

DOI: 10.5846/stxb201410152033

王长建, 汪菲, 张虹鸥. 新疆能源消费碳排放过程及其影响因素——基于扩展的 Kaya 恒等式. 生态学报, 2016, 36(8): - .

Wang C J, Wang F, Zhang H O. The process of energy-related carbon emissions and influencing mechanism research in Xinjiang. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(8): - .

新疆能源消费碳排放过程及其影响因素 ——基于扩展的 Kaya 恒等式

王长建^{1,*}, 汪 菲^{2,3}, 张虹鸥¹

1 广州地理研究所, 广州 510070

2 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 新疆, 中国西部的欠发达区域, 如何在保持社会经济持续快速发展的同时实现碳排放的减速增长是现阶段的重要发展命题, 对于实现国家的减排目标有着至关重要的作用。通过对经典的 Kaya 恒等式进行扩展, 并采用基于 LMDI 的完全分解模型, 解析了 1952 年—2010 年新疆的一次能源消费的碳排放的主要驱动因素。依据 1952 年以来新疆社会经济发展状况和碳排放总量演变特征, 并结合一定的历史背景等, 将新疆的一次能源消费的碳排放划分为 6 个演变阶段, 定量分析了人口规模效应、经济产出效应、能源强度效应、能源结构效应和能源替代效应在不同发展阶段的贡献作用, 主要的研究结论如下: (1) 经济产出效应和人口规模效应是新疆碳排放增长的最主要贡献因子。(2) 能源强度效应在 1978 年之前对碳排放的增长表现为正效应, 主要原因是极低的能源利用效率和落后的生产工艺。改革开放之后, 能源强度效应成为遏制碳排放增长的重要贡献因子。(3) 能源结构效应和能源替代效应也是遏制新疆碳排放增长的主要贡献因子, 但是其贡献作用还比较小, 主要是因为可再生能源在能源消费总量中的比重还比较低和以煤为主的能源消费结构还没有发生根本性的改变。

关键词: 能源消费; 碳排放; 影响因素; 新疆

The process of energy-related carbon emissions and influencing mechanism research in Xinjiang

WANG Changjian^{1,*}, WANG Fei^{2,3}, ZHANG Hong'ou¹

1 Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China

2 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Reduction of greenhouse gases (GHG) has become a primary concern for policy makers and government managers globally. China has become the world's largest primary energy consumer and carbon emitter after decades of rapid economic growth. Research on regional carbon emissions is crucial for China to achieve its reduction targets. Presently, the biggest challenge faced by the local government is to reduce carbon emissions, and ensure that it does not hinder social-economic development. This case study in Xinjiang, a less developed area in western China, aimed to determine the most important carbon emission contributors and analyze energy-related carbon emissions. Our estimates were based on the provincial and national energy statistics. Data resources available for the present study included statistics on populations, gross domestic product (GDP), and total energy consumption from 1952 to 2010. Carbon emissions due to energy consumption were calculated according to the method of the IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. It

基金项目: 广东省科学院青年科学研究基金(qnjj201501); 广州地理研究所优秀青年创新人才基金(030)

收稿日期: 2014-10-15; **网络出版日期:** 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangcj@gdas.ac.cn

was observed that the total energy consumption in Xinjiang increased from 0.393 Mtce in 1952 to 82.902 Mtce in 2010, representing a 210.95-fold increase over the period of 59 years. Energy-related carbon emissions in the area increased from 0.285 Mt in 1952 to 53.662 Mt in 2010, representing a 188.23-fold increase over the study period. We analyzed the changes in the total carbon emissions and carbon emissions structure from 1952 to 2010. Coal consumption was found to be the biggest contributor to total carbon emission in Xinjiang. The share of carbon emissions from coal consumption decreased until 2004, but increased afterward. The share of carbon emissions from natural gas increased steadily from 0.12% in 1954 to 8.66% in 2010. The Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) technique based on an extended Kaya identity was used to determine the five main energy-related carbon emissions in Xinjiang. We first used the LMDI method to decompose carbon dioxide emissions on a yearly basis. To understand of the factors influencing long-term carbon emissions, we divided the carbon emissions process into six stages based on the changing trends of socio-economic development and carbon emissions, historically. This method included measurements of the effects of population, affluence, energy intensity, renewable energy penetration, and emission coefficient for the different stages of the process. Decomposition results showed that affluence and population effects are the two most important contributors to increased carbon emissions, but their contributions are different in the special development period. Energy intensity was positive in curbing carbon emissions during the pre-reform period, but became relatively dominant after 1978. Renewable energy penetration and emission coefficients played important negative but relatively minor effects on carbon emissions. The insignificant effect of renewable energy penetration is largely attributed to the small shares of renewable energy, amounting to less than 6% of the total energy consumption. The emission coefficient effect plays a minor role in curbing carbon emissions, because the coal-dominated energy consumption structure has not fundamentally changed. An effective solution to these problems will help Xinjiang to reduce carbon emissions and environmental damage with economic growth.

Key Words: energy consumption; carbon emissions; influencing mechanisms; Xinjiang

以全球变暖为主要特征的气候变化受到国际社会的广泛关注,温室气体排放成为全球变化领域的研究热点和国际环境保护的谈判焦点。目前国内外关于碳排放的研究内容大致分为,碳排放总量估算以及核算方法^[1-2]、碳排放影响因素及其影响机理分析^[3-6]、碳排放情景分析^[7-10]、碳减排技术手段与政策措施模拟^[11-14]等几个方面,其中碳排放核算是碳排放研究的基础,碳排放影响因素分析是制定减排措施、实施情景分析、以及减排措施模拟的关键,碳减排技术手段与低碳政策体系构建是碳排放研究的目标。碳排放的影响因素有很多,人口增长、经济发展、能源消费、产业结构、能源结构、技术进步等都是其关键因子。在测定碳排放影响因素的众多模型中,Kaya 恒等式是应用最为广泛的模型之一。Kaya 恒等式将人口增长、人均 GDP、单位 GDP 能源消耗(能源强度)、单位能源消耗碳排放(能源碳强度)作为碳排放增长的最主要推动力^[15-20]。

高速的工业化进程、快速的经济增长和不断加速的能源消费增长,使中国的碳排放问题备受关注,为此中国做出了约束性的碳减排承诺。中国 CO₂排放量已位居世界第一,2009 年哥本哈根气候大会上,中国政府提出了 2020 年单位国内生产总值 CO₂排放强度比 2005 年下降 40%—45%的减排目标,非化石能源占一次能源消费的比重达到 15%左右。我国正在积极争取最大可能的排放权以适应社会经济的快速发展,能否在保持较快发展的前提下,兑现约束性的减排承诺,已经成为政府部门、研究机构、社会民众的关注焦点和研究热点。从地理学的角度分析,对于一个国家碳排放的研究不仅需要从总量变化方面评估,而且也需要从区域格局变化来把握。一旦国家层面的谈判达成,即国家碳排放总量的确定,接下来面临的问题将是区域碳排放如何分配,因此有必要对区域碳排放进行研究。从区域空间格局的角度落实国家的碳减排政策,并实现碳减排的目标,使其具有更为明确的针对性和更为良好的操作性。新疆作为我国西部对外开放的重要门户、西部大开发的重点地区和重要的能源综合生产基地,当前正处于大开发、大建设、大发展的战略机遇期,如何从严控制二氧化碳排放强度,积极应对全球气候变化,将是新疆实现能源经济社会可持续发展的重要命题。王长建等采

