DOI: 10.5846/stxb201507281580
张一清,刘传庚,白卫国.基于碳足迹研究的中国地区工业低碳转型——以山东省为例.生态学报,2016,36(16): - .
Zhang Y Q, Liu C G,Bai W G.China's carbon footprint regional industrial low-carbon transition: a case study of the Shandong Province.Acta Ecologica Sinica,2016,36(16): - .

基于碳足迹研究的中国地区工业低碳转型
——以山东省为例

张一清[1,2],刘传庚[1,3],白卫国[4]
1 山东能源经济协同创新中心,烟台市　264005
2 山东工商学院工商管理学院,烟台市　264005
3 山东工商学院煤炭经济研究院, 烟台市　264005
4 国瑞沃德低碳经济技术中心, 北京市　100053

摘要:行业的低碳发展是工业低碳转型的目标,以工业部门为对象,应用脱钩效应和面板模型分析行业能源消费的碳足迹,对深入研究地区工业低碳转型具有重要现实意义。以山东省为例,分析工业能源消费碳足迹的 1997 年至 2012 年样本数据,将工业部门分为高耗能行业、其他行业、战略性新兴行业,展开研究,结果表明:(1)自上世纪九十年末代开始节能降耗,山东省工业呈现强负"脱钩"、强"脱钩"、扩张负"脱钩"和弱"脱钩"交替发生,表明对工业节能降耗调控波动大,不利于工业部门均衡有序发展;(2)高耗能行业是能耗大户,高耗能行业与工业在绝大部分年份的脱钩状态相同,表明高耗能行业主导工业总体脱钩状态,是节能减排的主要对象;随着节能降耗的深入,相关政策趋紧,碳足迹边际成本不断升高,应关注锁定效应大的火电行业和碳足迹边际成本高的化学工业;(3)其他行业包含行业多,但总体能耗水平不高,随着节能减排的开展和行业持续发展,能耗将增加,必将承担更多的节能减排,需要关注锁定效应强的金属制品业发展,推动碳生产力系数高的食品饮料业发展;(4)战略性新兴行业碳锁定效应最弱、碳足迹边际成本最低和碳生产力系数最高,是国家大力倡导发展的行业;由于基数低,对工业碳排放态势影响极其有限,应大力推动碳锁定效应弱的新一代信息技术产业、碳足迹边际成本低的新材料行业、碳生产力系数高的节能环保业和新材料行业。

关键词:碳足迹; 脱钩效应; 面板协整; 工业; 山东省

China's carbon footprint regional industrial low-carbon transition: a case study of the Shandong Province

ZHANG Yiiqing[1,2], LIU Chuangeng[1,3],BAI Weiguo[4]
1 *Collaborative Innovation Center for Energy Economics of Shandong*, *Yantai* 264005, *China*
2 *Shandong Institute of business and technology*, *School of Business Administration*, *Yantai* 264005, *China*
3 *Shandong Institute of business and technology*, *Institute of Coal Economic Research*, *Yantai* 264005, *China*
4 *Green World Low-carbon Economy &Technology Center*, *Beijing* 100053, *China*

Abstract: Decreasing atmospheric carbon is the goal of low carbon industries. Using the industrial sector industry as an example, this study applies a decoupling model and analyzes the industrial carbon footprint during energy consumption. In this study, we analyzed the carbon footprint in Shandong province from 1997 to 2012. Separating the industrial sector into energy intensive and emerging industries, the results demonstrate that: (1) the government began to implement energy

基金项目:2014 年山东能源经济协同创新中心重大资助项目 (2014SDXT001);国家社科基金资助项目(13BGL108);山东省自然基金资助项目(ZR2011GL016);国家科技支撑计划课题(2013BAK15B04)
收稿日期:2015-07-28;　　**修订日期**:2016-01-25
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zyq_751105@ 163.com

conservation and emission reductions since the last century in late ninety's. The strong negative "decoupling", the strong "decoupling", the expansion negative "decoupling" and weak "decoupling" of industries occur alternately in Shandong province. This suggests that high volatility for regulation and the control of industrial saving energy and reduces consumption, which is harmful to industrial development. (2) The energy consumption in industries is vast. The decoupling of energy intensive industries and industry is the same in most periods. It is the main driving force of industrial energy consumption, and it necessitates implementation of government policies. . With increase in saving energy and reducing consumption, the marginal cost of carbon footprint is rising, and energy conservation and emission reduction should focus on thermal power industry with large locking effect and chemical industry with high carbon footprint marginal cost.(3) Energy consumption is not as high in other industries. With the development of the energy conservation and emission reduction and sustainable development of industry, the energy consumption will increase, and other industries will certainly take more obligation. The government should pay attention to industries making metal products and promote the food and beverage industry. (4) Strategic and emerging industries have the weakest carbon lock-in effect, the smallest cost of carbon production, and the highest production of carbon, which the government advocates. Because of the low base, emerging industries have limited effects on industrial carbon emissions. The government should promote a new generation of technologies with a smaller carbon footprint that will help conserve energy and protect the environment.

