

# 基于 EIO-LCA 的江苏省产业结构调整与碳减排潜力分析

吴常艳 黄贤金 揣小伟 徐国良 於冉 李丽

(南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210046)

**摘要** 随着城镇化与工业化进程的推进,经济增长与环境压力之间的矛盾日益加剧。为实现节能减排目标,研究以调整产业结构为主要碳减排路径的清洁发展机制尤为重要与迫切。江苏省是全国工业经济大省和碳排放大省之一。因此,本文以江苏省细分行业为例,采用投入产出生命周期评价方法对江苏省产业的直接和间接碳排放进行测算。并构建碳减排潜力模型模拟产业结构调整引起的减排潜力。结果表明:①一次性能源消费引起的直接碳排放最大的贡献部门是电力、热力的生产和供应业,占总体能源消费碳排放的 50.58%,其次是化学工业(9.65%),金属冶炼及压延加工业是第三贡献者(9.31%)。②从生产链视角,间接碳排放较高的部门依次为:从电力、热力生产和供应业( $15.183 \times 10^6$  t)、煤炭开采和洗选业( $8.0998 \times 10^6$  t)、石油加工、炼焦及核燃料加工业( $4.6944 \times 10^6$  t);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;从部门层次来看,通信设备、计算机及其他电子设备制造业(16.55%)、金属冶炼及压延加工业(12.65%)、交通运输设备制造业(12.49%)在出口碳排放中贡献较大。③江苏省碳减排潜力较大的部门主要是能源密集型行业。如产值变动 1%,电力、热力生产供应业减排效应达  $1.58 \times 10^4$  元,碳减排量占 2010 年碳排放 1.57%。因此,建议江苏省除了使用粉煤燃烧技术(PCC)、整体煤气化联合循环(IGCC)、大型循环流化床(CFB)等先进技术提高能源利用强度以外,开发利用可再生能源和新能源来优化能源结构。另外,重点提升具有较大减排潜力部门的产值,例如通信设备、计算机及其他电子设备制造业、通用、专用设备制造业。

**关键词** EIO-LCA; 碳排放; 产业结构调整; 减排潜力; 江苏省

**中图分类号** F062.1 **文献标识码** A **文章编号** 1002-2104(2015)04-0043-09 doi:10.3969/j.issn.1002-2104.2015.04.006

自从 2006 年中国成为第一大碳排放国,就面临严峻的国际碳减排压力<sup>[1]</sup>。减排问题是国际气候协议的核心问题,从某种角度看,未来国际气候协议,实质就是全球协同减排的制度安排<sup>[2]</sup>。在 2011 年德班气候大会上中国明确承诺将落实减排行动,并在“十二五”规划中针对节能减排制定了详细目标,到 2015 年实现单位 GDP 二氧化碳排放下降 17% 的目标。而江苏省作为中国经济最发达省份之一,在其“十二五”规划中也做出节能减排承诺,即 2015 年单位 GDP 能耗下降 18% 的目标。为实现“十二五”减排目标,江苏省采取措施除了推进节能降耗、发展低碳经济之外,首要任务是加快转变经济发展方式,促进产业结构升级。因此,需要对当前各行业碳排放量以及碳减排潜力做出正确估算。

## 1 文献综述

碳排放强度与产业结构演化之间存在倒“U”字形曲

线关系。发展模式转变和产业结构调整取得实质性成效是实现 2020 年减排目标的前提<sup>[3]</sup>。通过对当前产业结构背景下碳排放核算实现低碳化产业结构调整的前提。目前碳排放核算有两种:一方面是以生产者视角的碳排放清单核算框架为主。此方法主要是利用 IPCC 核算体系,针对行政区边界内部的各部门的估算直接碳排放<sup>[4-6]</sup>。京都议定书按照此类核算标准,制定国际碳减排责任,但这种方法仅计算国家行政区内的碳排放,忽略了国际间碳转移和经济部门间复杂的供应交错现象,对碳减排责任有失公平<sup>[7-9]</sup>。另一方面,消费者负责视角的碳排放研究得到越来越广泛关注,尤其在研究国际贸易中的碳泄露问题运用较为普遍<sup>[10-13]</sup>。投入产出分析方法将生产者视角与消费者视角纳入同一核算框架下,追踪整个经济系统的直接和间接碳排放,基于此提出了碳足迹概念<sup>[14]</sup>。已有学者运用碳足迹研究了美国<sup>[15-17]</sup>、美国<sup>[18]</sup>、澳大利亚<sup>[19]</sup>、悉

收稿日期:2014-12-10

作者简介:吴常艳,博士生,主要研究方向为土地与区域发展、资源环境经济与可持续发展。

通讯作者:黄贤金,博士,教授,博导,主要研究方向为土地资源管理。

基金项目:中国清洁发展机制(CDM)基金赠款项目“国家可持续发展实验区应对气候变化能力建设研究与示范”(编号:1214073);地方产业结构调整温室气体减排效应和调控研究——以江苏省为例(编号:2012065)。

尼<sup>[20]</sup>等国家的国际贸易的隐含碳问题。

目前就产业结构调整与碳排放间的研究,主要有两方面的研究成果。一方面利用结构分解方法分析产业结构的变动对总体碳排放的影响。张旺等利用 LMDI 分解技术研究了北京能源消费排放 CO<sub>2</sub> 增量增长的驱动因素,认为产业结构调整 and 能耗结构变化对产业碳排放变动影响较低<sup>[21]</sup>。徐成龙等采用同样的方法对山东省产业结构调整对碳排放的影响进行分析,并进行预测<sup>[22]</sup>。他认为工业比重下降一个百分点所对应的 CO<sub>2</sub> 排放量减少  $78.6 \times 10^4 - 83.7 \times 10^4$  t。另一方面,通过目标约束来调整产业结构,实现对碳排放量的约束。原毅军等基于 GTAP-E 模型分别从经济增长、节能减排、产业结构最优三种产业结构调整目标来分析对二氧化碳排放量造成的影响,认为政府应当出台综合性政策来实现产业结构优化与碳排放量降低<sup>[23]</sup>。牛鸿蕾等建立投入产出多目标优化模型,借助多目标遗传算法详细测算了中国产业结构调整碳排放效应。但是,以往研究都是将产业结构调整作为政策措施,宏观分析其变化带来的碳排放效应,没有涉及微观的具体行业如何调整的问题<sup>[24]</sup>。