用动态计量模型研究 1978—2010 年新疆能源消费对社会经济发展的影响机理^[21]。杜宏茹等对新疆 1995—2008 年能矿产业发展及其区域环境效应研究表明能矿产业的能源消耗与碳排放具有显著的相关性^[22]。霍金炜等运用岭回归分析方法研究 1995—2008 年新疆的人口增长、经济发展和技术进步对碳排放的影响^[23]。钱冬等借助投入产出结构分解模型对新疆 1997—2007 年的能源消费强度的影响因素进行研究^[24]。张新林等借助 IPAT 模型以及结构分解分析法对新疆能源消费碳排放的脱钩效应进行研究,1990—2010 年间经济增长与碳排放之间处于弱脱钩及扩张连接状态^[25]。借鉴已有的研究成果,本文通过重点分析新疆碳排放过程的历史演变规律,并借助指数分解模型同时结合相应的历史发展背景,对新疆碳排放的影响要素进行深入解析,为全面认识新疆的能源消费碳排放过程以及制定更具针对性的节能减排降耗政策提供理论参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

所有数据均来源于《新疆辉煌 50 年 1949—1999》、《新疆五十年 1955—2005》、《新疆统计年鉴》(1985 年—2012 年)和《中国能源统计年鉴》(1985 年—2011 年)。

1.2 碳排放量核算

能源消费碳排放的核算主要依据 IPCC 碳排放计算指南,参照缺省值确定主要的碳排放系数^[4, 26]。计算公式如下:

$$C_t = \sum_i E_t^i \times LCV_i \times CF_i^i \times O_i \quad (1)$$

上标 i 表示不同种类的能源,下标 t 代表时间, C_t 代表 t 年份的碳排放总量(百万吨, Mt), E_t^i 代表 t 年份第 i 种能源的消费总量(百万吨标准煤, Mtce), LCV_i (Lower calorific value) 代表第 i 种能源的燃料低热值, CF_i^i 代表第 i 种能源的碳排放系数, O_i 代表第 i 种能源的燃烧氧化率(如表 1 所示)。

表 1 碳排放转换因子

Table 1 Conversion factors, LCV, oxidation rate and carbon emission factors of energy sources

能源种类 Energy sources	转换因子 ^a Conversion factors	低热值 ^b Lower calorific value	碳排放因子 ^c Carbon emission factors	氧化率 ^c Oxidation rate
原煤 Raw coal	0.7143 tce/t	20.908	25.800	0.918
精煤 Cleaned coal	0.9000 tce/t	26.344	27.680	0.918
洗煤 Washed coal	0.2857 tce/t	8.363	25.800	0.918
焦炭 Coke	0.9714 tce/t	28.435	29.410	0.928
原油 Crude oil	1.4286 tce/t	41.816	20.080	0.979
汽油 Gasoline	1.4714 tce/t	43.070	18.900	0.986
煤油 Kerosene	1.4714 tce/t	43.070	19.600	0.980
柴油 Diesel oil	1.4571 tce/t	42.652	20.170	0.982
燃料油 Fuel oil	1.4286 tce/t	41.816	21.090	0.985
其它成品油 Other petroleum products	1.4286 tce/t	41.816	20.000	0.980
天然气 Nature gas	1.3300 tce/10 ³ m ³	38.931	17.200	0.990
液化石油气 Liquefied petroleum gas	1.7143 tce/t	50.179	17.200	0.989
炼油气 Refinery gas	1.5714 tce/t	46.055	18.200	0.989

^a数据来源:^[26], ^b数据来源:^[4, 27], ^c数据来源:^[4]

1.3 碳排放因素分解模型的构建与优化

常用的碳排放影响因素定量分析方法有结构因素分解模型(SDA)和指数因素分解模型(IDA)。指数分解法是用几个因素相乘的形式表示,并根据不同的权重确定方法进行分解,以确定各个指标的增量余额^[28]。

Ang 在系统阐述 Laspeyres 指数分解与 Divisia 指数分解等分析方法的基础上,运用对数平均迪氏指数方法 (LMDI) 对碳排放进行分解,不仅消除了分解残差,而且很好地解决了 Divisia 方法中的“0”值问题^[29-31]。目前 LMDI 模型已被广泛应用于碳排放研究,研究尺度从洲际区域^[6, 32]、国家层面^[33-34]延伸到次级区域的省级尺度^[35]、单体城市^[1, 36]、甚至城市和乡村居民^[37-38]。研究时段有长期时间序列^[39]、短期时间序列^[40]、甚至单个年份^[6]。研究内容从碳排放总量分解到能源强度和能源效率的分解^[41-42];从一次产业的解析到具体产业部门(工业、制造业、交通运输业和服务业)的能源消耗研究^[5, 35, 43]。Zhang 等利用 LMDI 模型在联合生产框架下对 20 个发展中国家 1995—2005 年间 CO₂ 排放进行因素分解分析,研究表明经济增长是 CO₂ 排放增加的主要影响因素,技术变革是 CO₂ 排放减少的最重要影响因素^[32]。Luciano Charlita 等利用 LMDI 模型对巴西 1970—2009 年能源消费的 CO₂ 排放进行因素分解分析,研究表明经济活动和人口增长是碳排放增加的最主要影响因素^[34]。Wang 等采用 LMDI 模型对中国 1957—2000 年能源碳排放进行因素分解分析,能源强度的降低很大程度抑制了中国的碳排放增长,能源结构调整和可再生能源利用对降低碳排放有一定的积极作用^[39]。Wu 等利用 LMDI 模型对中国 1996—1999 年能源消费的碳排放出现的微降趋势进行因素分解分析,研究表明产业结构调整 and 工业企业平均劳动生产率的增长缓慢是其重要影响因素^[44]。大量的研究结论均显示经济和人口增长是碳排放增长的拉动因素,产业部门能源效率的提高是能源强度下降的主要原因。

1.3.1 Kaya 恒等式

Kaya 恒等式将碳排放分解为 4 个影响因素,表达公式如下:

$$C = P \times \left(\frac{G}{P}\right) \times \left(\frac{E}{G}\right) \times \left(\frac{C}{E}\right) \quad (2)$$

P 代表人口规模, G 代表国民生产总值 (GDP), E 代表能源消费; G/P 代表人均 GDP, E/G 代表能源消费强度, C/E 代表能源消费碳强度。

1.3.2 扩展的 Kaya 恒等式

为了能够更好的解析能源消费的碳排放影响因素,特意将 Kaya 恒等式进行扩展^[3]。计算公式如下:

$$C = P \times \left(\frac{G}{P}\right) \times \left(\frac{E}{G}\right) \times \left(\frac{FE}{E}\right) \times \left(\frac{C}{FE}\right) = pgesf \quad (3)$$

FE 代表化石能源消费, P , G , 和 E 的含义与公式 (2) 一致。 C , 一次能源消费碳排放总量; P , 人口规模; G , 国内生产总值 (GDP); FE , 化石能源消费总量; E , 一次能源消费总量; $p = P$, 人口规模; $g = G/P$, 人均 GDP; $e = E/G$, 能源消费强度; $s = FE/E$, 化石能源消费比重; $f = C/FE$, 化石能源碳排放系数。鉴于当前能源结构多元化的发展趋势,我们对经典的 Kaya 恒等式进行扩展。能源消费结构优化的主要表现特征:相对高碳-化石能源逐步向相对低碳-非化石能源和可再生能源的过渡。经典的 Kaya 恒等式中仅仅考虑能源消费总量对碳排放的影响,而忽略了能源消费结构中非化石能源的替代作用。在能源消费结构多元化发展的今天,很有必要对非化石能源消费对碳排放的影响进行深入地的研究。

