

引用格式:邱纪翔,罗钰星,王克,等.基于多情景假设的中国碳减排目标省域分解[J].资源科学,2022,44(10):2038-2047.[Qiu J X, Luo Y X, Wang K, et al. Provincial decomposition of China's carbon emission reduction targets based on multi-scenario hypothesis[J]. Resources Science, 2022, 44(10): 2038-2047.] DOI: 10.18402/resci.2022.10.07

基于多情景假设的中国碳减排目标省域分解

邱纪翔¹,罗钰星¹,王克²,梅应丹¹

(1. 中国石油大学(北京)经济管理学院,北京 102249;2. 中国人民大学环境学院,北京 100872)

摘要:为确保中国在2030年之前实现碳达峰的目标,对中国碳减排目标进行省域分解至关重要。本文遵循公平性、效率性和可行性3项原则,选取人均CO₂排放量、人均可支配收入、第三产业产值占GDP比重、单位GDP能耗和人均GDP水平5项分解标准,构建中国碳排放增量控制目标省域分解模型,对不同GDP增速情景(2020—2025年情景以及2025—2030年期间高、低和基准GDP增速3种情景)进行仿真模拟。研究发现:①经济发展状况与历史碳排放量是影响碳减排目标省域分解的重要因素,排名较前和较后省份的碳强度下降目标稳定,而排名居中省份的碳强度下降目标则同时受公平性、效率性和可行性原则的影响,部分省份呈现不同情景偏好下目标分组不同的特点。②中国碳达峰趋势稳定,外部冲击对于GDP增速的影响,并没有造成各省份碳减排目标的分组结果变化,因此国家目标省域分解结果整体稳定。本文结论有助于各省份灵活制定减排目标,以保证国家减排目标顺利实现。

关键词:碳减排;增量控制;地区分解模型;碳强度;多情景假设;碳达峰;碳中和;中国

DOI: 10.18402/resci.2022.10.07

1 引言

以CO₂为代表的温室气体过度排放是全球气候变暖的主要原因,中国是全球最大的碳排放国家^[1],其2020年碳排放总量占全球总量的30.7%^①,也是全球最大的发展中国家,面临着碳减排与国家发展的双重难题。为此,习近平总书记提出“CO₂排放力争于2030年前达到峰值”的目标^[2]。这一重要承诺为中国碳减排工作指明了方向,也引起了学者们对稳增长和碳减排相互关系的热烈讨论^[3,4]。目前较为通用的做法是将国家整体目标划分为各省级单位的减排目标^[5]。该做法考虑省域间差异而实行差别化减排,对更好实现中国整体碳减排目标具有重要意义。

国家碳减排目标省域分解是指为了实现国家

整体碳减排目标,需要为各省份制定相应碳减排目标,该过程属于省际尺度碳排放权分配范畴,在其实施过程中需要考虑分解对象、分解原则、分解标准和分解模型等核心问题^[6]。

首先,应考虑分解对象。分解对象经历了从“以绝对碳减排量目标为分解对象”^[7]到“以单位国内生产总值CO₂排放量(以下简称“碳强度”)下降目标为分解对象”^[8]的演变,但二者均不适合中国这样的发展中国家:前者无法满足经济发展的需要,而后者无法有效推动能源转型与产业转型^[9]。因此,本文考虑以碳强度约束下碳排放总增量目标为分解对象^[6],该方法能够同时控制碳排放的增速和增量,适合于中国现阶段内部各省域之间发展不平衡且均需发展的情况。

收稿日期:2022-04-06;修订日期:2022-07-04

基金项目:国家自然科学基金重点项目(71934006)。

作者简介:邱纪翔,男,浙江温岭人,博士研究生,研究方向为可再生能源。E-mail: 2021310904@student.cup.edu.cn

通讯作者:王克,男,江西进贤人,副教授,研究方向为气候变化经济学。E-mail: wangkert@ruc.edu.cn

① 数据来源:英国石油公司(bp):<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/co2-emissions.html>。

2022年10月

其次,应考虑分解原则,这是分解思路的反映。当前主流的碳排放目标地区分解研究与报告普遍将公平性和效率性纳入考虑,这也是《联合国气候变化框架公约》提出的“共同但有区别”分配思路的实际表现^[10,11]。公平性原则是指每个人都有谋求发展与进行碳排放的权利^[12]。效率性原则是指以较小的成本实现较大的减排效果^[13]。此外,也有学者提出可行性原则,认为应该考虑减排的经济成本等因素^[13]。本文考虑以公平性、效率性和可行性为分解原则。

再次,应考虑分解标准,这是分解原则的外在表现。基于公平性原则,人均CO₂排放量^[14]和人均历史累计CO₂排放量被选作分解标准^[15]。此外,结合中国实际情况^[16],公平性原则还应该考虑具有中国特色的“共同富裕”概念,以人均可支配收入或城乡收入差距等分解标准来体现。基于效率性原则,地区碳强度^[7]和研发支出占GDP比重^[10]被作为分解标准。基于可行性原则,地方财政收入^[7]、人均GDP水平^[17]或工业占GDP比重^[18]被视为分解标准。本文考虑以人均CO₂排放量、人均可支配收入、第三产业产值占GDP比重、单位GDP能耗和人均GDP水平为分解标准。

最后,应考虑分解模型,这是分解标准的模型表现。相关研究在《京都议定书》签订之前便有开展,如各国减排率一致模型^[19]。此后,又出现了考虑人均碳排放、人均GDP等单一分解标准的分解模型,但因未综合分析多因素而被逐渐淘汰^[20]。分解模型逐步从单分解标准向多分解标准的综合分析方向发展^[21],如欧盟“三部门法”^[22]和碳排放权省区分配模型^[13]。分解模型中分解标准的组合不断丰富,但模型的分解深度却进步较慢。多数模型的分析只能得到省份的碳排放配额而未能考虑碳强度

