文章编号: 0253 - 9993(2011) 03 - 0507 - 07

基于 CO_2 排放因素模型的“脱钩”指标构建与评估
——以山西省为例

王　云,张军营,赵永椿,郑楚光

(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室,湖北 武汉　430074)

摘　要: 依据 Tapio 脱钩指标和 Kaya 恒等式,运用 LMDI 分解法分别构建了二氧化碳(CO_2) “脱钩”弹性指标和努力指标扩展分解模型,并对山西省 CO_2“脱钩”和低碳经济发展情况进行定量分析。结果表明,脱钩弹性指标和脱钩努力指标均显示山西省 CO_2的“脱钩”情况有所改善,已呈现出“弱脱钩”的低碳经济特征; 能源强度降低是导致 CO_2“脱钩”的关键性因子,其脱钩努力指标从 2001 年的 -0. 239 2 逐年增加到 2008 年的 0. 542 4,这主要源自工业领域技术的进步和能源效率的提高,产业结构和能源结构调整等其他措施并没有显示出明显的减排效果; 假定在以上条件均不变的情况下,CCS 技术将成为实现 CO_2减排和“强脱钩”的关键性因素。该研究尝试将脱钩指标和 CO_2 排放因素分解模型进行结合,考虑了 CCS 因素在减排和“脱钩”方面的作用。

关键词: CO_2排放; 脱钩指标; 因素分解法; 二氧化碳捕集和封存技术

中图分类号: F120. 3　　**文献标志码**: A

The construction and evaluation of “decoupling” indexes based on the model of factors decomposition of CO_2 emission: a case study of Shanxi Province

WANG Yun, ZHANG Jun-ying, ZHAO Yong-chun, ZHENG Chu-guang

(*State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan*　430074, *China*)

Abstract: The expand decomposition model of decoupling elasticity and effort index of CO_2 emissions was constructed by adopting Logarithmic Mean Divisia Index(LMDI) method based on the basic principle of Kaya identities and Tapio index, which was adopted to analyze quantitatively the decoupling of CO_2 and low-carbon economic development in Shanxi Province. The results indicate that the decoupling elasticity index and the decoupling effort index indicate that the situation of CO_2 “decoupling” is improved and a “weak decoupling” of low-carbon economic characteristics emerge; reduction of energy intensity is the key factor leading to decoupling of CO_2, whose decoupling effort coefficient increases from -0. 239 2 in 2001 to 0. 542 4 in 2008, mainly from advances in technology and energy efficiency, the adjustment of industrial structure and energy structure and other measures do not show the effects of emission reduction significantly. Assuming the CCS (Carbon Dioxide Capture and Storage) technology is implemented in the same conditions as above, CCS technology will become the key factors of CO_2 reduction and “strong decoupling”. It attempts to combine carbon dioxide decomposition model with decoupling index, and considers the role of CCS factors in CO_2 reduction and decoupling.

Key words: CO_2 emissions; decoupling index; factor decomposition method; carbon capture and storage technology

低碳经济是人类为应对全球气候变化和温室效应而提出的新的经济发展模式,它强调以较少的温室气体排放获得较大的经济产出,这是经济发展和能源消费以及人类生活方式的一次重大变革,它将全方位

收稿日期: 2010 - 07 - 12　　**责任编辑**: 许书阁
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40972102, 50936001) ; 国家重点基础研究发展计划(973) 项目(2010CB227003)
作者简介: 王　云(1978—) ,男,山西平陆人,副研究员,博士。E - mail: wangyun1978@163. com

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

地改造建立在化石燃料基础之上的现代工业文明转向生态文明。2003 年,英国政府发表《能源白皮书》,题为“我们未来的能源: 创建低碳经济(Our Energy Future,Creating a Low Carbon Economy) ”,首次提出“低碳经济”概念,引起国际社会的广泛关注[1]。虽然英国最早提出低碳经济的概念,但却没有给出衡量低碳经济的标准和指标体系。从长期来看,一个国家走向低碳经济的过程就是温室气体排放和经济增长逐渐”脱钩”的过程,因此,实现低碳经济发展的最终途径是弱化经济增长与温室气体排放之间的联系。

