

基于 LMDI 的结构调整对 CO₂ 减排的贡献度研究

Research on the Contribution of Structure Adjustment on the Carbon Dioxide Emissions Emission Reduction Based on LMDI

邬乐雅^{1*} 曾维华¹ 王金南² 蒋洪强²

(1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 环境保护部环境规划院, 北京 100012)

[摘要] 通过对北京市石景山区 2005—2010 年 CO₂ 排放量的测算, 运用目前较为成熟的对数平均指数法 (LMDI) 将该地区 CO₂ 排放强度分解为排放系数效应、能源强度效应、能源结构效应, 并进一步将能源强度的变化分解为产业结构效应和产业能源强度效应, 从而全面反映结构调整对 CO₂ 排放强度变化的影响。结果表明“十一五”期间石景山区 CO₂ 排放强度下降了 14.470 23 t/万元, 其中产业结构效应的贡献率为 53.98%, 能源结构效应的贡献率为 26.84%, 说明以首钢搬迁为代表的产业结构调整 and “煤改气” 能源结构调整对策的实施对石景山区 CO₂ 减排的贡献很大; 在对石景山区 2010—2015 年产业及能源结构进行情景预测的基础上, 对结构减排的贡献度进行“十二五”的预测分析, 结果表明“十二五”期间 CO₂ 排放强度将下降 8.400 89 t/万元, 其中产业结构效应的贡献率为 14.72%, 能源结构的贡献率为 56.94%, 说明结构调整仍将成为石景山区 CO₂ 减排的主要驱动力。

[关键词] LMDI 结构调整 CO₂ 减排 首钢搬迁

Abstract With the big challenge from global climate change and energy crisis, and having observed the relationship between structure adjustment with the change of carbon dioxide emissions intensity, the author wants to ascertain the effectiveness of industry and energy structure adjustment on the reduction of carbon dioxide emissions at Shi Jingshan district in Beijing, where the project of Shoudu Iron and Steel Co's move out and the “coal to gas” have been taken place at “11th Five-year Plan” period. Through the use of the long-mean Divasia Index Decomposition method (LMDI), the carbon dioxide emissions intensity is decomposed into the contribution from four components: industry structure effect, industrial energy intensity effect, energy structure effect and emission coefficient effect. It is found that the contribution of industry and energy structure effect into the decrease of carbon dioxide emissions intensity is 53.98% and 26.84%, respectively. The result shows that Shoudu Iron and Steel Co's move out and the “coal to gas” engineering have a great influence on carbon dioxide emissions' reduction, the contribution of structure adjustment is significant. Furthermore, in basis of the scientific forecast about energy consumption structure, sulfur dioxide emissions at “12th Five-year Plan” period in Shi Jingshan

* 作者简介: 邬乐雅, 北京师范大学硕士研究生, 环境规划与管理方向。

district, the predictive result shows that the contribution of industry and energy structure effect into the decrease of sulfur dioxide emissions intensity will be 14.72% and 56.94%, respectively. This indicates that the structure adjustment is still the major contributor on sulfur dioxide emissions reduction in the future.

Keywords LMDI, Structure adjustment, Carbon emission reduction, Shoudu Iron and Steel Co's move out