1.3.3 对数平均迪氏分解法 (Logarithmic Mean Divisia Index)

Kaya 恒等式是最为著名的指数分解法 Index decomposition analysis (IDA)。在众多的指数分解模型中, Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) 模型因其分解无残差和有效地解决“0”值问题,被广泛应用于碳排放的分解研究^[29, 31]。具体计算公式如下:

$$\Delta C = C_t - C_0 = \Delta C_{p-effect} + \Delta C_{g-effect} + \Delta C_{e-effect} + \Delta C_{s-effect} + \Delta C_{f-effect} \quad (4)$$

从 0 年到 t 年的碳排放量的差值称为总效应 ΔC 。 ΔC 由 5 部分组成:人口规模效应 ($\Delta C_{p-effect}$), 经济产出效应 ($\Delta C_{g-effect}$), 能源强度效应 ($\Delta C_{e-effect}$), 能源替代效应 ($\Delta C_{s-effect}$), 能源结构效应 ($\Delta C_{f-effect}$)。

$$\Delta C_{p-effect} = \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \ln \left(\frac{P_t}{P_0} \right) \quad (5)$$

$$\Delta C_{g-effect} = \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \ln \left(\frac{g_t}{g_0} \right) \quad (6)$$

$$\Delta C_{e\text{-effect}} = \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \ln\left(\frac{e_t}{e_0}\right) \quad (7)$$

$$\Delta C_{s\text{-effect}} = \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \ln\left(\frac{s_t}{s_0}\right) \quad (8)$$

$$\Delta C_{f\text{-effect}} = \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \ln\left(\frac{f_t}{f_0}\right) \quad (9)$$

2 实证分析

2.1 新疆能源消费过程研究

由图 1 可知,新疆的一次能源消费总量呈不断增长趋势,从 1952 年的 39.3 万吨标准煤增长到 2010 年的 8290.2 万吨标准煤,59 年间增长了 210.95 倍。①1952 年—1957 年,建国初期国民经济逐步恢复,“一五计划”的实施,一次能源消费总量快速增长,年均增长速度为 19.53%。②1958 年—1960 年,“大跃进”时期一次能源消费量急剧增长,3 年时间内一次能源消费总量为“一五计划”时期的 3.86 倍。③1961 年—1977 年,一次能源消费的缓慢增长阶段,年均增长速度为 5.08%。④1978 年—1990 年,改革开放以来,国民经济发展在良好的政策环境下恢复快速增长,12 年间年均增长速度为 10.70%,能源消费总量由 1978 年的 972 万吨增长到 1990 年的 1898 万吨,年均增长速度为 5.74%。⑤1991 年—2000 年,“八五”时期新疆确立优势资源转换发展战略,依托能源资源、矿产资源优势实施优势资源转换战略加速新型工业的发展。这一时期,新疆的优势资源转换发展战略初见成效,新型工业化进程稳步推进,GDP 继续保持较快速度增长的同时,能源消费量由 1991 年的 2050 万吨增长到 2000 年的 3316 万吨,年均增长速度为 5.49%。⑥2001 年—2010 年,2000 年 1 月,国务院成立西部地区开发领导小组,实施西部大开发战略,全面提高西部地区的经济和社会水平。新疆依托丰富的水土光热资源、矿产资源和旅游资源,在西部大开发一系列战略部署、政策支持下,国民经济发展进入了一个新的阶段,GDP 年均增长速度高达 13.28%。与此同时,随着能源资源、矿产资源的勘探开发进一步升级,石油天然气化工基地和煤电煤化工基地建设不断扩大规模,在带动新疆经济发展的同时,能源消费量由 2001 年的 3496 万吨迅速增长到 2010 年的 8290 万吨,年均增长速度高达 10.68%。

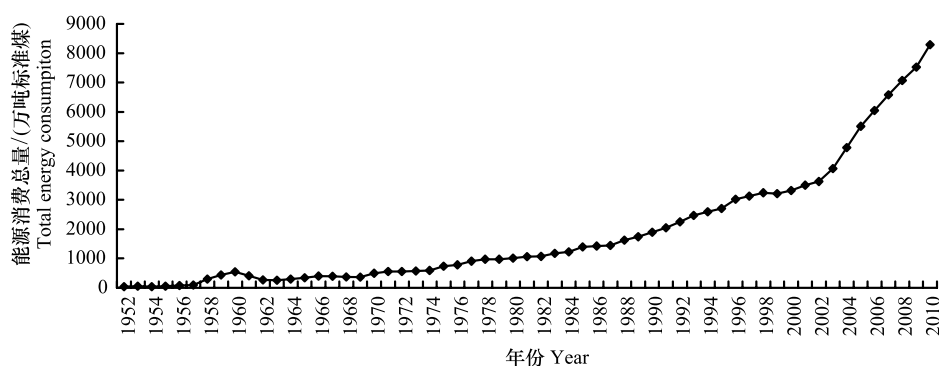


图 1 新疆 1952 年—2010 年一次能源消费演变

Fig. 1 Changes of energy consumption in Xinjiang from 1952 to 2010

由图 2 可知,近 60 年来新疆的一次能源消费仍以煤炭和石油为主,尤其是煤炭在一次能源消费中的比重多年在 60%以上。1952 年,新疆的一次能源消费中只有煤炭和石油,比重分别为 82.1%和 17.9%。1954 年一次能源消费中增加天然气,比重为 0.2%。1957 年一次能源消费中增加水风电,比重为 0.3%。之后天然气和水风电在一次能源消费中的比重呈不断增长趋势,尤其是 1990 年以来,天然气和水风电的消费比重呈快速增长趋势。2005 年以来,能源消费结构的多元化水平处于倒退状态,主要原因是煤炭消费比重呈现出逐年增长趋势。

