

DOI:10.13216/j.cnki.upcjess.2020.03.0003

基于零和收益 DEA 的省域能耗、大气污染物和碳排放控制目标联合分配研究

宋杰鯤,吕高天,梁璐璐,赵志浩,张业蒙

(中国石油大学(华东)经济管理学院,山东 青岛 266580)

摘要:大气污染物排放和碳排放具有能源同源性。对能耗、大气污染物排放和碳排放控制目标进行联合分配有助于更好地完成我国节能减排目标。结合环境生产技术,构建了基于零和收益 DEA 的省域控制目标联合分配模型,并对 2020 年进行分配分析。结果表明:零和收益 DEA 分配方案能够同时实现公平与效率,总体上比国家工作方案更优;各省可结合自身的节能减排压力状况,采取针对性措施,并积极推行区域协调发展战略,确保节能减排目标有效完成。

关键词:能耗;大气污染物;碳排放;联合分配;零和收益 DEA

中图分类号:F062.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-5595(2020)03-0016-09

改革开放以来,中国经济一直保持快速发展。近年来经济发展步入新常态,由高速增长转向中高速增长,GDP 增速有所减缓,但仍保持在 7% 左右。经济发展需要消耗大量的能源,中国政府高度重视节能工作,能耗强度不断下降,能源结构持续优化,但相对发达国家,中国的能源利用效率依然偏低,化石能源消耗占比在 85% 以上。化石能源燃烧产生了大量的 SO_2 、 NO_x 、 CO_2 等大气污染物,严重影响空气质量。《2018 年中国生态环境状况公报》显示,中国酸雨区面积约 53 万平方公里,占国土面积的 5.5%;全国 338 个地级及以上城市中,只有 121 个城市环境空气质量达标,占全部城市数的 35.8%。面对能源环境的严峻形势,中国在《国家应对气候变化规划(2014—2020 年)》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》《“十三五”节能减排综合工作方案》《“十三五”控制温室气体排放工作方案》等一系列规划中提出了明确的 2020 年节能减排与碳排放控制目标。同时,结合各省(自治区、直辖市,为简便,统称省)发展阶段、资源禀赋等因素,制定了 2020 年各地区能耗总量和强度、主要环境污染物排放总量以及碳排放强度的控制目标。对于各省而言,能耗

作为经济发展的重要动力,大气污染物排放作为能耗的伴生产出,所分配到的控制目标的多少势必影响地区经济发展速度与质量。如何科学分配能耗、大气污染物与碳排放控制目标,在保证各省经济持续发展的同时,不断推进能源节约利用,改善环境质量,对各省及全国经济高质量发展至关重要。

一、文献综述

学者们对能耗与大气污染物排放、温室气体排放的关系进行了研究。Paul 对主要国家的定量测算结果表明,减少化石燃料燃烧可以带来污染物减排这一显著的次要效益。^[1] Johannes 等以 OECD 和全球数据为基础,分析了气候变化、空气污染和能源安全的关系,指出它们之间的相互作用,并量化了节能减排效益。^[2] Zhang 等对发展中国家的能源消费与二氧化碳排放关系进行分析,指出能源消耗对碳排放增加具有正向、显著的影响。^[3] 宋杰鯤等的分析表明中国能源消费对碳排放增加具有明显的正影响。^[4] 汤铃等则分析指出减少化石能源投入可以降低碳排放。^[5] 薛冰指出大气污染物排放和温室气体排放具有能源的同根、同源、同步性,节能减排具有协同效应。^[6] 唐登莉等构建面板数据模型证明了能

收稿日期: 2019-07-18

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目(16YJAZH054);山东省自然科学基金项目(ZR2016GQ06);国家自然科学基金项目(71871222)

作者简介: 宋杰鯤(1979—),男,山东莱阳人,中国石油大学(华东)经济管理学院副教授,博士,研究方向为能源系统工程、碳排放等。

源消耗对雾霾污染具有显著正影响。^[7]田孟等认为能源结构的改善和能源强度的下降是减少大气污染物排放的主要原因和举措。^[8]

学者们对于能耗、大气污染物排放和碳排放控制目标在省域间的分配也进行了大量研究。从分配方法来看,主要包括三种:一是基于多指标复合的方法。刘红琴等^[9]、Zhang 等^[10]、Guo 等^[11]基于公平性、效率性指标构建多因子加权模型进行能耗分配。蒋洪强等^[12]、苑清敏等^[13]基于改进等比例分配方法对大气污染物排放控制目标进行分配。Han 等^[14]、Chang 等^[15]和 Wang 等^[16]分别基于最优组合加权、熵权方法进行碳排放分配。刘晓基于公平、发展的不同原则对碳排放配额进行分配,认为前瞻性原则分配方案更适合区域发展。^[17]二是以成本最低或公平性偏离最小为目标,建立非线性规划模型进行分配。Yang 等^[18]以最小化内外部经济成本为目标对省域天然气资源进行分配。Xue 等^[19]以污染控制成本最小为目标对 SO₂ 排放控制目标进行分配。郑立群^[20]、兰想等^[21]分别以公平偏离指数最小化、公平性与效率性分配偏离最小化为目标对碳减排责任进行分配。三是基于数据包络分析(DEA)模型的分配,这种方法通常是对其他分配方法或预测给出的初始配额进行效率优化。Xiong 等^[22]、Wu 等^[23]、Miao 等^[24]分别建立零和收益 DEA (ZSG-DEA) 模型对节能、大气污染物和碳排放控制目标进行分配。苗壮等构建 ZSG-DEA 模型对 SO₂、NO_x 排放进行分配。^[25]Jiang 等应用基于松弛变量的 DEA (SBM-DEA) 模型对初始配额进行效率测度,借助投影分析分配碳排放配额。^[26]王科等^[27]、宋杰鲲等^[28]分别构建固定成本分摊 (FCAM) 和环境 FCAM 模型进行碳排放目标分配。Zhou 等^[29]、李小红等^[30]构建集中分配 DEA 模型进行碳排放分配。宋杰鲲等构建改进的集中 DEA 模型对能耗、大气污染物和碳排放控制目标同时进行分配。^[31]