能源问题与气候变化作为目前人类社会面临的重大课题,并随着国际碳减排力度的不断加强,国际社会已经进入了一个碳约束时代,低碳发展成为推动社会可持续、经济环境相和谐的重要出路。改革开放 30 年以来,中国经历了翻天覆地的变化,国民生产总值以年均近 10% 的速度增长,人均收入增长近 50 倍,约 5 亿人口脱贫。然而,这种粗放型的增长方式带来的高污染、高能耗问题日益凸显,环境与资源问题越来越成为社会发展的瓶颈。在全球气候变化的大背景下,我国在哥本哈根会议上承诺 2020 年单位国内生产总值的 CO₂ 排放量(CO₂ 排放强度)比 2005 年下降 40%~45%,这对于正处工业化、城镇化快熟发展的中国来说,无疑将是一个巨大的挑战。因此我国已经把节能减排作为一项基本国策深入到整个国民经济活动中。节能减排的主要方式包括工程减排、结构减排和管理减排,所谓结构减排是指通过产业与能源结构的调整来降低能源消费和污染物排放。Greening 等^[1]应用 LMDI 方法对 10 个 OECD 国家(丹麦、芬兰、法国、联邦德国、意大利、日本、挪威、瑞典、英国和美国)的生产部门(1971—1991 年)、货物运输(1971—1993 年)、居民终端服务部门(1970—1993 年)、私人交通(1970—1993 年)的碳排放强度进行了分析,认为生产部门能源强度的下降是其碳排放强度下降的主要原因;胡初枝等^[2]通过对我国六部门能源消费数据使用简单的碳排放公式计算得到 1990—2005 年 CO₂ 排放量,并进行了简单平均的因素分解,指出规模和能源强度是正负两类最主要的因素,并且指出不同产业碳排放差异较大,产业结构的变化对碳排放减少有一定影响;宋德勇和卢忠宝^[3]基于我国 1990—2005 年时间序列数据,采用“两阶段”LMDI 方法,对能源消费产生的碳排放影响因素进行分解,并对减少碳排放起关键作用的因子再次分解,通过研究找到产出规模和能源效率两个影响碳排放的主要因素,结果表明我国经济增长方式的差异是碳排放周期波动的重要原因,特别是其中 2000 年以来“高投入、高排放、低效率”的经济增长方式直接导致了碳排放的显著增加。由此可以看出,以高耗能行业为主的产业结构特点和以煤炭为主的能源结构特点使得我国的结构调整势在必行。

在举办北京奥运会的背景下,2005 年国家批准实施首钢搬迁,并于 2010 年年底实现全面停产。首钢的搬迁调整使得北京市石景山区的产业结构发生了巨大变化,以文化创意、金融服务等为主的第三产业将得到快速发展;另一方面出于保证奥运会期间良好的大气环境质量和城市低碳发展模式等方面的要求,以煤炭为主要能源利用类型的石景山区进行了能源结构调整,主要包括“煤改气”工程,即将部分工业锅炉的燃料由煤炭改为天然气。为确定这些产业与能源结构调整对 CO₂ 减排的贡献度,即定量研究结构减排的实效性,本文以北京市石景山区为研究对象,运用目前较为成熟的对数平均指数法(LMDI)对该区域 2005—2015 年 CO₂ 排放强度的变化进行分解分析,其中 2005—2010 年为对“十一五”进行的评估分析,2010—2015 年为对“十二五”进行的预测分析。

1 研究方法

LMDI (Long-mean Divisia Index Decomposition Method) 方法由 Ang 在 1998 年提出^[4], 并从理论基础、适用性、易用性等角度系统地分析了各种指数分解分析方法的优劣程度, 指出对数平均指数方法 (LMDI) 在各方面显示出良好的特性, 并已被许多国家采纳并应用于国家或部门能源效率的研究。

CO₂ 排放强度分解模型的建立

CO₂ 排放强度是指一个国家或地区在一段时间内单位产值的 CO₂ 排放量, 通常以吨 CO₂/万元 GDP 来表示, 主要作为低碳发展模式的衡量指标, 如果在经济增长的同时, 每单位 GDP 所带来的 CO₂ 排放量在下降, 就说明实现了一个低碳的发展模式; 其可以分解为能源消费结构、能源强度和不同能源的 CO₂ 排放系数, 如式 (1) 所示:

$$G = \frac{C}{Y} = \sum_j \frac{C_j}{E_j} \times \frac{E_j}{E} \times \frac{E}{Y} = I \times \sum_j k_j \times S_j \quad (1)$$

式中: G ——CO₂ 排放强度;

C ——CO₂ 总排放量;

j ——能源利用类型;

E_j ——第 j 种能源的消费量;

I ——能源强度;

e_j ——第 j 种能源的 CO₂ 排放系数;

S_j ——第 j 种能源的消费份额。

利用 LMDI 变换得式 (2):

$$\Delta G = G^t - G^0 = \Delta G_I + \Delta G_k + \Delta G_s \quad (2)$$

式 (3) 表示将 CO₂ 排放强度的变化已分解为能源强度效应、CO₂ 排放系数效应和能源结构效应, 3 种效应的计算如式 (3) 所示:

$$\begin{aligned} \Delta G_I &= L(G^t, G^0) \times \ln \frac{I^t}{I^0} \\ \Delta G_k &= \sum_j L(G_j^t, G_j^0) \times \ln \frac{k_j^t}{k_j^0} \\ \Delta G_s &= \sum_j L(G_j^t, G_j^0) \times \ln \frac{S_j^t}{S_j^0} \end{aligned} \quad (3)$$