国际上通常用“脱钩”指标来反映经济增长与物质消耗不同步变化的实质,脱钩指标的建立旨在反映经济增长与物质消耗投入及生态环境保护之间的不确定关系,表征两者之间的压力关系[2]。目前,国内外学者越来越多地注重将脱钩指标运用在温室气体减排领域的研究中,目的在于探求影响连接与可能造成”脱钩”的因素,以此来检验一个国家气候变化政策的有效性或用来作为制定适当“脱钩”政策的依据。在二氧化碳减排领域,Tapio[3] 最早利用脱钩弹性方法对欧洲交通业经济增长与运输量、温室气体排放之间的“脱钩”情况进行了研究; David Gray 等[4] 对苏格兰地区经济增长与交通运输量及二氧化碳排放之间的“脱钩”情况作了研究; 庄敏芳[5] 对台湾的二氧化碳排放与经济增长的脱钩指标进行了研究; 庄贵阳[6] 运用 Tapio 脱钩指标对包括中国在内的全球 20 个温室气体排放大国在不同时期的“脱钩”情况进行了分析; 李忠民等[7] 运用 OECD 脱钩指标和 Tapio 脱钩指标对山西工业部门工业增加值及其能耗投入和二氧化碳排放之间的关系进行了分析。但是,从总体上来看,国内外关于“脱钩”研究的文献还较少,通过脱钩指标来衡量低碳经济的研究还处于起步阶段。

1 研究方法和模型

1.1 Tapio 脱钩指标及其分解量化模型

Tapio[3] 利用脱钩弹性(Decoupling Elasticity) 概念构建了脱钩指标,以某一弹性值范围来作为“脱钩”状态界定,将脱钩指标分为连接、脱钩和负脱钩 3 种状态,并依据不同弹性值再进一步细分为弱脱钩、强脱钩、弱负脱钩、强负脱钩、扩张负脱钩、扩张连接、衰退脱钩与衰退连接等八大类,其脱钩指标为

$$\varepsilon = \frac{\Delta C/C}{\Delta G/G} \tag{1}$$

式中,ε 为二氧化碳和经济发展的脱钩弹性指标; C 为二氧化碳排放总量; ΔC 为现期相对于基期二氧化碳排放变化量; G 为当年 GDP; ΔG 为现期相对于基期 GDP 的变动量。

Tapio 脱钩指标的具体分类等级如图 1 所示。

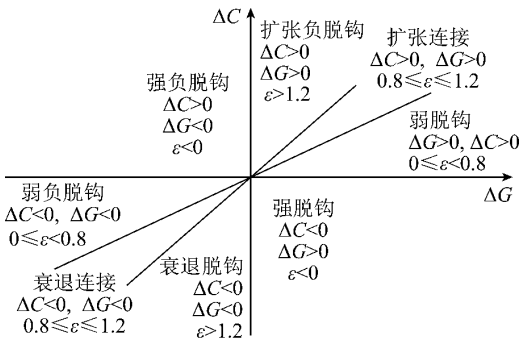

图 1 Tapio 指标的等级与弹性值[3]

Fig. 1 Level and elasticity values of Tapio index[3]

Tapio 脱钩指标可以有效地测评经济发展和二氧化碳的“脱钩”情况,为定量分析低碳经济发展状况提供可靠工具,但该指标缺乏对二氧化碳“脱钩”内在机理的深入分析和研究,不能为评价和制定准确、全面的低碳经济发展措施、政策及战略提供相应的理论依据。基于以上考虑,本文在 Tapio“脱钩”指标基础上结合 Kaya 恒等式基本原理,选取 LMDI(Log-Mean Divisia Index) 分解方法,构建二氧化碳“脱钩”弹性分解量化模型,即

$$\varepsilon = \frac{\Delta C}{C}\frac{G}{\Delta G} = \frac{\Delta E_{N1}+\Delta E_{N2}}{\Delta E}\Delta C_E\frac{G}{C\Delta G} + \frac{\Delta E_Q}{\Delta E}\Delta C_E\frac{G}{C\Delta G} + \frac{\Delta E_I}{\Delta E}\Delta C_E\frac{G}{C\Delta G} + \frac{\Delta E_M}{\Delta E}\Delta C_E\frac{G}{C\Delta G} + \frac{\Delta E_P}{\Delta E}\Delta C_E\frac{G}{C\Delta G} + \Delta C_S\frac{G}{C\Delta G} + \Delta C_F\frac{G}{C\Delta G} = \frac{\Delta C_N}{C}\frac{G}{\Delta G} + \frac{\Delta C_Q}{C}\frac{G}{\Delta G} + \frac{\Delta C_I}{C}\frac{G}{\Delta G} + \frac{\Delta C_M}{C}\frac{G}{\Delta G} + \frac{\Delta C_P}{C}\frac{G}{\Delta G} + \frac{\Delta C_S}{C}\frac{G}{\Delta G} + \frac{\Delta C_F}{C}\frac{G}{\Delta G} = \varepsilon_N + \varepsilon_Q + \varepsilon_I + \varepsilon_M + \varepsilon_P + \varepsilon_S + \varepsilon_F \tag{2}$$