等深层次的指标,从而导致结果可行性较低^[5,11,12]。本文参照欧盟国际间碳减排分配模型与中国国内碳减排分配模型,建立中国碳排放增量控制目标省域分解模型。

相较以往相关文献,本文创新之处有以下3点:

①参照欧盟国际间碳减排目标分解模型建立中国碳排放增量控制目标省域分解模型,为地区分解模型的多样性作出贡献;②相较以往只能得到未来碳排放总量配额目标的研究结论^[5,11,12],结合各省份2025年社会经济发展规划中的GDP增长目标和2030年GDP增长情景假设的分析,将最终的研究结论拓展至碳强度下降目标层面,增强碳减排工作的实际可操作性;③首次将“共同富裕”理念纳入公平性原则下的分解标准选取之中,丰富了公平性原则的表现形式。

2 研究方法与数据来源

2.1 省域分解原则与标准

本文在进行碳减排目标省域分解时遵循公平性、效率性和可行性3项原则。①公平性原则:选择人均CO₂排放量和人均可支配收入作为分解标准,先对其进行去量纲化处理,再以这两个分解标准的几何平均数为单一正向分解标准。②效率性原则:选择第三产业产值占GDP比重和单位GDP能耗为分解标准。由于第三产业产值占GDP比重是体现减排难易程度的负向分解标准,先对其进行正向化处理后,再对该结果与单位GDP能耗进行去量纲化处理,最后以这两个分解标准的几何平均数为单一正向分解标准。③可行性原则:选择人均GDP水平为分解标准,是体现省份的经济实力的正向分解标准。分解原则与对应的分解标准汇总见表1。

2.2 省域分解模型

本文参考减排目标分解模型建立中国碳排放

表1 分解标准定义汇总表

Table 1 Summary of definitions of decomposition criteria

分解标准(影响方向)	分解原则	说明
人均CO ₂ 排放量(+)	公平性原则	人均CO ₂ 排放量越大的省份个体减排责任越大,应当承担越多减排任务;
人均可支配收入(+)		人均可支配收入越低的省份越需要发展,应该承担越少的减排任务
第三产业产值占GDP比重(-)	效率性原则	第三产业产值占GDP比重越高的省份具有越差的减排潜力,应当承担越少的减排任务;
单位GDP能耗(+)		单位GDP能耗越高的省份具有越高的减排潜力,应当承担越多的减排任务
人均GDP水平(+)	可行性原则	人均GDP水平越高的省份能够付出越多的减排成本,需要承担越多的减排任务

增量控制目标省域分解模型。该模型的基本思路是以2020年为基准年,在中国整体碳强度下降目标的软约束下,各省份按照分解标准调整后的分配率来承担碳减排任务,并结合社会经济发展规划中的GDP增长目标与情景假设数据,计算每个省“十四五”与“十五五”期间碳强度下降目标。具体模型步骤如下:

第一步,将中国整体碳强度相对下降目标转化为中国整体碳减排绝对量目标。本步骤的目的是计算在同时保证GDP增长与完成碳强度下降目标时中国整体所需要的绝对减排量,该计算结果是后续省域分解进行的基础。具体计算公式如下:

$$\Delta E_t = (\sum gdp_{i,2020} \times (1 + r_{i,t})^{t-2020}) \times I_{2020} \times \alpha_t \quad (1)$$

式中: ΔE_t 是中国 t 年整体碳减排绝对量; $gdp_{i,2020}$ 是 i 省份 2020 年的 GDP 总量水平, $i = 1, 2, \dots, 30$; $r_{i,t}$ 是 i 省份 2020 年至 t 年 GDP 平均增速; I_{2020} 是中国 2020 年碳强度; α_t 是中国 t 年规划的相对 2020 年碳强度下降目标。

第二步,计算每个省份的碳减排基础分配率。本文以 2020 年为基准年,以 2020 年每个省份的碳排放量除以中国整体碳排放量来计算各省份的碳减排基础分配率,计算公式如下:

$$f(i) = \frac{c_{i,2020}}{\sum c_{i,2020}} \quad (2)$$

式中: $f(i)$ 为 i 省份的基础分配率; $c_{i,2020}$ 为 i 省份 2020 年的碳排放总量。

第三步,利用分解标准计算差异化调整系数。本文共选择了 3 个分解标准,因为每个标准计算差异化系数的方法相同,所以仅以可行性原则下的人均 GDP 水平分解标准为例来介绍本步骤。

将中国各省份按照人均 GDP 水平指标 $Pgdp(i)$ 从高到低进行排序,并由此产生序号 n_i ,再对指标值 $Pgdp(i)$ 对应的人口数,即 i 省份 2020 年人口数进行迭代计算,计算公式如下:

$$Upper(n_i) = Upper(n_i - 1) + \frac{Pop(n_i - 1) + Pop(n_i)}{2} \quad (3)$$

$$Lower(n_i) = Lower(n_i - 1) + \frac{Pop(n_i) + Pop(n_i + 1)}{2} \quad (4)$$

$$Upper(0) = 0 \quad (5)$$

$$Lower(0) = 0 \quad (6)$$

式中: $Upper(n_i)$ 和 $Lower(n_i)$ 为序号 n_i 省份的两个迭代结果; $Pop(n_i)$ 为序号 n_i 省份 2020 年的人口数。设:

$$Pop(90\%) = 90\% \times \sum_{n_i=1}^{30} Pop(n_i), \quad (7)$$

$$Pop(10\%) = 10\% \times \sum_{n_i=1}^{30} Pop(n_i) \quad (8)$$

则大于 $Pop(10\%)$ 的最小 $Upper(i)$ 对应的指标 $Pgdp(i)$ 为正常值域上限 $Pgdp(highest)$, 小于 $Pop(90\%)$ 的最大 $Lower(i)$ 对应的指标 $Pgdp(i)$ 为正常值域的下限 $Pgdp(lowest)$, 超过正常值域上限的点为高离群点, 低于正常值域下限的点为低离群点。对正常值域省份、高离群点省份和低离群点省份的初步差异化调整系数的计算公式分别有:

正常值域计算公式:

$$g(Pgdp(i)) = \frac{Pgdp(i) + Pgdp(lowest)}{Pgdp(highest) - Pgdp(lowest)} \quad (9)$$

高离群点计算公式:

$$g(Pgdp(i)) = \frac{Pgdp(i) - Pgdp(highest) - Pgdp(lowest)}{2(Pgdp(highest) - Pgdp(lowest))} \quad (10)$$

低离群点计算公式:

$$g(Pgdp(i)) = \frac{Pgdp(i) - Pgdp(lowest)}{2(Pgdp(highest) - Pgdp(lowest))} \quad (11)$$

式中: $g(Pgdp(i))$ 为 i 省份的初步差异化调整系数。再对初步差异化调整系数进行去负值 $h(Pgdp(i))$ 、标准化 $k(Pgdp(i))$ 和量化调整,使其变成差异化调整系数 $l(Pgdp(i))$, 具体公式如下所示:

去负值:

$$h(Pgdp(i)) = -\text{Min}(g(Pgdp(i))) + g(Pgdp(i)) \quad (12)$$

标准化:

$$k(Pgdp(i)) = \frac{h(Pgdp(i))}{\text{Max}(h(Pgdp(i)))} \quad (13)$$

量化:

$$l(Pgdp(i)) = 0.6 \times \frac{k(Pgdp(i)) - \sum k(Pgdp(i))}{\sum k(Pgdp(i))} + 1 \quad (14)$$

式中: $\text{Min}(g(Pgdp(i)))$ 为各省份 $g(Pgdp(i))$ 最小

2022年10月

值; $\text{Max}(h(Pgdp(i)))$ 为各省份 $h(Pgdp(i))$ 最大值。

第四步,利用差异化调整系数计算调整后每个省份应该承担的碳减排分配率。由于本模型考虑的是多分解指标下的省域分解,因此,最终的碳减排分配率应该是多分解标准加权平均的结果,具体公式如下所示:

$$\lambda_i = f(i) \times \sum_{j=1}^3 b_j \times l_j \quad (15)$$

式中: λ_i 为 i 省份经过差异化调整系数调整后的碳减排分配率; l_j 为第 j 个差异化调整系数; b_j 为该差异化调整系数对应的权重。

第五步,计算各省份未来碳排放额度和省份碳强度减排目标。利用第四步计算的碳减排分配率和各省份 GDP 数据即可计算各省份在未来能够产生的 CO_2 排放量与所需完成的碳强度下降目标,具体计算公式如下所示:

$$c_{i,t} = c_{i,2020} + \lambda_i \times (\sum gdp_{i,t} \times (1 + r_{i,t})^{t-2020}) \times I_{2020} \times (1 - \alpha_t) \quad (16)$$

$$\beta_{i,t} = \left| \frac{c_{i,t}/gdp_{i,t} - I_{i,2020}}{I_{i,2020}} \right| \quad (17)$$

式中: $c_{i,t}$ 为 i 省份 t 年的碳排放量; $\beta_{i,t}$ 为 i 省份 t 年时相对 2020 年所需要完成的碳强度下降目标; $gdp_{i,t}$ 为 i 省份 t 年的 GDP 总量水平; $I_{i,2020}$ 为 i 省份 2020 年碳强度。

2.3 数据选取及来源

本文以 2020 年为基准年,以 2025 年和 2030 年中国碳强度约束下的碳排放增量为分配对象,对 30 个省份(因数据缺失未包含西藏自治区、港澳台地区)进行中国碳减排目标省域分解。为此,首先应确定中国 2025 年和 2030 年的碳排放增量额度,即确定“十四五”和“十五五”期间中国整体碳强度和 GDP 变动情况。能源基金会(PECE)^[23]关于中国 1.5℃ 和 2℃ 的温控目标下“十四五”至“十六五”期间碳强度下降目标的预测见表 2。

能源基金会关于中国 2℃ 温控目标下“十四五”期间碳强度下降目标与中国“十四五”规划中的整体碳强度下降目标相同^[24],因此,以能源基金会在 2℃ 温控目标下的碳强度下降目标为研究基础,确定“十五五”期间中国整体碳强度下降目标为 21%。

表 2 中国 1.5℃ 和 2℃ 的温控目标下碳强度下降目标

Table 2 China's carbon intensity reduction targets under 1.5℃ and 2℃ temperature control goals

控温目标	碳强度下降目标/%		
	十四五	十五五	十六五
1.5℃	24.00	32.00	37.00
2℃	18.00	21.00	31.00

在 GDP 数据方面,综合分析各省份“十四五”社会经济发展规划中的 GDP 增长目标,设中国“十四五”期间 GDP 增速为 6.18%;同时,结合机构与学者的研究预测,设中国“十五五”期间 GDP 基础增速为 5.50%,具体见表 3。此外,为提高文章分析的可信度,根据各省份历史 GDP 目标与实际完成情况对其“十五五”期间 GDP 增速进行情景假设,拓展为高增速、基准增速和低增速 3 种情景。以北京市为例来说明,如图 1 所示。

除碳强度和 GDP 预测数据外,本文结合各省份

表 3 机构/学者对中国“十五五”期间 GDP 增长率的预测

Table 3 Prediction of China's GDP growth rates during the 15th Five-year Plan period by financial institutions/scholars