将经济投入产出模型与生命周期理论结合的方法即经济投入产出生命周期评价(EIO-LCA)是碳足迹核算框架下分析计算微观部门生产全过程隐含碳排放的有效方法之一,也是从微观视角研究产业如何进行合理调整的科学手段。Shui and harriss 利用经济投入产出生命周期评价软件计算了美国出口到中国的隐含碳排放量<sup>[25]</sup>,国内学者唐建荣等运用 EIO-LCA 方法对江浙沪地区隐含碳排放进行估算,并分析其地区差异<sup>[26]</sup>。而运用 EIO-LCA 方法从部门层次开展隐含碳的研究在国内还较为薄弱<sup>[27-29]</sup>。鉴于此,本文对江苏省各行业部门从生产到供应链再到消费环节的隐含碳进行分析,在此基础上探讨产业结构调整碳减排潜力,为江苏省科学制定减排政策提供理论参考。

## 2 数据来源与研究方法

目前主要的能源有化石能源、生物质能、太阳能、核能、风能、电能等。考虑到当前江苏省的碳排放主要源于一次性能源的消费所致。因此,本文仅以煤、石油、天然气等一次性能源计算其碳排放。研究采用 2010 年江苏省统计数据,其中,各种能源消费数据来自于《中国能源统计年鉴》江苏省能源平衡表。部门投入产出数据来自于 2010 年江苏省投入产出延长表。本文采用 42 部门投入产出表,并结合能源平衡表,调整合并最后确定为 29 个部门(见表 1)。

基于能源消费的碳排放计算采用 IPCC 推荐计算方法,其中的碳排放因子采用国家科委气候变化项目(煤 0.726,石油 0.583,天然气 0.409)。除此之外,本文利用

经济投入产出模型与生命周期理论模型相结合,计算了产业链过程的隐含碳排放,并构建碳减排潜力预测模型。

### 2.1 EIO-LCA 模型

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

式中:  $B$  为各部门的能源消费 CO<sub>2</sub> 排放矩阵,  $b_{ij}$  为  $B$  中元素( $i$  为产品生产或服务提供部门的序号,  $j$  为产品或服务部门的序号,  $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n$ ,  $n$  为投入产出表中的部门数);  $B$  的各行向量之和表示部门  $i$  在产品生产或服务过程之中碳排放量,列向量之和表示部门  $j$  在生产中因使用部门  $i$  的产品或服务产生的隐含碳排放;  $R$  为对角矩阵,表示各个部门的直接能源消费碳排放强度,对角元素为  $R_i$ ;  $(I - A^d)^{-1}$  为列昂惕夫逆矩阵,反映了经济的中间投入产出结构以及生产技术水平,其中  $I$  为单位矩阵,  $A^d$  为国内投入部分的直接消耗系数矩阵,采用“比例等同法”得到<sup>[7]</sup>;  $a_{ij}$  为  $A$  的元素,表示第  $j$  个部门增加一个单位的最终需求时所需要的  $i$  部门的产出。本文中以 2010 年江苏省非竞争投入产出表中  $j$  部门对  $i$  部门产品或服务的直接消耗系数;  $Y^d$  为对角矩阵,剔除进口部分的最终需求量,对角元素  $Y_j$  表示  $j$  部门产品或服务的最终需求量(包括居民最终消费量、政府最终需求量、资本形成与出口量)。

表 1 江苏省行业部门归类

Tab. 1 Classification industrial sectors of jiangsu province

| 编码<br>Code | 名称<br>Name      | 编码<br>Code | 名称<br>Name         |
|------------|-----------------|------------|--------------------|
| a          | 农林牧渔业           | p          | 通用、专用设备制造业         |
| b          | 煤炭开采和洗选业        | q          | 交通运输设备制造业          |
| c          | 石油和天然气开采业       | r          | 电气机械及器材制造业         |
| d          | 金属采矿业           | s          | 通信设备、计算机及其他电子设备制造业 |
| e          | 非金属矿及其他矿采选业     | t          | 仪器仪表及文化办公用机械制造业    |
| f          | 食品制造及烟草加工业      | u          | 工艺品及其他制造业          |
| g          | 纺织业             | v          | 废品废料               |
| h          | 纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业 | w          | 电力、热力的生产和供应业       |
| i          | 木材加工及家具制造业      | x          | 燃气生产和供应业           |
| j          | 造纸印刷及文教体育用品制造业  | y          | 水的生产和供应业           |
| k          | 石油加工、炼焦及核燃料加工业  | z          | 建筑业                |
| l          | 化学工业            | aa         | 交通运输、仓储及邮政业        |
| m          | 非金属矿物制品业        | ab         | 批发零售和住宿餐饮业         |
| n          | 金属冶炼及压延加工业      | ac         | 其他                 |
| o          | 金属制品业           |            |                    |

## 2.2 碳减排潜力模型

投入产出模型反映了部门之间的复杂经济联系,因此,当一个部门的产值发生变化时也会影响相关的其余产业产值发生变化。以传统投入产出模型为基础,碳减排潜力模型构建时考虑产值的直接变化和间接变化带来的碳减排效应。

$$\Delta X_j^d = \lambda_j X_j^d + \sum_{i=1}^n b_{ij} X_j^d \lambda_j \quad (2)$$

式中  $\Delta X_j^d$  表示  $j$  部门的产值变化与  $j$  部门变化引起的其余部门的变化总和;  $\lambda_j$  假设是产值变化率;  $X_j^d$  表示  $j$  部门的排除进口项后的国内产值,  $b_{ij}$  表示  $j$  行业为产出单位产品需要  $i$  行业投入的直接和间接投入。

$$\Delta C = R_j^d \lambda_j X_j^d + \sum_{i=1}^n R_i^d b_{ij} X_j^d \lambda_j \quad (3)$$

式中  $\Delta C$  表示由于产值变化引起的直接碳排放与间接碳排放总和,  $R_j^d$  表示  $j$  部门能源消费单位产值碳排放,其余含义同(2)

$$CRE = \frac{\Delta C}{\Delta X_j^d} = \frac{R_j^d \lambda_j X_j^d + \sum_{i=1}^n R_i^d b_{ij} X_j^d \lambda_j}{\lambda_j X_j^d + \sum_{i=1}^n b_{ij} X_j^d \lambda_j} = \frac{R_j^d + \sum_{i=1}^n R_i^d b_{ij}}{1 + \sum_{i=1}^n b_{ij}} \quad (4)$$