文献梳理可知,目前对省域能耗、大气污染物排放和碳排放控制目标的分配多兼顾了公平和效率,特别是基于 DEA 模型的分配将经济活动的投入与期望、非期望产出相关联,且无需事先估算减排成本等指标,比基于复合指标和非线性规划模型的分配更加客观,研究也更为广泛。但当前的研究仍存在着一定的不足:一是对单一控制目标的分配研究多,对三者进行联合分配的研究少,实际上节能减排具有协同效应,对三者联合分配更加科学;二是 SBM-DEA 投影分析模型直接以相对有效的投影作为碳排放配额值,使得我国的碳排放控制总量显著下降,

并不符合当前实际情况,可行性较低;三是改进的集中 DEA 模型虽能反映地区发展、能源禀赋等特征,但是分配方案中某些省的经济增长目标过高,在区域一体化发展尚不成熟的现实背景下并不可行。考虑到 ZSG-DEA 模型相比 FCAM 模型,在处置非期望产出时能够较好地体现其弱可处置性和零结合性,计算较为简便,本文选择该模型对我国能耗、大气污染物排放和碳排放控制目标进行联合分配。

二、省域控制目标联合分配的 ZSG-DEA 模型

传统的 DEA 模型通常假设各个决策单元的投入或产出变量之间互不影响,亦即对任何一个决策单元,它自身投入要素的使用或产出不会对其他决策单元的投入或产出发生作用。然而,在总量控制原则下的资源分配中,各个决策单元之间存在着零和博弈的竞争关系,因为当某一投入或产出指标的总量保持不变时,低效的决策单元为了实现有效需要减少要素投入或增加产出,需要其他决策单元相应地增加投入或者减少产出。这种体现竞争性资源总量不变性思想的 DEA 模型即零和收益 DEA (Zero-Sum-Gains DEA, 即 ZSG-DEA), 该模型通过测度单个决策单元的效率,对无效决策单元的分配要素不断地迭代调整,使每个决策单元的效率值都能够达到 1。设对 K 个省进行能耗、大气污染物排放和碳排放控制目标分配,以待分配要素的效率加权和最小为目标函数,结合环境生产技术构建 ZSG-DEA 模型如下:

$$\begin{aligned} \min \eta &= \alpha \varphi_l + \sum_{h=1}^H \beta_h \theta_{hl} \\ \text{s. t. } &\sum_{k=1}^K \delta_k I_{mk} \leq I_{ml}, \quad m = 1, \dots, M \\ &\sum_{k=1}^K \delta_k Y_k \geq Y_l \\ &\sum_{k=1}^K \delta_k E_k \left| 1 + \frac{E_l(1 - \varphi_l)}{\sum_{k \neq l} E_k} \right| \leq \varphi_l E_l \\ &\sum_{k=1}^K \delta_k U_{hk} \left| 1 + \frac{U_{hl}(1 - \varphi_{hl})}{\sum_{k \neq l} U_{hk}} \right| = \theta_{hl} U_{hl}, \\ &h = 1, \dots, H \\ &\delta_k \geq 0, \quad k = 1, \dots, K \end{aligned} \quad (1)$$

式中: φ_l 、 θ_{hl} 分别为第 l 个省的能耗及第 h 种非期望产出(大气污染物排放、碳排放)的效率值, $h = 1, 2, \dots, H$, $0 < \varphi_l, \theta_{hl} \leq 1$; α, β_h 为相应效率值的权重系数,体现了决策者对各分配要素的重视程度, $\alpha + \sum_{h=1}^H \beta_h = 1$; I_{ml} 和 Y_l 分别表示第 l 个省的第 m 种非待分配投入与 GDP 期望产出, $m = 1, 2, \dots, M$; E_l 和 U_{hl}

分别表示第 l 个省的待分配能耗与第 h 种非期望产出; δ_k 为决策变量。模型中的不等式约束反映出能耗等投入要素与 GDP 期望产出的强可处置性, 等式约束反映出大气污染物排放、碳排放等非期望产出的弱可处置性(非期望产出伴随期望产出, 不可随意减少)及零结合性(没有非期望产出就没有期望产出)。

在 ZSG-DEA 模型的思想下, 无效的决策单元需要通过减少配额以提高效率。当第 l 个省减少 $E_l(1 - \varphi_l)$ 和 $U_{hl}(1 - \theta_{hl})$ 份额时, 为了保持资源的总量不变, 除其自身外的其他 $(K - 1)$ 个省需要按照它们初始配额所占总量的份额等比例增加, 这意味着其他每个省的待分配要素增加量分别为 $\frac{E_k E_l}{\sum_{k \neq l} E_k}(1 - \varphi_l)$ 、 $\frac{U_{hk} U_{hl}}{\sum_{k \neq l} U_{hk}}(1 - \theta_{hl})$ 。任一省都通过上述比例削减法增加或者减少配额, 所有省都调整结束后, 各省新的能耗和非期望产出配额见公式(2)、(3)。

$$E'_k = E_k + \sum_{l \neq k} \left[\frac{E_k E_l}{\sum_{k \neq l} E_k} (1 - \varphi_l) \right] - E_k (1 - \varphi_k) \tag{2}$$

$$U'_{hk} = U_{hk} + \sum_{l \neq k} \left[\frac{U_{hk} U_{hl}}{\sum_{k \neq l} U_{hk}} (1 - \theta_{hl}) \right] - U_{hk} (1 - \theta_{hk}) \tag{3}$$

把调整后的配额代入 ZSG-DEA 模型, 再次测算加权效率值, 同样按照比例削减法调整各决策单元的配额, 当所有决策单元的加权效率值都达到 1 时结束调整, 该调整结果即为 ZSG-DEA 优化联合分配方案。