式中,ΔC_E为由能源消费变动引起的二氧化碳排放量的变动,称为能源消费效应; ΔE_{N1}、ΔE_Q、ΔE_I、ΔE_M分别为生产能源消费量的人口规模效应、经济增长效应、产业结构效应和能耗强度效应; ΔE_{N2}、ΔE_P分别为生活能源消费的人口规模效应和生活水平效应; ΔC_N、ΔC_Q、ΔC_I、ΔC_M、ΔC_S、ΔC_P、ΔC_F分别为二氧化碳排放的人口规模效应、经济增长效应、产业结构效应、能源强度效应、能源结构效应、生活水平效应、能源碳排放强度效应; ε_N、ε_Q、ε_I、ε_M、ε_S、ε_P、ε_F分别为各效应对应的分脱钩弹性指标。

由式(2) 可进一步分析影响二氧化碳和经济发展“脱钩”的各项因素及其作用大小。二氧化碳因素

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

分解模型的相关研究、分解模型公式及推导过程见文献[8]。

为了进一步有效评价和衡量各直接或间接的二氧化碳减排措施或政策的效果,在二氧化碳排放总量中剔除因经济增长而导致的二氧化碳排放量,来重新衡量各政策措施在减排上的努力或贡献大小,借鉴文献[8-9]构建二氧化碳“脱钩”努力指标,即

$$\Delta F = \Delta C - \Delta C_Q = \Delta C_N + \Delta C_I + \Delta C_M + \Delta C_P + \Delta C_S + \Delta C_F \quad (3)$$

$$D = -\Delta F/\Delta C_Q \quad (4)$$

$$D = -\frac{\Delta C_N}{\Delta C_Q} - \frac{\Delta C_I}{\Delta C_Q} - \frac{\Delta C_M}{\Delta C_Q} - \frac{\Delta C_P}{\Delta C_Q} - \frac{\Delta C_S}{\Delta C_Q} - \frac{\Delta C_F}{\Delta C_Q} = D_N + D_I + D_M + D_P + D_S + D_F \quad (5)$$

式中,ΔF 为现期相对于基期剔除因经济增长排放后的二氧化碳排放量的变动; D 为剔除经济增长效应后的脱钩努力指标; D_N、D_I、D_M、D_S、D_F、D_P 分别为控制人口、产业结构升级、能源强度降低、能源结构优化、能源碳排放强度和生活水平变化对“脱钩”的相对努力或贡献。

$D \geqslant 1$ 为“强脱钩努力”; $0 < D < 1$ 为“弱脱钩努力”; $D \leqslant 0$ 为“无脱钩努力”。

1.2　CO_2 捕集封存与“脱钩”分解模型

由于所排放 CO_2 的 90% 左右来自于化石燃料的燃烧利用[10],因而控制 CO_2 排放的重点,也要紧紧围绕能源消耗和利用展开。目前,CO_2 减排的主要途径除了提高能源转化效率、升级产业结构、优化能源结构等措施外,还可以利用生物固化方法、CO_2 捕集与储存技术(CCS, Carbon Dioxide Capture and Storage)等其他措施[11]。考虑到在相当长时期内化石燃料仍将是主要的一次能源,以及 CCS 技术与现有能源利用设施的兼容性,CCS 技术越来越被认为是减缓 CO_2 排放最为可行、极具潜力的措施与技术[12-13]。CCS 是指将 CO_2 从相关能源利用过程中分离出来,输送到一个封存地点,与大气隔绝的过程。主要是针对化石燃料电厂、钢铁厂等 CO_2 的集中排放源。其中,针对电厂等能源系统排放 CO_2 的捕获分离技术主要有 3 类,即燃前(如 IGCC)、燃中(如 O_2/CO_2 循环燃烧技术)以及燃后捕集技术(如 MEA 化学吸附)[14]。基于 CCS 技术对于 CO_2 减排具有特殊重要的意义,在二氧化碳分解模型和“脱钩”指标中考虑 CCS,可以对各种 CCS 技术缓解 CO_2 排放的效果进行定量评估,即基于对人口、经济和社会发展进行合理的假设,预测未来各终端需求部门的能源需求等情景分析情况下,对低碳经济发展和二氧化碳的“脱钩”状况进行模拟和预测。