其中 CRE 表示碳减排效应

$$ACR = \lambda X_j^d (R_j^d + \sum_{i=1}^n R_i^d b_{ij}) \quad (5)$$

其中 ACR 表示碳减排总量,  $\lambda$  在本文中假设为 1%, 表示某一行业产值变动 1%, 引起的其余行业碳排放变化。

## 3 研究结果

### 3.1 基于能源消费的直接碳排放计算

通过 IPCC 核算方法,对江苏省细分行业一次性能源

消费引起的直接碳排放进行估算。来自于能源消费碳排放总量为  $203.12 \times 10^6$  t, 其中部门 w(电力、热力的生产和供应业)是最大的排放部门,为总体碳排放贡献 50.58% ( $102.74 \times 10^6$  t)。2010 年江苏省单位 GDP 能耗为 0.734, 如果要实现在“十二五”节能减排规划中单位 GDP 能耗下降 18% 的目标,从直接碳排放来看,电力行业是碳减排潜力最大最关键的部门。由于大量的化学工业产品生产,部门 l(化学工业)是能源消费碳排放的第二贡献者,占总体碳排放的 9.65% ( $20 \times 10^6$  t), 部门 n 是第三贡献者,碳排放量为  $18.92 \times 10^6$  t, 占总体碳排放的 9.31%。但是,从图 1 可以看出直接碳排放强度与碳排放总量之间不成正比。煤炭开采洗选业自身能源消费碳排放量较低,但是其具有最高的直接碳排放强度 5.046 9, 其次是电力热力生产供应业直接碳排放强度 2.956 8, 石油加工炼焦、及核燃料业 0.921 9(见表 2)。碳排放强度高的部门均是基础性能源部门,这与整个中国以煤炭能源为主要生产系统的能源利用结构有关系,降低能源消费引起的碳排放量需要调整能源利用结构,大力发展清洁能源和新能源,例如地热能、潮汐能、太阳能等。能源消耗引起的碳排放不能够反映生产部门之间的碳排放分配情况,因此,中间生产与服务引起的在各个部门的碳排放不容忽视。

### 3.2 生产链视角的隐含碳排放计算

采用投入产出全生命周期评价方法从生产视角分析来看,间接的碳排放为  $38.4301 \times 10^6$  t, 以生产总体碳排放量进行排序,排名前 3 的部门分别是电力、热力生产和供应业(部门 w,  $15.183 \times 10^6$  t)、煤炭开采和洗选业(部门 b,  $8.0998 \times 10^6$  t)、石油加工、炼焦及核燃料加工业(部门 k,  $4.6944 \times 10^6$  t)、分别占总体碳排放的 39.51%、21.08%

表 2 江苏省细分部门直接和间接碳排放强度(t/万元)

Tab. 2 Direct and indirect carbon intensity of detailed industries in jiangsu province (t/10<sup>4</sup> yuan)

| 编号<br>Code | 直接碳强度<br>Direct carbon<br>intensity | 间接碳强度<br>Indirect carbon<br>intensity | 编号<br>Code | 直接碳强度<br>Direct carbon<br>intensity | 间接碳强度<br>Indirect carbon<br>intensity | 编号<br>Code | 直接碳强度<br>Direct carbon<br>intensity | 间接碳强度<br>Indirect carbon<br>intensity |
|------------|-------------------------------------|---------------------------------------|------------|-------------------------------------|---------------------------------------|------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| a          | 0.034 3                             | 0.234 6                               | k          | 0.921 9                             | 1.191 1                               | u          | 0.009 1                             | 0.492 5                               |
| b          | 5.046 9                             | 5.799 5                               | l          | 0.146 9                             | 0.940 0                               | v          | 0.066 1                             | 0.445 2                               |
| c          | 0.102 3                             | 0.312 2                               | m          | 0.267 5                             | 1.255 7                               | w          | 2.956 8                             | 5.315 5                               |
| d          | 0.013 4                             | 0.859 6                               | n          | 0.189 2                             | 0.960 8                               | x          | 0.037 9                             | 0.310 1                               |
| e          | 0.357 7                             | 1.145 1                               | o          | 0.024 1                             | 0.747 8                               | y          | 0.007 4                             | 0.452 5                               |
| f          | 0.039 8                             | 0.288 3                               | p          | 0.010 7                             | 0.574 2                               | z          | 0.008 0                             | 0.639 3                               |
| g          | 0.058 5                             | 0.506 0                               | q          | 0.002 9                             | 0.466 0                               | aa         | 0.136 8                             | 0.471 9                               |
| h          | 0.021 1                             | 0.379 5                               | r          | 0.008 4                             | 0.590 2                               | ab         | 0.004 0                             | 0.154 4                               |
| i          | 0.067 7                             | 0.537 8                               | s          | 0.000 9                             | 0.303 5                               | ac         | 0.015 5                             | 0.210 7                               |
| j          | 0.193 7                             | 0.699 3                               | t          | 0.002 2                             | 0.375 4                               |            |                                     |                                       |



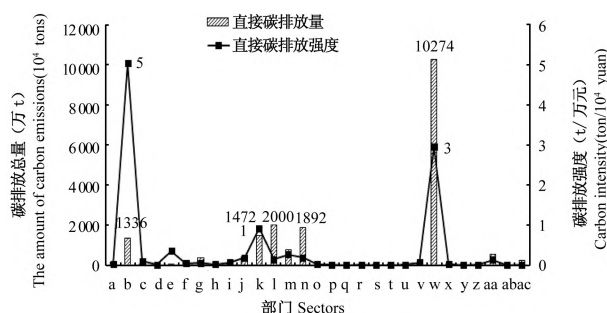


图 1 细部门直接碳排放与碳排放强度

Fig. 1 Direct carbon emissions and carbon intensity of detailed sectors

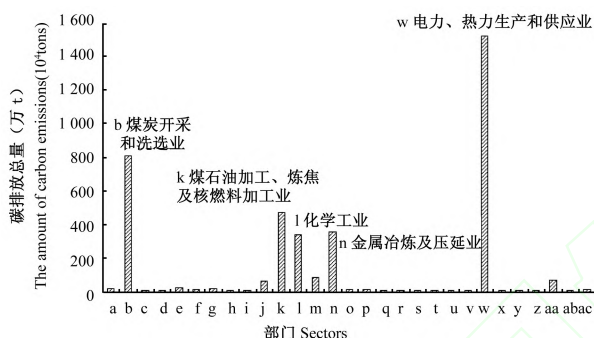


图 2 生产供应链视角的碳排放总量

Fig. 2 Amount of carbon emissions from production and supply chain perspective

和 12.22% (见图 2)。这几个部门均处于生产链上游的能源供应部门,为其余下游部门的生产提供能源来源,与其余产业联系密切,因此,制定减排任务时不仅要考虑部门自身的碳排放,而且综合考虑其间接的为其余部门转移排放的碳排放。从整个生产链的碳累积效应来看,纺织业(部门 g)、服装生产制造业(部门 h)、工艺品制造业(部门 u)等部门因处于产业链上游,碳排在总体碳排放中占较低比例。因此,依据各行业产值对经济增长贡献程度,淘汰落后的高污染高排放行业,提高生产链之间对接技术,降低生产过程能源消耗碳排放。另外,金属冶炼及压延业(部门 n)、化学工业(部门 l)的碳排放也较高,分别为  $354.74 \times 10^4$  t 和  $338.05 \times 10^4$  t, 分别占总体碳排放的 9.23% 和 8.8%。与电力、煤炭、石油行业相比,虽然对总体碳排放的贡献较小,但是与其余的下游生产链部门相比,碳排放也是贡献较大的部门。在保证江苏省经济平稳增长的同时,限制产能过剩行业发展规模,转变经济增长方式,促进产业结构升级。