Key Words: Carbon footprint; decoupling effect; panel cointegration; industry; Shandong province

低碳发展是实现生态文明的主要途径之一,工业作为碳排放大户,中国各个地区大力推进工业低碳转型。工业碳足迹,即测量工业部门生产经营导致的温室气体排放,对工业低碳发展具有重要现实意义。碳足迹核算方法研究,按核算范围可分为生产侧和消费侧。生产侧以《IPCC 国家温室气体排放清单指南》[1]为代表,只核算边界内直接产生的温室气体排放,适用于国家和地区;消费侧以《ISO14064 标准系列》[2]为代表,不仅包括核算边界内直接产生的温室气体排放,也包括边界内人类活动引致产生的边界外温室气体排放,适用于项目和产品。有学者认为只核算生产侧[3-4]会导致国际贸易的隐含碳或碳泄漏;对地域划分较小的如城市,《ICLEI 城市温室气体清单指南》[5]与部分学者[6-8]指出城市应该按照需求侧核算。考虑到本文所指的地区为省域,碳足迹核算适合采用生产侧。国内外学者应用不同方法对碳足迹进行了深入研究。(1)碳足迹驱动因素分解。采用 IPCC 方法核算能源消费碳排放,对经济增长主要动力和抑制因素分析[9]-[12]。(2)脱钩效应。综合运用脱钩理论及 LMDI 方法,从国家、省级层面或者产业角度对经济增长与能源消费、碳排放之间关系以及碳排放驱动因素作了深入研究[13]-[17]。(3)面板协整。从省级或者行业层面对经济增长、产业结构以及碳排放关系,使用面板协整均衡分析[18]-[19]。

作为代表性的工业大省,山东省近些年积极推动低碳发展。2012 年出台的《山东省"十二五"控制温室气体排放工作实施方案》①提出,要大幅度降低单位地区生产总值二氧化碳排放。本文以山东省工业部门的碳足迹为研究对象,研究碳足迹的影响因素、脱钩效应和面板协整,分析行业优化升级,以深入剖析工业部门分行业碳足迹特征,为山东省工业低碳转型的政策措施提供决策依据。

1 模型方法

脱钩效应主要刻画工业部门及分行业的经济增长与能源消费的动态关系,面板模型能够更详实地分析分行业碳足迹、行业增加值和行业碳生产力的均衡关系。综合两种方法可以互相补充验证经济增长和能源消费的动态关系以及分行业碳足迹、行业增加值以及行业碳生产力的均衡关系,为地区工业低碳转型提供决策依

① 山东省人民政府. 关于印发山东省"十二五"控制温室气体排放工作实施方案的通知[EB/OL].2012,http://www.shandong.gov.cn/art/2012/11/21/art_3883_3120.html

据和经验借鉴。

1.1　脱钩效应模型

衡量经济增长、物质消耗及环境保护之间同期变化关系的一个重要思想是脱钩理论。其理论基础为经济合作与发展组织(Organization for Economic Co-operation and Development)在 1993 年提出的 DPSIR 框架。而后 Tapio 利用弹性系数法构建了“脱钩”指标,“脱钩弹性”见[20]式(2),并将“脱钩”指标划分为三大状态和八种等级。其中,“脱钩”状态包括弱“脱钩”、强“脱钩”和衰退“脱钩”,连接状态包括扩张连接和衰退连接,负“脱钩”状态包括弱负“脱钩”、强负“脱钩”和扩张负“脱钩”,具体见表 1。

$$\varepsilon = \frac{\Delta CO_2/CO_2}{\Delta \mathrm{GDP}/GDP} \tag{1}$$

式中,ε 为二氧化碳和经济发展的“脱钩”弹性系数,CO_2 排放表示碳足迹对环境的压力,ΔCO_2 为现期相对于基期 CO_2 排放变化量,GDP 表示经济驱动力,ΔGDP 为现期相对于基期 GDP 变动量。

表 1　经济增长与环境污染脱钩状态

Table 1　Decoupling condition between economic growth and environmental pollution

分类 Classification	状态 State	$\Delta CO_2/CO_2$ $\Delta CO_2/CO_2$	$\Delta GDP/GDP$ $\Delta GDP/GDP$	ε 含义 Implication	
脱钩状态	弱“脱钩”	>0	>0	0—0.8	好:经济增长,污染缓慢增长
Decoupling state	强“脱钩”	<0	>0	<0	最好:经济增长,污染程度下降
	衰退“脱钩”	<0	<0	>1.2	较好:经济缓慢衰退,污染大幅下降
连接状态	扩张连接	>0	>0	0.8—1.2	一般:经济增长,污染同步增长
coupled condition	衰退连接	<0	<0	0.8—1.2	较差:经济衰退,污染同步下降
负“脱钩”状态	弱负“脱钩”	<0	<0	0—0.8	很差:经济衰退,污染缓慢下降
negative decoupling	强负“脱钩”	>0	<0	<0	最差:经济衰退,污染增长
	扩张负“脱钩”	>0	>0	>1.2	差:经济增长缓慢,污染大幅增长

1.2　面板模型

选择高耗能行业、其他行业和战略性新兴行业的 17 个行业,以行业碳足迹、行业增加值和行业碳生产力三个变量构建模型,通过面板模型分析行业碳足迹是否与行业增加值、行业碳生产力之间存在长期均衡关系,通过研究行业特点与碳足迹的联系,有助于根据产业特性,制定更有针对性的减排策略。

