

· 环境管理 ·

## 基于Theil指数KAYA分解的中国碳排放差异性分析

王 克, 姚幸颖, 刘琦媛  
(中国人民大学环境学院, 北京 100872)

**摘 要:** 为了量化2005至2010年中国各省区市之间碳排放差异性及其变化趋势, 本文运用Theil指数KAYA分解方法进行研究, 结果表明: 全国人均碳排放差异逐年减小, 能源强度是差异的主要影响因素, 人均GDP是人均碳排放差异缩小的主要原因; 东中西部和东北地区区域划分方法的组内差异大于组间差异, 且中西部地区内部差异是造成全国差异的主要原因; 相对“十一五”能源强度目标分解, “十二五”碳强度目标分解已考虑省市区差异, 但其基本上根据人均GDP差异进行分组, 且很大程度沿用了东中西部和东北地区区域划分。因此, 建议在对各省区市分配减排指标时, 考虑各地经济发展水平差异的同时兼顾产业结构和资源禀赋, 并根据中西部地区内部排放差异将目标分解方案精细化

**关键词:** 碳排放; 差异性; KAYA分解; Theil指  
**中图分类号:** X24

**文献标志码:** A

### Analysis of Inequalities in Regional Carbon Emissions in China Based on Theil Index and KAYA Factors

Wang Ke, Yao Xingying, Liu Qiyuan  
(School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

**Abstract:** In this paper, Theil index and KAYA factors are used to quantify the inequality and variation trend of carbon emissions respectively in the provinces, regions and cities in China from 2005 to 2010. The results show that inequality of national carbon emission per capita decreases year by year with energy intensity as the main influencing factor, while per capita GDP is the major cause for the alleviating difference in per capita carbon emission. According to the decomposition of eastern, central, western and northeast regions, the inequalities within the regions are greater than those between the regions. Furthermore, the inequalities within central and western regions are the main cause for the national inequality. In comparison with the assignment of energy intensity target in the “Eleventh-Five-Year Work Plan”, the inequalities between the provinces, regions and cities have been taken into consideration for the assignment of carbon intensity target in the “Twelfth-Five-Year Work Plan”. However, grouping is basically performed according to the inequality of per capita GDP, following the regional division of eastern, central, western and northeast regions. Therefore, it is recommended that imbalance of economic development, industrial structure and resource endowment among different provinces, regions and cities should be considered during allocation of emission reduction targets and target decomposition plan should be specified in details according to the inequalities of emission within the central and western regions.

**Keywords:** Carbon Emission; Inequality; Decomposition by KAYA Factors; Theil Index

CLC number: X24

中国已经提出到2015年全国单位国内生产总值二氧化碳排放要比2010年下降17%, 并写入了“十二五”规划《纲要》, 且在国际上承诺2020年前要在2005年基础上降低40%至45%的碳强度目标<sup>[1]</sup>。为了完成减排任务, 中国采用目标责任制, 将目标分解至各个省、直辖市和自治

区, 再逐层分解。目标分解过程中, 通用原则是效率、效果和公平。“十一五”期间的能源强度目标分解大体上属于平均分配, 而“十二五”目标的分解则部分考虑到了各个省区市之间的差异。但是, 目前中国各个省区市之间碳排放差异以及差异的动态变化尚不明确, 因此需要有一个