考虑 CCS 的二氧化碳分解模型为

$$C_{CCS} = \sum_i C_{i,CCS} = \sum_i \frac{C_{i,CCS}}{C_i}\frac{C_i}{E_i}\frac{E_i}{E}\frac{E}{G}\frac{G}{N}N = \sum_i C_{Si}F_iS_iMQN \quad (6)$$

式中,C_{CCS} 为经捕集封存后的 CO_2 排放量; C_i 为第 i 种能源二氧化碳的排放总量; E_i 为第 i 种化石能源的消费量; E 为能源消费总量; C_{Si} 为第 i 种能源消耗经捕集封存后的二氧化碳最终排放量与二氧化碳排放总量的比例(二氧化碳捕集封存率 $= 1 - C_{Si}$); F_i 为第 i 种化石能源的二氧化碳排放强度; S_i 为第 i 种化石能源消费在总化石能源消费中的比例; M 为能源强度; Q 为人均 GDP; N 为人口规模。

基于式(6),利用文献[8]的各分解模型和推导方法,可得

$$\Delta C_{CCS} = \Delta C_{CS} + \Delta C_F + \Delta C_S + \Delta C_M + \Delta C_Q + \Delta C_N \quad (7)$$

其计算方法见文献[8]。

参照 1.1 节中“脱钩”指标的构建方法和过程,可得 CCS 后的脱钩弹性指标 ε_{CCS} 和努力指标 D_{CCS},即

$$\varepsilon_{CCS} = \frac{\Delta C_{CCS}}{C}\frac{G}{\Delta G} = \frac{\Delta C_{CS}}{C}\frac{G}{\Delta G} + \frac{\Delta C_F}{C}\frac{G}{\Delta G} + \frac{\Delta C_S}{C}\frac{G}{\Delta G} + \frac{\Delta C_M}{C}\frac{G}{\Delta G} + \frac{\Delta C_Q}{C}\frac{G}{\Delta G} + \frac{\Delta C_N}{C}\frac{G}{\Delta G} = \varepsilon_{CS} + \varepsilon_F + \varepsilon_S + \varepsilon_M + \varepsilon_Q + \varepsilon_N \quad (8)$$

$$D_{CCS} = -\frac{\Delta C_{CS}}{\Delta C_Q} - \frac{\Delta C_F}{\Delta C_Q} - \frac{\Delta C_S}{\Delta C_Q} - \frac{\Delta C_M}{\Delta C_Q} - \frac{\Delta C_N}{\Delta C_Q} = D_{CS} + D_F + D_S + D_M + D_N \quad (9)$$

式中,ΔC_{CCS} 为现期相对于基期 CCS 后的二氧化碳排放量的变动; ΔC_{CS} 为二氧化碳排放的 CCS 效应; ε_{CCS} 和 D_{CCS} 分别为实施 CCS 后的总二氧化碳脱钩弹性指标和努力指标; ε_{CS} 和 D_{CS} 分别为 CCS 技术效应的分弹性指标和努力指标。

1.3　数据来源及说明

我国各主要能源化工省份的二氧化碳减排工作直接关系到全国节能减排工作绩效和低碳经济实施成效。山西作为我国重要的煤炭大省和能源基地,最具代表性和典型性,因此,本文选取山西为例并应用以上建立的指标模型进行量化分析,以期对山西低碳经济发展和二氧化碳减排措施成效进行评估。计算中所采用的数据见文献[8],其中假定能源的二氧化碳排放强度保持不变,因此 $\Delta C_F = 0$。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

2 计算结果和分析

根据式(1)、(2),脱钩弹性指标的计算结果见表1。

根据式(3)~(5),剔除经济增长效应后的脱钩努力指标的计算结果见表2。

以1998年为基准年,在以上条件不变的情况下假定山西从2001年开始实施CCS技术减排CO_2,以实现各年度初步进入"强脱钩"或"强脱钩努力"阶段为目标,基于式(6)~(9)分别对各年度的CO_2捕集封存率进行了试算,即计算CCS捕集率的临界值*,结果分别见表3和表4。