进一步对能源强度的变化进行分解, 如式 (4) 所示:

$$I = \frac{E}{Y} = \sum_i \frac{E_i}{Y_i} \times \frac{Y_i}{Y} = \sum_i I_i \times R_i \quad (4)$$

式中: I ——能源强度;

E ——综合能源消费总量;

Y ——全年 GDP;

i ——产业类型;

E_i ——第 i 产业的综合能源消费量;

Y_i ——第 i 产业的 GDP;

I_i ——第 i 产业的能源强度;

R_i ——第 i 产业的 GDP 占总 GDP 的份额。

利用 LMDI 变换得式 (5):

$$\Delta I = I' - I^0 = \Delta I_i + \Delta I_R \quad (5)$$

式 (5) 表示将能源强度的变化已分解为产业能源强度效应和产业结构调整效应, 两种效应的计算如式 (6) 所示:

$$\Delta I_i = \sum_i L(I'_i, I_i^0) \times \ln \frac{I'_i}{I_i^0} \quad (6)$$

$$\Delta I_R = \sum_i L(I'_i, I_i^0) \times \ln \frac{R'_i}{R_i^0}$$

综合以上各式, 最后得出结构调整的 CO₂ 减排贡献率的计算模型, 如表 1 所示。

表 1 结构减排的贡献率计算模型

评估指标	产业结构调整效应	能源结构效应	结构减排贡献率
CO ₂ 排放强度	$W_{NR} = \frac{\Delta G_i}{\Delta G} \times \frac{\Delta I_R}{\Delta I} \times 100\%$	$W_{NS} = \frac{\Delta G_s}{\Delta G} \times 100\%$	$W_{CO_2} = W_{GR} + W_{GS}$

2 石景山区实例研究与分析

北京市石景山区位于北纬 39°53'—39°59', 东经 116°07'—116°14', 暖温带半湿润性气候, 地势北高南低。位于长安街西段, 中心区距天安门 16 km, 总占地面积为 84.38 km², 常住人口 54.6 万人。作为北京市传统的重工业区, 集冶金、电力、机械等大型工业企业于一地, 工业布局主要集中在平原地区, 冶金工业 (首钢总公司) 位于中西部, 电力工业 (京能热电厂和大唐高井电厂) 位于西北部, 机械工业 (北重电机厂) 位于东南部, 其中首钢经济总量占石景山地区生产总值一直保持在 50% 以上。

2.1 2005—2010 年的评估分析

由于第二产业是石景山区“十一五”期间主要的能源消费产业, 从行业角度来分析的话, 工业的能源消费又是第二产业的主要能源消费行业, 所以工业能源消费的情况可以很好地反映整个石景山区“十一五”期间的能源消费结构 (表 2), 因此根据石景山区“十一五”期间的能源消费结构和各能源品种的 CO₂ 排放系数 (表 3), 计算得出 CO₂ 排放总量及排放强度 (图 3)。