机构或学者	预测增长率/%	本文增长率/%
世界银行 ^(a)	5.40	5.50
国际货币基金组织 ^(b)	5.70	
摩根大通银行 ^(c)	5.50	
陈锡康等 ^[25]	5.40	

注:(a)数据来源:世界银行全球经济展望; <https://www.shi-hang.org/zh/publication/global-economic-prospects>; (b)数据来源:货币基金组织世界经济展望; <https://www.imf.org/zh/Publications/WEO/Issues/2021/07/27/world-economic-outlook-update-july-2021>; (c)数据来源:摩根大通银行; https://www.euamth.com/Uploads/images/2021/04/30/1619788951_news2_file.pdf。

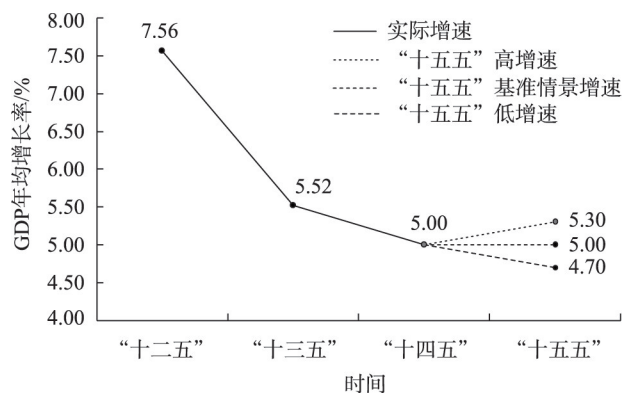


图 1 北京市 GDP 情景分析预测

Figure 1 Prediction of annual GDP growth rate in Beijing

统计年鉴和地方统计局公布的2020年经济发展增速数据确定2020年GDP数据和历年能源消耗量数据,采用的单位GDP能耗数据通过历年能源消耗量数据与对应年份GDP数据计算得到;以第七次人口普查结果确定2020年人口数据;以各类统计年鉴确定2020年人均可支配收入和2019年第三产业产值占GDP比重数据。最后,由于各省份2020年碳排放总量数据的缺失,以2019年各省份碳排放总量数据替代,该数据来自于CEADs(中国碳核算数据库)公开发布的2019年中国30省份排放清单。基于上述数据可以确定各省份经过差异化调整系数调整后的碳减排分配率,结果见表4,这是减排目标分解

表4 各省份经过差异化调整系数调整后的碳减排分配率(%)

Table 4 Provincial distribution of carbon emission reduction rate after adjustment by differential adjustment coefficients (%)

省份	基础情景	偏重公平性原则	偏重效率性原则	偏重可行性原则
安徽	1.32	1.32	1.32	1.32
北京	0.56	0.57	0.57	0.55
福建	1.09	1.08	1.10	1.08
甘肃	0.59	0.59	0.59	0.60
广东	2.52	2.51	2.54	2.50
广西	0.81	0.81	0.81	0.82
贵州	0.83	0.83	0.83	0.84
海南	0.20	0.20	0.20	0.20
河北	3.31	3.32	3.29	3.33
河南	1.92	1.92	1.92	1.93
黑龙江	1.15	1.15	1.14	1.16
湖北	1.11	1.11	1.12	1.11
湖南	1.23	1.22	1.23	1.23
吉林	0.76	0.76	0.76	0.77
江苏	3.33	3.33	3.37	3.30
江西	0.88	0.88	0.88	0.88
辽宁	2.24	2.25	2.23	2.25
内蒙古	2.69	2.73	2.66	2.69
宁夏	0.72	0.73	0.71	0.73
青海	0.20	0.20	0.20	0.21
山东	4.15	4.15	4.16	4.14
山西	1.84	1.84	1.82	1.86
陕西	1.03	1.03	1.04	1.04
上海	0.97	0.97	0.98	0.95
四川	1.12	1.14	1.12	1.12
天津	0.70	0.70	0.71	0.70
新疆	1.78	1.79	1.77	1.79
云南	0.66	0.66	0.66	0.67
浙江	1.80	1.80	1.81	1.78
重庆	0.67	0.67	0.67	0.67

模型中第四步的结果,是承接上文基础数据与下文省域分配的重要中间指标。

3 结果与分析

3.1 2025年碳减排省域分解结果

2025年中国碳减排省域分解结果根据权重选择的不同可以分为基础情景、偏重公平性原则、偏重效率性原则和偏重可行性原则4种情景,具体如图2所示。以国家“十四五”期间18.00%的整体碳强度下降目标为基准,根据目标偏离基准超过0.50%与否,将各省份分为3组:①>18.50%为向上偏离,即高于国家目标;②<17.50%,向下偏离,即低于国家目标;③17.50%~18.50%(包含两端),则认为其偏离较小,即与国家目标相近。分析发现除河南省之外,其他29个省份在4种情景下的分解结果趋于一致。因此,先对这29个省份进行分组:①北京市、广东省、江苏省等6个省份在“十四五”期间的碳强度下降目标均高于18.00%。这些省份能源消耗量处在全国前列(如内蒙古),同时其中多数省份为经济较发达地区(如北京和广东),具备承担较大减排任务责任的能力和完成减排的经济实力。②安徽省、甘肃省、广西壮族自治区等11个省份的碳强度下降目标均低于18.00%。这些省份的历史碳排放量较其他省份靠后,其发展也均落后于国家平均水平,需要拥有更多的碳排放权,因此“十四五”期间承担较低碳减排目标。③福建省、河北省、黑龙江省等12个省份碳强度下降目标与国家整体目标相近,均在18.00%上下略微浮动。详细分组结果如表5所示。