表1 二氧化碳排放各影响因素脱钩弹性指标

Table 1 The elastic decoupling indexes of decomposition of CO_2 emission factors

年份	能源强度 ε_M	产业结构 ε_I	人口规模 ε_N	经济增长 ε_Q	生活水平 ε_P	能源结构 ε_S	脱钩弹性指标 ε	脱钩状态
2001	0.173 9	-0.146 5	0.126 4	0.727 0	-0.001 0	0.389 9	1.269 7	扩张负脱钩
2002	0.098 6	-0.027 8	0.095 9	0.749 0	0.017 0	0.263 8	1.196 5	扩张连接
2003	-0.126 2	0.033 2	0.074 8	0.806 2	0.024 2	0.182 9	0.995 1	扩张连接
2004	-0.345 5	0.072 1	0.067 3	0.897 3	0.023 3	0.113 1	0.827 7	扩张连接
2005	-0.436 5	0.095 2	0.067 0	0.963 8	0.014 8	0.060 2	0.764 4	弱脱钩
2006	-0.424 5	0.105 4	0.066 0	0.975 2	0.016 5	0.049 7	0.788 3	弱脱钩
2007	-0.487 6	0.114 7	0.063 0	1.022 3	0.014 4	0.050 3	0.777 1	弱脱钩
2008	-0.592 4	0.101 8	0.062 7	1.092 2	0.029 2	0.044 0	0.737 4	弱脱钩

表2 各影响因素的脱钩努力指标

Table 2 The decoupling effort indexes of CO_2 emission factors

年份	能源强度 D_M	产业结构 D_I	生活水平 D_P	能源结构 D_S	人口规模 D_N	脱钩努力指标 D	脱钩努力
2001	-0.239 170	0.201 571	0.001 342	-0.536 31	-0.173 90	-0.746 470	无脱钩
2002	-0.131 700	0.037 127	-0.022 680	-0.352 17	-0.128 04	-0.597 470	无脱钩
2003	0.156 568	-0.041 170	-0.030 040	-0.226 79	-0.092 77	-0.234 210	无脱钩
2004	0.385 027	-0.080 390	-0.026 020	-0.126 08	-0.075 00	0.077 526	弱脱钩
2005	0.452 863	-0.098 780	-0.015 370	-0.062 43	-0.069 47	0.206 817	弱脱钩
2006	0.435 274	-0.108 120	-0.016 920	-0.050 98	-0.067 65	0.191 591	弱脱钩
2007	0.477 010	-0.112 230	-0.014 100	-0.049 25	-0.061 61	0.239 811	弱脱钩
2008	0.542 425	-0.093 210	-0.026 780	-0.040 27	-0.057 38	0.324 785	弱脱钩

表3 不同二氧化碳捕集封存率情况下CCS脱钩弹性指标

Table 3 The elastic decoupling indexes under CCS in different rates of carbon capture and storage

年份	脱钩弹性指标 ε	脱钩状态	CCS_1			CCS_2			CCS_3		
			捕集率	ε_{CCS}	脱钩状态	捕集率*	ε_{CCS}	脱钩状态	捕集率	ε_{CCS}	脱钩状态
2001	1.269 7	扩张负脱钩	0.2	0.378 5	弱	0.3	-0.259 5	强	0.4	-1.110 2	强
2002	1.196 5	扩张连接	0.3	0.316 6	弱	0.4	-0.172 9	强	0.5	-0.858 1	强
2003	0.995 1	扩张连接	0.4	0.131 4	弱	0.5	-0.300 7	强	0.6	-0.948 9	强
2004	0.827 7	扩张连接	0.4	0.167 1	弱	0.5	-0.163 4	强	0.6	-0.659 3	强
2005	0.764 4	弱脱钩	0.4	0.191 0	弱	0.5	-0.096 0	强	0.6	-0.526 5	强
2006	0.788 3	弱脱钩	0.5	0.059 7	弱	0.6	-0.304 8	强	0.7	-0.912 3	强
2007	0.777 1	弱脱钩	0.5	0.165 2	弱	0.6	-0.140 9	强	0.7	-0.651 0	强
2008	0.737 4	弱脱钩	0.5	0.180 9	弱	0.6	-0.097 5	强	0.7	-0.561 5	强

注: CCS_1、CCS_2、CCS_3分别为不同情境下的CO_2捕集与储存率。

假定各年度均实现进入"强脱钩"或"强脱钩努力"阶段(即在CCS捕集率的临界值*阶段),进一步分别考察了各因素对二氧化碳排放的影响,结果如图2所示。

(1) 由表1可知,2001年山西二氧化碳脱钩指标$\varepsilon>1.2$,为扩张负脱钩,2002—2004年则改善为扩张连结,2004—2008年则为弱脱钩,说明1998—2001年山西发展中排放大量二氧化碳的同时,并没有带来

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

表 4　不同二氧化碳捕集封存率情况下 CCS 脱钩努力指标

Table 4　The decoupling effort indexes under CCS in different rates of carbon capture and storage