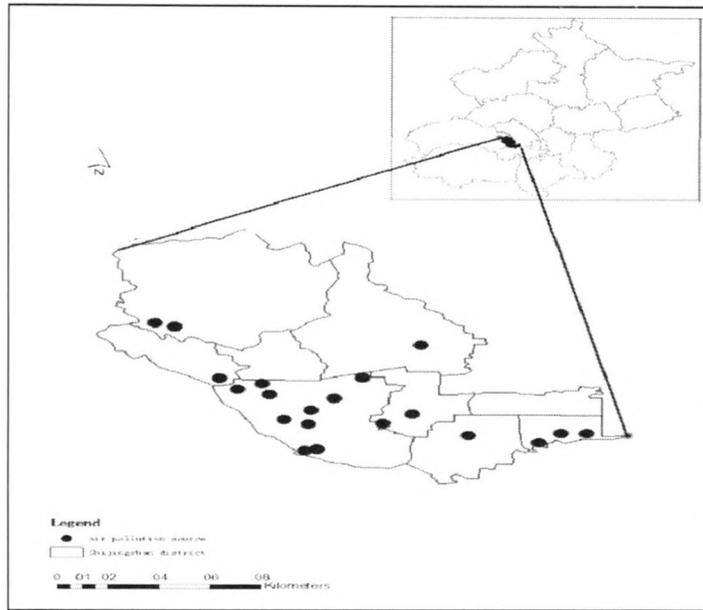


图1 石景山区大气污染源分布图

表2 石景山区2005—2009年工业能源消费情况

单位: t 标煤

年份	2005	2006	2007	2008	2009
能源消费种类					
原煤	5 720 477	5 519 178	5 544 052	5 061 916	4 792 102
洗精煤	2 213 230	2 111 450	2 045 678	1 974 802	1 923 995
其他洗煤	23 613	22 954	20 148	17 934	21 240
焦炭	3 787 499	3 270 840	3 353 170	2 198 697	2 013 450
焦炉煤气	447 118	431 144	474 633	462 863	453 246
天然气	0	56 538	61 844	63 277	60 339
高炉煤气	4 196 068	3 728 862	3 619 499	2 217 771	2 204 462
汽油	7 045	6 380	6 050	5 475	4 430
柴油	71 517	63 770	68 943	60 687	53 971
燃料油	5 576	5 132	3 783	2 157	1 317
热力	283 903	261 634	305 126	224 561	200 171
电力	742 112	752 304	775 349	636 435	618 813
总计	17 498 158	16 230 185	16 278 276	12 926 574	12 347 535

表3 石景山区2005—2010年主要能源利用类型的CO₂排放系数

年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010
CO ₂ 排放系数						
煤炭/(t 标煤)	2.74	2.74	2.74	2.74	2.74	2.74
石油/(t 标煤)	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14
天然气/(t 标煤)	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63
电力/(g/kW·h)	913.81	899.92	909.83	883.92	866.64	840.00

注: 煤炭、石油和天然气的CO₂排放系数来源于IPCC(2006), 电力的CO₂排放系数由石景山区电力行业的燃煤量和发电量等统计数据计算得出。

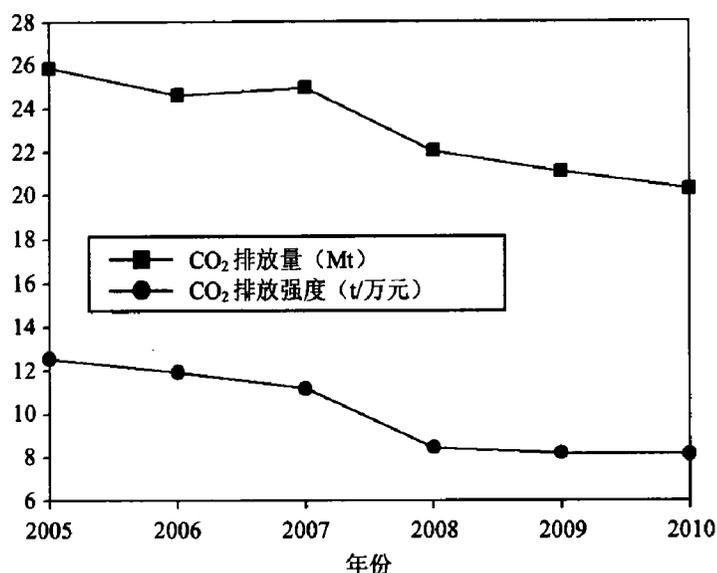


图2 2005—2010年石景山区CO₂排放总量及强度变化情况

由于工业是主要耗能大户，其CO₂排放量远远高于第三产业和生活所产生的CO₂量，所以将工业CO₂排放量作为全区CO₂的总排放量。以2006年为例，工业CO₂排放量为48 321 915 t，而第三产业和生活共产生了482 543 t CO₂，只占工业排放总量的0.99%，可以忽略不计。

运用LMDI方法得出CO₂排放强度变化的因素分解结果，如表4所示。

表4 CO₂排放强度变化的因素分解结果

单位：t/万元

年份	ΔG	ΔG_1	ΔG_K	ΔG_S
2005—2006	-2.536 38	-1.757 46	-0.052 63	-0.726 29
2006—2007	-2.293 73	-0.154 51	0.038 18	-2.177 59
2007—2008	-6.443 11	-6.846 86	-0.092 49	0.496 25
2008—2009	-0.197 04	-0.139 08	-0.055 00	-0.002 96
2009—2010	-2.999 97	-1.462 72	-0.063 93	-1.473 32
2005—2010	-14.470 23	-10.360 64	-0.225 67	-3.883 92