河南省在偏重公平性原则情境下的结果出现较大偏离(17.42%,低于17.5%的基准阈值),因此,认为河南省的目标应该低于国家目标。这主要是由于本文以人均CO₂排放量和人均可支配收入的几何平均数来代表公平性原则,而河南省过去人均CO₂排放量与人均可支配收入均处在全国低位,较另外两个分解标准更低,可以拥有更多的碳排放权以谋求发展,故其碳强度下降目标也随之下降。

3.2 2030年碳减排省域分解结果

2030年中国碳减排省域分解结果同样分4种权重情景展开,具体如图3所示,此时各省份2030年的GDP是基准增速下的计算结果。以国家“十五

2022年10月

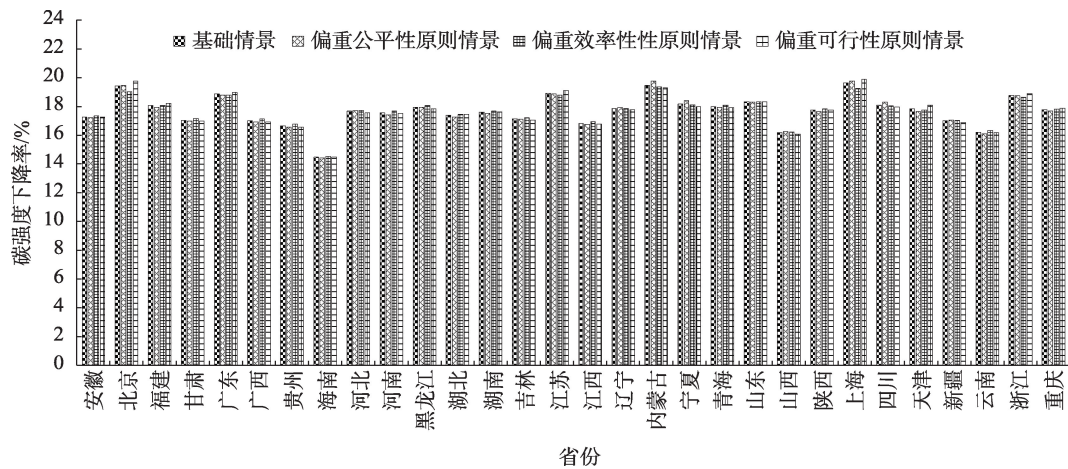


图2 2025年各权重情景碳减排省域分解结果

Figure 2 Results of provincial decomposition of carbon emission reduction under different weighting scenarios, 2025

表5 2025年中国各省份碳强度下降目标分组表

Table 5 Grouping of Chinese provinces by carbon intensity reduction targets, 2025

分组类型	省份
高于国家目标	北京市、广东省、江苏省、内蒙古自治区、上海市和浙江省
等于国家目标	福建省、河北省、黑龙江省、湖南省、辽宁省、宁夏回族自治区、青海省、山东省、陕西省、四川省、天津市和重庆市
低于国家目标	安徽省、甘肃省、广西壮族自治区、贵州省、海南省、湖北省、吉林省、江西省、山西省、新疆维吾尔自治区和云南省

注:由于河南省出现了不同原则情景下的不一致情况,对碳强度下降目标进行了调整,详见正文所述,表中未列出。

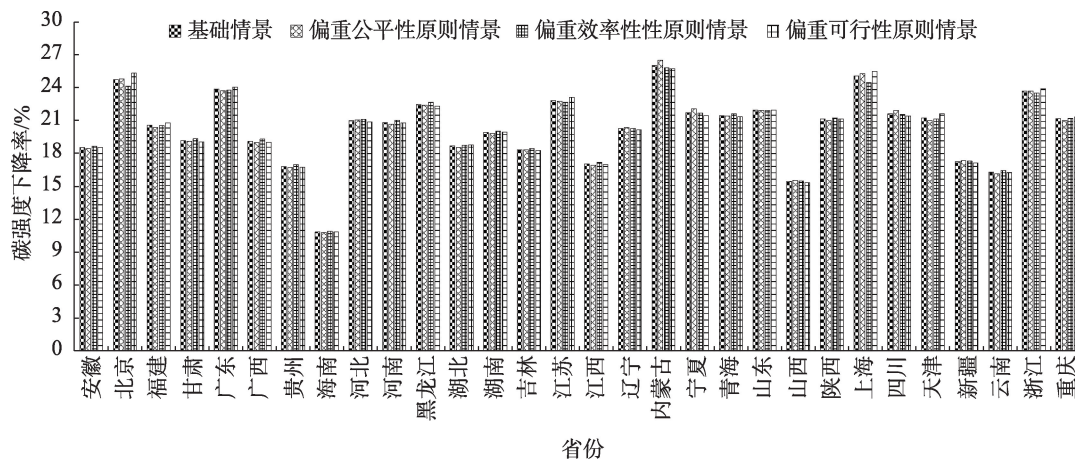


图3 基准GDP增速情景下2030年各权重情景碳减排省域分解结果

Figure 3 Results of provincial decomposition of carbon emission reduction under different weighting scenarios in 2030 for the baseline

GDP growth scenario

五”期间21.00%的整体碳强度下降目标为基准,根据目标偏离基准超过2.50%与否,将各省份分为3组:①>23.50%为高于国家目标;②<18.50%为低于国家目标;③18.50%~23.50%(包含两端)为等于国家目标。分析发现,除安徽省与浙江省之外,其他28个省份在4种权重情景下的结果趋于一致。因

此,先对这28个省份进行分组:①北京市、广东省、内蒙古自治区和上海市在“十五五”期间碳强度下降目标均高于21.00%。②贵州省、海南省、吉林省等7个省份碳强度下降目标均低于21.00%。③福建省、甘肃省、广西壮族自治区等17个省份的碳强度下降目标在21.00%上下略微浮动。详细分组结