年份	脱钩弹性指标 D	脱钩状态	CCS_1			CCS_2			CCS_3		
			捕集率	D_{CCS}	脱钩状态	捕集率*	D_{CCS}	脱钩状态	捕集率	D_{CCS}	脱钩状态
2001	-0.746 470	无脱钩	0.2	0.585 6	弱	0.3	1.265 9	强	0.4	2.051 4	强
2002	-0.597 470	无脱钩	0.3	0.682 3	弱	0.4	1.160 7	强	0.5	1.726 7	强
2003	-0.234 210	无脱钩	0.4	0.885 8	弱	0.5	1.238 5	强	0.6	1.670 2	强
2004	0.077 526	弱脱钩	0.4	0.869 3	弱	0.5	1.116 7	强	0.6	1.419 5	强
2005	0.206 817	弱脱钩	0.4	0.860 2	弱	0.5	1.064 2	强	0.6	1.314 0	强
2006	0.191 591	弱脱钩	0.5	0.960 2	弱	0.6	1.181 5	强	0.7	1.466 8	强
2007	0.239 811	弱脱钩	0.5	0.894 2	弱	0.6	1.080 7	强	0.7	1.321 1	强
2008	0.324 785	弱脱钩	0.5	0.892 3	弱	0.6	1.052 0	强	0.7	1.257 9	强

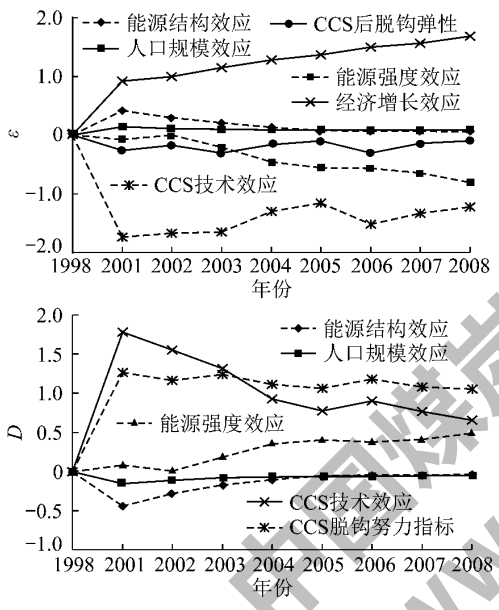

图 2　2001—2008 年山西省各二氧化碳减排因素包括 CCS 后的脱钩弹性指标和脱钩努力指标

Fig. 2　The elastic decoupling indexes and the decoupling effort indexes of CO_2 emission factors under CCS over 1998—2008 in Shanxi Province

同比例的 GDP 增长,2002 年以后 GDP 增长才有了相应提高,并逐步进入二氧化碳和经济发展的“弱脱钩”阶段。

由表 2 可知,在剔除经济增长效应后,2001—2003 年,$D<0$,为无脱钩努力阶段; 2003—2008 年,$0<D<1$,为弱脱钩努力阶段。两个指标的计算结果和变动趋势都反映出,山西二氧化碳“脱钩”情况整体上处于不断改善状态,现以弱脱钩为主,但还均远未达到“脱钩”状态。

(2) 由表 1 的各分脱钩弹性指标计算结果看,影响山西二氧化碳“脱钩”最重要的因素分别是经济增长和能源强度下降。其中,1998—2008 年山西 GDP 的连续增长导致了能源消耗量不断加大,从而造成碳排放量不断增加,其弹性指标从 2001 年的 0.727 0 逐年增加到 2008 年的 1.092 2。山西节能减排的工作力度逐年加大,使得能源强度特别是第二产业的能源强度不断降低,从而促使能源脱钩弹性呈逐年下降趋势,其脱钩弹性指标从 2001 年的 0.179 3 逐年降低到 2008 年的 -0.592 4。山西产业结构的“重工业化”调整则增加了二氧化碳的排放,其弹性指标从 2001 年的 -0.146 5 逐年增加到 2008 年的 0.101 8; 山西能源结构的优化减少了二氧化碳的排放,但由于能源结构的变化不是很大,其脱钩弹性指标从 2001 年的 0.389 9 逐年降低到 2005 年的 0.060 2 后,基本维持不变,产业结构和能源结构变动对二氧化碳的排放影响都相对较小。人口规模的弹性指标在 2004 年降低为 0.067 3 后基本维持不变,生活水平的弹性指标则基本在 0.02 左右变动,两者在总体上并不显著。