**收稿日期:** 2014-02-14

**作者简介:** 王 克 (1979-), 男, 讲师、硕士生导师。研究方向: 能源与气候变化战略与政策研究、国际谈判制度经济分析。E-mail: wangkert@gmail.com

指标和方法进行量化，为目标的分配提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 方法学

国内外用差异指数法计算碳排放或能源消耗的研究并不多，主要集中在Gini指数、CV、Theil指数、Kakwani指数等。国际上，全球的差异指数分析主要是为碳排放责任在不同国家分配提供理论依据和政策指导，如Heil和Wodon利用Gini指数进行分解，分析两个收入群国家（穷国与富国）CO<sub>2</sub>排放的差异性<sup>[2]</sup>；Alcantara和Duro利用Theil指数法分析了OECD国家1971年到1999年能源强度的差异性，并得出能源强度差异的降低是由区域内与区域间共同贡献，且后者为主要因素<sup>[3]</sup>；Duro et al.<sup>[4]</sup>依据卡亚公式对四个不同年份的人均碳排放Theil指数进行因素分解，结果表明国际的人均碳排放差异性主要由人均收入差异造成；Padilla et al.<sup>[5]</sup>套用了多个用于衡量收入差异性的工具，对1971年至1999年全球各国以及各地区CO<sub>2</sub>排放的差异性作分析，主要研究GDP与CO<sub>2</sub>排放的关系。国内学者查冬兰、梁竞等也略有涉及地区的能源利用差异性计算<sup>[6-7]</sup>。可见，目前的研究直接针对中国各省区市之间的碳排放差异及差异主要来源的研究相对较少，且在国家碳强度目标分解背景下，关于不同分组方案下的组内和组间差异及差异来源研究也较为缺乏。

本文在国内外碳排放驱动因素研究的基础上，针对我国在相关方面研究的薄弱点，选用Theil指数KAYA分解，提出并解决以下几个问题：①利用Theil指数定量中国除西藏之外30个省区市的碳排放差异以及2005至2010年间的动态变化；②运用KAYA分解方法识别驱动地区间碳排放差异扩大或缩小的主要因素，并进一步分析造成各个KAYA因子差异变化的原因；③通过Theil指数KAYA分解方法，分析东中西部和东北地区区域划分以及“十二五”规划碳强度目标分解的不同分类方法下组间和组内的碳排放差异性。

本研究首先计算中国各省区市的碳排放差异

性。设碳排放差异值为T，将Theil-L指数公式<sup>[8]</sup>改写为如下形式：

$$T = \sum_{i=1}^n p_i \ln \frac{\bar{c}}{c_i} \quad (1)$$

其中， $c_i$ 为*i*地区人均二氧化碳排放量， $p_i$ 为*i*地区人口占全国人口的比重， $\bar{c}$ 为全国平均二氧化碳排放量。Theil指数越大，表示各地区间指标水平差异越大；反之，则差异越小。

其次，为探讨碳排放差异的影响因素，利用KAYA因子将人均碳排放进行分解。根据研究需要，将KAYA公式<sup>[9]</sup>改写如下：

$$\frac{CO_2}{P} = \frac{GDP}{P} \times \frac{E}{GDP} \times \frac{CO_2}{E} \quad (2)$$

由此，将人均碳排放依次分解为分别反映能源结构、能源效率和经济部门结构以及经济生产情况的三个因子：能源强度（即单位GDP的能源消耗）、能源碳强度（即单位能源消费产生的二氧化碳排放）以及人均GDP。下文将以上三个KAYA因子分别表示为*a*、*b*和*y*。

由于三个KAYA因子相互独立的差异程度，可以用公式（1）分别计算其各自的差异值，即 $T^a$ 、 $T^b$ 和 $T^y$ 。另外，考虑交互作用，定义 $inter_{a,by}$ 和 $inter_{b,y}$ 分别表示能源强度-碳排放系数和能源碳强度-人均GDP的交互作用。由此，各省区市之间的人均二氧化碳排放总差异指数*T*可分解为独立的三个KAYA因子和两个交互成分，即：

$$T = T^a + T^b + T^y + inter_{a,by} + inter_{b,y} \quad (3)$$

其中， $inter_{a,by} = \log \frac{\bar{c}}{c^a} = \log(1 + \frac{\bar{\sigma}_{a,by}}{c^a})$ ， $inter_{b,y} = \log \frac{\bar{c}}{c^b} = \log(1 + \frac{a\bar{\sigma}_{by}}{c})$ 。