果见表6。

安徽省在偏重公平性原则情境下的结果出现偏离(18.43%,低于18.5%的基准阈值),故认为该省目标应该低于国家目标,与上小节相同。由于安徽省该标准在全国的排名较另外两个原则情景更低,应该承担相对更少的碳减排任务,故其碳强度下降目标也随之下降。浙江省在偏重效率性原则情境下的结果出现偏离(23.49%,低于23.5%的基准阈值),故认为该省目标应该与国家目标一致。由于本文以第三产业产值占GDP比重和单位GDP能耗的几何平均数来代表效率性原则,浙江省推进产业转型,其现代服务业的快速发展使第三产业产值占GDP比重大幅提高,相应的单位GDP能耗也随之减少,导致其碳减排效率降低,即浙江省效率性原则对应下的分解标准在全国的排名较另外两个原则情景更低,故在该情景下的碳强度下降目标也随之下降。

此外,本文还计算了各省份2030年GDP处在低增速和高增速下的碳强度下降目标省域分解结果,具体结果如图4和图5所示。仅安徽省和湖北省分别在偏重效率性原则和偏重公平性原则情景下的结果出现变化,因此,本文认为改变GDP增速预期并不会改变省域分解结果的分组情况,这也表明该分组结果比较稳健。

从总体上来说,碳减排省域分解结果的分组情况是比较稳定的,仅江苏省从2025年的高于国家整体目标下降至2030年的等于国家整体目标,甘肃省和广西壮族自治区从2025年的低于国家整体目标上升至2030年的等于国家整体目标。

4 结论与政策建议

4.1 结论

本文基于公平性、效率性和可行性3项原则,选取人均CO₂排放量、人均可支配收入、第三产业产值占GDP比重、单位GDP能耗和人均GDP水平5项

表6 基准GDP增速情景下2030年中国各省份碳强度下降目标分组表

Table 6 Grouping of Chinese provinces by carbon intensity reduction targets in 2030 for the baseline GDP growth scenario

分组类型	省份
高于国家目标	北京市、广东省、内蒙古自治区和上海市
等于国家目标	福建省、甘肃省、广西壮族自治区、河北省、河南省、黑龙江省、湖北省、湖南省、江苏省、辽宁省、宁夏回族自治区、青海省、山东省、陕西省、四川省、天津市和重庆市
低于国家目标	贵州省、海南省、吉林省、江西省、山西省、新疆维吾尔自治区和云南省

注:由于安徽省和浙江省出现了不同原则情景下的不一致情况,对碳强度下降目标进行了调整,详见正文所述,表中未列出。

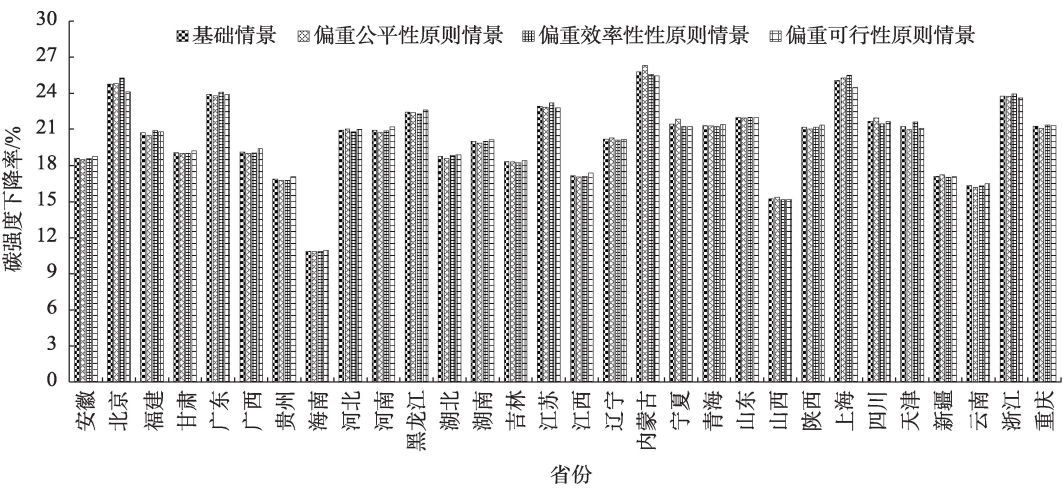


图4 高GDP增速情景下2030年各权重情景碳减排省域分解结果

Figure 4 Results of provincial decomposition of carbon emission reduction under different weighting scenarios in 2030 for the high GDP growth scenario

2022年10月

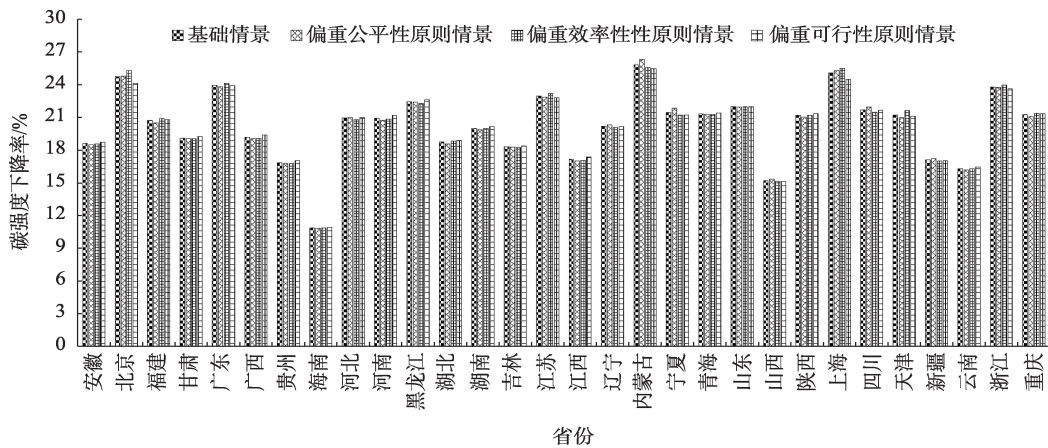


图5 低GDP增速情景下2030年各权重情景碳减排省域分解结果

Figure 5 Results of provincial decomposition of carbon emission reduction under different weighting scenarios in 2030 for the low GDP growth scenario