三、2020 年省域控制目标联合分配

(一) 指标选取与数据说明

(1) 非待分配投入指标, 包括人口和资本存量。根据除西藏(缺乏能源统计数据, 不予考虑)外的大陆其他 30 个省的人口发展规划, 给出 2020 年各省常住人口数量。应用永续盘存法测算 2011—2017 年各省的资本存量^[32], 并折算为 2015 年价格下的数值, 分别对各省这 7 年的资本存量数据进行线性回归, 预测得到 2020 年的资本存量。

(2) 期望产出指标, 即 GDP。根据各省“十三五”规划中的 GDP 年均增速预期值以及 2015 年 GDP, 得到各省 2020 年在 2015 年可比价格下的预期 GDP。30 个省 2020 年 GDP 总和为 1 038 034.37 亿元。

(3) 待分配能耗指标。根据《“十三五”节能减

排综合工作方案》, 得到 2020 年能耗强度控制目标下的能耗总量控制值为 54.6845 亿吨, 高于能耗总量 50 亿吨的控制目标, 因此确定 2020 年能耗总量不超过 50 亿吨。考虑到各省能源禀赋的非流动性特征并为了保障各省生产连续性, 基于 2011—2016 年各省能耗占比, 依据溯往机制下的世袭值原则确定各省 2020 年的能耗控制目标预分配值, 如表 1 所示。

表 1 2020 年各省能耗控制目标预分配值

万吨					
地区	能耗	地区	能耗	地区	能耗
北京	7 879.76	浙江	21 481.97	海南	2 043.43
天津	9 168.62	安徽	13 403.06	重庆	10 024.42
河北	33 747.87	福建	13 215.99	四川	22 687.85
山西	22 014.01	江西	8 912.27	贵州	11 025.80
内蒙古	21 414.15	山东	42 595.69	云南	11 667.86
辽宁	25 124.90	河南	26 135.13	陕西	12 529.24
吉林	9 845.66	湖北	18 878.81	甘肃	8 187.97
黑龙江	13 863.88	湖南	17 908.39	青海	4 309.02
上海	12 928.94	广东	33 588.80	宁夏	5 614.82
江苏	33 534.38	广西	10 662.66	新疆	15 604.66

(4) 待分配非期望产出指标, 包括 SO_2 、 NO_x 和 CO_2 排放量。根据《“十三五”节能减排综合工作方案》得到 2020 年 SO_2 、 NO_x 排放规划限值分别为 1 579.80 万吨、1 568.89 万吨; 根据《“十三五”控制温室气体排放工作方案》中 CO_2 排放强度下降目标, 得到 2020 年 CO_2 排放规划限值为 1 200 209.76 万吨。鉴于节能减排具有协同效应, 以 2011—2016 年能耗强度 e 为自变量, 分别将 SO_2 排放强度 s 、 NO_x 排放强度 n 和 CO_2 排放强度 c 为因变量, 进行回归分析, 得到关系式如下:

$$\begin{aligned} s &= 7.8081 \times 10^{-3} e - 2.1063 \times 10^{-3}, R^2 = 0.9704 \\ n &= 9.5294 \times 10^{-3} e - 3.2064 \times 10^{-3}, R^2 = 0.9687 \\ c &= 2.0900 e + 0.0915, R^2 = 0.9730 \end{aligned}$$

将 2020 年能耗强度 0.4817 吨/万元代入上述关系式, 得到 2020 年 SO_2 、 NO_x 及 CO_2 排放强度分别为 1.5547×10^{-3} 、 1.3838×10^{-3} 、1.0982 吨/万元, 则基于节能减排协同效应的 SO_2 、 NO_x 和 CO_2 排放量限值分别为 1 613.81、1 436.38、1 139 981.91 万吨。其中, NO_x 、 CO_2 排放量限值小于规划限值, SO_2 排放量限值大于规划限值, 以节能减排效应下的限值作为 NO_x 、 CO_2 排放的控制目标, 以规划限值作为 SO_2 排放控制目标。

现有研究对排污权分配中涉及的公平性分配原则主要包括世袭制原则、人际公平原则与支付能力原则^[33], 其中, 支付能力体现了减排担当的公平性, 人口多、人均 GDP 少的省能够得到较多的排污权配

额,计算公式为:

$$R_k = R \times \frac{p_k(g_k/p_k)^{-\alpha}}{\sum_{k=1}^K p_k(g_k/p_k)^{-\alpha}} \tag{4}$$

式中: g_k 表示第 k 省基期人均 GDP; $0<\alpha<1$,本文取 0.7 以突出人均 GDP 较高的省承担较大的减排责任。

以 2011—2016 年为基期,分别按照世袭制、人际公平与支付能力原则,得到各省 2020 年非期望产出控制目标预分配值。咨询排污权分配领域相关专

家,2020 年世袭制和支付能力原则下的可行性并无悬殊,且比人际公平原则可行性高,为此设置三种序关系反映不同原则之间的差异,即:①世袭制=支付能力>人际公平;②世袭制>支付能力>人际公平;③支付能力>世袭制>人际公平。相应地,假设世袭制、人际公平与支付能力原则的权重向量有三种情形,即 $A_1:(3/7\ 1/7\ 3/7)$, $A_2:(4/7\ 1/7\ 2/7)$, $A_3:(2/7\ 1/7\ 4/7)$ 。得到 30 个省在三种情形下的非期望产出预分配值,如表 2 所示。