模型如下:

$$Y_{it} = X_{it}^{\beta_{1i}} e^{(\alpha_i + \beta_{2i} Z_{it} + u_{it})} \qquad i = 1,2,\ldots,17 \qquad t = 1,2,\ldots,16 \tag{2}$$

式中,Y_{it} 表示第 i 行业第 t 期的碳足迹(单位:万吨碳),X_{it} 表示第 i 行业第 t 期行业增加值(单位:亿元),Z_{it} 表示第 i 行业第 t 期的碳生产力(单位:亿元/万吨碳)。等式两边同取对数,得:

$$\ln Y_{it} = \alpha_i + \beta_{1i} \ln X_{it} + \beta_{2i} Z_{it} + u_{it} \tag{3}$$

式中,α_i 表示 i 行业性质所决定的对碳足迹的静态依赖性,β_{1i} 表示 i 行业产出的碳足迹需求弹性,β_{2i} 反映该行业碳生产力变化对碳足迹的影响。

2　案例应用

2.1　经济部门分析

以《省级温室气体清单编制指南(试行)》方法为参考,分析 1997 年—2012 年山东省能源消费碳足迹,将其划分为能源工业、农业、工业和建筑业、交通运输业、服务业和居民生活六个经济部门。能源消费总量包括各种化石燃料终端消费及加工与转换的火力发电、供热、炼焦和炼油引致碳足迹,用于原料的除外。碳排放量计算公式如下:

$$GHG\ 排放量 = \mathrm{A} = \sum \sum \sum (EF_{ij} \times DA_{ij}) \tag{4}$$

式中，EF_{ij} 为排放因子，引自《省级温室气体清单编制指南（试行）》；

DA_{ij} 为活动水平数据，各个年度能源消费数据源于《山东省统计年鉴（1998—2013）》[21]；

i：为燃料类型；

j：为部门活动。

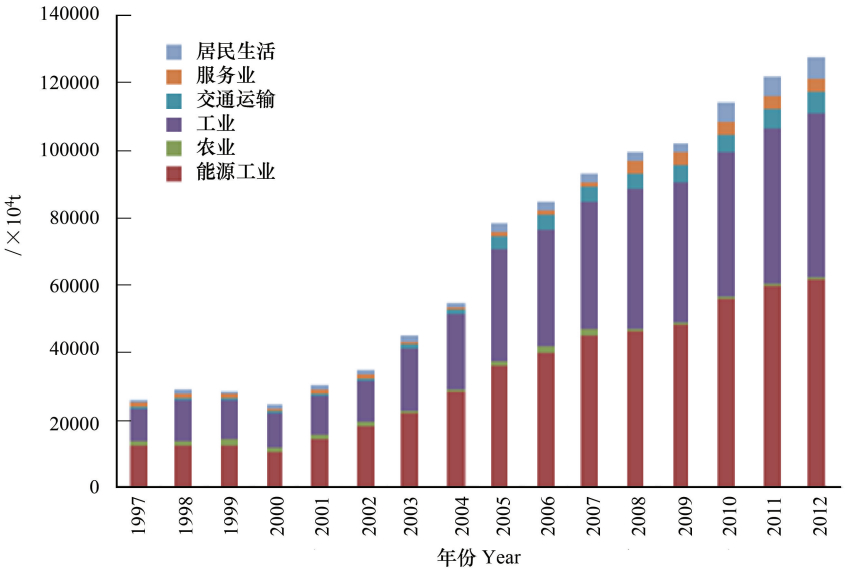

图 1 总量及 6 个经济部门的碳足迹

Fig.1 Total and 6 sector Carbon footprint

居民生活：The lives of residents；服务业：Service industry；交通运输：Communication and Transportation；工业：Industry；农业：Agriculture；能源工业：Energy industry

根据计算结果山东省碳足迹从 1997 年的 26133.42 万吨增长到 2012 年的 128005.06 万吨，增长了 4.9 倍，年均增长 11.17%。按照碳足迹主要指标山东省比较国家同期水平：2005 年，中国为 3.16 吨二氧化碳/万元 GDP，人均 3.88 吨二氧化碳/人，山东 4.26 吨二氧化碳/万元 GDP，8.52 吨二氧化碳/人（参考国家第二次信息公报的能源活动引致二氧化碳直接排放的数据，GDP 为以 1997 年为基期的扣除通货膨胀因素的实际 GDP，以及人口数量数据来源于《中国统计年鉴 2006》；而山东省相关数据来源于《山东省统计年鉴 2006》）。可以得出，虽然山东省碳足迹强度指标呈现下降态势，但是主要指标均高于国家平均水平，这很大程度上得益于能源消费的快速增长。按照 1997 至 2012 年间碳足迹所占比重平均水平分析，能源工业约为 48.29%，工业和建筑业约为 39.66%（其中工业为 38%，建筑业为 1.66%），服务业约为 2.91%，交通运输业约为 3.97%，居民生活约为 3.57%，农业约为 1.6%。其中，如果将能源工业与工业加总，则占到 86.29%，说明山东省碳足迹主要来源于统计意义上的工业。