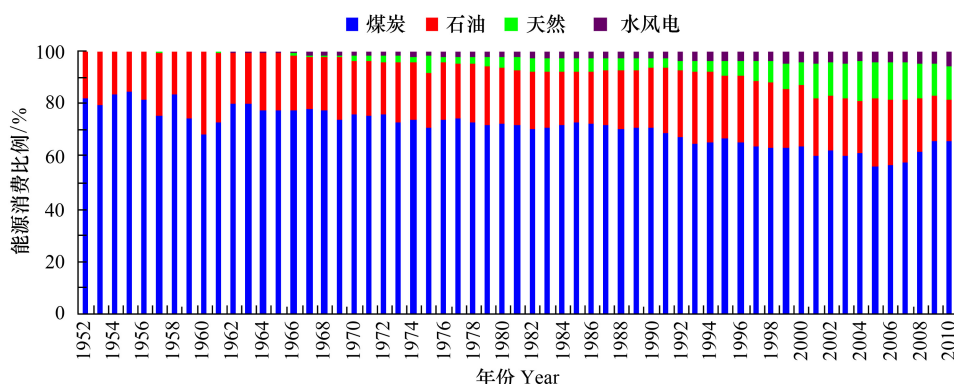


图2 新疆1952年—2010年一次能源消费结构演变

Fig. 2 Changes of energy consumption structure in Xinjiang from 1952 to 2010

2.2 新疆碳排放量核算及其演进特征分析

由计算结果分析,1952—2010年间新疆一次能源消费的碳排放总体呈不断增长趋势(图3),从1952年的28.51万吨增长到2010年的5366.26万吨,59年间增长了188.23倍。①1952年—1957年,新疆在“一五计划”期间碳排放以较快速度增长,年均增速为15.67%。②1958年—1960年,在“大跃进”运动期间,为实现工农业生产高指标,基本建设投资急剧膨胀,能源消费量的急剧增长导致了新疆碳排放出现阶段性的高峰,从1958年的218.25万吨迅速增长到1960年的380.79万吨。此后新疆碳排放呈现缓慢增长态势,③1961年—1977年,新疆碳排放年均增长速度为4.97%,尤其是1966年—1976年的“文化大革命”期间,新疆的国民经济经历由停滞、下降转向回升,相应的能源消费碳排放也经历了持续下降到缓慢增长的发展阶段。④1978年—1990年,随着改革开放政策的全面实施,新疆国民经济呈现较快增长,能源消费的碳排放也呈现较快增长态势,年均增长速度为5.59%。⑤1991年—2000年,新疆实施优势资源转换战略,加速新型工业化的发展,新疆碳排放年均增长速度为5.06%。⑥2001年—2010年,国家实施西部大开发战略,新疆的国民经济快速增长,能源消费的碳排放也呈现快速增长趋势,10年间年均增长速度达到10.16%。

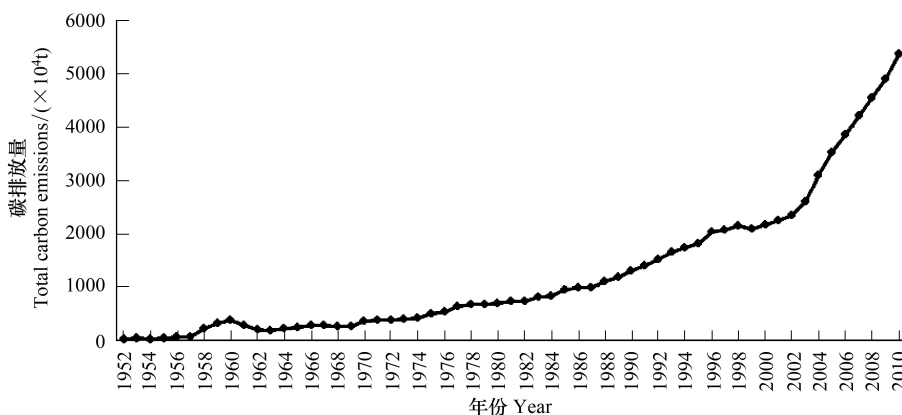


图3 1952—2010年新疆碳排放总量增长趋势

Fig. 3 Total carbon emissions changes of Xinjiang from 1952 to 2010

由图4可知,煤炭消费是新疆一次能源消费碳排放的最主要来源。煤炭消费占新疆一次能源消费的碳排放比例最大,多年来在70%以上。煤炭消费的碳排放比重由1952年的85.55%调整到2010年的76.96%。新疆的能源资源储量丰富,据全国第二次油气资源评价,新疆石油预测资源量209.2亿吨,占全国陆上石油资源量的30%,天然气预测资源量10.4万亿立方米,占全国陆上天然气资源量的34%,煤炭预测储量2.19万亿吨,占全国预测储量的40%。尽管新疆拥有丰富的石油和天然气资源,但是这些低碳能源大多被国有企业-中

国石油和中国石化控制,由此煤炭的资源优势和价格优势使其长期作为新疆能源消费的第一选择。

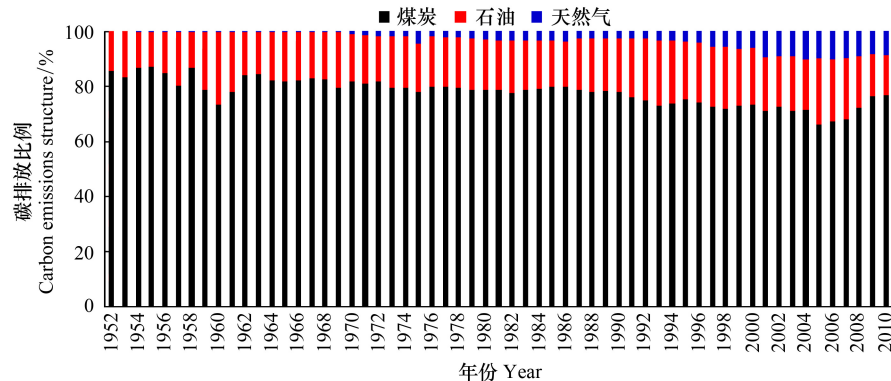


图 4 1952 年—2010 年新疆一次能源消费的碳排放比例变化

Fig. 4 1952 年—2010 年新疆一次能源消费的碳排放比例变化

2.3 新疆一次能源消费碳排放的因素分解分析

采用基于 LMDI 的完全分解模型,首先逐年解析了 1952 年—2010 年新疆的一次能源消费的碳排放的主要驱动因素。定量分析了 1952 年—2010 年的人口规模效应、经济产出效应、能源强度效应、能源结构效应和能源替代效应在各个年份之间的贡献作用(表 2)。

表 2 碳排放影响因素的指数分解分析(单位:万吨)

Table 2 Complete decomposition of carbon emission change from 1952 to 2010

年份 Year	人口规模 效应 <i>p-effect</i>	经济产出 效应 <i>g-effect</i>	能源强度 效应 <i>e-effect</i>	能源结构效应 <i>s-effect</i>	能源替代 效应 <i>f-effect</i>	碳排放增量 ΔC
1952—1953	0.942	3.445	6.749	0.000	-0.206	10.930
1953—1954	1.555	4.288	-14.679	0.000	0.332	-8.504
1954—1955	0.863	5.462	7.222	0.000	0.044	13.591
1955—1956	2.066	7.950	2.692	0.000	-0.343	12.365
1956—1957	2.842	0.499	9.076	-0.188	-0.823	11.407
1957—1958	5.511	14.624	127.113	0.259	2.449	149.955
1958—1959	28.466	31.729	40.296	0.000	-5.782	94.709
1959—1960	19.348	34.198	19.450	0.000	-5.167	67.829
1960—1961	11.339	-138.110	33.111	-0.668	3.983	-90.346
1961—1962	-3.778	-37.889	-56.742	-0.482	4.268	-94.623
1962—1963	3.844	19.770	-31.302	-0.386	0.037	-8.037
1963—1964	8.570	24.646	-4.948	0.000	-1.204	27.063
1964—1965	13.436	20.774	-4.275	-0.231	-0.286	29.417
1965—1966	15.830	17.957	5.631	-0.531	0.224	39.110
1966—1967	11.157	-55.154	41.227	-1.141	0.656	-3.256
1967—1968	11.243	-45.586	21.861	-0.278	-0.277	-13.035
1968—1969	9.952	-6.891	-10.326	0.000	-2.266	-9.532
1969—1970	10.399	36.304	47.130	-0.307	0.737	94.263
1970—1971	12.391	33.578	-10.054	0.375	-0.893	35.398
1971—1972	14.954	-41.935	26.840	-0.787	0.664	-0.263
1972—1973	14.498	-9.844	11.575	0.000	-2.950	13.278
1973—1974	13.440	-7.248	3.633	-0.412	0.369	9.782
1974—1975	11.482	41.728	47.731	0.928	-6.624	95.244
1975—1976	14.011	51.283	-33.232	-1.067	7.563	38.559
1976—1977	11.349	57.014	19.148	-0.598	0.590	87.503
1977—1978	12.853	37.370	-4.394	0.000	-2.433	43.396