(3) 根据表 2 在剔除经济增长效应后的脱钩努力指标来看,能源强度的降低对二氧化碳减排的贡献最大,其脱钩努力指标从 2001 年的 -0.239 170 逐年增加到 2008 年的 0.542 425,说明山西省近年来在工业领域尤其是在高耗能行业进行的节能降耗工作成效显著。产业结构和技术进步是影响能源强度的重要因素[15-16],而从产业结构的脱钩努力指标可知,其脱钩努力指标从 2001 年的 0.201 571 逐年降低到 2008 年的 -0.093 210,贡献率较低,且在 2003 年之后成为阻碍能源强度下降和二氧化碳“脱钩”的因素,这也证明山西在节能降耗领域的成效主要来自于技术进步和能源效率提高。表 2 还表明,能源强度的下降虽然大幅抑制了山西二氧化碳的排放,但近年来已显现出瓶颈; 技术水平进步到一定程度,能源强度下降到一个很低的水平时,很难再进一步下降,这时合理调整产业结构、降低对能源的依赖性对于提高能源利用效率、降低能源强度有着重要的影响。合理调整山西产业结构使其向逐步降低能源强度的方向发

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

展,将成为实现“脱钩”的一项重要举措。能源结构的脱钩努力指标相对较小,这主要与山西以煤为主的能源禀赋和能源消费方式相关,加快发展可再生能源和新能源、优化能源结构将有利于控制二氧化碳的排放和增加能源结构因素对“脱钩”的贡献[17-18]。人口规模和生活水平的脱钩努力指标相对很小,总体上也并不显著。

(4) 由表 3、4 可知,假定山西 2001 年开始实施 CCS 技术且其他条件不变,则在 2001 年 CCS 捕集封存率约为 0.3,2002 年约为 0.4,2003—2005 年约为 0.5,2006—2008 年约为 0.6 的情况下,各年度才能分别实现进入“强脱钩”或“强脱钩努力”阶段;由图 2 可知,在此阶段经济增长、能源强度降低以及 CCS 技术成为影响二氧化碳排放的主要因素。而且,随着能源消费量的持续增长以及能源强度下降速度趋缓,CCS 技术逐渐成为了实现“强脱钩”或“强脱钩努力”的关键性因素。以上对实施 CCS 后的二氧化碳排放影响的评价仅是对过去情景的一种简单假定,如果在对山西未来经济增长、人口规模、能源消费、能源效率以及 CCS 技术发展等情况进行详细的情景分析的条件下,该方法可以对山西未来低碳经济的发展和二氧化碳“脱钩”状况以及减排政策的实施效果等进行更为精确的定量预测和评估。

3 结 论

(1) 以 1998 年为基准年,2001—2008 年山西省二氧化碳和经济发展的“脱钩”情况有所改善,从 2001 年的扩张负脱钩,脱钩指标为 1.269 7,到 2002—2004 年改善为扩张连接状态,脱钩指标分别为 1.196 5、0.995 1 和 0.827 7,2004—2008 年则呈现出了弱脱钩的特征,其脱钩指标分别为 0.764 4、0.788 3、0.777 1、0.737 4,二氧化碳脱钩弹性总体上呈逐年下降趋势,但下降速度明显放缓。

(2) 从剔除经济增长效应后的脱钩努力指标计算结果来看,2001—2003 年间,脱钩努力指标分别为 -0.746 470、-0.597 470、-0.234 210,为无脱钩努力阶段;2004—2008 年,脱钩努力指标分别为 0.077 526、0.206 817、0.191 591、0.239 811、0.324 785,为弱脱钩努力阶段,说明山西省在节能减排工作上力度不断加强,发展低碳经济取得了一定的成效。

(3) 经济增长和能源强度降低是影响二氧化碳排放的两个重要因素,其中能源强度降低是导致二氧化碳”脱钩”的关键性因子,这主要源自工业领域技术的进步和能源效率的提高,未来能源强度的降低则将主要依靠产业结构的优化升级和能源结构的优化。

(4) 通过对 CCS“脱钩”指标分析表明,假定在 2001 年 CCS 捕集封存率约为 0.3、2002 年约为 0.4、2003—2005 年约为 0.5、2006—2008 年约为 0.6 的情况下实施 CCS 技术,在各年度才能分别实现进入“强脱钩”或“强脱钩努力”阶段。计算结果也说明,相比以上常规的节能减排举措而言,对二氧化碳的直接捕集和存储 CCS 将成为实现“脱钩”的重要手段和根本途径。

(5) “脱钩”弹性指标和努力指标均表明,山西二氧化碳“脱钩”情况在逐年得到改善,但远未达到“脱钩”状态,山西“重工业化”的产业结构、以煤为主的能源结构、能源输出的经济增长模式,决定了长期以来山西以“高碳消费”来换取经济增长的发展道路,使得山西在发展中承载了巨大的温室气体排放压力,实现二氧化碳“脱钩”和低碳经济发展将是一个长期复杂的系统过程。

参考文献:

[1] Department of Trade and Industry. Our energy future-creating a low carbon economy[R]. London: The Stationery Office,2003.