从表4可以看出在CO₂减排过程中，CO₂排放系数的影响作用较小，2005—2010年只使CO₂排放强度下降了0.225 67 t/万元，减排贡献率仅为1.56%，主要原因是以京能热电厂和高井电厂为代表的电力行业所采用的节能技术已较为先进，包括变频调速等先进电机调整技术，等离子点火技术或微油点火技术等低耗能点燃技术，煤种掺烧的燃烧优化调整技术等先进燃烧技术等，改善潜力有限，使得排放系数效应的减排贡献率不大。能源强度效应和能源结构效应的影响变化波动较大，进一步计算结构减排的CO₂减排贡献率，如表5所示。

表 5 CO₂ 排放强度变化的结构减排贡献率

单位: %

年份	W_{GR}	W_{GS}	W_{CO_2}
2005—2006	-0.059 38	0.286 35	0.226 97
2006—2007	-0.029 63	0.949 37	0.919 74
2007—2008	0.167 84	-0.077 02	0.090 82
2008—2009	27.090 33	0.015 04	27.105 37
2009—2010	0.498 53	0.491 11	0.989 64
2005—2010	0.539 83	0.268 41	0.808 24

能源结构效应从 2005—2006 年就开始显现, 主要因为这一年石景山区工业开始利用天然气这一 CO₂ 排放系数较低的能源品种, 天然气工业消费比例由 0% 上升到 0.35%, 电力的消费比例也由 4.24% 上升到 4.64%; 能源结构效应的减排贡献率在 2006—2007 年达到了最大值, 为 94.93%, 主要原因是其他洗煤、焦炭和高炉煤气等高 CO₂ 排放系数的能源品种消费比例都有所下降, 而天然气、电力和热力等清洁能源的消费比例都有所提高, 使得能源结构调整的 CO₂ 减排效果显著; 2007—2008 年能源结构调整体现为负效应, 主要原因是虽然能源消费所产生的 CO₂ 总量有较大幅度的减少, 但其中煤炭的消费比例反而有所上升, 如原煤和洗精煤的比例分别由 34.06%、12.57% 上升到 39.16%、15.28%; 2008—2009 年能源结构效应的贡献率逐渐减少, 其原因是“无煤区”工程建设初期能源结构中煤炭消费比例依然稳中有升, 能源结构调整的作用还未完全显现, 2009—2010 年在部分“煤改气”工程开始运行后, 能源结构效应的 CO₂ 减排贡献率开始增加, 达到了 49.11%。

产业结构效应通过影响能源强度而使得 CO₂ 排放强度变化, “十一五”初期产业结构调整缓慢, 2005—2007 年一直呈现负效应; 但随着第三产业的飞速发展以及首钢的搬迁, 从 2007 年开始, 产业结构效应的减排贡献率显著增加。尤其在 2008—2009 年, 在产业能源强度效应阻碍了 CO₂ 排放强度下降的情况下, 通过产业结构调整, 第三产业比例由 45% 上升到 55%, 产业结构效应明显, 弥补了产业能源强度提高所带来的负效应, 使得 CO₂ 排放强度呈下降趋势。

2005—2010 年, 产业结构效应对 CO₂ 减排的贡献率为 53.98%, 能源结构效应的贡献率为 26.84%, 使得结构减排的 CO₂ 减排贡献率达到了 80.82%, 节能减排实效性显著。

2.2 2010—2015 年的预测分析

运用能源弹性系数法, 在 BAU 方案的基础上, 结合“十二五”规划的主要建设工程并参考“十一五”期间电力行业的煤炭消耗情况, 得出规划情景下的石景山区工业能源消费情况 (表 6); 根据能源结构与排放系数进行 CO₂ 排放量的预测 (图 3)。

煤炭、石油和天然气的 CO₂ 排放系数仍然认为保持不变, 根据西北热电中心规划设计的基础数据, 计算得出“十二五”石景山区电力行业的 CO₂ 排放系数 (表 7)。

表 6 规划情景下的“十二五”石景山区工业能源消费情况 单位：t 标煤

能源消费种类 \ 年份	2011	2012	2013	2014	2015
原煤	4 106 703	3 161 399	2 216 095	1 270 791	1 205 985
洗精煤	1 722 539	1 338 085	953 631	569 177	552 095
其他洗煤	21 439	17 119	12 800	8 480	8 734
天然气	1 220 830	1 846 111	2 471 393	3 471 393	3 469 563
汽油	4 301	4 175	4 054	3 820	3 709
柴油	50 812	47 838	45 038	39 920	37 583
燃料油	1 275	1 234	1 194	1 118	1 082
热力	180 323	162 442	146 335	118 753	106 978
电力	598 806	579 446	560 712	525 041	508 066
总计	7 907 027	7 157 850	6 411 251	6 008 494	5 893 795