2.2 脱钩效应

为分析深入，比较研究山东省工业增长与碳足迹的脱钩效应，以及高耗能行业、其他行业、战略性新兴行业增长与碳足迹的脱钩效应。其中，高耗能行业包括电力行业、石油天然气开采与加工业、煤炭开采和洗选业、钢铁工业、有色金属加工业、建筑材料业、化学工业；其他行业包括纺织业、造纸及纸制品业、食品饮料业、金属制品业等；战略性新兴行业[22]包括节能环保（废弃资源和废旧材料回收加工业）、新一代信息技术产业（电气机械及器材制造业、通信设备、计算机及其他电子设备制造业）、生物产业（医药制造业）、高端装备制造业（通用设备制造业、专用设备制造业、交通运输设备制造业、仪器仪表及文化、办公用机械制造业）、新材料（工艺品及其他制造业）。

数据来源与整理。CO_2 排放以《省级温室气体清单编制指南（试行）》方法为参考，二氧化碳排放因子引自

《省级温室气体清单编制指南(试行)》,各个年度能源消费数据源于《山东省统计年鉴(1998—2013)》及灰色文献[23]。各个行业工业增加值在《山东省统计年鉴(1998—2013)》中是以当年价格计算的,需要进行价格换算。换算的方法是首先以 1997 年为基期,基期价格指数为 100;然后将历年各个行业名义工业增加值通过“按工业行业分工业生产者出厂价格指数”换算成实际工业增加值。其中,电力行业按电力工业指数换算,煤炭开采和洗选业按煤炭及炼焦工业指数换算,石油天然气开采与加工业按石油工业指数换算,化学原料及化学制品制造业按化学工业指数换算,建筑材料业按建筑材料工业指数换算,钢铁工业按冶金工业指数换算,有色金属业按冶金工业指数换算;纺织业按纺织工业指数换算,造纸及纸制品业按造纸工业指数换算,食品饮料业按食品工业指数换算,金属制造业按冶金工业指数换算;废弃资源和废旧材料回收加工业参考其他工业指数换算,机械/电子/通用设备业按机械工业指数换算,医药制造业参考化学工业指数换算,通用设备制造业、专用设备制造业、交通运输设备制造业、仪器仪表及文化、办公用机械制造业参考机械工业指数换算,工艺品及其他制造业参考其他工业指数换算。经过汇总整理,分别将数据代入式(1)得山东省工业、高耗能行业、其他行业和战略性新兴行业的脱钩效应,见图 2 山东省工业及行业的脱钩效应。

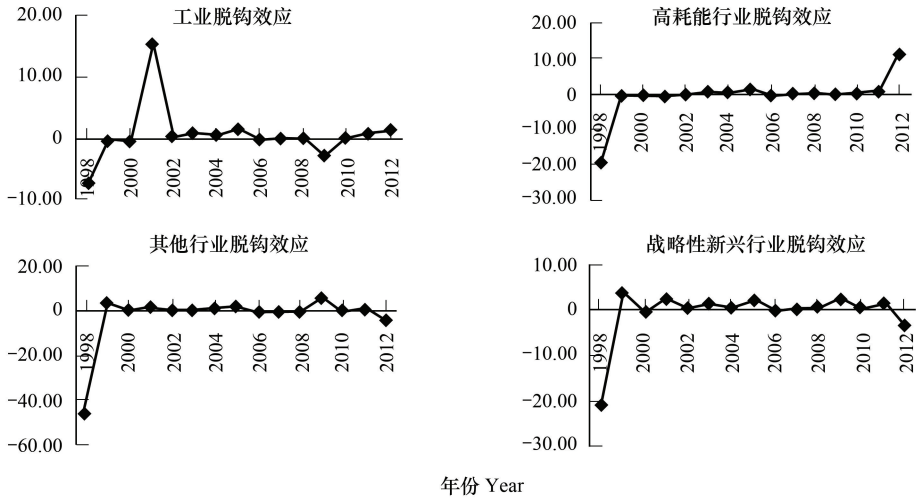

图 2　山东省工业及行业的脱钩效应

Fig.2　The decoupling effect in Shandong province ,industry and industries

2.3　面板协整

数据来源与整理。分行业碳足迹和行业增加值引用上述研究,行业碳生产力为行业增加值除以行业碳足迹得到。以 17 个行业碳足迹、行业增加值以及碳生产力(1997—2012)的面板数据为分析样本,经过协方差分析检验,面板模型设定为既有个体影响又有结构影响的变截距变系数模型,即模型中的参数对各个行业而言是不同的。

1.单位根检验

对 17 个行业碳足迹和增加值的对数值,以及碳生产力分别进行单位根的 LLC 检验、ADF 检验和 PP 检验。由检验结果(见表 2)可知,构成面板模型 3 个变量满足协整检验要求。

2. 协整检验

对 17 个行业碳足迹、行业增加值的对数值以及碳生产力进行面板协整检验,其检验结果见表 3。

由表 3 可知,Panel—PP 和 Panel—ADF 的统计量显著,Panel—rho 统计量不显著。因为 Pedroni[24] 指出在时间较短(T≤20)的样本数据分析中,Panel ADF 和 Group ADF 的统计量具有较高能效,其余统计量较低,则可以判断通过了显著性检验,即 17 个行业碳足迹的对数值、增加值的对数值和碳生产力之间存在长期协整关系。