电力、热力生产工业供应业的一次性能源消费直接碳排放和间接碳排放都远高于其余部门,这与其部门的能源需求有关。因此,对电力、热力部门的总体碳排放进行

碳排放来源分解(见图 3)。通信设备、计算机及其他电子设备制造业(部门 s,  $934.19 \times 10^4$  t)对电力部门的碳排放贡献最大,占电力部门碳排放总量的 61.53%;其次是化学工业(部门 l,  $193.6 \times 10^4$  t)对电力部门碳排放贡献 12.75%,通用专用设备制造业(部门 p)、电子机械及器材制造业(部门 r)的贡献也不容忽视,分别占 7.13% 和 6.3%。江苏省节能规划要求到 2015 年,全省规模以上工业企业增加值能耗比 2010 年下降 20% 以上。因此,对于电力行业而言,不仅就电力行业本身发展高参数、大容量燃煤机组和天然气燃气—蒸汽联合循环发电机组来降低能源消耗碳排放;而且针对碳排放贡献较大的部门设置减排计划,提高计算机制造业及其电子机械制造业的生产技术,化学工业继续推广炼油、乙烯生产节能工艺技术,推进大型炼化企业能源中心建设,加强余热余压回收利用。纺织业(部门 g)、仪器仪表制造业(部门 t)虽然贡献不显著,但是在生产链中扮演了重要角色,要减低整体工业部门的碳排放,需要对生产链上的各个部门都实施减排措施,才能达到减排目标。

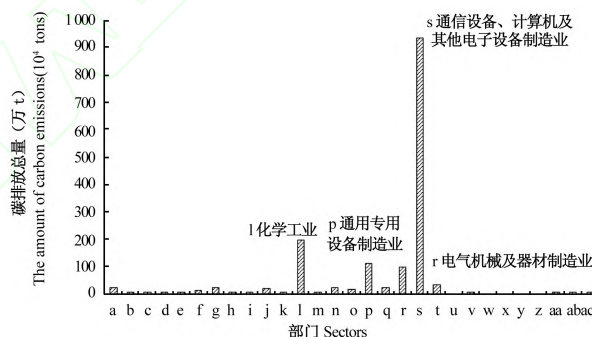


图 3 电力、热力生产与供应业碳排放分解

Fig. 3 Compositions of direct carbon emissions from electric heat power sector

### 3.3 消费需求视角的隐含碳排放计算

由于部门 j 在生产过程中会利用其余部门的产品或服务,而部门 j 也是因为不同的消费需求刺激其生产而为其服务。所以该部门因为最终需求引起的碳排放与该部门直接有关系,同时也与其余相关部门有关。本文从居民消费需求、政府消费需求、资本形成、出口需求等方面对江苏省需求视角的碳排放进行估算。2010 年江苏省各部门最终需求引起的总体碳排放为  $66.47 \times 10^6$  t, 如图 4 所示,其中出口隐含碳在各个部门消费碳排放中所占比例都较大,占总体碳排放的 90.62%,其中纺织业(部门 g)、通信设备制造业(部门 s)等部门是引起出口碳排放对总体碳排放的贡献最大部门。资本形成引起的碳排放为  $4.1 \times 10^6$  t, 占需求碳排放的 6.17%, 部门 p (通用、专用设备制

制造业)、部门 r(电气机械及器材制造业)、部门 s(通信设备、计算机及其他电子设备制造业)是资本形成引起碳排放中较为显著的部门。另外,居民消费和政府消费引起的碳排放分别占总体隐含碳的 2.96% 和 0.3%,随着江苏省对外开放程度的加深,对外贸易成为经济增长的主要贡献者,必引起更多的碳排放。

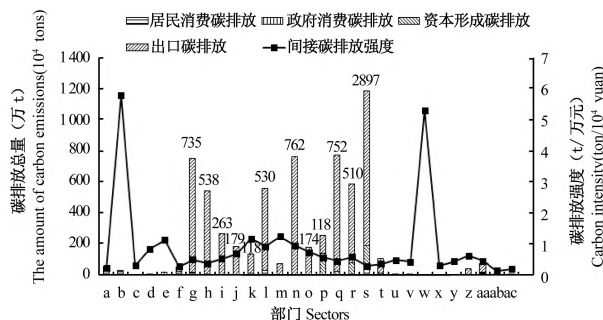


图4 最终消费引起的29个部门隐含碳排放

Fig. 4 Embodied CO<sub>2</sub> emissions and carbon intensity result from final demand in 29 sectors

从各个部门对总体隐含碳贡献来看,通信设备、计算机及其他电子设备制造业(部门 s)隐含碳排放达  $28.97 \times 10^6$  t,占总体隐含碳的 43.58%,其次是金属冶炼及压延加工业(部门 n)隐含碳排放为隐含碳贡献 11.46% ( $7.62 \times 10^6$  t),交通运输设备制造业(部门 q)和纺织业(部门 g)对隐含碳贡献分别为 11.31% 和 11.06%。但是这几个部门的间接碳排放强度反而较低(见图4),煤炭开采洗选业和电力、热力供应业的间接碳排放总量与间接碳排放强度也不成比例,从表2中看到,间接碳排放强度第一的是煤炭开采洗选业(5.799 5),其次是电力、热力生产供应业间接碳强度为 5.315 5,非金属矿物制品业的间接碳排放排名到 14,但是其间接碳排放强度为 1.255 7,排名第三。说明产业结构的调整不仅取决于产业自身的经济产出与碳排放,也要考虑该部门引起的间接经济效应和间接碳排放。例如江苏省伴随着城市化不断推进,城市建筑面积不断扩张,需要的水泥生产也会增加,这不仅使得非金属制造业的碳排放增加,建筑业碳排放也会增长。江苏省散装水泥“十二五”发展规划认为散装水泥量到 2015 年达到  $130 \times 10^6$  t。因此,提升散装水泥生产技术和降低水泥生产过程碳排放的有效方式之一。