表 2 2020 年各省控制目标预分配值 万吨

地区	A ₁			A ₂			A ₃		
	SO ₂	NO _x	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO ₂
北京	12.14	13.13	11492.26	11.11	12.89	11658.79	13.17	13.37	11325.72
天津	13.39	14.41	13480.29	14.28	15.97	15400.99	12.49	12.85	11559.60
河北	95.51	94.27	80119.54	96.18	97.35	84340.26	94.83	91.18	75898.83
山西	69.65	57.32	43549.39	76.26	61.33	46089.08	63.03	53.30	41009.71
内蒙古	57.37	48.77	40318.00	68.85	58.07	48239.08	45.90	39.46	32396.92
辽宁	58.54	49.41	44159.62	64.13	53.22	48834.53	52.95	45.59	39484.71
吉林	30.15	31.40	23924.77	30.09	32.67	24601.23	30.22	30.13	23248.31
黑龙江	44.46	46.47	33428.84	42.90	47.06	32754.36	46.01	45.87	34103.32
上海	17.49	19.95	18473.14	17.45	21.26	20392.16	17.54	18.64	16554.11
江苏	70.77	73.58	62798.08	72.72	78.44	68119.80	68.81	68.73	57476.37
浙江	48.08	46.53	39024.72	48.12	47.51	40500.72	48.03	45.55	37548.72
安徽	63.78	66.72	53291.40	57.08	63.54	50876.91	70.48	69.90	55705.89
福建	33.15	31.54	26579.08	32.20	31.15	26781.95	34.10	31.94	26376.20
江西	53.08	47.80	34333.74	50.07	44.90	30834.63	56.10	50.69	37832.85
山东	112.43	98.01	82458.69	118.17	101.81	87037.57	106.70	94.20	77879.80
河南	109.62	105.36	75895.79	104.88	102.94	71403.44	114.36	107.78	80388.14
湖北	57.44	51.33	44316.41	54.72	48.56	43306.90	60.17	54.11	45325.93
湖南	68.51	59.77	48344.56	63.51	54.38	44371.12	73.51	65.16	52318.00
广东	84.31	88.38	68662.20	78.79	87.27	67289.55	89.83	89.49	70034.85
广西	52.53	46.82	36342.67	47.97	42.35	32527.02	57.10	51.28	40158.32
海南	7.54	8.60	6362.73	6.24	8.01	5739.16	8.83	9.19	6986.29
重庆	37.14	27.63	21299.80	38.43	26.75	20391.90	35.86	28.51	22207.70
四川	89.66	74.24	60972.43	82.58	65.38	54625.41	96.73	83.10	67319.45
贵州	63.84	42.67	33201.31	66.68	40.13	30961.15	61.00	45.22	35441.47
云南	63.87	52.65	39074.09	60.24	47.55	34119.35	67.49	57.76	44028.84
陕西	51.56	43.58	30478.72	54.03	44.72	30012.81	49.10	42.44	30944.64
甘肃	43.03	34.19	24908.81	42.80	32.34	22690.64	43.27	36.05	27126.97
青海	9.47	7.45	5215.92	10.17	7.70	5181.06	8.77	7.20	5250.79
宁夏	17.58	15.78	9999.18	20.78	18.62	11408.35	14.39	12.94	8590.00
新疆	43.69	38.63	27475.72	48.36	42.50	29491.98	39.02	34.75	25459.47

(二)基于 ZSG-DEA 优化的控制目标联合分配
假设决策者认为节能、污染物减排和降碳同等重要,则模型(1)中的 $\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 均为 0.25,将这一目标赋权情形命名为 B_1 。将表 2 中 2020 年 A_1 方案下各省 SO_2 、 NO_x 及 CO_2 排放控制目标预分配值及其他

参数值代入 ZSG-DEA 模型,得到 (A_1, B_1) 组合下能耗效率值 φ 、 SO_2 排放效率值 θ_1 、 NO_x 排放效率值 θ_2 、碳排放效率值 θ_3 及加权效率值 η (见表 3)。此时北京、天津、上海的效率值均达到 1,说明它们均实现了有效分配,在后续的调整过程中需按比例接受其他省

多余的配额;其他 27 个省的效率值均未达到 1,需要按照比例分配进一步调整给其他省。

表 3 基于 ZSG-DEA 的 (A_1, B_1) 初始分配方案效率测度结果

地区	φ	θ_1	θ_2	θ_3	η	地区	φ	θ_1	θ_2	θ_3	η
北京	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	河南	0.520	0.191	0.215	0.261	0.297
天津	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	湖北	0.588	0.298	0.360	0.365	0.403
河北	0.310	0.169	0.185	0.190	0.213	湖南	0.606	0.244	0.303	0.328	0.370
山西	0.199	0.097	0.127	0.146	0.142	广东	0.760	0.466	0.481	0.542	0.562
内蒙古	0.299	0.172	0.219	0.231	0.230	广西	0.565	0.177	0.215	0.242	0.300
辽宁	0.393	0.260	0.333	0.326	0.328	海南	0.635	0.265	0.251	0.297	0.362
吉林	0.501	0.252	0.262	0.300	0.329	重庆	0.603	0.251	0.364	0.414	0.408
黑龙江	0.364	0.175	0.181	0.220	0.235	四川	0.464	0.181	0.236	0.252	0.283
上海	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	贵州	0.383	0.102	0.165	0.186	0.209
江苏	0.750	0.548	0.570	0.584	0.613	云南	0.439	0.123	0.162	0.191	0.229
浙江	0.700	0.482	0.538	0.562	0.570	陕西	0.528	0.198	0.253	0.317	0.324
安徽	0.617	0.200	0.206	0.226	0.312	甘肃	0.298	0.087	0.119	0.143	0.162
福建	0.739	0.454	0.516	0.536	0.561	青海	0.201	0.141	0.194	0.242	0.195
江西	0.705	0.182	0.219	0.267	0.343	宁夏	0.186	0.092	0.110	0.152	0.135
山东	0.531	0.310	0.384	0.400	0.406	新疆	0.209	0.115	0.141	0.173	0.160

根据公式(2)和(3),经过 17 次迭代调整后,所有省的加权效率值均达到 1,迭代调整结束,调整后的结果即为基于 ZSG-DEA 优化后的控制目标联合分配方案(见表 4)。