表 2 单位根检验结果

Table 2 Unit root test results

变量 Variable	检验方法 Test method	检验形式 Inspection form	水平值统计量(p 值) Level statistics(p value)	结论 Conclusion
行业增加值 Added value of industry	LLC	(1, 1,0)	-12.82 (0.0000)	平稳
	ADF		110.17 (0.0000)	平稳
	PP		177. 70 (0.0000)	平稳
碳足迹 Carbon footprint	LLC	(1, 1,0)	-2.21 (0.0136)	平稳
	ADF		61.88(0.0024)	平稳
	PP		66.46(0.0007)	平稳
碳生产力 Carbon productivity	LLC	(1, 1,0)	-19.62(0.0000)	平稳
	ADF		124.25 (0.0000)	平稳
	PP		150.88 (0.0000)	平稳

注:检验形式(c,t,k)中,$c=1$ 和 $t=1$ 分别表示带有常数项和趋势项,$c=0$ 和 $t=0$ 分别表示无常数项和无趋势项,k 表示滞后期数

表 3 协整检验结果

Table 3 Cointegration test results

检验方法 Test method	统计量 Statistics	统计量值(p 值) Statistical quantity(p value)
Pedroni	Panel—rho	-0.89(0.8152)
	-1.18(0.1184)	
	Panel—ADF	-3.68(0.0001)
Panel-ADF	Group—rho	-0.12(0.4501)
	Group—PP	-4.97(0.0000)
	Group—ADF	-5.02(0.0000)

3.协整估计

对公式(3)进行 TSLS 估计,得协整向量(α_i 、β_{1i} 和 β_{2i})估计结果,见表 4:

表 4 协整方程估计结果

Table 4 Estimated result of Cointegration equation

行业 Industry		α_i	T 值 T Value	β_{1i}	T 值 T Value	β_{2i}	T 值 T Value
高耗能行业 Energy-intensive industries	电力行业	1.11	1.11	0.37	1.50	-0.09	-3.17
	石油天然气开采与加工业	-0.55	-0.55	0.77	2.49	-0.07	-2.18
	煤炭开采和洗选业	-1.30	-1.30	0.84	3.62	-0.05	-1.84
	钢铁工业	-2.09	-2.09	0.89	5.94	-0.11	-2.28
	有色金属业	-3.88	-3.88	0.94	10.89	-0.12	-4.82
	建筑材料业	-4.50	-4.50	1.01	8.13	-0.01	-6.62
	化学工业	-4.11	-4.11	1.08	8.64	-0.12	-3.89
其他行业 Other industries	纺织业	-2.17	-2.17	0.73	8.39	-0.02	-5.79
	造纸及纸制品业	-2.55	-2.55	0.82	8.02	-0.05	-5.24
	食品饮料业	-2.81	-2.81	0.79	8.78	-0.02	-5.48
	金属制品业	-0.95	-0.95	0.60	8.10	-0.02	-8.56
	其他行业	-3.77	-3.77	1.03	7.07	-0.05	-3.10
战略性新兴行业 Strategic emerging industries	节能环保业	-3.02	-3.02	0.38	6.77	-0.001	-9.70
	新一代信息技术产业	-5.95	-5.95	0.95	11.23	-0.01	-4.43
	生物产业	-3.73	-3.73	0.76	9.16	-0.01	-6.47
	高端装备制造业	-4.26	-4.26	0.99	8.09	-0.02	-3.45
	新材料行业	-1.01	1.01	0.31	5.46	-0.001	-4.80