### 3.4 碳减排潜力分析

根据公式(4)和(5)分别计算碳减排效应与减排总量,结果如图5所示。碳减排效应与碳减排总量之间没有直接的联系,在产值变化 1% 的情景下,煤炭开采与洗选业的碳减排效应最高,减排效应达到了  $3.31 \text{ t}/10^4$  元,其次分别是

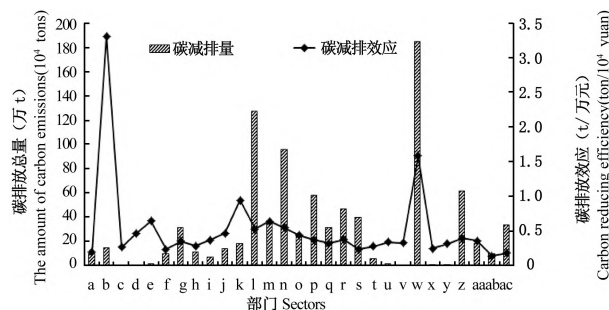


图5 江苏省29部门的碳减排潜力分析

Fig. 5 Carbon reducing potential of jiangsu's 29 sectors

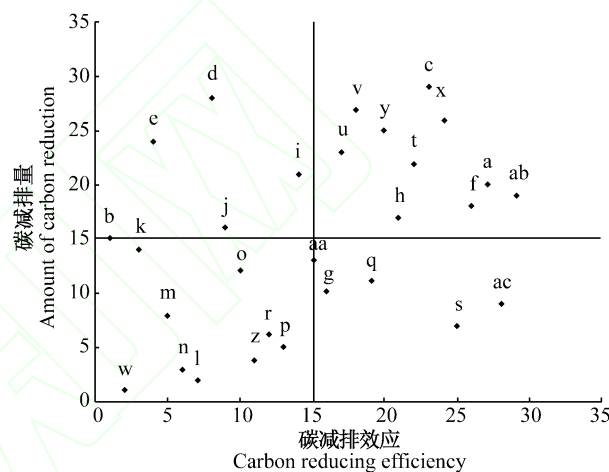


图6 江苏省29部门碳减排潜力分布图

Fig. 6 Distribution map of carbon reducing potential of jiangsu's 29 industries

电力、热力生产供应业( $1.58 \text{ t}/10^4$  元)、石油加工、炼焦及核燃料加工业( $0.94 \text{ t}/10^4$  元)、非金属矿物制品业( $0.63 \text{ t}/10^4$  元)、非金属矿及其他矿采选业( $0.64 \text{ t}/10^4$  元)。碳减排总量来看,行业产值变动 1% 引起排电力、热力的生产和供应业减排量达  $1.847 0 \times 10^6$  t,此减排量占电力部门当前碳排放的 1.57%。化学工业为  $1.280 1 \times 10^6$  t、金属冶炼及压延加工业为  $0.960 7 \times 10^6$  t、建筑业是  $0.618 7 \times 10^6$  t、通用、专用设备制造业是  $0.582 6 \times 10^6$  t。

为了分析碳减排量与减排效应均属于高潜力的部门,将江苏省 29 个部门按照其减排量和减排效应排名进行象限划分,其中 X 轴表示减排效应,Y 轴表示减排量,以各自排名的第十五名作为划分原点(见图6)。定义减排潜力为三个等级(第一、第二、第三),第一象限是减排效应与减排量都较高的部门,属于第一减排潜力部门;第二象限是减排效应高、减排量低的部门,属于第二减排潜力部门;第三象限减排效应和减排量都较低的部门,属于第三减排潜力部门;第四象限与第二现象含义相反,减排效应低、减排量高,属于第二减排潜力部门(见表3)。

属于第一减排潜力的第三象限包含的减排潜力最大

表 3 江苏省 29 部门碳减排潜力分类  
Tab. 3 Classification of carbon reducing potentials  
of jiangsu's 29 sectors

| 编码<br>Code | 减排量<br>排名<br>Order of<br>amount of<br>reduction | 减排效<br>应排名<br>Order of<br>effect of<br>reduction | 减排潜<br>力分类<br>Classifi-<br>cation of<br>reducing<br>potential | 编码<br>Code | 减排量<br>排名<br>Order of<br>amount of<br>reduction | 减排效<br>应排名<br>Order of<br>effect of<br>reduction | 减排潜<br>力分类<br>Classifi-<br>cation of<br>reducing<br>potential |
|------------|---|--|---|------------|---|--|---|
| a          | 20  | 26   | 3   | p          | 5   | 18   | 2   |
| b          | 15  | 1  | 1   | q          | 11  | 22   | 2   |
| c          | 29  | 15   | 3   | r          | 6   | 17   | 2   |
| d          | 28  | 6  | 2   | s          | 7   | 24   | 2   |
| e          | 24  | 5  | 2   | t          | 22  | 23   | 3   |
| f          | 18  | 27   | 3   | u          | 23  | 21   | 3   |
| g          | 10  | 20   | 2   | v          | 27  | 16   | 3   |
| h          | 17  | 25   | 3   | w          | 1   | 2  | 1   |
| i          | 21  | 19   | 3   | x          | 26  | 14   | 2   |
| j          | 16  | 9  | 2   | y          | 25  | 10   | 2   |
| k          | 14  | 3  | 1   | z          | 4   | 13   | 1   |
| l          | 2   | 8  | 1   | aa         | 13  | 12   | 1   |
| m          | 8   | 4  | 1   | ab         | 19  | 29   | 3   |
| n          | 3   | 7  | 1   | ac         | 9   | 28   | 2   |
| o          | 12  | 11   | 1   |            |   |  |   |

的 9 个部门,分别是电力、热力的生产和供应业(部门 w)、煤炭开采与洗选业(部门 b)、金属冶炼及压延加工业(部门 n)、化学工业(部门 l)、建筑业(部门 z)、非金属矿物制品业(部门 m)、金属制品业(部门 o)交通运输、仓储及邮政业(部门 aa)石油加工、炼焦及核燃料加工业(部门 k)(见图 6),说明对这几个部门实施减排政策,不会对经济产出产生较大影响,反而会有更大的碳减排。但是这 9 个部门中的 4 个部门(电力、热力生产、化学工业、非金属矿物制品业、金属冶炼及压延加工业)是减排量与减排效应差距不大的部门。对于金属制品业和交通运输、仓储及邮政业减排量与减排效应几乎同步,且在第一减排潜力中相对排名靠后,这两个部门的直接碳排放强度比起间接碳排放强度较低,因此政府的减排政策应该针对其相关的上下游产业制定减排量。例如,发展先进高效运输方式,构建物流园区,交通物流配送中心,使用清洁交通运输工具等。