表 4 基于 ZSG-DEA 优化的 (A_1, B_1) 最终分配方案

地区	能耗	SO ₂	NO _x	CO ₂	地区	能耗	SO ₂	NO _x	CO ₂
北京	14 773.61	46.88	42.64	33 694.82	河南	25 473.08	81.23	73.62	58 127.53
天津	17 190.07	51.68	46.79	39 523.65	湖北	20 818.27	66.25	60.13	47 496.82
河北	19 586.65	62.52	56.63	44 706.56	湖南	20 361.76	64.85	58.82	46 458.00
山西	8 195.13	26.30	23.72	18 711.75	广东	47 847.65	152.03	138.15	109 145.18
内蒙古	11 994.07	38.28	34.67	27 372.77	广西	11 302.33	36.07	32.67	25 793.27
辽宁	18 489.90	58.88	53.41	42 187.34	海南	2 433.21	7.75	7.03	55 52.16
吉林	9 241.37	29.43	26.70	21 086.81	重庆	11 330.40	36.09	32.72	25 848.93
黑龙江	9 457.41	30.19	27.35	21 584.70	四川	19 748.94	63.00	57.07	45 067.15
上海	24 240.23	67.53	64.80	54 162.45	贵州	7 924.91	25.42	22.92	18 090.02
江苏	47 162.56	149.79	136.15	107 579.88	云南	9 594.78	30.71	27.75	21 901.02
浙江	28 182.20	89.54	81.36	64 285.98	陕西	12 406.64	39.57	35.85	28 308.20
安徽	15 503.08	49.43	44.81	35 381.30	甘肃	4 567.39	14.68	13.22	10 429.30
福建	18 302.92	58.16	52.84	41 751.32	青海	1 625.79	5.20	4.70	3 710.33
江西	11 781.99	37.59	34.05	26 885.95	宁夏	1 958.56	6.29	5.67	4 471.92
山东	42 377.42	134.82	122.38	96 678.21	新疆	6 127.66	19.63	17.73	13 988.59

同理可得 (A_2, B_1) 、 (A_3, B_1) 组合下基于 ZSG-DEA 优化的最终分配方案。为了分析不同权系数对分配方案的影响,对 $\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 的取值进行灵敏度分析。鉴于 SO₂ 和 NO_x 排放控制通常在各类规划中同时出现,可认为具有相同的重要性,即 $\beta_1 = \beta_2$,定义如下三种情形:① B_2 :节能>减排=降碳,由 $\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 构成的目标权重向量为 (0.4 0.2 0.2 0.2);② B_3 :减排>节能=降碳,目标权重向量为 (1/6 1/3 1/3 1/6);③ B_4 :降碳>节能=减排,目标权重向量为 (0.2 0.2 0.2 0.4)。这样可得三种控制目标预分配方案 $A_1 \sim A_3$ 和四种目标权重情形 $B_1 \sim B_4$ 之间共 12 种组合情形下的分配方案。

上述方案均是对初始分配方案的效率优化,最终各省的能耗效率,SO₂、NO_x、碳排放的效率及加权

效率均为 1。计算这些方案的公平性测度指标值然后进行公平性比较,得到 12 种组合情形中能耗和非期望产出控制目标的 Gini 系数(见表 5)。

由表 5 可知,12 种组合情形中人均能耗 Gini 系数完全相同,强度 Gini 系数也完全相同,能耗控制目标分配额几无差别。固定目标权重方案 $B_i(i=1, 2, 3, 4)$,预分配方案 A_2 下非期望产出控制目标的 Gini 系数值最大, A_3 对应的 Gini 系数值最小,可见,初始分配方案按照支付能力>世袭制>人际公平的优先序,将会提高分配的公平性。固定预分配方案 $A_j(j=1, 2, 3)$,目标权重方案 B_1 对应的 Gini 系数值最小, B_3 次之, B_2 和 B_4 最大且二者基本相同,可见,节能、减排和降碳目标权重等同,亦可促进分配的公平性。 (A_3, B_1) 组合情形对应分配方案的公平性最

好,其强度 Gini 系数均小于 0.2,在经济发展上实现了绝对公平,人均 Gini 系数在 0.2~0.3 之间,在人均方面比较公平,具体分配结果见表 6。

表 5 不同预分配方案和目标权重组合下分配方案的公平性指标值

组合	人均 Gini 系数				强度 Gini 系数			
	能耗	SO ₂	NO _x	CO ₂	能耗	SO ₂	NO _x	CO ₂
(A ₁ , B ₁)	0.222 6	0.215 4	0.218 0	0.221 9	0.025 8	0.019 5	0.020 8	0.025 2
(A ₂ , B ₁)	0.222 6	0.222 2	0.224 3	0.228 4	0.025 8	0.028 6	0.028 2	0.033 0
(A ₃ , B ₁)	0.222 6	0.209 8	0.212 1	0.215 2	0.025 8	0.011 5	0.013 7	0.017 0
(A ₁ , B ₂)	0.222 6	0.222 2	0.224 3	0.228 4	0.025 8	0.028 8	0.028 3	0.033 0
(A ₂ , B ₂)	0.222 6	0.222 5	0.224 3	0.228 4	0.025 8	0.029 1	0.028 3	0.033 0
(A ₃ , B ₂)	0.222 6	0.210 2	0.212 2	0.215 2	0.025 8	0.011 8	0.013 6	0.017 1
(A ₁ , B ₃)	0.222 6	0.216 0	0.218 2	0.222 0	0.025 8	0.019 8	0.020 9	0.025 2
(A ₂ , B ₃)	0.222 6	0.222 5	0.224 3	0.228 4	0.025 8	0.028 6	0.028 2	0.033 0
(A ₃ , B ₃)	0.222 6	0.209 9	0.212 2	0.215 2	0.025 8	0.011 8	0.013 7	0.017 0
(A ₁ , B ₄)	0.222 6	0.215 9	0.218 2	0.222 0	0.025 8	0.020 2	0.021 0	0.025 2
(A ₂ , B ₄)	0.222 6	0.222 6	0.224 3	0.228 4	0.025 8	0.029 1	0.028 3	0.033 0
(A ₃ , B ₄)	0.222 6	0.210 2	0.212 3	0.215 3	0.025 8	0.011 8	0.013 6	0.017 0