T 值即 t 统计量

3　结果分析

3.1　脱钩效应分析

为深入分析山东省工业及高耗能行业、其他行业、战略性新兴行业脱钩效应,制作图 3—6。

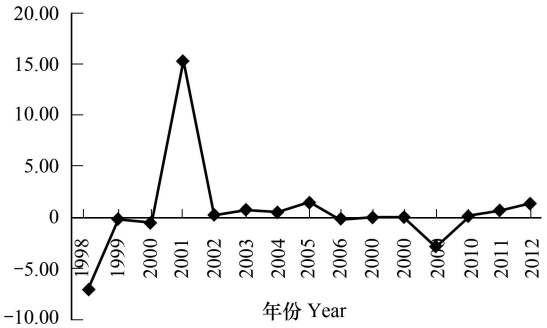

图 3　工业脱钩效应

Fig.3　The decoupling effect of industry

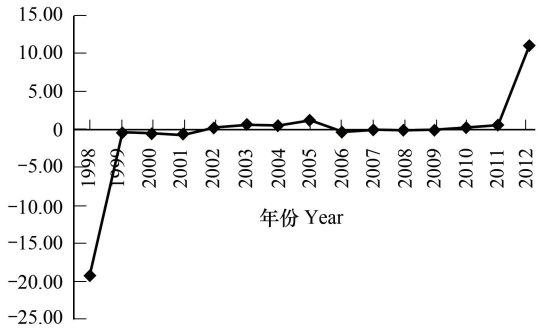

图 4　高耗能行业脱钩效应

Fig. 4　The decoupling effect of the traditional high energy consuming industries

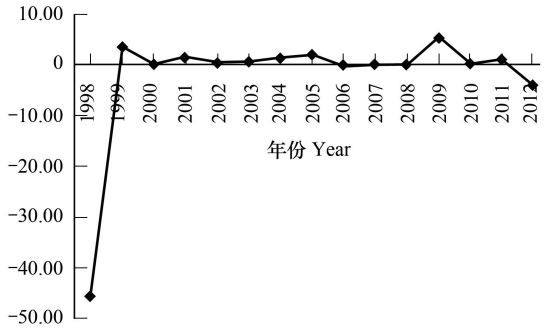

图 5　其他行业脱钩效应

Fig.5　The decoupling effect of other industries

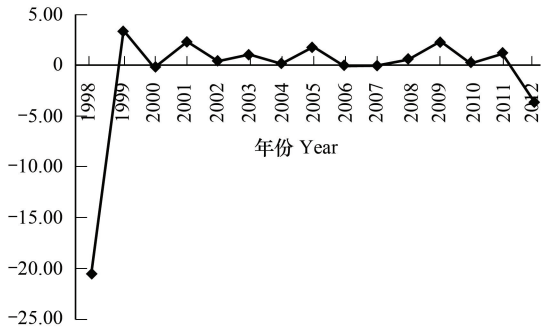

图 6　战略性新兴行业脱钩效应

Fig.6　The decoupling effect of the strategic emerging industries

图 3 显示工业在 1998 年、2006 年和 2009 年呈现强负“脱钩”,1999 年至 2000 年为强“脱钩”,2001 年、2005 年和 2012 年为扩张负“脱钩”,2002 年至 2004 年、2007 年至 2008 年、2010 年至 2011 年为弱“脱钩”,说明上世纪九十年末开始的节能降耗发展初始起到一定效果,但在 2006 年开始将节能降耗指标作为约束性指标后,能源消耗与工业经济发展的脱钩显著提升,在经历 2008 年的刺激政策后脱钩势头减弱。

图 4 显示高耗能行业在 1998 年、2001 年、2006 年和 2009 年呈现强负“脱钩”,1999 年至 2000 年为强“脱钩”,2005 年和 2012 年为扩张负“脱钩”,2002 年至 2004 年、2007 年至 2008 年、2010 年至 2011 年为弱“脱钩”,说明根据节能降耗要求,针对能耗大户——高耗能行业开展的节能降耗措施行动起初成果突出,而后受经济发展需要,弱化了节能降耗要求,“十一五”期间将节能降耗指标作为约束性指标后,高耗能行业能源消费高速增长势头得到极大遏制,但在 2008 年的刺激政策后,又得到了反弹,“十二五”的严峻形势使得脱钩效应明显。

图 5 显示其他行业在 1998 年和 2006 年呈现强负“脱钩”,2012 年为强“脱钩”,1999 年、2001 年、2004 年至 2005 年、2009 年为扩张负“脱钩”,2000 年、2002 年至 2003 年、2007 年至 2008 年、2010 年为弱“脱钩”,2011 年为扩张连接,说明上世纪开始的节能降耗发展初始起到一定效果,在“十一五”期间将节能降耗指标作为约束性指标后,其他行业起初能耗增长速度显著降低,但之后节能降耗作用并不明显,与其不是能耗大户有极大关联。

图 6 显示战略性新兴行业在 1998 年和 2006 年呈现强负“脱钩”,2000 年和 2012 年为强“脱钩”,1999 年、2001 年和 2009 年为扩张负“脱钩”,2002 年、2004 年、2007 年至 2008 年、2010 年为弱“脱钩”,2003 年、2005 年和 2011 年为扩张连接,说明战略性新兴行业自上世纪末到 2002 年重组,能耗增长速度加快,而后伴随行业发展,能耗增长速度明显超过经济增速,但由于基数低,对工业部门的碳排放态势影响极其有限。

总体来讲,山东省工业 1997 年至 2012 年期间呈现强负“脱钩”、强“脱钩”、扩张负“脱钩”和弱“脱钩”交替发生,表明对工业节能降耗调控波动大;3 个强负“脱钩”和扩张负“脱钩”体现了高耗能的特征。

高耗能行业与工业在绝大部分年份的脱钩状态相同,表明高耗能行业主导工业总体脱钩状态。其他行业脱钩状态变化多,1997 年至 2012 年期间共发生强负“脱钩”、强“脱钩”、扩张负“脱钩”、扩张连接和弱“脱钩”5 种状态,其中强负“脱钩”发生 2 次,扩张负“脱钩”发生 5 次,期间能耗增长速度显著。战略性新兴行业强负“脱钩”发生 2 次,扩张负“脱钩”发生 3 次,相对而言,期间能耗增长速度最快,但碳足迹低,对工业部门的影响有限。