续表

年份 Year	人口规模 效应 <i>p-effect</i>	经济产出 效应 <i>g-effect</i>	能源强度 效应 <i>e-effect</i>	能源结构效应 <i>s-effect</i>	能源替代 效应 <i>f-effect</i>	碳排放增量 ΔC
1978—1979	12.429	69.290	-80.058	-1.375	-2.421	-2.135
1979—1980	14.756	63.161	-48.319	0.000	-0.619	28.979
1980—1981	10.958	56.120	-37.398	-1.463	-0.604	27.613
1981—1982	7.162	59.719	-60.304	-2.244	-3.078	1.254
1982—1983	10.068	120.275	-59.447	0.000	2.253	73.148
1983—1984	6.623	77.940	-47.499	-0.845	1.902	38.120
1984—1985	11.344	119.986	-16.185	1.847	0.931	117.923
1985—1986	15.898	56.615	-50.257	-1.991	-0.097	20.168
1986—1987	15.991	54.859	-61.530	-3.036	0.392	6.675
1987—1988	14.867	114.894	-1.465	0.000	-2.449	125.846
1988—1989	22.132	-61.706	114.056	-1.185	1.059	74.355
1989—1990	62.390	117.372	-70.722	0.000	0.440	109.479
1990—1991	22.166	211.865	-130.413	2.773	-7.449	98.942
1991—1992	24.180	124.419	-17.667	-4.501	-5.923	120.509
1992—1993	24.501	117.215	11.295	-1.638	-11.302	140.071
1993—1994	28.777	75.921	-22.007	-1.757	4.152	85.086
1994—1995	30.944	63.438	-17.803	-1.842	2.062	76.798
1995—1996	31.999	-1.146	179.521	3.972	-8.431	205.915
1996—1997	34.580	221.946	-186.301	-6.358	-18.056	45.811
1997—1998	35.551	102.506	-60.304	-2.184	-4.790	70.778
1998—1999	33.253	154.117	-206.978	-24.333	0.079	-43.861
1999—2000	87.682	287.834	-309.453	6.718	5.602	78.383
2000—2001	31.770	112.161	-26.858	-6.953	-39.098	71.023
2001—2002	35.196	192.895	-146.882	4.816	12.703	98.727
2002—2003	37.064	370.183	-122.427	-7.791	-13.478	263.551
2003—2004	42.543	386.386	34.943	29.736	-10.142	483.466
2004—2005	78.475	484.161	-99.034	-3.436	-33.235	426.930
2005—2006	71.947	438.983	-165.838	-11.530	2.523	336.085
2006—2007	87.855	299.012	-49.189	4.208	13.030	354.916
2007—2008	73.817	323.428	-80.398	-32.113	58.792	343.526
2008—2009	61.272	20.011	214.085	-14.924	65.283	345.727
2009—2010	53.653	891.433	-448.774	-27.122	-1.445	467.744

p-effect:人口规模效应 Population size effect; *g-effect*:经济产出效应 Economic growth effect; *e-effect*:能源强度效应 Energy intensity effect; *s-effect*:能源结构效应 Energy structure effect; *f-effect*:能源替代效应 Energy penetration effect; ΔC :碳排放增量 Carbon emissions increment

根据 1952 年以来新疆社会经济发展状况、碳排放总量演变特征和碳排放强度变化,并结合一定的历史背景等,将新疆的一次能源消费的碳排放划分为 6 个演变阶段(表 3)。通过对新疆 1952 年—2010 年社会经济发展和碳排放演进的阶段划分,通过计算各个影响因素在各个阶段的碳排放增量效应值和贡献率,并综合探讨各个影响因素在划分的六个发展阶段内的作用程度(表 4 和图 5)。

第一阶段:1952 年—1957 年,建国初期国民经济恢复阶段,“一五计划”的实施响应国家的“以钢为纲”的工业发展指导方向。这一时期内,新疆的经济规模很小,仅占同时期全国 GDP 的 1.16%,但是增长速度很快, GDP 年平均增长速度为 15.45%。碳排放总量和人均碳排放量均比较低,碳排放总量仅为全国同期碳排放的 0.88%,但是碳排放和人均碳排放的增长速度较快,年均增长速度分别为 15.67%和 14.84%。

第一阶段(1952 年—1957 年):建国初期经济的快速增长是碳排放量增加的最主要原因,经济产出效应引起的碳排放增量为 24.44 万吨,贡献率达 61.43%。人口数量增长和能源消费强度增长对碳排放量的增量均表现为正效应,贡献率分别为 20.83%和 19.86%。能源结构的调整,可再生能源比重的增长产生微弱的能源结构效应和能源替代效应,引起的碳排放增量为-0.7 万吨和-0.1 万吨。

表 3 新疆一次能源消费碳排放阶段划分以及划分标准

评判指标 Indexes	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段	第五阶段	第六阶段
	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4	Stage 5	Stage 6
	(1952—1957)	(1958—1960)	(1961—1977)	(1978—1990)	(1991—2000)	(2001—2010)
历史背景 Historical backgrounds	国民经济恢复时期	大跃进	文化大革命	改革开放	优势资源转换战略	西部大开发对口援疆
人口年均增速/% Population growth rate per year	3.71	8.56	3.38	1.81	1.95	1.69
GDP 年均增速/% GDP growth rate per year	15.45	21.16	4.89	10.70	9.03	13.28
碳排放年均增长速度/% Carbon emissions growth rate per year	15.67	32.09	4.97	5.59	5.06	10.16
万元 GDP 碳排放增速/% Carbon emissions per GDP growth rate per year	5.25	8.17	1.69	-10.96	-11.22	-4.80
人均碳排放年均增速/% Carbon emissions per capita growth rate per year	14.84	21.67	1.54	3.71	3.05	9.33

表 4 碳排放影响因素分解结果(单位:万吨)

阶段 Stage	人口规模效应 <i>p-effect</i>	经济产出效应 <i>g-effect</i>	能源强度效应 <i>e-effect</i>	能源结构效应 <i>s-effect</i>	能源替代效应 <i>f-effect</i>	碳排放增量 ΔC
第一阶段:1952—1957 Stage 1	8.29	24.44	7.90	-0.14	-0.70	39.79
第二阶段:1958—1960 Stage 2	47.98	64.14	61.21	0.00	-10.79	162.54
第三阶段:1961—1977 Stage 3	233.65	80.93	33.26	-7.10	0.14	340.87
第四阶段:1978—1990 Stage 4	204.90	956.53	-524.44	-11.72	-3.84	621.43
第五阶段:1991—2000 Stage 5	304.97	1060.74	-521.16	-29.18	-35.88	779.49
第六阶段:2001—2010 Stage 6	652.95	4337.84	-815.11	-12.63	88.21	4251.25