表 7 石景山区 2010—2015 年主要能源利用类型的 CO₂ 排放系数

CO ₂ 排放系数 \ 年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015
煤炭/ (t/t 标煤)	2.74	2.74	2.74	2.74	2.74	2.74
石油/ (t/t 标煤)	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14
天然气/ (t/t 标煤)	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63
电力/ (kg/kWh)	840.00	302.98	302.98	302.98	302.98	302.98

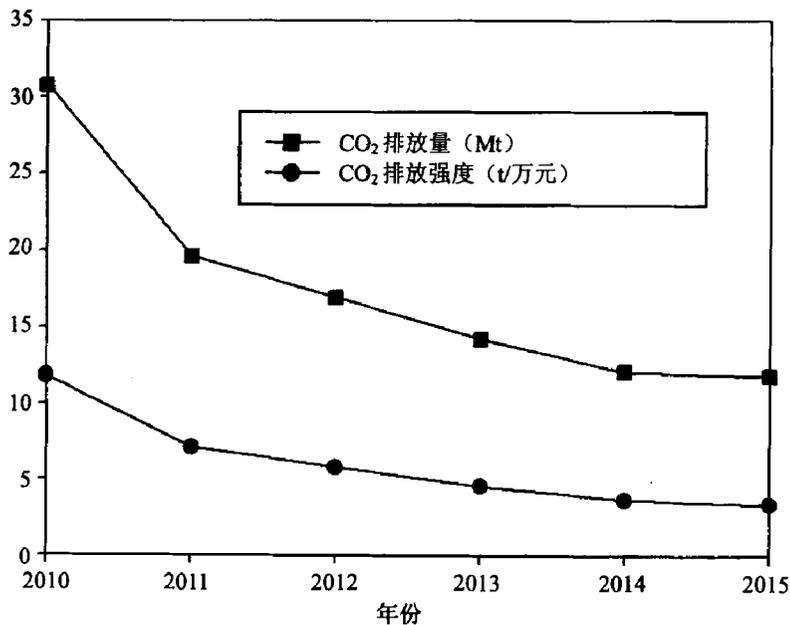


图 3 石景山区“十二五”CO₂ 排放总量及排放强度预测

运用 LMDI 方法得出 CO₂ 排放强度变化的影响因素分解结果 (表 8)。

表 8 CO₂ 排放强度变化的因素分解结果

单位: t/万元

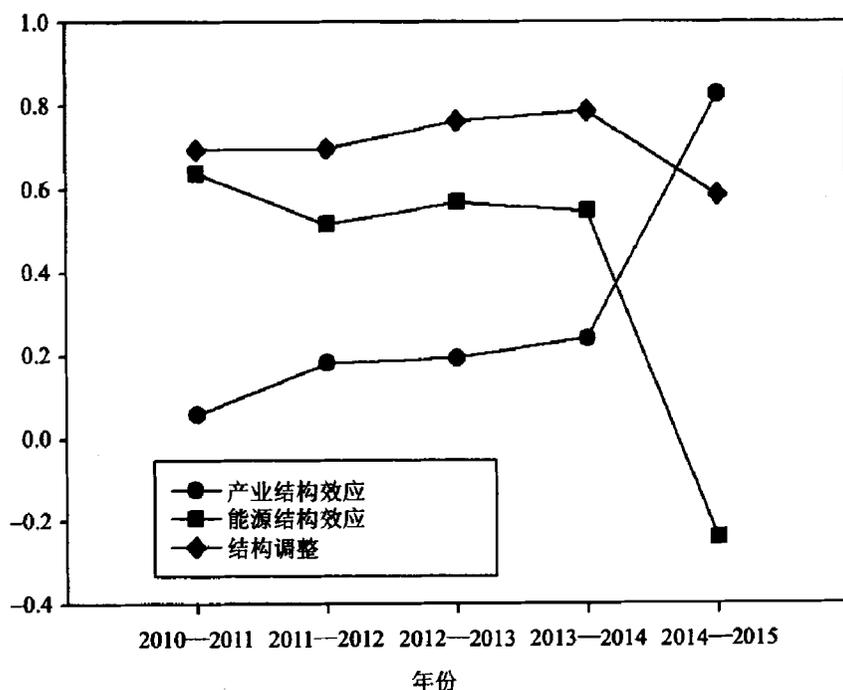
年份	ΔG	ΔG_1	ΔG_K	ΔG_S
2010—2011	-4.698 90	-0.721 17	-0.980 49	-2.997 24
2011—2012	-1.318 15	-0.638 83	0	-0.679 32
2012—2013	-1.192 90	-0.514 07	0	-0.678 82
2013—2014	-0.906 42	-0.410 44	0	-0.495 98
2014—2015	-0.284 52	-0.352 74	0	0.068 22
2010—2015	-8.400 89	-2.637 25	-0.980 49	-4.783 15