在KAYA分解基础上，可将Theil指数进行二次分解，以探究导致各个KAYA因子差异的深层次原因：

$$T = \sum_{i=1}^M S_i \sum_{j=1}^N S_j S_i \frac{X_{ij}}{X} \ln \frac{X_{ij}}{X} \quad (4)$$

其中， $S_i$ 表示部门能耗占全国能耗的比重， $S_j$ 表示地区GDP占全国GDP的比重， $X_{ij}$ 表示地区部门的能源强度。 $X_i = \sum_{j=1}^N S_j X_{ij}$ ， $Z_i = \sum_{j=1}^N S_j X_{ij} \ln X_{ij}$ 。

在此基础上，Theil指数可以进行分组分解，以研究组内和组间差异程度。公式如下：

$$T = \sum_{g=1}^G P_g T_g + \sum_{g=1}^G P_g \ln \frac{\bar{c}}{c_g} \quad (5)$$

其中,  $p_g$ 代表 $g$ 组人口占总人口比重,  $T_g$ 则是 $g$ 组 $CO_2$ 排放的差异值,  $c_g$ 表示 $g$ 组内平均二氧化碳排放,  $\bar{c}$ 为全国平均二氧化碳排放。  $\sum_{g=1}^G P_g T_g$ 表示组内差异,  $\sum_{g=1}^G P_g \ln \frac{\bar{c}}{c_g}$ 表示组间差异。

同理, 二次分解时也可以作组内和组间差异分析, 根据公式(5)将公式(4)进行改写如下:

$$T = \sum_{i=1}^M S_i \frac{x_i}{x} (\frac{z_i}{x_i} - \ln X_i) + \sum_{i=1}^M S_i \frac{x_i}{x} \ln \frac{x_i}{x} \quad (6)$$

其中, 第一项表示内差异, 第二项表示组间差异。

### 1.2 数据需求及来源

本研究需要搜集全国除西藏之外的30个省区市2005至2010年人口、经济、能源消费以及 $CO_2$ 排放相关数据, 本研究的数据需求及相应的数据来源见表1。

表1 数据需求与数据来源对照表

变量	变量解释	单位	数据来源	数据加工
人口	全年各省年末人口总数	万人		无
GDP	实际全国各省生产总值	亿元	中国统计年鉴	以2005为基准年, 利用GDP平减指数对往年进行调整
投资	实际全国各省资本形成总额	亿元		
消费	实际全国各省最终消费支出总额	亿元		
部门产值	一产、二产、三产、生活部门产值	亿元		
能源消耗	各省能源消耗总量	万吨标准煤	中国能源统计年鉴	利用全国(地区)能源平衡表(实物量)进行核算 <sup>[10]</sup>
$CO_2$ 排放量	各省二氧化碳排放量	万吨 $CO_2$		
能源碳强度	全国各省各类能源的碳密度	吨 $CO_2$ /吨标准煤		
部门能源强度	一产、二产、三产、生活部门单位产值能耗	吨标准煤/万元	中国统计年鉴、中国能源统计年鉴	生活部门的产值用居民收入代替 部门能耗与部门产值之比, 部门能耗数据利用全国(地区)能源平衡表(实物量)进行核算

## 2 结果分析

### 2.1 中国省级碳排放差异及驱动因素分析

#### 2.1.1 省级碳排放差异

按照上述方法, 计算

中国各省区市2005至2010年人均碳排放以及三个KAYA因子的差异指数, 分析差异性趋势及影响因素。结果见表2。

表2 全国各省区市人均碳排放及其影响因素差异指数

t/a	人均碳排放	人均GDP	能源强度	能源碳强度
2005	0.202	0.176	0.183	0.010
2006	0.202	0.166	0.185	0.011
2007	0.193	0.154	0.171	0.010
2008	0.203	0.140	0.183	0.012
2009	0.188	0.144	0.170	0.017
2010	0.175	0.106	0.151	0.023