第二阶段:1958 年—1960 年,碳排放异常增长阶段。“大跃进”运动,在生产发展上追求高速度,以实现工农业生产高指标为目标。1958 年,中共中央政治局北戴河会议,确定了一批工农业生产的高指标,全国各地提出“全党全民大炼钢铁”、“大办铁路”等口号。基本建设投资急剧膨胀,能源消费量猛增,但由于技术水平低下,能源利用效率极低,成为“高能耗、高排放、低效益”的典型时期。碳排放年均增长速度高达 32.09%,万元 GDP 碳排放和人均碳排放均呈快速增长。“大跃进”的三年时间内碳排放总量大约为“一五计划”五年内碳排放量的 3.79 倍,并且在 1960 年到达阶段性高峰 380.79 万吨。

第二阶段(1958 年—1960 年):“大跃进”时期经济的快速增长和能源消费强度的急剧增长成为这一时期碳排放增量的主要影响因子。经济产出效应引起的碳排放增量为 64.14 万吨,贡献率为 39.46%。能源强度效应超过人口规模效应,成为碳排放增长的第二位主要驱动力,能源强度效应引起的碳排放增量为 61.21 万吨,贡献率为 37.66%。能源消费结构仍然表现出微弱的负效应,引起的碳排放增量为-10.79 万吨。能源替代效应没有表现出明显的影响作用,因为这一时期可再生能源占能源消费总量的比重没有任何明显的变化。

第三阶段:1961 年—1977 年,这一阶段国民经济缓慢发展、碳排放增长速度。这一时间段内,“文化大革命”使中国的国民经济发展受到严重影响,经济增速缓慢。新疆的 GDP 年均增长率仅为 4.89%,碳排放量年

均增速为 4.97%。万元 GDP 碳排放量和人均碳排放量的年均增长速度分别仅为 1.69%、1.54%。

第三阶段(1961 年—1977 年):人口规模增长产生的人口规模效应是这一时间段内碳排放的最主要推动力,引起的碳排放增量为 233.65 万吨,贡献率为 68.54%。由于这一阶段宽松的人口政策,新疆经历了 60 年代第二次人口生育高峰和 70 年代第三次人口生育高峰期,人口年均增长速度为 3.38%,人口规模的快速增长助推了一次能源消费量的增长,从而推动了碳排放的增加。“文化大革命”时期,国民经济受到重创,GDP 的缓慢增长使得经济产出效应增加的碳排放量仅为 80.93 万吨,贡献率为 23.74%。能源替代效应成为这一阶段唯一的遏制碳排放增长的负效应,可再生能源在能源消费总量中的比重由 1961 年的 0.3 增长到 1977 年的 1.9%,引起的碳排放增量为-7.1 万吨。

第四阶段:1978 年—1990 年,这一阶段经济恢复快速增长、碳排放增长速度提升。1978 年,十一届三中全会之后,中国实行“对内改革、对外开放”的政策,将工作重点转移到社会主义现代化建设,并试图将经济体制从计划经济体制转移到市场经济。新疆的国民经济发展在良好的政策环境下恢复快速增长,12 年间 GDP 增长了 1.92 倍,年均增长速度为 10.70%。相比较于经济规模的快速恢复增长,碳排放量并没有同步高速增长,碳排放年均增长速度和人均碳排放年均增长速度分别为 5.59%和 3.71%。这一时期新疆的产业结构调整初见成效,第三产业产值比重由 1978 年的 17.2%增长到 1990 年的 28.4%。自 1978 年,新疆的万元 GDP 碳排放开始呈现逐年下降趋势,该时段内万元 GDP 碳排放年均下降速度为 10.96%。

第四阶段(1978 年—1990 年):经济产出效应是这一阶段新疆碳排放增长的最主要影响因素,引起的碳排放增量为 956.53 万吨,贡献率为 153.92%,表现出较强的正效应。改革开放以来,新疆的国民经济恢复较快增长,年均增长速度为 10.70%。能源消费强度的降低使得能源强度效应由 1978 年之前的正效应首次出现负效应,引起的碳排放增量为-524.44 万吨,贡献率为-84.39%,表现出强烈的负效应,能源消费强度的降低在很大程度上遏制了新疆碳排放的快速增长。能源结构效应和能源替代效应仍然表现出微弱的负效应。

第五阶段:1990 年—2000 年,经济增长和碳排放较快增长阶段。随着改革开放的不断深入,经济体制改革的不断完善,中国逐步实现从沿海到沿江沿边、从东部到中西部区域的梯次开放。“八五”时期新疆确立优势资源转换发展战略,依托矿产资源优势实施优势资源转换战略加速新型工业的发展。这一时期,新疆的优势资源转换发展战略初见成效,新型工业化进程稳步推进,能源利用效率逐步提升。GDP 继续保持较快速度增长,碳排放年均增长速度和人均碳排放年均增长速度相比较“改革开放”时期略微下降,分别为 5.06%和 3.05%。万元 GDP 碳排放年均下降速度明显提升,达到 11.22%。

第五阶段(1991 年—2000 年):经济产出效应是这一阶段碳排放增长的最主要助推作用,引起的碳排放增量为 1060.74 万吨,贡献率为 136.08%。能源强度效应是这一阶段碳排放增长的最主要抑制作用,引起的碳排放增量为-521.16 万吨,贡献率为-66.86%。新疆的优势资源转换发展战略继续推动着社会经济发展和新型工业化进程,但是优势资源转换发展战略已经出现成效,能源结构效应和能源替代效应相比较于前四个阶段有了很大程度的提升,引起的碳排放增量的贡献率分别为-4.60%和-3.74%。

第六阶段:2001 年—2010 年,经济增长和碳排放快速增长阶段。2000 年 1 月,国务院成立西部地区开发领导小组,实施西部大开发战略,全面提高西部地区的经济和社会发展水平。新疆依托丰富的水土光热资源、

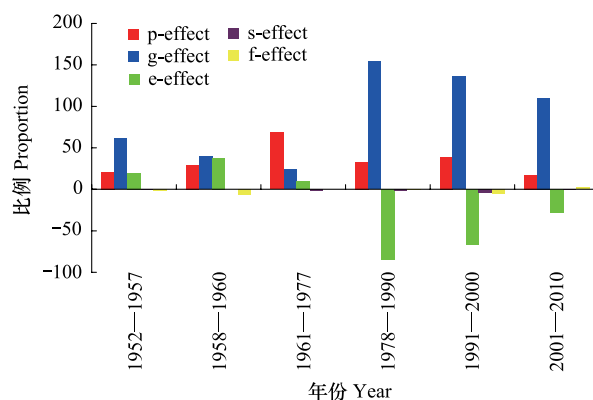


图 5 碳排放影响因素指数分解结果

Fig. 5 The comparison of decomposition results for the six periods

p-effect: 人口规模效应 Population size effect; g-effect: 经济产出效应 Economic growth effect; e-effect: 能源强度效应 Energy intensity effect; s-effect: 能源结构效应 Energy structure effect; f-effect: 能源替代效应 Energy penetration effect

矿产资源和旅游资源,在西部大开发一系列战略部署、政策支持下,国民经济发展进入了一个新的阶段,GDP 年均增长速度高达 13.28%。与此同时,随着矿产资源的勘探开发进一步升级,石油天然气化工基地和煤电煤化工基地建设不断扩大规模,有色金属工业和盐化工业异军突起,第二产业产值比重由 2001 年的 38.5% 增长到 2010 年的 47.7%,在带动新疆经济发展的同时,其重型工业化趋势愈发明显,重工业比重由 2001 年的 74.64% 演变到 2010 年的 86.34%。碳排放和人均碳排放均呈现快速增长趋势,年均增长速度分别为 10.16% 和 9.33%。万元 GDP 碳排放下降速度明显减缓,年均下降速度为 4.80%。