表 6 基于 ZSG-DEA 模型优化的(A₃,B₁)最终分配方案

地区	能耗	SO ₂	NO _x	CO ₂	地区	能耗	SO ₂	NO _x	CO ₂
北京	14 773.61	47.32	42.98	33 994.64	河南	25 473.08	81.70	74.15	58 628.66
天津	17 190.08	44.87	41.30	34 696.62	湖北	20 818.26	66.73	60.58	47 910.72
河北	19 586.67	63.28	57.16	45 144.77	湖南	20 361.76	65.29	59.26	46 861.99
山西	8 195.12	26.32	23.86	18 865.75	广东	47 847.65	153.32	139.23	110 107.09
内蒙古	11 994.06	38.46	34.91	27 604.47	广西	11 302.35	36.52	32.99	26 049.78
辽宁	18 489.89	59.27	53.81	42 552.15	海南	2 433.21	7.80	7.08	5 600.21
吉林	9 241.37	29.63	26.90	21 268.24	重庆	11 330.42	36.58	33.06	26 110.08
黑龙江	9 457.40	30.33	27.53	21 767.64	四川	19 748.97	63.81	57.63	45 516.77
上海	24 240.24	63.00	59.93	49 687.86	贵州	7 924.91	25.45	23.07	18 242.72
江苏	47 162.55	151.10	137.23	108 527.89	云南	9 594.78	30.79	27.93	22 085.79
浙江	28 182.20	90.30	82.00	64 852.19	陕西	12 406.66	40.07	36.20	28 591.82
安徽	15 503.08	49.73	45.13	35 683.67	甘肃	4 567.39	14.68	13.30	10 515.58
福建	18 302.92	58.65	53.26	42 118.75	青海	1 625.79	5.22	4.73	3 742.01
江西	11 781.99	37.79	34.30	27 117.84	宁夏	1 958.55	6.29	5.70	4 508.49
山东	42 377.41	135.82	123.32	97 522.61	新疆	6 127.65	19.67	17.84	14 105.10

(三) 优化结果分析

1. 与工作方案的公平性比较

《“十三五”节能减排综合工作方案》对各省提出了能耗总量和强度“双控”、SO₂ 和 NO_x 排放总量控制要求,由此可计算各省在该工作方案下的能耗、SO₂ 和 NO_x 排放控制目标。其中,能耗取“双控”目标下的总量较小者,新疆的 SO₂ 和 NO_x 排放目标包含新疆生产建设兵团相应数值,对未设置要求的福建及海南取 2015 年的排放量(即在 2015 年的基础上不增加也不减少)。《“十三五”控制温室气体排放工作方案》中分类别对各省设置碳排放强度控制要求,据此计算各省在该工作方案下的 CO₂ 排放控制目标。结果表明,按照国家工作方案,2020 年 30 个省的能耗总量为 515 317 万吨,超过了国家总体规划限值 50 亿吨;SO₂、NO_x 和 CO₂ 排放总量分别为 1 554.77 万吨、1 541.52 万吨和 1 188 295 万吨,均低于国家总体规划限值。但亦可看出,除了在 SO₂ 排

放总量方面,国家工作方案数值略低于 ZSG-DEA 优化方案的 1 579.80 万吨之外,在能耗及 NO_x、CO₂ 排放总量方面,国家工作方案数值均高于 ZSG-DEA 优化方案数值。

计算国家工作方案下各指标的 Gini 系数,能耗和 SO₂、NO_x、CO₂ 排放的人均 Gini 系数依次为 0.188 6、0.289 4、0.232 4 和 0.258 2;强度 Gini 系数为 0.211 4、0.385 6、0.312 6、0.289 6。对比基于 ZSG-DEA 优化的(A₃, B₁)最终分配方案和工作方案,除了在能耗的人均 Gini 系数方面,工作方案较 ZSG-DEA 优化方案更为公平外,在其他指标的人均、强度 Gini 系数方面,ZSG-DEA 优化方案均比工作方案更加公平。可见,ZSG-DEA 优化方案总体上要比工作方案公平、有效。

2. 与初始分配方案的压力比较

假设 2020 年各省人口、GDP 等规划目标以及按照历史特征获得的资本存量均可实现,按照 A₃ 综

合公平性方案得到的各省控制目标预分配值对所有省是公平的,初始分配方案对于各省压力程度相当。定义优化后的控制目标实现压力指数:

$$z_{ij} = \frac{(g_{ij}^0 - g_{ij})}{g_{ij}^0} \times 100\%$$

(5)

式中: z_{ij} 为*i*省第*j*项分配要素的压力指数; g_{ij}^0 和 g_{ij} 分别为*i*省第*j*项要素的初始分配值和优化分配值; $z_{ij}>0$ 意味着控制目标的实现压力加大;反之, $z_{ij}\leq 0$ 意味着压力减小。由于大气污染物与碳排放具有同源同步性,将SO₂、NO_x和碳排放控制目标实现压力指数按等权重1/3加权为减排目标实现的压力指数。计算得到ZSG-DEA优化分配方案节能、减排的控制目标实现压力指数(见表7)。

表 7 ZSG-DEA 优化分配方案的节能减排压力指数

				%	
地区	节能	减排	地区	节能	减排
北京	-87.49	-226.97	河南	2.53	28.94
天津	-87.49	-226.97	湖北	-10.27	-9.53
河北	41.96	37.03	湖南	-13.70	10.22
山西	62.77	55.82	广东	-42.45	-61.16
内蒙古	43.99	14.18	广西	-6.00	35.62
辽宁	26.41	-12.57	海南	-19.07	18.14
吉林	6.14	7.07	重庆	-13.03	-11.84
黑龙江	31.78	36.74	四川	12.95	32.36
上海	-87.49	-226.97	贵州	28.12	51.93
江苏	-40.64	-102.69	云南	17.77	51.95
浙江	-31.19	-80.25	陕西	0.98	13.56
安徽	-15.67	33.61	甘肃	44.22	63.47
福建	-38.49	-66.16	青海	62.27	34.52
江西	-32.20	31.10	宁夏	65.12	53.25
山东	0.51	-27.81	新疆	60.73	47.62

