1.89×10<sup>6</sup>t),部门 m(非金属制品业,1.65×10<sup>6</sup>t),分别占总体碳排放的 18.17%、10.44%和 7.53%(见图 2)。分析可知,上述部门均为生产链上游的能源供应行业,作为生产链下游行业的能源动力源,其对下游各产业的发展影响极大,因此,青海省想要打造清洁能源产业高地,就得从源头制定绿色低碳减排方案。从整个生产链的碳排放情况来看,纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业(以下简称服饰业,部门 h)、木材加工品和家具制造业(以下简称木材家具制造业,部门 i),通信设备计算机和其他电子设备制造业(以下简称电子设备制造业,部门 s)等行业碳排放量较低。因此,在淘汰落后的低产值高碳排放量产业的同时,还要提高各生产链之间技术的升级,减少间接碳排放量的产生。另外,部门 v(电力、热力的生产和供应业,以下简称电热生产供应业)和部门 a(农林牧渔业)的碳排放量也较高,分别为 102.81×10<sup>4</sup>t 和 89.93×10<sup>4</sup>t。

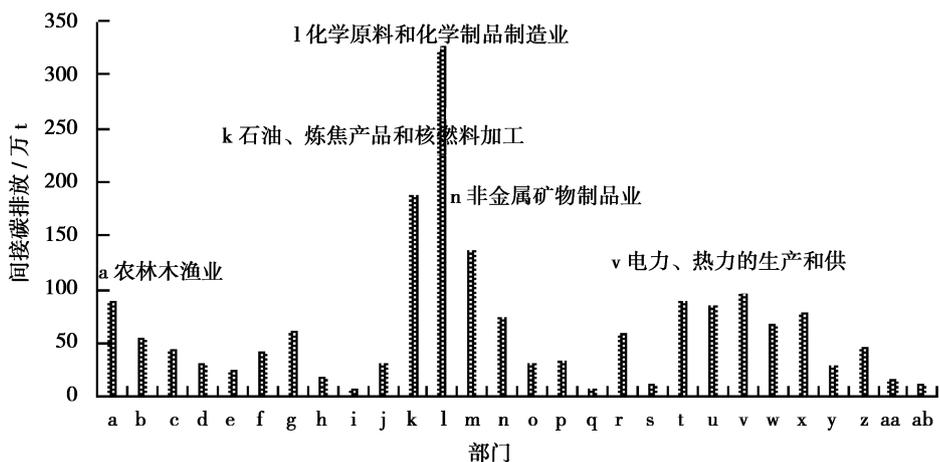


图 2 生产供应链视角的碳排放总量

由于化工行业生产链视角碳排放量最高,为了进一步做探讨,本文对化工制造部门的总体碳排放进行各部门具体碳排放分解分析发现,其自身的碳排放量最高,为 109.04×10<sup>4</sup>t,占该部门碳排放总量的 33.15%。其次是部门 n(金属加工业,48.43×10<sup>4</sup>t)的贡献为 14.72%,农林牧渔业(部门 a)、通用及专用设备制造业(部门 p,以下简称通专用设备制造业)、交通运输仓储及邮政业(部门 z,以下简称交运仓邮业)的贡献也不容忽视,分别占 9.66%、5.47%和 5.46%,见图 3。

(四)消费需求视角的隐含碳排放计算

基于消费需求视角,从消费终端分别对隐含碳排放进行核算分析,总体分为青海省居民消费、政府消费、资本形成消费以及出口消费四个部分,其具体结果如图 4 所示。

从图 2 可以看出 2017 年青海省各行业因为最终需求导致的隐含碳排放总量为 18.76×10<sup>6</sup>t,其中出口部分占比最大(7.55×10<sup>6</sup>t),占总排放量的 40.25%,其余为资本形成部分(5.04×10<sup>6</sup>t)、居民消费部分(4.89×10<sup>6</sup>t)和政府消费部分(1.27×10<sup>6</sup>t),占比分别为 26.91%、26.07%和 6.78%。其中,部门 n(金属加工