第六阶段(2001 年—2010 年):经济产出效应依然是这一阶段碳排放增加的主要影响因子,引起的碳排放增量为 3444.71 万吨,贡献率高达 110.38%。国家实施西部大开发战略以来,新疆的国民经济呈现出快速增长趋势,GDP 年均增长速度高达 13.28%。碳排放也呈现出快速增长趋势,年均增长速度为 10.16%。主要是因为能源强度的负效应相比较于第四阶段和第五阶段有了大幅度的降低,贡献率仅为 -28.58%;并且能源结构的微弱的负效应也首次转变为微弱的正效应,引起的碳排放增量为 62.1 万吨,贡献率为 1.99%。这一阶段新疆的产业结构进一步调整,第二产业比重有明显的增长趋势,由 2001 年的 38.5% 增长到 2010 年的 47.7%;能源消费结构的优化也在近几年表现出退步现象,煤炭消费比例由 2001 年的 60.4% 调整到 2005 年的 56.1% 进而增长到 2010 年的 65.8%。说明这一时期的产业结构调整 and 能源结构优化并没有向着有利于碳减排的方向发展。

3 主要结论和政策建议

伴随着持续的经济增长,新疆的能源消费总量呈不断增长趋势,从 1952 年到 2010 年的 59 年间增长了 210.95 倍,依据 IPCC 碳排放计算指南的核算结果,1952 年—2010 年间新疆能源消费的碳排放总量呈不断增长趋势,从 1952 年到 2010 年的 59 年间增长了 188.23 倍,煤炭消费是新疆碳排放的最主要来源,煤炭消费占新疆一次能源消费的碳排放比例多年来在 70 以上。2001 年—2010 年,国家实施西部大开发战略,新疆的国民经济快速增长,能源消费的碳排放也呈现快速增长趋势,10 年间年均增长速度达到 10.16%。

采用基于 LMDI 的完全分解模型,解析了 1952 年—2010 年新疆的一次能源消费的碳排放的主要驱动因素。定量分析了人口规模效应、经济产出效应、能源强度效应、能源结构效应和能源替代效应在六个不同发展阶段的贡献作用,主要的研究结论如下:

(1) 经济产出效应和人口规模效应是新疆碳排放增长的最主要贡献因子。在不同的发展阶段经济产出效应和人口规模效应对碳排放增长的贡献程度不同,尤其是 1978 年之后,经济的快速增长和计划生育政策的实施,经济产出效应对碳排放增长的贡献程度远远超过了人口规模效应。

(2) 能源强度效应在 1978 年之前的三个发展阶段,对碳排放的增长表现为正效应,主要的原因是极低的能源利用效率和过时的生产工艺。改革开放之后,能源强度效应成为遏制碳排放增长的重要贡献因子。

(3) 能源结构效应和能源替代效应也是遏制新疆碳排放增长的主要贡献因子,但是其贡献作用还比较小。能源替代效应的贡献程度较低,主要是因为可再生能源在能源消费总量中的比重还比较低。能源结构效应的贡献程度较低,主要是因为以煤为主的能源消费结构还没有发生根本性的改变;甚至在第六阶段能源结构效应表现出微弱的正效应,主要原因是高碳能源-煤炭在能源消费总量中的比重上升。

在过去 1952 年—2010 年的 59 年间,能源消费增长作为直接因素影响新疆碳排放总量的增长,人口增长、经济发展、能源结构作为间接因子共同影响着新疆碳排放总量的变化。新疆,中国西部的欠发达区域,如何在保持社会经济持续快速发展的同时实现碳排放的减速增长是现阶段的重要的发展命题,对于实现国家的减排目标有着至关重要的作用。

(1) 现阶段,新疆的经济发展将继续保持快速增长,考虑到经济产出效应对碳排放增长的强大正效应,经济结构的优化和升级将是平衡经济增长和碳排放增加的有效途径,应该关注并培育新兴的低碳产业,尤其是可再生能源产业,新材料工业,节能减排和环境友好型产业等。

(2) 改革开放以来能源强度效应成为遏制碳排放增长的重要贡献因子。尽管 1978 年以来, 新疆的能源强度呈现出持续下降的趋势, 但是与全国平均水平相比仍有很大的差距存在。因此在未来一段时期内, 基于产业层面的能源消耗强度降低是新疆节能降耗工作的重点, 并推进第三产业健康快速发展以及促进第二产业高能耗产业部门向低能耗产业部门的有效转化。重点开展能源、电力、煤炭、煤化工、石油石化、钢铁、有色、纺织、装备制造等重点领域节能和清洁生产机制。按照“减量化、再利用、资源化”的要求, 加快构建资源循环利用体系, 深化循环经济试点示范, 采用高新技术和先进适用技术改造提升传统产业, 加强资源综合利用和循环利用, 推进生态工业园区建设。加快电力、煤炭、钢铁、化工、有色等重点用能企业的节能技术改造, 淘汰落后产能, 鼓励推广应用节能环保新技术、新工艺、新设备、新材料, 严格执行重点耗能产业单位产品能耗限额标准, 提高能源利用效率。

(3) 化石能源替代效应的发挥应该实现由高化石能源-煤炭, 向低化石能源-石油和天然气的过渡。新疆拥有丰富的石油和天然气资源, 在国家综合能源生产基地建设的过程中, 在更好地服务东部能源消费的同时, 应更多地为本地区争取更多的相对低碳能源。新疆独特的地缘政治优势, 为开展面向中亚的能源“走出去”战略奠定了良好的基础, 应进一步加速开展与中亚国家在石油和天然气的开采、运输、利用等方面的深度合作, 进一步提升石油和天然气的消费比重。能源结构效应是遏制碳排放增长的重要贡献因子, 但是作用程度较低。新疆拥有丰富的可再生能源, 尤其是风能和太阳能, 可再生能源在能源消费总量中的比重应得到很大程度的提升。加大对可再生能源产业的支持力度, 拓宽可再生能源产业的投融资渠道, 加速可再生能源产业的技术进步。

参考文献 (References):