计算压力指数>0的各省压力指数均值,得到节能压力指数均值为31.77%,减排压力指数均值为34.59%。将压力指数≥均值视为高压,压力指数>0且<均值视为低压,压力指数≤0视为无压,按照各省的节能压力与减排压力所处压力区,可将30个省划分为8类,见图1。

(1) I类地区包括北京、天津、上海、江苏、浙江、福建、湖北、广东、重庆这9个省(其中北京、天津、上海由于其坐标值较大,未在图中显示)。这些省不存在节能减排压力,可沿袭现有政策措施,如可继续推广节能减排促消费政策,或通过排污权交易、碳排放权交易,在市场上售出多余配额。

(2) II类地区包括安徽、江西、湖南、海南四省,这些省不存在节能压力但具有一定的减排压力;III类地区仅包括广西,其无节能压力但存在较高的减排压力。这五个省可采取脱硫、脱氮等前端控制技术减少能源中的硫和氮,或者安装工业排放源的废

气处理设备等废气后端处理技术减少大气污染物和二氧化碳排放。

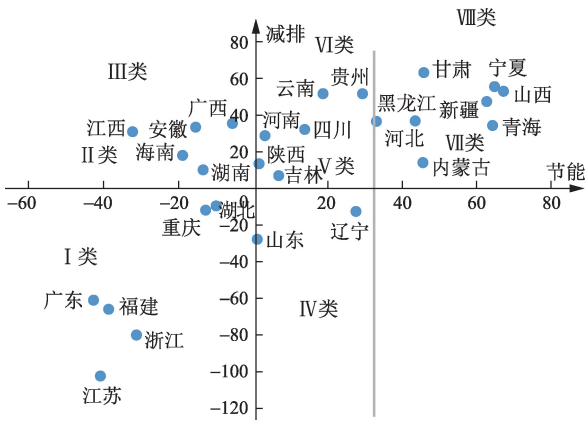


图 1 基于节能压力与减排压力的省域分类

(3) IV类地区包括辽宁和山东,它们具有一定的节能压力但不存在减排压力。这两个省工业发达,可通过采取节能技术、淘汰落后产能、加快新旧动能转换等来实现节能目标;由于节能减排的协同效应,在节能时会降低大气污染物和二氧化碳排放,还可将多余的排放配额通过市场出售。

(4) V类地区包括吉林、河南、四川、陕西这四个省,它们具有一定的节能压力与减排压力。可以通过推广节能技术、减少不发达产能来实现节能与大气污染物和二氧化碳协同减排。

(5) VI类地区包括贵州和云南两省,它们具有一定的节能压力和较高的减排压力。一方面可通过采取节能技术、加快淘汰落后产能等节能措施协同减少大气污染物、二氧化碳排放,另一方面还应采取脱硫脱氮技术、安装废气处理设施等减少排放。

(6) VII类地区包括内蒙古、青海,其节能压力较高,减排压力较小。除推广节能技术、淘汰落后产能等,还应大力改善能源结构,减少能源的消耗;若有多余的排放配额,也可通过市场出售。

(7) VIII类地区包括河北、山西、黑龙江、甘肃、宁夏以及新疆,这7个省具有很高的节能与减排双压力,这些地区的能源消耗主要多以煤炭等传统能源为主,应大力改善能源结构,使用清洁高效能源,避免过度使用煤炭等化石能源,同时采取脱硫脱氮技术及安装工业排放源的废气处理设备等措施。

从节能减排压力指数及地区分类中也能看到,省域间的节能减排压力差异很大,宁夏、青海等相对贫穷的地区承担了巨大的节能减排压力,而北京、天津、上海等经济发达地区拥有充足的配额。因此,加快实施区域协调发展战略,推动省域间的区域一体化合作,建设高效交通网络、健全物流运输系统,削

弱地区间的要素流动壁垒,建立资源输出地与输入地之间利益补偿机制,有利于推动各省节能减排控制目标和我国总体控制目标的有效实现。

四、结论

由于能耗、大气污染物和二氧化碳排放控制目标联合分配更加科学,本文构建了ZSG-DEA优化分配模型,对2020年省域控制目标联合分配进行实际分析。通过分析,得出以下主要结论:一是初始分配方案按照支付能力>世袭制>人际公平的优先序,节能、减排和降碳目标权重等同,该情形下基于ZSG-DEA优化的控制目标分配结果相对公平性最好。二是基于ZSG-DEA优化的控制目标分配结果总体上比国家工作方案的分配结果更加公平和有效,在经济发展上实现了绝对公平,在人际方面比较公平。三是相比基于公平性原则的初始分配方案,基于ZSG-DEA模型优化后的各省节能减排压力不尽相同,8类地区中的各省应结合节能减排压力的实际情况,针对性采取有关措施,同时,我国应加强区域协调发展战略实施,推动各省和全国节能减排目标实现。

参考文献:

[1] Paul E. How Large a Carbon Tax is Justified by the Secondary Benefits of CO₂ Abatement? [J]. Resource and Energy Economics, 1996,18(2):161-187.

[2] Johannes B, Sebastiaan H, Bob Z. An Integrated Assessment of Climate Change, Air Pollution, and Energy Security Policy [J]. Energy Policy, 2010, 38(8): 4021-4030.

[3] Zhang X, Zhang H, Yuan J. Economic Growth, Energy Consumption, and Carbon Emission Nexus: Fresh Evidence from Developing Countries[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(25): 26367-26380.

[4] 宋杰鲲,张凯新,曹子建.中国经济增长、能源消费与碳排放动态分析[J].中国石油大学学报(社会科学版), 2015,31(6):1-6.

[5] 汤铃,张亮,余乐安.基于CGE模型的碳关税政策影响研究[J].中国石油大学学报(社会科学版),2018,34(6):14-20.