煤炭开采洗选业减排效应排名第一,但是其减排量排名 15,在减排象限图中属于第二象限和第三现象的中间,既可以看作是具有第一减排潜力也可以看做是第二减排潜力。这主要与煤炭是多有行业的基础性能源,消费产出量较大有关系。针对煤炭开采业的减排措施,江苏省需要

发展清洁能源和新能源,逐步提高能源使用效率,降低对煤炭能源的依赖性,从而降低来自于煤炭能源的碳排放。类似于煤炭这种能源性消费带来的碳排放的还有部门 k(石油加工、炼焦及核燃料加工业),石油加工部门自身的能源消费碳排放强度仅为  $0.92 \text{ t}/10^4 \text{ 元}$ ,但是其隐含的间接碳排放强度为  $1.191 \text{ t}/10^4 \text{ 元}$ ,间接碳排放强度排名第 4(见表 2),说明这些能源性部门除了提高自身的能源效率降低碳排放以外,更要降低其生产供应链中的碳排放,可以适当缩短供应链,增加产品附加值,减少供应生产过程中的碳排放。建筑业(部门 z)碳减排效应排名到 13,说明建筑业自身的碳排放强度相对不高,这与建筑业上游的水泥生产产业替代其排放了大量的碳排放有关系,针对此情况可以提高散装水泥生产的技术水平,加大对散装水泥工艺的改进力度。建筑业的碳减排量却排名第 4,随着江苏省城市化不断推进,建筑面积不断扩张,对建筑节能标准的制定可以有效降低建筑业碳排放。江苏省“十二五”节能计划预计到 2015 年末,全省公共建筑节能改造面积  $2000 \text{ 万 m}^2$ 、住宅节能改造面积达  $400 \text{ 万 m}^2$ ,为实现这一目标,需要加大绿色节能建筑材料的使用,开发可再生新能源。

第一象限包含了 9 个部门,分别是农林牧渔业(部门 a)、石油和天然气开采业(部门 c)、食品制造及烟草加工业(部门 f)、纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业(部门 h)、木材加工及家具制造业(部门 i)、仪器仪表及文化办公用机械制造业(部门 t)、工艺品及其他制造业(部门 u)、废品废料(部门 v)、批发零售和住宿餐饮业(部门 ab),这 9 个部门的碳减排效应和碳减排量都较低。并且 9 个部门的总产出仅仅占有所有行业产出的 16%,与第一减排潜力的 9 个部门相比较,对于碳减排潜力贡献较小,说明传统的工业对经济发展贡献较低。第三减排潜力的部门是江苏省的传统产业部门,这些部门的直接碳排放强度与间接碳排放强度也较低。江苏省为了刺激经济发展,逐步淘汰传统落后产能工业,依赖重工业提高经济发展速度,这将会造成更大的环境压力和产生大量的碳排放。所以,通过提高生产技术,增加产值较低行业的产品附加值例如纺织服装制造业,实现产业结构升级。

剩余第四象限的 6 个部门,电气机械及器材制造业(部门 r)通用、专用设备制造业(部门 p)、交通运输设备制造业(部门 q)、纺织业(部门 g)、通信设备、计算机及其他电子设备制造业(部门 s)、其他(部门 ac)(包含了金融业、房地产业、居民服务业和社会保障业等),是减排效应低,减排量高的部门,同时表 2 可以看到这些部门也是间接碳排放大于直接碳排放部门,因此需要降低这些部门的间接碳排放强度来实现碳减排。第二象限的 5 个部门是减排



效应高、减排量低的部门。金属矿采选业(部门 d)非金属矿及其他矿采选业(部门 e)水的生产和供应业(部门 y)燃气生产和供应业(部门 x)造纸印刷及文教体育用品制造业(部门 j)间接碳排放较高,尤其是非金属矿及其他采矿业,这几个部门除了降低其自身的碳排放强度以外,也要减少相关生产链的碳排放强度,另外,这几个部门是生产生活中的上游产业,经济产出较大,产值变化对其经济影响较大,需要适当调整产业结构。

## 4 结论与政策建议

与能源相关的碳排放估算发现电力、热力的生产和供应业是碳排放总量最大的部门,占总体能源消费碳排放 50.58%,其次化学工业碳排放占总体碳排放的 9.65%,金属冶炼及压延加工业是第三贡献者,占总体碳排放的 9.31%。从碳排放强度看,煤炭开采洗选业、电力热力生产供应业、石油加工炼焦、及核燃料业等部门远高于其余部门,江苏省碳排放主要来自于能源供给部门。林伯强等认为能源强度是碳减排的主要因素,能效水平的变化对二氧化碳排放影响明显<sup>[30]</sup>,而江苏省的能源消费碳排放对 CO<sub>2</sub> 贡献接近 70%,因此,通过使用粉煤燃烧技术(PCC)、煤气化联合循环(IGCC)、大型循环流化床(CFB)等先进技术提高能源利用强度,同时发展清洁能源和开发新能源等是有效降低碳排放的关键措施。

从生产链视角的间接碳排放发现电力、热力生产和供应业( $15.183 \times 10^6$  t)依然是间接碳排放最大的部门,这不仅与其自身依赖煤炭火力发电的能源结构有关,而且与相关的上下游产业能源供给过程排放有关。采用“电力分摊”原则<sup>[31]</sup>,将电力、热力生产供应业的碳排放分解发现通信设备、计算机及其他电子设备制造业对电力部门的碳排放贡献最大,占电力部门碳排放的 61.53%,主要是因为电子设备制造业在江苏省出口贸易中占据较大比重。针对出口额份额与碳排放贡献值,优化出口结构,提高出口产品的产品附加值。同时,引进国外先进生产技术,来降低出口的隐含碳排放。

另外,化学工业也是间接碳排放的主要来源。随着江苏省节能减排措施的实施,工业行业的直接碳排放节能减排成果边际递减效应日益显现,而位于间接排放的第三产业潜力将成为今后挖掘碳减排潜力的重点领域,这一结论同王凯<sup>[32]</sup>计算中国整个服务业碳减排潜力的结论一致。针对化工行业当前产品结构复杂、高消耗、粗加工、低附加值产品比重偏高现象,需要提高化工行业的精细化程度,淘汰落后工艺技术,引进先进技术,改进工艺生产流程。