由表2可见, 2005至2010年, 全国各省区市人均碳排放差异指数从0.202下降至0.175, 降幅约14%, 说明全国地区间碳排放存在一定的差异, 但差异总体呈缩小趋势。究其原因, 中国幅员辽阔, 地区之间人口、经济、文化、生活、资源禀赋、产业结构等方面的差异较大, 发展不平衡, 导致了各省区市碳排放存在差异。近年来, 随着产业结构调整 and 能源结构优化, 早年人均碳排放较高的北京、上海等地区出现下降趋势, 而早年人均碳排放较少的内蒙古、宁夏等地区则由于经济发展等因素人均碳排放逐渐增大, 并且增

速大于人均碳排放较高的地区, 因此出现全国整体人均碳排放地区差异减小的趋势。

进一步分析影响人均碳排放三个影响因素, 除能源碳强度外, 人均GDP和能源强度差异指数均呈下降趋势, 其中又以人均GDP降幅最大, 达40%左右。由此可见, 全国地区间的收入以及能源利用效率差距缩小, 即部分经济落后地区加快发展, 同时改良能源技术以提高效率, 逐渐缩小与发达地区的差距, 而能源资源禀赋以及能源分配的差异性扩大, 即部分地方强化了煤炭的使用, 而部分地方则增大了天然气等清洁能源的使

用。另外，由人均GDP差异指数降幅最大，可得出人均碳排放差异缩小主要由人均GDP差异缩小引起的结论。

2.1.2 省级碳排放差异驱动因素 为进一步分析各省区市之间产生差异性的驱动因素，将全国

各省区市的人均碳排放差异指数分解为三个独立的KAYA因子以及两个交互成分，对中国2005至2010年除西藏之外的30个省区市人均碳排放差异指数作一次分解，结果见表3。

表3 全国各省区市排放差异的驱动因素一次分解和贡献率

<i>t/a</i>	Theil 指数	人均 GDP	能源碳强度	能源强度	<i>inter<sub>a,by</sub></i>	<i>inter<sub>b,y</sub></i>
2005	0.202	0.176(87%)	-0.012(-6%)	0.184(91%)	0.008(4%)	-0.154(-76%)
2006	0.202	0.093(46%)	-0.010(-5%)	0.264(131%)	0.009(4%)	-0.154(-76%)
2007	0.193	0.153(79%)	-0.008(-4%)	0.181(90%)	0.008(4%)	-0.142(-73%)
2008	0.203	0.140(69%)	-0.009(-4%)	0.183(90%)	0.010(5%)	-0.121(-60%)
2009	0.188	0.144(77%)	-0.011(-6%)	0.170(91%)	0.005(2%)	-0.119(-64%)
2010	0.175	0.106(61%)	0.002(1%)	0.151(87%)	0.013(8%)	-0.098(-56%)

由表3可见，能源强度的差异指数最大，年平均约0.189，且贡献率保持在90%左右；人均GDP其次，年平均约0.135，贡献率在60%至90%之间；能源碳强度差异贡献最小，贡献率在10%以内。因此，可以将造成中国人均碳排放差异的主要因素归结为能源强度，此结论与国际研究相呼应，Duro等人认为全球人均碳排放差异主要受人均GDP即收入影响，而将中国和印度从样本中刨除后人均GDP差异的贡献率明显降低<sup>[4]</sup>。可见改善能源强度可能对中国等新兴经济体完成减排目标起关键作用。

接下来分别对三个KAYA因子作二次分解分析，其中，人均GDP分别按支出法和三产两种方法进行分解，能源强度分别按能耗部门和能源品种两种方法进行分解，能源碳强度按能源品种进行分解。二次分解结果如图1所示，分析结果如下：

(1) 按支出法分解人均GDP，投资的差异即全国各地投资额的不均衡是造成全国人均GDP差异的主要因素，其贡献率达55%以上，同时，投资和消费的差异指数均呈下降趋势，投资消费间结构的差异指数则增大，说明各省区市的支出水平逐渐趋同，而投资与消费间的差异日益显著。