- [1] Kennedy C, Steinberger J, Gasson B, Hansen Y, Hillman T, Havrůnek M, Pataki D, Phdungsilp A, Ramaswami A, Mendez G V. Greenhouse gas emissions from global cities. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(19): 7297-7302.
- [2] Guan D B, Liu Z, Geng Y, Lindner S, Hubacek K. The gigatonne gap in China's carbon dioxide inventories. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 672-675.
- [3] Mahony T O. Decomposition of Ireland's carbon emissions from 1990 to 2010: an extended Kaya identity. *Energy Policy*, 2013, 59: 573-581.
- [4] Geng Y, Zhao H Y, Liu Z, Xue B, Fujita T, Xi F M. Exploring driving factors of energy-related CO₂ emissions in Chinese provinces: A case of Liaoning. *Energy Policy*, 2013, 60: 820-826.
- [5] Sheinbaum-Pardo C, Mora-Pérez S, Robles-Morales G. Decomposition of energy consumption and CO₂ emissions in Mexican manufacturing industries: Trends between 1990 and 2008. *Energy for Sustainable Development*, 2012, 16(1): 57-67.
- [6] Jotzo F, Burke P J, Wood P J, Macintosh A, Stern D I. Decomposing the 2010 global carbon dioxide emissions rebound. *Nature Climate Change*, 2012, 2(4): 213-214.
- [7] Meng M, Niu D X, Shang W. A small-sample hybrid model for forecasting energy-related CO₂ emissions. *Energy*, 2014, 64: 673-677.
- [8] Zhou N, Fridley D, Khanna N Z, Ke J, McNeil M, Levine M. China's energy and emissions outlook to 2050: Perspectives from bottom-up energy end-use model. *Energy Policy*, 2013, 53: 51-62.
- [9] Wang Y F, Liang S. Carbon dioxide mitigation target of China in 2020 and key economic sectors. *Energy Policy*, 2013, 58: 90-96.
- [10] Wang K, Zhang X, Wei Y M, Yu S W. Regional allocation of CO₂ emissions allowance over provinces in China by 2020. *Energy Policy*, 2013, 54: 214-229.
- [11] Li J F, Wang X, Zhang Y X. Is it in China's interest to implement an export carbon tax? *Energy Economics*, 2012, 34(6): 2072-2080.
- [12] Jin W. Can technological innovation help China take on its climate responsibility? An intertemporal general equilibrium analysis. *Energy Policy*, 2012, 49: 629-641.
- [13] Maisonnave H, Pycroft J, Saveyn B, Ciscar J C. Does climate policy make the EU economy more resilient to oil price rises? A CGE analysis. *Energy Policy*, 2012, 47: 172-179.
- [14] Qi T Y, Winchester N, Karplus V J, Zhang X L. Will economic restructuring in China reduce trade-embodied CO₂ emissions? *Energy Economics*, 2014, 42: 204-212.
- [15] Duro A J. Decomposing international polarization of per capita CO₂ emissions. *Energy Policy*, 2010, 38(11): 6529-6533.
- [16] Steckel J C, Jakob M, Marschinski R, Luderer G. From carbonization to decarbonization? -Past trends and future scenarios for China's CO₂

- emissions. *Energy Policy*, 2011, 39(6): 3443-3455.
- [17] Jung S, An K J, Dodbiba G, Fujita T. Regional energy-related carbon emission characteristics and potential mitigation in eco-industrial parks in South Korea: Logarithmic mean Divisia index analysis based on the Kaya identity. *Energy*, 2012, 46(1): 231-241.
- [18] Tokimatsu K, Kosugi T, Asami T, Williams E, Kaya Y. Evaluation of lifecycle CO₂ emissions from the Japanese electric power sector in the 21st century under various nuclear scenarios. *Energy Policy*, 2006, 34(7): 833-852.
- [19] Iskin I, Daim T, Kayakutlu G, Altuntas M. Exploring renewable energy pricing with analytic network process-Comparing a developed and a developing economy. *Energy Economics*, 2012, 34(4): 882-891.
- [20] Baris K, Kucukali S. Availability of renewable energy sources in Turkey: Current situation, potential, government policies and the EU perspective. *Energy Policy*, 2012, 42: 377-391.
- [21] 王长建, 杜宏茹, 汪菲. 能源消费对新疆经济发展的影响机理. 干旱区研究, 2014, 31(6): 1163-1169.
- [22] 杜宏茹, 李雪梅, 王长建. 新疆能矿资源型产业发展及其区域效应研究. 干旱区研究, 2011, 28(2): 363-369.
- [23] 霍金炜, 杨德刚, 唐宏. 新疆碳排放影响因素分析与政策建议. 地理科学进展, 2012, 31(4): 435-441.
- [24] 钱冬, 郭菊娥, 薛勇, 安尼瓦尔·阿木提. 新疆能源强度影响因素及其治理策略. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(5): 139-146.
- [25] 张新林, 王强, 王长建, 鲁建荣. 新疆 1990—2010 年能源消费碳排放脱钩及其驱动因素分析. 资源与产业, 2014, 16(2): 76-82.
- [26] Liang S, Zhang T Z. What is driving CO₂ emissions in a typical manufacturing center of South China? The case of Jiangsu Province. *Energy Policy*, 2011, 39(11): 7078-7083.
- [27] Xi F M, Geng Y, Chen X D, Zhang Y S, Wang X B, Xue B, Dong H J, Liu Z, Ren W X, Fujita T, Zhu Q H. Contributing to local policy making on GHG emission reduction through inventorying and attribution: A case study of Shenyang, China. *Energy Policy*, 2011, 39(10): 5999-6010.
- [28] Su B, Ang B W. Structural decomposition analysis applied to energy and emissions: Some methodological developments. *Energy Economics*, 2012, 34(1): 177-188.
- [29] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide. *Energy Policy*, 2005, 33(7): 867-871.
- [30] Ang B W, Liu F L. A new energy decomposition method: perfect in decomposition and consistent in aggregation. *Energy*, 2001, 26(6): 537-548.
- [31] Ang B W, Liu F L, Chew E P. Perfect decomposition techniques in energy and environmental analysis. *Energy Policy*, 2003, 31(14): 1561-1566.
- [32] Zhang X P, Tan Y K, Tan Q L, Yuan J H. Decomposition of aggregate CO₂ emissions within a joint production framework. *Energy Economics*, 2012, 34(4): 1088-1097.
- [33] Lise W. Decomposition of CO₂ emissions over 1980—2003 in Turkey. *Energy Policy*, 2006, 34(14): 1841-1852.
- [34] de Freitas L C, Kaneko S. Decomposition of CO₂ emissions change from energy consumption in Brazil: Challenges and policy implications. *Energy Policy*, 2011, 39(3): 1495-1504.
- [35] Hasanbeigi A, de la Rue du Can S, Sathaye J. Analysis and decomposition of the energy intensity of California industries. *Energy Policy*, 2012, 46: 234-245.
- [36] Zhao M, Tan L R, Zhang W G, Ji M H, Liu Y, Yu L Z. Decomposing the influencing factors of industrial carbon emissions in Shanghai using the LMDI method. *Energy*, 2010, 35(6): 2505-2510.
- [37] Zhao X L, Li N, Ma C B. Residential energy consumption in urban China: A decomposition analysis. *Energy Policy*, 2012, 41: 644-653.
- [38] Zha D L, Zhou D Q, Zhou P. Driving forces of residential CO₂ emissions in urban and rural China: An index decomposition analysis. *Energy Policy*, 2010, 38(7): 3377-3383.
- [39] Wang C, Chen J N, Zou J. Decomposition of energy-related CO₂ emission in China: 1957—2000. *Energy*, 2005, 30(1): 73-83.
- [40] Zhao X L, Ma C B, Hong D Y. Why did China's energy intensity increase during 1998—2006: Decomposition and policy analysis. *Energy Policy*, 2010, 38(3): 1379-1388.
- [41] Inglesi-Lotz R, Pouris A. Energy efficiency in South Africa: A decomposition exercise. *Energy*, 2012, 42(1): 113-120.
- [42] Liao H, Fan Y, Wei Y M. What induced China's energy intensity to fluctuate: 1997—2006? *Energy Policy*, 2007, 35(9): 4640-4649.
- [43] González D, Martínez M. Decomposition analysis of CO₂ emissions in the Mexican industrial sector. *Energy for Sustainable Development*, 2012, 16(2): 204-215.
- [44] Wu L B, Kaneko S, Matsuoka S. Driving forces behind the stagnancy of China's energy-related CO₂ emissions from 1996 to 1999: the relative importance of structural change, intensity change and scale change. *Energy Policy*, 2005, 33(3): 319-335.