3.2 面板协整分析

根据面板模型分析得出行业碳足迹、行业增加值和行业碳生产力存在均衡关系,对 α_i 、β_{1i} 、β_{2i} 展开分析。

工业碳足迹的静态依赖性 α_i 为-2.68,总体静态依赖性低,即碳锁定效应减弱。按照行业三个类别,高耗能行业为-2.19,其他行业为-2.45,战略性新兴行业为-3.59,高耗能行业和其他行业都高于平均水平且高耗能行业最高,战略性新兴行业不仅低于平均水平而且在三者之中最低,显示高耗能行业高耗能特点和战略性新兴行业低耗能的特点,说明在经济低碳转型背景下,节能降耗诸多措施(如产品综合能耗限额标准等)重点针对高耗能行业能源消耗的限制,以及大力倡导积极发展战略性新兴行业的原因。具体到行业:高耗能行业 7 个行业从高到低依次为电力行业、石油天然气开采与加工业、煤炭开采和洗选业、钢铁工业、有色金属加工业、化学工业、建筑材料业,仅有建筑材料业和化学工业低于均值-2.68,而电力行业不仅是高耗能行业最高的,也是 17 个行业中唯一的正值,表明电力投资大,尤其是火电所造成的锁定效应最高;其他行业 5 个行业从高到低依次为金属制品业、纺织业、造纸及纸制品业、食品饮料业、其他行业,只有食品饮料业和其他行业低于均值-2.68,金属制品业最高;战略性新兴行业 5 个行业从高到低依次为新材料行业、节能环保、生物产业、高端装备制造业、新一代信息技术产业,仅有新材料行业高于均值-2.68,新一代信息技术产业不仅在战略性新兴行业,而且在工业部门也是最低的,这从能耗角度也能凸显为什么互联网+愈来愈受到产业发展的推崇。

工业产出碳足迹需求弹性(碳足迹边际成本) β_{1i} 平均水平为 0.78。其中,高耗能行业为 0.84,其他行业为 0.79,战略性新兴行业为 0.68,高耗能行业和其他行业都高于平均水平且高耗能行业最高,战略性新兴行业不仅低于平均水平而且在三者之中最低,呈现随着节能降耗的深入,高耗能行业规模经济导致碳足迹边际成本不断升高。按照行业分析:高耗能行业 7 个行业从高到低依次为化学工业、建筑材料业、有色金属加工业、钢铁工业、煤炭开采和洗选业、石油天然气开采与加工业、电力行业,只有电力行业低于平均水平,其余行业如建筑材料业和化学工业碳足迹边际成本较高,并且化学工业在 17 个行业中最高,表明需求弹性变化大,其与碳锁定效应下降形成一致;其他行业 5 个行业从高到低依次为其他行业、食品饮料业、造纸及纸制品业、纺织业、金属制品业,其他行业最高,表明需求弹性变化大,其与碳锁定效应下降形成一致;战略性新兴行业 5 个行业从高到低依次为高端装备制造业、新一代信息技术产业、生物产业、节能环保、新材料行业,这里新一代信息技术产业和高端装备制造业高于平均水平,体现了大规模制造能耗大的特点,生物产业接近平均水平,说明有一定可取之处,节能环保业和新材料行业远低于平均水平,体现绿色低碳的显著效果。

工业碳生产力系数 β_{2i} 平均水平为-0.045,总体为负值。其中,高耗能行业为-0.081,其他行业为-0.032,战略性新兴行业为-0.008,高耗能行业低于平均水平且高耗能行业最低,其他行业和战略性新兴行业都高于平均水平,而且战略性新兴行业在三者之中最高,呈现明显的行业特征优势,与静态依赖性及产出碳足迹需求弹性分析一致。按照行业分析:高耗能行业 7 个行业从高到低依次为建筑材料业、煤炭开采和洗选业、石油天

然气开采与加工业、电力行业、钢铁工业、有色金属加工业和化学工业,有色金属加工业和化学工业既是高耗能行业最低,也是 17 个行业中最低的,表明这两个行业碳生产力乏力;其他行业 5 个行业从高到低依次为食品饮料业、纺织业、金属制品业、其他行业、造纸及纸制品业,总体处于中游水平;战略性新兴行业 5 个行业从高到低依次为节能环保业、新材料行业、新一代信息技术产业、生物产业、高端装备制造业,这 5 个行业均高于平均水平,其中节能环保业、新材料行业在 17 个行业中最高,凸显战略性新兴行业低排放的特征。

4　结论与讨论

以山东省工业能源消费碳足迹的 1997 年至 2012 年的样本数据为切入点,将工业分为高耗能行业、其他行业、战略性新兴行业三大类别 17 个行业,应用脱钩效应和面板模型深入分析,研究结果对地区工业低碳转型具有重要现实意义。首先,得出山东省碳足迹强度指标呈现下降态势,但主要指标均高于国家平均水平,其中工业是碳足迹主要来源的结论。其次,研究结果表明:(1)自上世纪九十年末代开始,山东省工业呈现强负“脱钩”、强“脱钩”、扩张负“脱钩”和弱“脱钩”交替发生,表明工业节能降耗调控波动大,不利于工业部门均衡有序发展;(2)高耗能行业主导工业总体脱钩状态,是实施节能减排措施的对象;随着节能降耗的深入,节能环保政策趋紧,碳足迹边际成本不断升高,应关注锁定效应大的火电行业和碳足迹边际成本高的化学工业;(3) 其他行业总体能耗水平不高,随着节能减排工作的开展和行业持续发展,必将承担更多的节能减排,需要关注锁定效应强的金属制品业发展,推动碳生产力系数高的食品饮料业发展;(4) 战略性新兴行业碳锁定效应最弱,碳足迹边际成本最低而且碳生产力系数最高,是需要倡导发展的行业;应大力推动碳锁定效应弱的新一代信息技术产业、碳足迹边际成本低的新材料行业、碳生产力系数高的节能环保业和新材料行业。