(2) 按三产分解人均GDP，第二产业的差

异贡献率约37%左右，可见各地区第二产业发展不均衡是造成全国收入差异的主要原因。近年来随着第三产业的日益发展，第三产业差异贡献率不断提高，同时产业间差异指数略有缩小，预计第三产业将代替第二产业成为影响全国人均GDP差异的主要因素。

(3) 按能源消耗部门分解能源强度，部门间和第二产业能源强度差异为主，贡献率分别为56.7%和41.8%左右，而第一、第三产业以及生活部门的能源强度差异影响较小，三者贡献率总计不到2%。由此反映出全国第二产业能源利用效率较其他部门的不均衡发展，这也与部门间能源强度差异影响最大的结论相呼应。

(4) 按能源品种分解能源强度，全国使用煤炭的差异为主导因素，贡献率达60%左右，远远大于石油、天然气等其他能源的使用差异贡献率，而能源品种间差异相应较高，约37%左右。这一现象可能由宁夏、贵州、内蒙古、山西等能源粗放型省份的单位GDP煤炭使用量远高于其他能源品种且高于其他轻化工型地区造成。

(5) 按能源品种分解能源碳强度，造成差异的主要贡献因素是能源品种间能源碳强度的差异，其贡献率在80%左右。究其原因，煤炭始终是中国消费的主要能源，且其排放系数高于石油、天然气等其他能源。