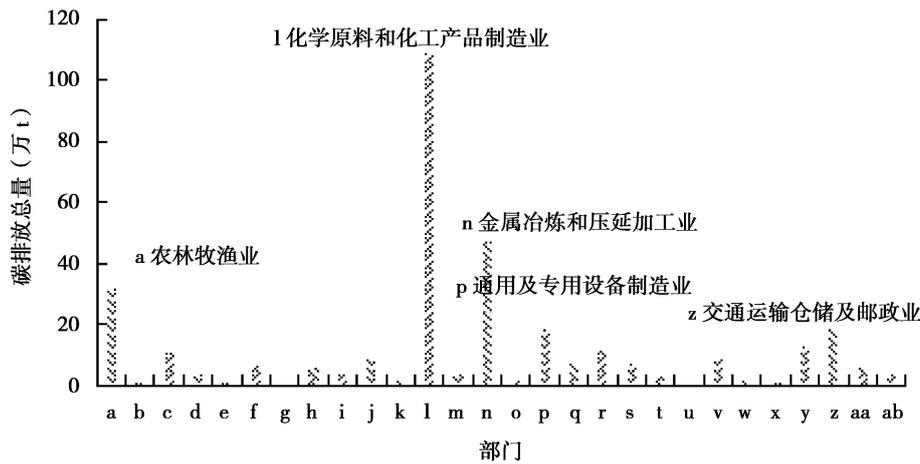


图3 化学原料和化工产品制造业碳排放分解

业)、部门l(化工业)和部门k(燃料加工品业)等引起的碳排放量所占比重较大。

从各部门间接碳排放强度(见表2)来看,间接碳排放强度第一的是金属加工业(部门n,8.6379),其次是化工业(部门l,6.1043),开采业(部门c,2.9509)。其中部门p(通专用设备制造业)、部门f(食品和烟草业)、部门y(建筑业)和部门aa(批发零售和住宿餐饮业)碳排放量和碳排放强度不成比例,甚至呈现碳排放量越高,碳排放强度越低的现象。近年来学者们发现建筑业碳排放量占总体碳排放量的比重在不断上升,这与城市化进程加快有着密切的联系。城市化的不断加快会引发城市建筑面积的扩大,会引