分解标准,构建中国碳排放增量控制目标省域分解模型,并依赖各省份社会经济发展规划中的GDP增长目标与多情景假设增速数据,将分解结果拓展至碳强度下降目标层面。得到如下主要结论:

(1)中国碳减排目标省域分解结果具有明显的聚类效应,可分为3类省份:①由于经济发展状况与历史碳排放量是影响碳减排目标省域分解的首要因素,经济发展状况或历史碳排放量在全国位居前列的省份,其碳强度下降目标将不受其他因素的影响,始终需要承担高于国家整体目标的碳减排任务。②经济发展状况或历史碳排放量在全国位居末尾的省份,需要依赖碳排放权换取本省份的发展,故始终承担低于国家整体目标的碳减排任务。③非上述特征省份的碳强度下降目标将同时受到公平性、效率性和可行性原则的影响,从而出现偏重某个原则情景而改变碳减排任务的情况,如2025年的河南和2030年的浙江。

(2)中国整体碳排放趋势与省域碳减排目标分配结果稳定,既表明中国碳排放增量控制目标省域分解模型结果的稳健性,也表明中国整体与省域碳达峰工作受外部冲击的影响较小,具有内在发展规律。

4.2 政策建议

本文研究结果有助于国家政府部门分配省级减排任务与省级政府部门制定减排目标。但由于各省份的统计数据存在差异,上述结果存在某些省份

的碳减排目标与国家整体目标偏离较大的情况(如海南省),提高了实际操作的难度。因此,依据分组结果建议相关部门在国家碳减排目标的基础上灵活设定自身目标,即处于高于国家目标组省份的减排目标应该以18%为基准向上浮动1%~2%,至19%~20%;等于国家目标组省份的减排目标应该在18%左右浮动;低于国家目标组省份的减排目标应该以18%为基准向下浮动1%~2%,至16%~17%。这一方法可以协调省份之间的差异,实行减排差别化控制。

参考文献(References):

- [1] Liang W, Gan T, Zhang W. Dynamic evolution of characteristics and decomposition of factors influencing industrial carbon dioxide emissions in China: 1991–2015[J]. Structural Change and Economic Dynamics, 2019, 49: 93–106.
- [2] 中国政府网. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[N/OL]. (2020-09-22) [2021-11-04]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm. [Chinese Government Network. Xi Jinping Delivers an Important Speech at the General Debate of the 75th UN General Assembly[N/OL]. (2020-09-22) [2021-11-04]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm.]
- [3] 程纪华. 中国省域碳排放总量控制目标分解研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(1): 23–30. [Cheng J H. Decomposition of carbon cap targets at provincial level in China: A case study of Zhejiang[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(1): 23–30.]
- [4] 赵永斌, 丛建辉, 杨军, 等. 中国碳市场配额分配方法探索[J]. 资