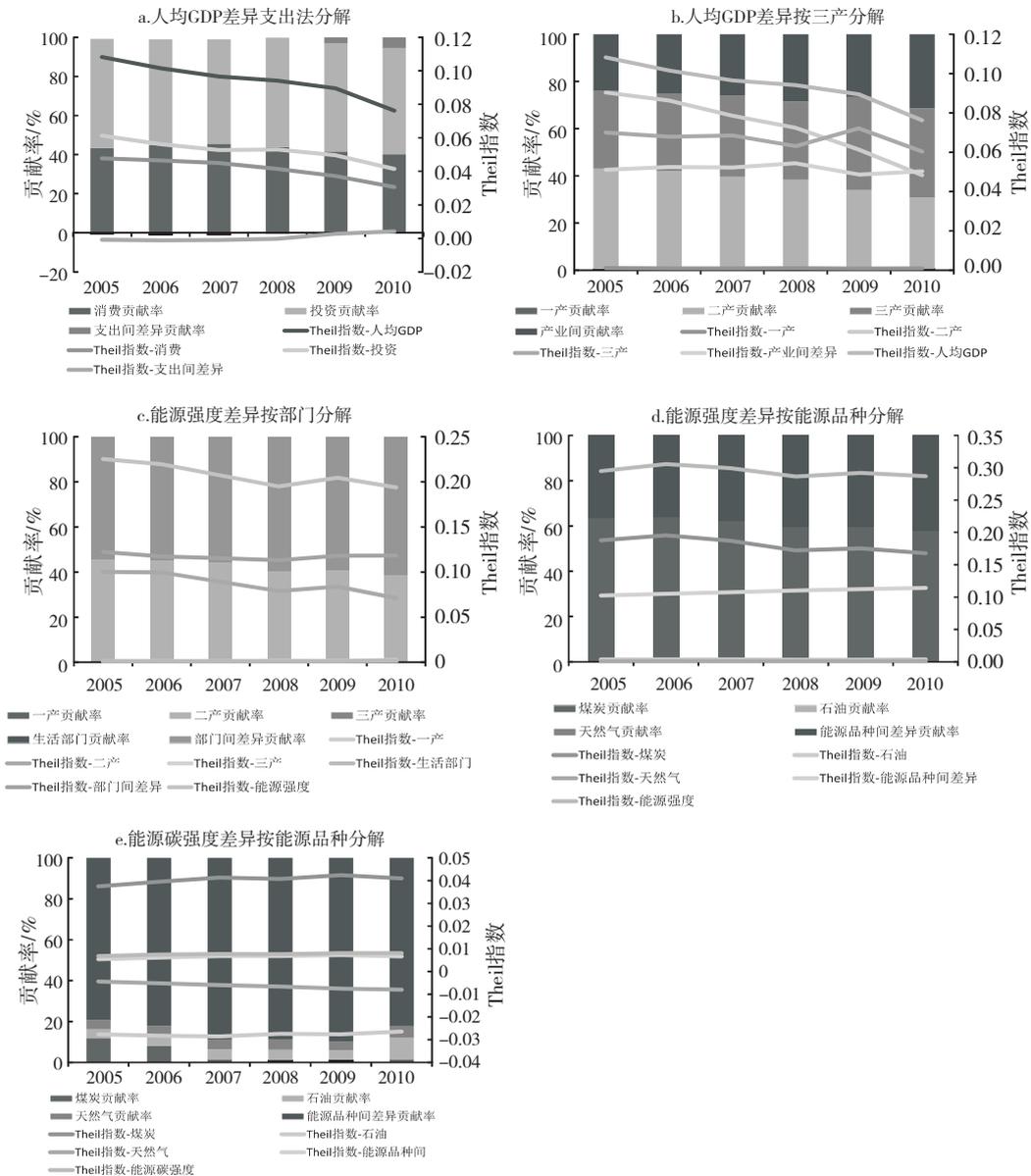


图1 人均GDP、能源强度、能源碳强度三个KAYA因子的二次分解

2.2 不同区域分组方法碳排放差异分析

2.2.1 中国东中西部和东北地区区域划分方法 根据近年来国家促进中部崛起、西部大开发等计划

提出的东中西部和东北地区区域划分方法，对东中西部和东北地区2005至2010年人均碳排放进行差异分解。结果见表4。

表4 全国东中西部和东北地区人均碳排放差异指数分解

t/a	T	区域差异指数					区域差异贡献率/%				
		东部	中部	西部	东北部	区域间	东部	中部	西部	东北部	区域间
2005	0.200	0.020	0.084	0.100	-0.003	-0.002	10.2	42.3	50.2	-1.5	-1.2
2006	0.197	0.020	0.082	0.103	-0.003	-0.005	10.1	41.6	52.1	-1.3	-2.6
2007	0.200	0.018	0.079	0.098	-0.002	0.007	9.0	39.4	49.1	-1.0	3.5
2008	0.190	0.015	0.089	0.097	-0.002	-0.010	7.7	47.1	51.4	-0.8	-5.4
2009	0.173	0.015	0.093	0.075	-0.001	-0.009	8.8	53.7	43.2	-0.7	-5.0
2010	0.349	0.007	0.083	0.086	-0.002	0.175	4.3	49.3	51.0	-1.1	-3.4

2005至2010年间,东中西部和东北地区的区域内平均差异指数分别为0.016, 0.085, 0.093和-0.002,基本大于区域间的平均差异指数0.008。由此可见,对于人均碳排放而言,传统的东中西空间格局概念已模糊化。对东中西部和东北地区四个地区作贡献率分析,西部和中部地区人均碳排放差异的贡献率分别约为49.5%和45.5%,成为造成2005至2010年间全国差异的主要贡献因素,同时,东部差异指数逐年下降,从2005年的

10.2%降低到了2010年的4.3%,说明东部地区碳排放呈趋同发展。

进一步分析造成不同区域碳排放差异的因素,如图2所示,造成东部地区碳排放差异的主要因素为人均GDP,其贡献率约占55%左右,即碳排放主要随地区的收入高低而不同,中部、西部以及东北部地区差异的主要影响因素均为能源强度,分别约为64%、70%和73%,即这些区域的碳排放受能源利用效率的影响较大。