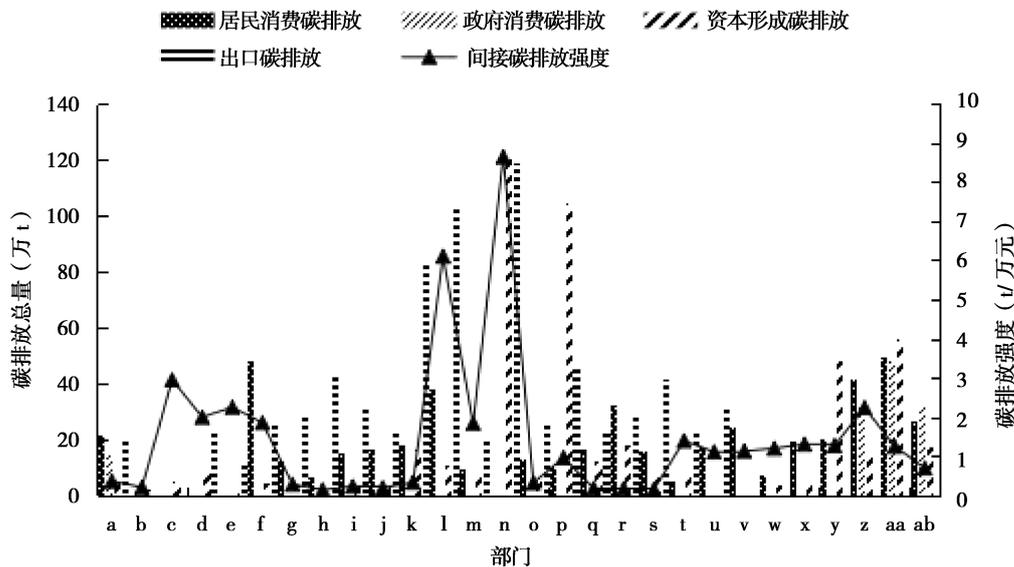


图4 最终消费引起的28部门隐含碳排放

起钢筋水泥等建筑用材的产量增长,从而推动与建筑有关的多个行业碳排放量大幅增长。

#### (五)碳减排潜力分析

根据碳减排效应和碳减排总量核算结果,从图5可以发现这两者之间没有直接的明显关联,在产值变化1%的情况下,除其他行业(ab)外,碳减排效应最高的是金属加工业达到了 $2.59t/10^4$ 元,其次分别是化工制造业( $2.08t/10^4$ 元)、电热生产供应业( $2.01t/10^4$ 元)、交运仓邮业( $1.84t/10^4$ 元)和开采业( $1.69t/10^4$ 元)。从碳减排总量来看,部门产值变动1%引起的金属加工业减排量达 $1.9118 \times 10^6 t$ 。非金属矿采选业和其他矿采选业(以下简称其他矿采选业)为 $1.9064 \times 10^6 t$ 、农林牧渔业为 $1.1266 \times 10^6 t$ ,金属矿采选业为 $0.7816 \times 10^6 t$ 、燃料加工品业为 $0.6755 \times 10^6 t$ 、电器机械器材制造业(以下简称器材制造业) $0.6427 \times 10^6 t$ 。

本文参考王家明等<sup>[20]</sup>的做法,如图6所示,X轴为减排效应,Y轴为产值变化引起的碳减排总量,以各自升序排名的第15名为分界线,将碳减排潜力划分为三个梯队:第一梯队为碳减排潜力高的行业(第I象限);