[6] 薛冰.空气污染物与温室气体的协同防控[J].改革, 2017(8):78-80.

[7] 唐登莉,李力,洪雪飞.能源消费对中国雾霾污染的空间溢出效应[J].系统工程理论与实践,2017,37(7): 1697-1708.

[8] 田孟,王毅凌.工业结构、能源消耗与雾霾主要成分的关联性——以北京为例[J].经济问题,2018(7):50-58.

[9] 刘红琴,丁哲,王泳璇,等.基于信息熵的省域内能源消费总量分配研究[J].长江流域资源与环境,2014,23(4):482-489.

[10] Zhang L X, Feng Y Y, Zhao B H. Disaggregation of Energy-saving Targets for China's Provinces: Modeling Results and Real Choices [J]. Journal of Cleaner Production, 2015,103:837-846.

[11] Guo J, Zheng X, Wei C. Disaggregating Energy Use Cap Among China's Provinces [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 127: 374-386.

[12] 蒋洪强,张静,卢亚灵,等.基于主体功能区约束的大气污染物总量控制目标分配研究[J].地域研究与开发, 2015,34(3):137-142.

[13] 苑清敏,高凤凤.基于改进等比例分配方法的大气污染物总量分配效率[J].科技管理研究,2016,36(13): 197-204.

[14] Han R, Tang B J, Fan J L, et al. Integrated Weighting Approach to Carbon Emission Quotas: An Application Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Journal of Cleaner Production, 2016,131:448-459.

[15] Chang K, Zhang C, Chang H. Emissions Reduction Allocation and Economic Welfare Estimation-through Interregional Emissions Trading in China: Evidence from Efficiency and Equity [J]. Energy, 2016, 113: 1125-1135.

[16] Wang Y, Zhao H, Duan F, et al. Initial Provincial Allocation and Equity Evaluation of China's Carbon Emission Rights——Based on the Improved TOPSIS Method [J]. Sustainability, 2018,10:982.

[17] 刘晓.基于公平与发展的中国省区碳排放配额分配研究[J].系统工程,2016(2):64-69.

[18] Yang X, Li H, Wallin F, et al. Impacts of Emission Reduction Target and External Costs on Provincial Natural Gas Distribution in China [J]. Energy Procedia, 2017, 105:3326-3331.

[19] Xue J, Zhao L J, Fan L Z, et al. An Inter-provincial Cooperative Game Model for Air Pollution Control in China [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2015,65(7):818-827.

[20] 郑立群.中国各省区碳减排责任分摊——基于公平与效率权衡模型的研究[J].干旱区资源与环境,2013,7(5):1-6.

[21] 兰想,何艳秋.非线性规划法在我国分区减排中的运用[J].统计与决策,2017(9):85-87.

[22] Xiong S Q, Tian Y S, Ji J P, et al. Allocation of Energy Consumption among Provinces in China: A Weighted ZSG-DEA Model [J]. Sustainability, 2017, 9(11):2115.

[23] Wu X H, Tan L, Guo J, et al. A Study of Allocative

Efficiency of PM2.5 Emission Rights Based on a Zero Sum Gains Data Envelopment Model [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 113:1024-1031.

[24] Miao Z, Geng Y, Sheng J. Efficient Allocation of CO₂ Emissions in China: a Zero Sum Gains Data Envelopment Model[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 112: 4144-4150.

[25] 苗壮,周鹏,周德群,等.“十一五”省级能源强度约束指标效率分配研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2013,23(5):58-64.

[26] Jiang H Q, Shao X X, Zhang X, et al. A Study of the Allocation of Carbon Emission Permits among the Provinces of China Based on Fairness and Efficiency [J]. Sustainability, 2017,9:2212.

[27] 王科,李默洁.碳排放配额分配的 DEA 建模与应用[J]. 北京理工大学学报(社会科学版),2013,15(4): 7-13.

[28] 宋杰鲲,梁璐璐,牛丹平. 中国省域碳排放权分配——基于环境 FCAM [J]. 技术经济, 2017, 36 (10): 100-106.

[29] Zhou P, Sun Z R, Zhou D Q. Optimal Path for Controlling CO₂ Emissions in China: A Perspective of Efficiency Analysis[J]. Energy Economics, 2014, 45: 99-110.

[30] 李小龙,宋马林.“十二五”时期中国碳排放额度分配评估——基于效率视角的比较分析[J]. 中国工业经济,2015(9):99-113.

[31] 宋杰鲲,梁璐璐,康忠燕,等. 中国省域 EAC 控制目标协同分配——基于改进集中 DEA 模型[J]. 技术经济,2019,38(3):88-96.

[32] 张军,吴桂英,张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952—2000[J]. 经济研究,2004(10):35-44.

[33] 宋杰鲲,张凯新,曹子建. 省域碳排放配额分配——融合公平和效率的研究[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(5):7-13.

责任编辑:曲 红

Joint Distribution of the Control Targets of Provincial Energy Consumption, Air Pollutant and Carbon Emissions Based on ZSG-DEA Model

SONG Jiekun, LÜ Gaotian, LIANG Lulu, ZHAO Zhihao, ZHANG Yemeng

(School of Economics and Management, China University of Petroleum(East China), Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract: Air pollutants emissions and carbon emissions are energy homologous. Joint distribution of the control targets of energy consumption, air pollutant emissions and carbon emissions will help better meet China's energy conservation and emission reduction targets. Combined with the environmental production technology, a joint distribution model of provincial control targets based on ZSG-DEA is constructed, and the distribution analysis in 2020 is conducted. The results show that the ZSG-DEA distribution scheme can achieve fairness and efficiency at the same time and is generally better than the national work program. Each province can take targeted measures according to its own energy conservation and emission reduction pressure and actively implement the regional coordinated development strategy to ensure the effective completion of energy conservation and emission reduction targets.

Key words: energy consumption; air pollutant emissions; carbon emissions; joint distribution; ZSG-DEA model