[2] OECD. Decoupling: a conceptual overview[R]. Paris: OECD,2001.

[3] 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 [J]. Journal of Transport Policy,2005,12: 137 - 151.

[4] David Gray, Jillian Anable, Laura Illingworth, et al. Decoupling the link between economic growth, transport growth and carbon emissions in Scotland[EB/OL]. 2006: 3 - 48. http://en.scientificcommons.org/42399527,2010 - 06 - 15.

[5] 庄敏芳. 台湾工业与运输部门脱钩指标建构与评估[D]. 台北:台北大学,2006.
Zhuang Minfang. The establishment and evaluation of decoupling indicators for Taiwan's industry and transport sectors[D]. Taipei: National Taipei University,2006.

[6] 庄贵阳. 低碳经济:气候变化背景下中国的发展之路[M]. 北京:气象出版社,2007:28 - 30.
Zhuang Guiyang. How will China move towards a low carbon economy[M]. Beijing: China Meteorological Press,2007: 28 - 30.

[7] 李忠民,庆东瑞. 经济增长与二氧化碳脱钩实证研究——以山西省为例[J]. 福建论坛·人文社会科学版,2010(2):67 - 72.
Li Zhongmin, Qing Dongrui. Empirical research on decoupling of economic growth from carbon dioxide: as exemplified by Shanxi Province[J]. Fujian Tribune · The Humanities & Social Sciences,2010 (2): 67 - 72.

[8] 王 云,张军营,赵永椿,等. 二氧化碳排放因素分解实证研究——以山西省为例[J]. 水电能源科学,2010,28(11):161 - 165.
Wang Yun, Zhang Junying, Zhao Yongchun, et al. Empirical study of decomposition of CO_2 emission factors: the case study of Shanxi Province[J]. Water Resources and Power,2010,28(11): 161 -

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

165.

[9] Diakoulaki D, Mandaraka M. Decomposition analysis for assessing the progress in decoupling industrial growth from CO_2 emissions in the EU manufacturing sector [J]. Energy Economics, 2007, 29(4): 636 – 664.

[10] Working Group Ⅲ of the Intergovernmental Panel on Climate Chang (IPCC). IPCC' fourth assessment report(AR4): mitigation of climate change [R]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2007.

[11] Working Group Ⅲ of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). IPCC special report on carbon dioxide capture and storage [R]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2005.

[12] Majchrowicaz B B, Franco D V, Yperman J, et al. An investigation into the changes of structure and reacivity during desulphurization of a bituminous coal [J]. Fuel, 1991, 70(3): 434 – 441.

[13] Simon S, David R, Paul U, et al. The acceptability of CO_2 capture and storage (CCS) in Europe: an assessment of the key determining factors Part1: Scientific, technical and economic dimensions [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2009, 3(3): 333 – 343.

[14] 陈文颖,吴宗鑫,王伟中. CO_2 收集封存战略及其对我国远期减缓 CO_2 排放的潜在作用 [J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1 178 – 1 182.
Chen Wenying, Wu Zongxin, Wang Weizhong. Carbon capture and storage(CCS) and its potential role to mitigate carbon emission in China [J]. Environmental Science, 2007, 28(6): 1 178 – 1 182.

[15] 韩智勇,魏一鸣,范　英. 中国能源强度与经济结构变化特征研究 [J]. 数理统计与管理, 2004, 23(1): 1 – 5.
Han Zhiyong, Wei Yiming, Fan Ying. Research on change features of Chinese energy intensity and economic structure [J]. Application of Statistics and Management, 2004, 23(1): 1 – 5.

[16] 史　丹. 我国经济增长过程中能源利用效率的改进 [J]. 经济研究, 2002(9): 49 – 56.
Shi Dan. The improvement of energy consumption efficiency in China's economic growth [J]. Economic Research Journal, 2002(9): 49 – 56.

[17] 邱世明,顾培亮,郝　海. 能源消费 CO_2 排放量的变化与控制分析 [J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 412 – 416.
Qiu Shiming, Gu Peiliang, Hao Hai. Study on increase and control of carbon dioxide emission from energy consumption [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 412 – 416.

[18] 濮洪九. 洁净煤技术产业化与我国能源结构优化 [J]. 煤炭学报, 2002, 27(1): 1 – 5.
Pu Hongjiu. Industrialization of clean coal technology and optimization of China energy structure [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(1): 1 – 5.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net