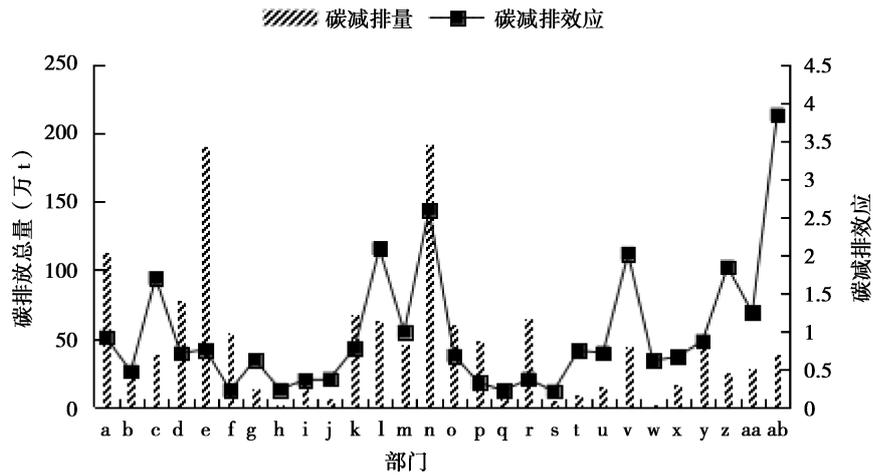


图 5 青海省 28 部门碳减排潜力分析

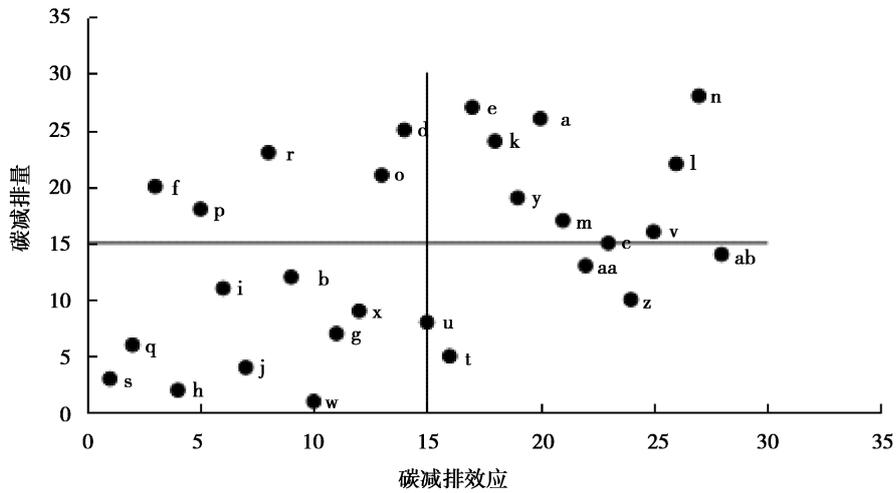


图 6 青海省 28 部门碳减排潜力分布

第二梯队为碳减排潜力较低的行业(第Ⅱ、象限);第三梯队为碳减排潜力低的行业(第Ⅲ象限)(见表3)。

属于第一减排潜力的第Ⅰ象限包含的减排潜力最大的 8 个部门分别是金属加工业(部门 n)、化工业(部

表 3 青海省 28 部门碳减排潜力梯队表

部门	碳减排效应排名	碳减排量排名	碳减排潜力梯队	部门	碳减排效应排名	碳减排量排名	碳减排潜力梯队
a	20	26	第一梯队	o	13	21	第二梯队
b	9	12	第三梯队	p	5	18	第二梯队
c	23	15	第二梯队	q	2	6	第三梯队
d	14	25	第二梯队	r	8	23	第二梯队
e	17	27	第一梯队	s	1	3	第三梯队
f	3	20	第二梯队	t	16	5	第二梯队
g	11	7	第三梯队	u	15	8	第二梯队
h	4	2	第三梯队	v	25	16	第一梯队
i	6	11	第三梯队	w	10	1	第三梯队
j	7	4	第三梯队	x	12	9	第三梯队

续表:

部门	碳减排效应排名	碳减排量排名	碳减排潜力梯队	部门	碳减排效应排名	碳减排量排名	碳减排潜力梯队
k	18	24	第一梯队	y	19	19	第一梯队
l	26	22	第一梯队	z	24	10	第二梯队
m	21	17	第一梯队	aa	22	13	第二梯队
n	27	28	第一梯队	ab	28	14	第二梯队

部门 l)、电热生产供应业(部门 v)、非金属矿物制品业(部门 m)、农林牧渔业(部门 a)、建筑业(部门 y)、燃料加工品业(部门 k)、其他矿采选业(部门 e)(见图 6),说明这几个部门未来碳减排空间较大,可以通过加快技术更新升级等方式加大碳减排力度。这 9 个部门中的 4 个部门(非金属制品业、化工业、燃料加工品业、农林牧渔业)是减排量与减排效应差距不大的部门,可以进行科学适度降低。对于服饰业和建筑业减排量与减排效应几乎同步,服饰业在第一减排潜力中相对排名靠前,建筑业相对靠后,可以淘汰一些高污染企业。

第Ⅲ象限包含了 9 个部门,分别是煤炭开采和洗选业(以下简称洗选业,部门 b)、纺织业(部门 g)、服饰业(部门 h)、木材家具制造业(部门 i)、造纸印刷和文教体育用品制造业(部门 j)、交通运输设备制造业(部门 p)、电子设备制造业(部门 s)、燃气生产和供应业(部门 w)和水的生产和供应业(部门 x)。以上 9 个部门的碳减排潜力贡献都较小,且都为传统工业,需不断进行产业低碳化升级。