碳减排潜力分析发现,能源密集性行业除了是高碳排

放行业以外,也是碳减排潜力最大的行业(如电力、热力生产供应业减排效应  $1.58 \times 10^4$  元,煤炭开采洗选业减排效应  $3.31 \times 10^4$  元等)。建筑业碳减排量高而减排效应较低,江苏省工业化与城市化的不断推进,建筑面积总量的增长对实施建筑业减排效果明显,但是其上游的水泥生产行业的间接碳排放影响,使得其减排效应很低。传统产业部门例如农林牧渔业、纺织服装业、家具制造业等的碳减排不显著,因为这些行业对总体碳排放的贡献也较低,因此江苏省在不断淘汰落后产能的工业部门的过程中,需要转变经济增长方式,调整产业结构,降低能源强度才是碳减排的有效途径。针对减排潜力浮动的行业,例如第二象限和第四象限的部门,根据不同减排潜力特征,因地制宜制定减排策略。一方面发展新能源或清洁能源来代替传统能源的使用,另一方面引进先进技术,降低生产过程的碳排放,增加产品附加值。

碳减排技术角度而言,建议政府部门提供理论技术规划指导,并对重点排放行业引进外资和先进技术来提高节能减排效果。例如水泥行业纯低温余热发电、钢铁行业高炉差发电、低热值煤气发电等技术的广泛推广使用来替代电力、热力行业的发电,从而降低此行业的能耗排放量。另外,目前我国使用的火电机组主要是燃煤发电机组,存在污染严重,供电煤耗高的问题,发展高参数、大容量燃煤机组,天然气-燃气-蒸汽联合循环发电机组,是提高火电热效率的重要突破口。

积极开发利用新能源,促进能源结构优化。为了减少江苏省以煤炭为主带来的环境压力,鼓励使用天然气和秸秆沼气以提高煤的清洁使用。根据当前新能源利用状况,努力扩大新能源利用范围,提高全省能源装机容量和发电量。太阳能装机容量和发电量目前在江苏省呈现爆发式增长,积极开发风能装机容量,提高生物质能发电量,拓宽光伏产业的发展。

总之,产业结构优化调整具有结构性降碳作用,短期内效果较为明显,降碳效应高于技术进步。因此,未来经济发展方式的低碳化转型应重点关注产业结构调整,进一步加大产业结构的调整力度,从源头上抑制较高的能源消费刚性增长势头。加快构建三次产业协调拉动、服务经济为主的产业体系,加快第二产业内部结构升级进程。执行高耗能、高碳排放行业的碳排放限额标准,实行节能准入制和节能淘汰制,严格控制高耗能产业发展,进一步加大落后产能的淘汰力度,实现重工业、高耗能行业的优质化和比重的合理化。

(编辑:于杰)

## 参考文献(References)

- [1] Gregg J, Andres R, Marland G. China: Emissions Pattern of the

- World Leader in CO<sub>2</sub> Emissions from Fossil Fuel Consumption and Cement Production [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35 (8):1-5.
- [2] 潘家华,王谋. 国际气候谈判新格局与中国的定位问题探讨[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(4):1-5. [Pan Jiahua, Wang Mou. Climate Regime Building in a Changing World and China's Role in Global Climate Governance [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(4):1-5.]
- [3] 刘卫东,张雷,王礼茂,等. 我国低碳经济发展框架初步研究[J]. 地理研究,2010,29(5):778-788. [Liu Weidong, Zhang Lei, Wang Limao, et al. A Sketch Map of Low-carbon Economic Development in China [J]. *Geography Research*, 2010, 29(5):778-788.]
- [4] Marin G, Mazzanti M, Montini A. Linking NAMEA and Input Output for Consumption Vs. Production Perspective' Analyses: Evidence on Emission Efficiency and Aggregation Biases Using the Italian and Spanish Environmental Accounts [J]. *Ecological Economics*, 2012,74:71-84.
- [5] Munksgaard J, Pedersen K A. CO<sub>2</sub> Accounts for Open Economies: Producer or Consumer Responsibility? [J]. *Energy Policy*,2001,29(4):327-34.
- [6] 赵荣钦,黄贤金,高珊,等. 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,2013,32(2):109-115. [Zhao Rongqin, Huang Xianjin, Gao Shan, et al. Regional Carbon Emission Inventory Estimation and Reduction Potential Analysis in Jiangsu Province [J]. *Areal Research and Development*, 2013,32(2):109-115.]
- [7] Lin B Q, Sun C W. Evaluating Carbon Dioxide Emissions in International Trade of China [J]. *Energy Policy*, 2010, 38(1):613-621.
- [8] Muradian R, O'Connor M, Martinez-Alier J. Embodied Pollution in Trade: Estimating the 'Environmental Load Displacement' of Industrialised Countries [J]. *Ecological Economics*,2002,41(1):51-67.
- [9] Lenzen M, Pade L L, Munksgaard J. CO<sub>2</sub> Multipliers in Multi-region Input-output Models [J]. *Economic Systems Research*, 2004, 16(4):392-412.
- [10] Davis S J, Caldeira K. Consumption-based Accounting of CO<sub>2</sub> Emissions [J]. *PNAS*,2010,107(12):5678-5692.
- [11] Hertwich E G, Peters G P. Carbon Footprint of Nations: A Global Trade-Linked Analysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009,43(16):6414-6420.
- [12] Steinberger J K, Roberts J T, Peters G P, et al. Pathways of Human Development and Carbon Emissions Embodied in Trade [J]. *Nature Climate Change*,2012,(2):81-84.
- [13] Peters G P, Minx J C, Weber C L, et al. Growth in Emission Transfers via International Trade From 1990 to 2008 [J]. *PNAS*, 2011,108(21):8903-8908.
- [14] Weber C L, Peters G P, Guan D B, et al. The Contribution of Chinese Exports to Climate Change [J]. *Energy Policy*, 2008, 36(9):3572-3577.
- [15] Chen G Q, Zhang B. Greenhouse Gas Emissions in China 2007: Inventory and Input-Output Analysis [J]. *Energy Policy*, 2010,38(10):6180-93.
- [16] 孙建卫,陈志刚,赵荣钦,等. 基于投入产出分析的中国碳排放足迹研究[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(5):28-34. [Sun Jianwei, Chen Zhigang, Zhao Rongqin, et al. Research on Carbon Emission Footprint of China Based on Input-output Model [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010,20(5):28-34.]
- [17] Chen G Q, Chen Z M. Carbon Emissions and Resources Use by Chinese Economy 2007: A 135-sector Inventory and Input-Output Embodiment [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*,2010,15(11):3647-732.
- [18] Weber C L, Matthews H S. Quantifying the Global and Distributional Aspects of American Household Carbon Footprint [J]. *Ecological Economics*, 2008,66(23):379-91.
- [19] Wood R, Dey C J. Australia's Carbon Footprint [J]. *Economic Systems Research*, 2009,21(3):243-66.
- [20] Sanchez-Choliz J, Duarte R. CO<sub>2</sub> Emissions Embodied in International Trade: Evidence for Spain [J]. *Energy policy*,2004,32(18):1999-2005.
- [21] 张旺,周跃云. 北京能源消费排放 CO<sub>2</sub> 增量的分解研究:基于 IDA 法的 LMDI 技术分析 [J]. 地理科学进展,2013,32(4):514-521. [Zhang Wang, Zhou Yueyun. An Empirical Analysis of the Increment of CO<sub>2</sub> Emission from Energy Consumption in Beijing: Based on LMDI Technique of IDA Method [J]. *Progress in Geography*, 2013,32(4):514-521.]
- [22] 徐成龙,任建兰,巩灿娟. 产业结构调整对山东省碳排放的影响 [J]. 自然资源学报,2014,29(2):201-210. [Xu Chenglong, Ren Jianlan, Gong Canjuan. The Influence of Adjustment in Industrial Structures on Carbon Emissions in Shandong Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014,29(2):201-210.]
- [23] 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 [J]. 工业技术经济,2013,235(5):113-122. [Yuan Yijun, Wang Xue. Impact of Different Objectives of Industrial Structural Adjustment on Carbon Dioxide Emission Reduction in China [J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2013,235(5):113-122.]
- [24] 牛鸿蕾,江可申. 中国产业结构调整碳排放效应的多目标遗传算法 [J]. 系统管理学报,2013,22(4):560-572. [Niu Honglei, Jiang Keshen. Multi-objective Genetic Algorithm for Optimizing Carbon Emission from Industrial Structure Adjustment in China [J]. *Journal of Systems & Management*,2013,22(4):560-572.]
- [25] Shui B, Harriss R C. The Role of CO<sub>2</sub> Embodiment in US-China Trade [J]. *Energy Policy*,2006,34(18):4063-4068.
- [26] 唐建荣,李焯嘯. 基于 EIO-LCA 的隐含碳排放估算及地区差异化研究:江浙沪地区隐含碳排放构成与差异 [J]. 工业技术经济,2013,234(4):125-135. [Tang Jianrong, Li Yexiao. Study on