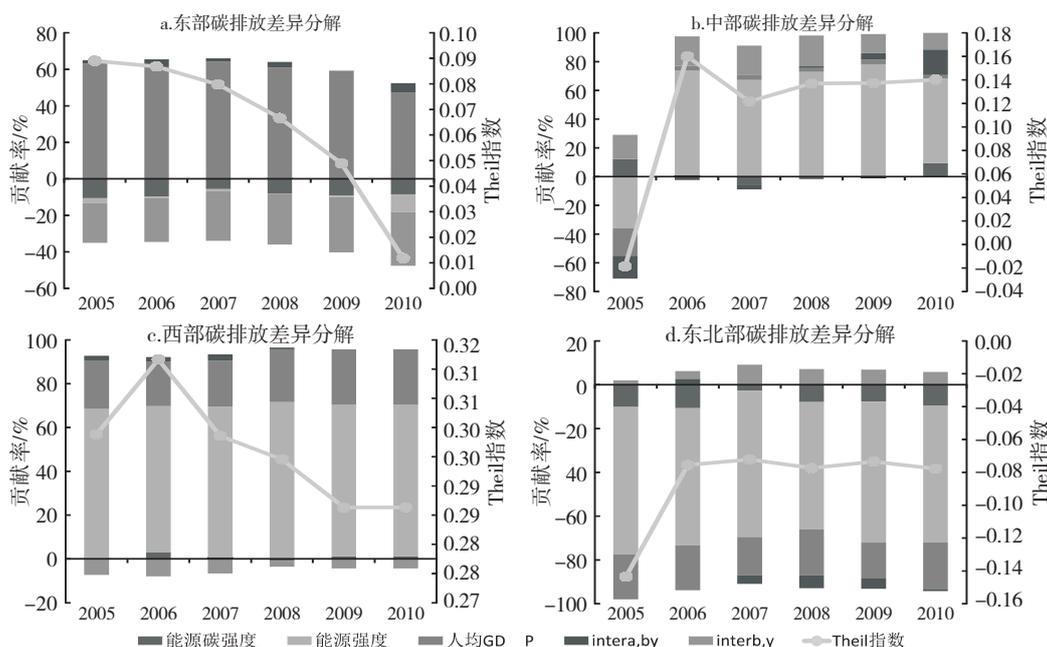


图2 2005至2010年间全国东中西及东北部人均碳排放差异KAYA分解

2.2.2 “十二五”碳强度目标分解的分类方法 根据国家发改委2011年12月下发的《“十二五”控制温室气体排放工作方案》中各地区单位国内生产总值二氧化碳排放下降指标分配方案(见表5),将全国30个省市区分为五类,五类地区的

减排目标区间分别为19%至20%、17.5%至18%、17%、16%至16.5%和10%至11%,在此分组基础上进行组内和组间差异性分析。由于国家“十二五”根据单位GDP碳排放下降提出,此处顺势作单位GDP碳排放的差异分解,见图3。

表5 东中西部和东北地区各省区市“十二五”碳强度目标

东部	目标/%	中部	目标/%	西部	目标/%	东北部	目标/%
广东	19.5	山西	17	四川	17.5	辽宁	18
天津	19	安徽	17	陕西	17	吉林	17
上海	19	江西	17	重庆	17	黑龙江	16
江苏	19	河南	17	云南	16.5		
浙江	19	湖北	17	贵州	16		
北京	18	湖南	17	甘肃	16		
山东	18			宁夏	16		
河北	18			内蒙古	16		
福建	17.5			广西	16		
海南	11			新疆	11		
				西藏	10		
				青海	10		

根据表5和图3的分析结果，得出以下结论：

(1) 组间和组内的单位GDP碳排放差异贡献率分析表明(图3.b)，组间差异指数占全国差异指数的60%左右，大于组内差异，而组内差异指数相对较小，说明该目标分解方法已考虑省市区市差异，政策基本合理。