剩余第Ⅳ象限的 6 个部门,开采业(部门 c)、仪器仪表制造业(部门 t)、交运仓邮业(部门 z)、批发零售和住宿餐饮业(部门 aa)和其他行业(部门 ab)是减排效应高减排量低的部门。第Ⅱ象限的 5 个部门是碳减排效应低碳减排量高的部门。在表 2 中可以看到采选业(部门 d)、食品和烟草业(部门 f)、金属制品业(部门 o)和器材制造业(部门 r)间接碳排放强度均大于直接碳排放强度的,说明在这些行业生产过程中碳排放较大,因此需要加快产业技术升级来提高产品和服务的生产效率,从而达到实现碳减排的目的。

#### 四、研究结论与政策建议

本文运用 EIO-LCA 模型对青海省 28 个行业的直接和间接碳排放以及总体碳减排潜力进行分析,得出如下结论和建议:

##### (一)研究结论

第一,青海省直接碳排放主要来自于金属加工业、化工业以及非金属制品业,其次交运仓邮业及开采业直接碳排放也较高,以上部门占总直接碳排放量的 78.67%。以上传统能源行业既不利于产业转型,更不利于青海省生态保护工作的进行,因此,采用 CCUS 技术提高能源利用和生产效率、加快清洁能源生产,建设大型光伏发电基地等举措是推动青海省实现“碳中和”的重要途径。

第二,生产链视角下的间接碳排放排名前三的依次为化工业、燃料加工品业以及非金属制品业,这三个行业占间接碳排放的贡献度高达 36.14%。对化工业部门进行分解,发现化工业(33.15%)、金属加工业以及农林牧渔业对其贡献度较高,合计高达 57.53%。此外,发现化工业在直接碳排放和间接碳排放中的贡献度都很高,笔者认为主要是青海境内有着中国最大的钾肥工业生产基地,且钾肥多用于农业种植和经济作物生长,所以造成排放量偏高。

第三,消费需求视角下的隐含碳排放分析表明出口部分占比最大,占总排放量的 40.25%,其余为出口形成部分、居民消费部分和政府消费部分,占比分别为 26.91%、26.07%和 6.78%。其中,金属加工业、化工业和燃料加工品业等引起的出口碳排放较高,可以看出,青海省出口形成的支柱产业多为制造业部门,产业结构呈现出严重失衡,面对新时代产业结构不断升级优化的大发展趋势,这会对青海省的经济发展和环境保护造成严重阻碍。为此应该大力推动青海省产业结构调整优化,推动第二产业向第三产业转移,发展以清洁能源为基础的低碳化产业,从而拉动现代服务业、旅游业、清洁产业的不断发展。

第四,通过对碳减排潜力进行分析,发现碳减排潜力最大的 8 个行业分别为金属加工业、化工业、农林牧渔业、其他矿采选业、燃料加工品业、电热生产供应业、建筑业和非金属制品业,这些行业能有效降低碳排放促进碳减排,应对这些能源产业重化工业行业进行大力改造;而传统行业如纺织业、服饰业、木材加工家

具制造业、造印文体制造业、交运和电子设备制造业、燃气生产供应业和水的生产和供应业碳减排量与减排效应都非常低,因此可以通过建立产业园区集群、加快技术更新、打造品牌特色等手段振兴传统产业;其他 11 个行业属于碳减排潜力和减排效应严重不平衡的行业,需根据行业特征有针对性地提出减排举措。

## (二) 对策建议

第一,要提升盐湖资源综合利用效率,加快产业技术升级转型,充分发挥青海省盐湖资源区位优势,通过“延链补链强链”的方法探索循环经济新模式,比如加强钾资源合理有序开发,加快盐湖资源系列产品研制,提高钾肥资源高效转化率,建设世界级钾产业基地,打造现代化、高端化、智能化、绿色化的新型钾肥产业,推动新能源多元循环经济体系,引领青海省各产业低碳化发展。