国内外学者(张明,2011;徐盈之等,2011;王同孝等,2012;宋杰鲲,2012;王云,2012;吴振信等,2012;杜书云等,2013;Wang, W.W,2013;Ming,Zhang,2015;Ren, S. G 等,2014)对碳足迹的影响因素,分别应用 IPCC 方法、面板协整、脱钩效应与 LMDI,从国家、省级层面或者产业角度对经济增长与碳排放因素开展研究。碳足迹驱动因素分解可以明晰碳排放增长的主要动力和抑制因素,脱钩效应能够刻画动态变化,面板模型可以突出指标之间均衡关系,但是上述学者尚没有将这些方法综合应用,深入研究地区工业低碳转型。本研究应用脱钩效应和面板模型分析地区工业低碳转型,剖析行业的经济增长与碳排放,以及碳锁定效应、碳足迹边际成本和碳生产力系数之间的关系,研究揭示出了地区工业低碳转型中行业碳足迹,为地区工业低碳转型提供决策依据和经验借鉴。然而,碳足迹的核算和模型分析存在一些局限性。比如,只核算了化石燃料燃烧排放,未纳入工业生产过程排放,碳排放因子和参数的选择是否符合山东省实际;模型的选择以及关键指标变量还需要斟酌,另外模型可能还存在不确定性。后续研究针对不同地区工业低碳转型,碳足迹核算应尽可能包含化石燃料燃烧排放和工业生产过程排放,碳排放因子和参数的选择符合实际情况,并考虑模型适应范围。

参考文献(References):

[1] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory. New York: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.

[2] ISO. ISO/TS 14067—2013 Greenhouse gases-carbon footprint of products-requirements and guidelines for quantification and communication. Santiago: Austrian Federal Environment Agency, 2012.

[3] Wyckoff A W, Roop J M. The embodiment of carbon in imports of manufactured products: implications for international agreements on greenhouse gas emissions. Energy Policy, 1994, 22(33): 187-194.

[4] Rhee H C, Chung H S. Change in CO_2 emission and its transmissions between Korea and Japan using international input-output analysis. Ecological Economics, 2006, 58(4): 788-800.

[5] ICLEI. International Local Government GHG Emissions Analysis Protocol Version 1.0, (October 2009). ICLEI, 2009. (请核对出版地)

[6] Lin J Y, Liu Y, Meng F X, Cui S H, Xu L L. Using hybrid method to evaluate carbon footprint of Xiamen City, China. Energy Policy, 2013, 58: 220-227.

[7] Ramaswami A, Hillman T, Janson B, Reiner M, Thomas G. A demand-centered, hybrid life-cycle methodology for city-scale greenhouse gas inventories. Environmental Science & Technology, 2008, 42(17): 6455-6461.

[8] 林剑艺, 孟凡鑫, 崔胜辉, 于洋, 赵胜男. 城市能源利用碳足迹分析——以厦门市为例. 生态学报, 2012, 32(12): 3782-3794.
[9] 张明. 基于能流图的山东省能源消耗分析. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(7): 46-50.
[10] 王同孝, 赵联振, 王伟. 山东省能源消费与碳排放分析. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(7): 49-52.
[11] 宋杰鲲. 基于 LMDI 的山东省能源消费碳排放因素分解. 资源科学, 2012, 34(1): 35-41.
[12] 赵忠, 任俊义, 黄婉澈. 山东省碳排放的影响因素及低碳经济发展路径探析. 生态经济, 2013, (4): 62-65, 69.
[13] Zhang M, Song Y, Su B, Sun X M. Decomposing the decoupling indicator between the economic growth and energy consumption in China. Energy Efficiency, 2015, 8(6): 1231-1239.
[14] 徐盈之, 徐康宁, 胡永舜. 中国制造业碳排放的驱动因素及脱钩效应. 统计研究, 2011, 28(7): 55-61.
[15] Wang W W, Liu R, Zhang M, Li H N. Decomposing the decoupling of energy-related CO_2 emissions and economic growth in Jiangsu Province. Energy for Sustainable Development, 2013, 17(1): 62-71.
[16] 王云. 低碳经济"脱钩"量化分解模型研究——基于 IPAT 方程的分析. 经济问题, 2012, (5): 8-13.
[17] Ren S G, Yin H Y, Chen X H. Using LMDI to analyze the decoupling of carbon dioxide emissions by China's manufacturing industry. Environmental Development, 2014, 9: 61-75.
[18] 吴振信, 谢晓晶, 王书平. 经济增长、产业结构对碳排放的影响分析——基于中国的省际面板数据. 中国管理科学, 2012, 20(3): 161-166.
[19] 杜书云, 万宇艳. 中国工业结构调整的碳减排战略研究-基于 12 个行业的面板协整分析. 经济学家, 2013, (12): 51-56.
[20] Tapio P. Towards a Theory of Decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in finland between 1970 and 2001. Transport Policy, 2005, 12(2): 137-151.
[21] [23] 山东省统计局, 国家统计局山东调查总队. 山东省统计年鉴(1998-2013). 北京: 中国统计出版社, 1998-2013.
[22] 周晶, 何锦义. 战略性新兴产业统计标准研究. 统计研究, 2011, 28(10): 3-8.
[24] Pedroni P. Critical Values for Cointegration Tests in Heterogeneous Panels with Multiple Regressors. Oxford Bulletin of Economics and Statistics, 1999, 61(S1): 653-670.