进一步计算结构减排的贡献率 (表 9、图 4)。

表 9 CO₂ 排放强度变化的结构减排贡献率

单位: %

年份	W_{GR}	W_{GS}	W_{CO_2}
2010—2011	0.057 19	0.637 86	0.695 05
2011—2012	0.181 63	0.515 36	0.696 99
2012—2013	0.192 82	0.569 05	0.761 87
2013—2014	0.239 75	0.547 19	0.786 94
2014—2015	0.825 99	-0.239 77	0.586 22
2010—2015	0.147 21	0.569 36	0.716 57

图 4 CO₂ 排放强度变化的结构减排贡献率 (100%)

由表 9 可以看出, 结构减排对于 CO₂ 的减排发挥了很大的作用, 整个“十二五”的减排贡献率将达到 71.66%, 产业和能源结构调整的 CO₂ 减排实效性显著。

从图 4 分析, 产业结构效应的贡献率逐年增加, 说明产业结构调整的作用逐渐显现, 并在“十二五”末期(2015 年)达到最大, 贡献率为 82.60%; 能源结构效应的贡献率在 2010—2014 年表较稳定, 保持在 50%以上, 2014—2015 年能源结构效应呈现负效应, 减排贡献率为负值。其主要原因是 2014 年石景山区的“无煤区”建设工程全部完成, 能源消费结构基本定型(表 6), 2014—2015 年能源结构调整的幅度很小, 该年主要将会是产业结构效应发挥 CO₂ 减排作用。

“十二五”期间, 为落实“绿色北京”的行动计划, 石景山区制定了低碳城区的建设目标。由结构减排实效性的预测分析可以看出, 建设低碳城区重点应优化产业结构、推动城区产业升级, 通过构建循环低碳的产业体系形成节约资源能源和保护生态环境的产业结构增长方式和消费模式, 以充分发挥产业结构效应的减排贡献。结合能源结构的调整, 其主要建设思路包括: 打造低碳商务金融中心, 开拓新能源产业、吸引高新低碳技术产业入驻城区, 建设生态低碳产业园区, 建设再生能源利用的研发中心等。

3 主要结论

(1) “十一五”期间, 结构减排是石景山区 CO₂ 排放强度下降的主要驱动因素, 其中产业结构效应的 CO₂ 减排贡献率为 53.98%; 能源结构效应的贡献率为 26.84%; 由此看出通过首钢搬迁和“煤改气”等产业与能源结构调整政策的实施, 使得石景山区 CO₂ 排放强度大幅下降, 减排实效性显著。

(2) “十二五”期间, 结构减排贡献率的预测分析结果表明: 结构减排依然是石景山区 CO₂ 排放强度下降的主要驱动因素, 其中产业结构效应的 CO₂ 减排贡献率为 14.72%; 能源结构效应的贡献率为 56.94%; 以“无煤区”建设工程为代表的能源结构调整体现了显著的减排实效性。

参考文献

- [1] Greening L A. Effects of human behavior on aggregate carbon intensity of personal transportation: comparison of 10 OECD countries for the period 1970–1993[J]. *Energy Economics*, 2004 (26): 1-30.
- [2] 胡初枝, 黄贤金, 钟太洋, 等. 中国碳排放特征及其动态演进分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2008, 18 (3): 38-42.
- [3] 宋德勇, 卢忠宝. 中国碳排放影响因素分解及其周期性波动研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2009, 19 (3): 18-22.
- [4] B.W.Ang. Decomposition analysis for policy making in energy: Which is the preferred method? [J]. *Energy Policy*, 2004, 32 (4): 1131-1139.
- [5] 北京市石景山区“十二五”环境保护与建设规划技术报告[R]. 北京: 北京师范大学环境学院, 2010.
- [6] 北京市通州战略环评总报告[R]. 北京: 北京师范大学环境学院, 2007.