第二,要推进产业链供应链低碳升级,发挥青海省清洁能源优势。比如完善“装备制造—清洁能源生产—绿电输送—消纳”循环产业链条,发挥青海省生态固碳重要功能,高效利用青藏高原得天独厚的太阳能资源和土地资源,持续推进新能源发电集约化发展,打造国家级水风光一体化建设,积极建造光伏发电和风电基地技,促进省内能源结构优化和产业结构升级。

总之,产业结构优化在短期和长期内在降低碳排放方面都具有较大作用,有利于地区经济和社会的发展。因此,青海省未来要大力建造国内大型清洁能源基地,打造盐湖钾肥低碳化产业链,加快第二产业内部结构升级进程,推动第二产业向第三产业转变。对高耗能高碳排低产值行业设置碳排放限额标准,严格控制落后高耗能产业企业发展,综合利用区位优势,大力发展水风光一体清洁能源开发。

## 参考文献:

[1]胡西武,黄蕾,李毅.应对气候变化下的青藏高原碳脱钩水平测度及碳达峰路径选择——以青海省为例[J].青海社会科学,2021,(5).

[2]刘卫东,张雷,王礼茂,赵建安,马丽,唐志鹏,高菠阳,余金艳.我国低碳经济发展框架初步研究[J].地理研究,2010,(5).

[3]赵荣钦,黄贤金,高珊,赵志凌.江苏省碳排放清单测算及减排潜力分析[J].地域研究与开发,2013,(2).

[4]Hertwich Edgar G,Peters Glen P. Carbon footprint of nations: a global, trade-linked analysis[J]. Environmental science & technology,2009,(16).

[5]Julia K. Steinberger,J. Timmons Roberts,Glen P. Peters, Giovanni Baiocchi. Pathways of human development and carbon emissions embodied in trade[J]. Nature Climate Change,2012,(2).

[6]Peters Glen P,Minx Jan C,Weber Christopher L, Edenhofer Ottmar. Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2011,(21).

[7]Weber C L,Peters G P,Guan D B, et al.The Contribution of Chinese Exports to Climate Change[J].Energy Policy,2008,(9).

[8]徐成龙,任建兰,巩灿灿.产业结构调整对山东省碳排放的影响[J].自然资源学报,2014,(2).

[9]原毅军,王雪.产业结构调整不同目标对降低二氧化碳排放量效果研究——基于 GTAP-E 模型[J].工业技术经济,2013,(5).

[10]陶长琪,彭永樟,琚泽霞.经济增长、产业结构与碳排放关系的实证分析——基于 PVAR 模型[J].经济经纬,2015,(4).

[11]王长波,张力小,庞明月.生命周期评价方法研究综述——兼论混合生命周期评价的发展与应用[J].自然资源学报,2015,(7).

[12][17][18]吴常艳,黄贤金,揣小伟,徐国良,於冉,李丽.基于 EIO-LCA 的江苏省产业结构调整与碳减排潜力分析[J].中国人口·资源与环境,2015,(4).

[13]袁长伟,白娟,芮晓丽,李若影.基于 EIO-LCA 模型的陕西省产业碳减排效应[J].长安大学学报(社会科学版),2016,(4).

[14]曲英,雷震,刘越.辽宁省行业隐含碳排放及碳减排潜力分析——基于产业结构分析视角[J].科技管理研究,2017,(24).

[15]翁世梅,陶伟良.安徽省行业隐含碳及碳减排潜力分析[J].河北环境工程学院学报,2021,(2).

[16][20]王家明,张云菲,李明晖,林承耀,杜雪怡.山东省资源型城市产业结构调整与碳减排潜力研究[J].中国矿业,2022,(6).

[19]王雅楠,罗岚,陈伟,王博文.中国产业结构调整视角下的碳减排潜力分析——基于 EIO-LCA 模型[J].生态经济,2019,(11).

[责任编辑 陈文烈]

[责任校对 薛振东]