- the Differentiation of Regional Implicit Carbon Emissions Based on EIO-LCA; Composition and Differences of Implicit Carbon Emissions Based on EIO-composition and Differences of Implicit Carbon Emissions in Yangtze River Delta [J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2013, 234(4): 125 - 135. ]
- [27] 计军平, 刘磊, 马晓明. 基于 EIO-LCA 模型的中国部门温室气体排放结构研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(4): 741 - 749. [Ji Junping, Liu Lei, Ma Xiaoming. Greenhouse Gas Emissions by Chinese Economy: An Assessment Based on EIO-LCA Model[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(4): 741 - 749. ]
- [28] Feng Y Y, Ke Y L. China's Foreign Trade and Climate Change: A Case Study of CO<sub>2</sub> Emissions[J]. Energy Policy, 2010, 38(1): 350 - 356.
- [29] Yang J, Chen B. Carbon Footprint Estimation of Chinese Economic Sectors Based on A Three-tier Model [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 29: 499 - 507.
- [30] 林伯强, 孙传旺. 如何在保障中国经济增长前提下完成碳减排目标[J]. 中国社会科学, 2011, (1): 64 - 76. [Lin Boqiang, Sun Chuanwang. How Can China Achieve Its Carbon Emission Reduction Target While Sustaining Economic Growth? [J]. China Social Sciences, 2011, (1): 64 - 76. ]
- [31] 涂正革. 中国的碳减排路径与战略选择: 基于八大行业部门碳排放量的指数分解分析[J]. 中国社会科学, 2012, 3: 78 - 94. [Tu Zhengge. Strategic Measures to Reduce China's Carbon Emissions: Based on Index Decomposition Analysis of Carbon Emissions in Eight Industries[J]. Social Sciences in China, 2012, 3: 78 - 94. ]
- [32] 王凯, 李娟, 唐宇凌, 等. 中国服务业能源消费碳排放量核算及影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(5): 21 - 28. [Wang Kai, Li Juan, Tang Yuling, et al. Carbon Emissions Accounting and Decomposition Analysis of Energy Consumption of Service Industry in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(5): 21 - 28. ]

## Analysis of Industrial Structure Adjustment and Carbon Reduction Potential in Jiangsu Province: Based on EIO-LCA Model

WU Chang-yan HUANG Xian-jin CHUAI Xiao-wei XU Guo-liang YU Ran LI Li

(College of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing Jiangsu 210093, China)

**Abstract** With the development of urbanization and industrialization, it is a heated contradiction between economic growth and environmental pressures. Therefore, to save energy and reduce carbon emission, industrial restructuring is of great importance. Jiangsu Province is one of the most developed industrial economies as well as the biggest carbon emitters. Hence, taking the detailed industries of Jiangsu Province as a case study, this paper estimates direct and indirect carbon emissions of industries using input-output life cycle assessment model. And then carbon reducing potential models were created to simulate the effect of reducing potential resulted from industrial restructuring. The results show that: ①The largest contributor to direct carbon emissions caused by primary energy consumption is electric and heat power, which accounts for 50.58% of total carbon emissions based on energy consumption, followed by chemical industry (9.65%), and metal melting and rolling industry (9.31%). ②From the produce chains perspective, the major industry emitters of indirect carbon emissions are electric and heat power ( $1\,518.3 \times 10^4$  tons), coal mining and dressing ( $809.98 \times 10^4$  tons) and petroleum refining, coking and nuclear industry ( $469.44 \times 10^4$  tons); from consumer demand perspective, export embodied emissions is a major contributor to the overall indirect emissions. At the sector level, telecommunication, computer and other equipment manufacturing (16.55% of total exports carbon emissions), metal minerals mining and dressing industry (12.65%), transportation equipment manufacturing (12.49%) are obvious contributors to the export embodied carbon emissions. ③The largest contributor sectors of carbon reducing potential are mainly energy-intensive industries. For example, when the output value of industry changes by 1%, the reduction effect of electric and heat power industry would change  $1.58 \times 10^4$  yuan, which the amount of carbon reduction accounts for 1.57% of the total carbon emissions in 2010. Therefore, this paper makes suggestions to Jiangsu Province government that renewable and new energy should be developed to optimize the energy structure as well as improving energy efficiency by using the advanced technology, such as Pulverized Coal Combustion (PCC), Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC), and Circulating Fluidized Bed (CFB). In addition, enhancing production value of larger reduction potential sectors, such as communication equipment, computer and other electronic industry, and general or special equipment manufacturing.

**Key words** EIO-LCA; carbon emissions; industrial restructuring; reduction potential; Jiangsu province