(2) “十二五”指标的分解呈现自东向西

减排目标依次下降的趋势(见表5)，基本根据人均GDP差异进行分组，说明此目标分解存在一定的改进空间。

(3) 该目标分解方法仍存在30%至40%的组内差异，说明目前的分组仍不够精细，存在组内(尤其是西中部地区)的不公平性，组内的差异性尚可进一步区分。

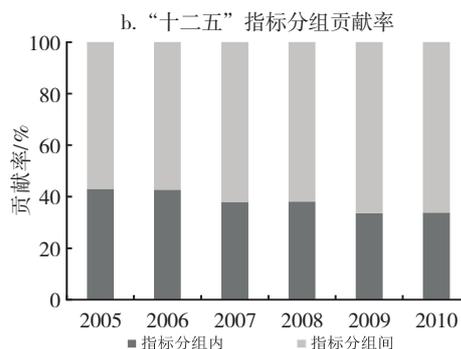
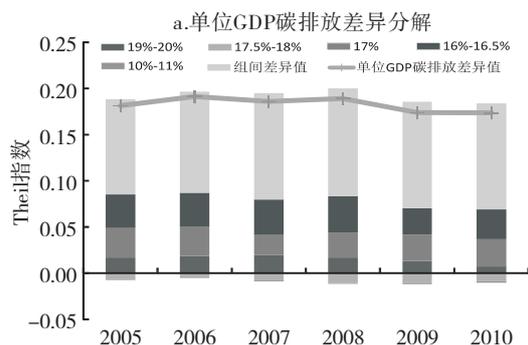


图3 “十二五”碳强度目标分解分类的单位GDP碳排放差异和分组贡献率

### 3 结论

本研究结果表明，全国人均碳排放差异逐年减小，能源强度是差异的主要影响因素，人均GDP是人均碳排放差异缩小的主要原因；东中西部和东北地区区域划分方法的组内差异大于组间差异，且中西部地区内部差异是造成全国差异的主要原因；相对“十一五”能源强度目标分解，“十二五”碳强度目标分解已考虑省市区差异，具有一定的政策合理性，但其基本上根据人均GDP差异进行分组，且很大程度沿用了东中西部和东北地区区域划分。因此，建议在未来对各省市区分配减排指标和任务时，应考虑各省区市的能源强度差异，即产业结构和资源禀赋的差异，而不是单单考虑各省的经济发展水平，如进一步考虑区域内尤其是中西部组内的排放差异，使分组更精细化。

### 参考文献

[1]全国人民代表大会第十一届四中全会. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要[M]. 北京:人民出版社,2011.

[2]Heil M T, Wodon Q T. Inequality in CO<sub>2</sub> emissions between poor and rich countries[J]. Journal of Environment and Development, 1997, 6: 426-452.

[3]Alcantara V, Duro J A. Inequality of energy intensities across OECD countries: a note[J]. Energy Policy, 2004, 32(11): 1257-1260.

[4]Duro J A, Padilla E. International inequalities in per capita CO<sub>2</sub> emissions: A decomposition methodology by Kaya factors[J]. Energy Economics, 2006, 28(2):170-187.

[5]Padilla E, Serrano A. Inequality in CO<sub>2</sub> emissions across countries and its relationship with income inequality: A distributive approach[J]. Energy Policy, 2006, 34(14):1762-1772.

[6]查冬兰, 周德群. 地区能源效率与二氧化碳排放的差异性基于Kaya因素分级[J]. 系统工程, 2007, 25(11):65-71.

[7]梁竞, 张力小. 基于Theil指数的城市能源消费空间差异测度分析[J]. 中国人口、资源与环境, 2010, 20(3):85-88.

[8]Theil H, Sorooshian C. Components of the change in regional inequality[J]. Economics Letters, 1979, 4(2): 191-193.

[9]Kaya Y. Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: interpretation of proposed scenarios[A]. IPCC Energy and Industry Subgroup[C]. Response Strategies Working Group, Paris, France, 1990.

[10]崔学勤. 中国城市能源相关二氧化碳排放清单核算方法研究[D].