- 源科学, 2019, 41(5): 872–883. [Zhao Y B, Cong J H, Yang J, et al. An innovative allowance allocation method in China's unified national emissions trading scheme[J]. Resources Science, 2019, 41(5): 872–883.]
- [5] 邵桂兰, 王金, 李晨. 基于2030年碳减排目标的中国省际碳排放配额研究[J]. 山东财经大学学报, 2021, 33(4): 13–23. [Shao G L, Wang J, Li C. Research on China provincial carbon emission quota based on 2030 carbon emission reduction target[J]. Journal of Shandong University of Finance and Economics, 2021, 33(4): 13–23.]
- [6] 刘春兰, 蔡博峰, 陈操操, 等. 中国碳减排目标的地区分解方法研究述评[J]. 地理科学, 2013, 33(9): 1089–1096. [Liu C L, Cai B F, Chen C C, et al. Review of carbon mitigation targets allocation in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(9): 1089–1096.]
- [7] 方恺, 李帅, 叶瑞克, 等. 全球气候治理新进展: 区域碳排放权分配研究综述[J]. 生态学报, 2020, 40(1): 10–23. [Fang K, Li S, Ye R K, et al. New progress in global climate governance: A review on the allocation of regional carbon emission allowance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 10–23.]
- [8] Ringius L, Torvanger A, Holtmark B. Can multi-criteria rules fairly distribute climate burdens? OECD results from three burden sharing rules[J]. Energy Policy, 1998, 26(10): 777–793.
- [9] Shi M J, Li N, Zhou S L, et al. Can China achieve its carbon dioxide emission reduction target in 2020? [J]. Journal of Resources and Ecology, 2010, 1(2): 145–154.
- [10] 方恺, 张琦峰, 叶瑞克, 等. 巴黎协定生效下的中国省际碳排放权分配研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(3): 1224–1234. [Fang K, Zhang Q F, Ye R K, et al. Allocating China's carbon emission allowance to the provincial quotas in the context of the Paris Agreement[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(3): 1224–1234.]
- [11] 田云, 陈池波. 基于碳排放权分配的中国省域碳减排奖惩方案[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(11): 54–62. [Tian Y, Chen C B. Reward and punishment scheme of China's provincial carbon emission reduction based on the allocation of carbon emission rights[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(11): 54–62.]
- [12] 张富利. 公平视角下我国碳排放配额的初始分配[J]. 华侨大学学报(哲学社会科学版), 2020, (5): 65–78. [Zhang F L. Research on initial allocation of carbon emission quota in China from the perspective of equity[J]. Journal of Huaqiao University (Philosophy and Social Sciences), 2020, (5): 65–78.]
- [13] 王勇, 程瑜, 杨光春, 等. 2020和2030年碳强度目标约束下中国碳排放权的省区分解[J]. 中国环境科学, 2018, 38(8): 3180–3188. [Wang Y, Cheng Y, Yang G C, et al. Provincial decomposition of China's carbon emission rights under the constraints of 2020 and 2030 carbon intensity targets[J]. China Environmental Science, 2018, 38(8): 3180–3188.]
- [14] Ribeiro H V, Rybski D, Kropp J P. Effects of changing population or density on urban carbon dioxide emissions[J]. Nature Communications, 2019, DOI: 10.1038/s41467-019-11184-y.
- [15] 杨超, 吴立军, 李江风, 等. 公平视角下中国地区碳排放权分配研究[J]. 资源科学, 2019, 41(10): 1801–1813. [Yang C, Wu L J, Li J F, et al. Distribution of carbon emission rights in China based on equity perspective[J]. Resources Science, 2019, 41(10): 1801–1813.]
- [16] 张博胜, 曹筱杨. 精准扶贫政策对国家级贫困县城乡收入差距的影响[J]. 资源科学, 2021, 43(8): 1549–1561. [Zhang B S, Cao X Y. Impact of targeted poverty alleviation policy on the urban rural income gap in national poverty-stricken counties[J]. Resources Science, 2021, 43(8): 1549–1561.]
- [17] Wang H K, Lu X, Deng Y, et al. China's CO₂ peak before 2030 implied from diverse characteristics and growth of cities[J]. Nature Sustainability, 2019, 2(8): 748–754.
- [18] Khan R. Beta decoupling relationship between CO₂ emissions by GDP, energy consumption, electricity production, value-added industries, and population in China[J]. Plos One, 2021, DOI: 10.1371/journal.pone.0249444.
- [19] Grubler A, Nakicenovic N. International Burden Sharing in Greenhouse Gas Reduction (Einglish)[R]. Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis, 1994.
- [20] Wu F, Huang N Y, Liu G J, et al. Pathway optimization of China's carbon emission reduction and its provincial allocation under temperature control threshold[J]. Journal of Environmental Management, 2020, DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111034.
- [21] 韩梦瑶, 刘卫东, 谢漪甜, 等. 中国省域碳排放的区域差异及脱钩趋势演变[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 710–721. [Han M Y, Liu W D, Xie Y T, et al. Regional disparity and decoupling evolution of China's carbon emissions by province[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 710–721.]
- [22] 卞勇, 曾雪兰. 基于三部门划分的能源碳排放总量目标地区分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(10): 106–114. [Bian Y, Zeng X L. Study on energy-derived carbon emission quantity target regional allocation based on three-sector division[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(10): 106–114.]
- [23] 能源基金会. 中国碳中和综合报告2020: 中国现代化的新征程: “十四五”到碳中和的新增长故事[R/OL]. (2020–12–10) [2022–04–02], <https://www.efchina.org/14FYP-zh/Reports-zh/report-lceg-20201210-zh>. [Energy Foundation. China's Carbon Neutralization Comprehensive Report 2020: A New Journey of China's Modernization: A New Growth Story from the 14th Five Year Plan to Carbon Neutralization[R/OL]. (2020–12–10) [2022–04–02], [https://www.efchina.org/14FYP-zh/Reports-zh/report-lceg-](https://www.efchina.org/14FYP-zh/Reports-zh/report-lceg-20201210-zh)

2022年10月

20201210-zh.]

- [24] 新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[N/OL]. (2021-03-13)[2022-04-02] http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm. [Xinhua News Agency. The 14th Five-Year Plan for the National Economic and Social Development of the People's Republic of China and the Outline of the Vision for 2035[N/OL]. (2021-03-13)

[2022-04-02] http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.

- [25] 陈锡康, 杨翠红, 祝坤福, 等. 2021年中国经济增长速度的预测分析与政策建议[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(1): 37-46. [Chen X K, Yang C H, Zhu K F, et al. Forecast of China's economic growth rate in 2021 and policy suggestions[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(1): 37-46.]

Provincial decomposition of China's carbon emission reduction targets based on multi-scenario hypothesis

QIU Jixiang¹, LUO Yuxing¹, WANG Ke², MEI Yingdan¹

(1. School of Economics and Management, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. School of Environment, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: In order to ensure that China can achieve the goal of carbon peak by 2030, provincial decomposition of China's carbon emission reduction targets is essential. This study followed the three principles of fairness, efficiency, and feasibility and selected five decomposition criteria, namely, per capita CO₂ emissions, per capita disposable income, proportion of the tertiary industry in GDP, energy consumption per unit GDP, and per capita GDP level, to build a provincial decomposition model of the target for incremental control of China's carbon emission, and simulated different GDP growth scenarios (2020 to 2025 scenario and three scenarios of high, low and baseline GDP growth rate from 2025 to 2030). The research found that: (1) Economic development and historical carbon emissions are important factors that affect the provincial decomposition of carbon emission reduction targets, showing the characteristics of stable carbon intensity reduction targets obtained from extreme ranked provinces. The carbon intensity reduction targets derived from non extreme provinces are affected by the principles of fairness, efficiency and feasibility at the same time. Some provinces have characteristics of different target groups under different situation preferences. (2) China's carbon peaking trend is stable, and the impact of external shocks on GDP growth has not changed the grouping results of carbon emission reduction targets of each province, so the provincial decomposition results of national emission reduction targets are generally stable. The results of this study will help provinces to formulate emission reduction targets flexibly to ensure the smooth realization of national emission reduction targets.

Key words: carbon emission reduction; increment control; regional decomposition model; carbon intensity; multi-scenario hypothesis; carbon emission peak; carbon neutrality; China