

## 附录1 碳减排责任测算方法具体思路

建立包含  $M$  个区域  $N$  个部门的 MRIO 模型为:

$$X^r = \sum_{s=1, s \neq r}^M A^{rs} X^s + A^{rr} X^r + \sum_{s=1}^M Y^{rs} + EX^r \quad (1)$$

其中,  $r$ 、 $s$  为区域,  $X^r$ 、 $Y^{rs}$ 、 $EX^r$  分别表示总产出、最终产品、出口向量,  $A^{rs}$  为直接消耗系数矩阵。定义  $B^{rr} = (I - A^{rr})^{-1}$  为里昂惕夫逆矩阵, 则区域  $r$  的总产出表示为:

$$X^r = B^{rr} \sum_{s=1, s \neq r}^M A^{rs} X^s + B^{rr} \sum_{s=1, s \neq r}^M Y^{rs} + B^{rr} Y^{rr} + B^{rr} EX^r \quad (2)$$

其中,  $B^{rr} \sum_{s=1, s \neq r}^M A^{rs} X^s$  表示区域  $r$  为满足国内其他地区中间产品需要的总产出,  $B^{rr} \sum_{s=1, s \neq r}^M Y^{rs}$  表示区域  $r$  为满足国内其他地区最终产品需要的总产出,  $B^{rr} Y^{rr}$  表示区域  $r$  为满足本地区最终产品需要的总产出,  $B^{rr} EX^r$  表示区域  $r$  为满足国外产品需要的总产出。

由于本文的研究重点是国内统一的碳排放权分配方案的探索, 暂不涉及对外贸易, 因此暂不考虑进出口贸易隐含碳部分。定义  $C^r$  是碳排放系数对角矩阵, 其对角线上的元素表示区域  $r$  的第  $i$  部门单位总产出的碳排放量, 则区域  $r$  基于生产者责任的碳排放量 ( $PR$ ) 为:

$$PR = C^r B^{rr} Y^{rr} + C^r B^{rr} \sum_{s=1, s \neq r}^M A^{rs} X^s + C^r B^{rr} \sum_{s=1, s \neq r}^M Y^{rs} \quad (3)$$

其中,  $C^r B^{rr} Y^{rr}$  为满足本地区最终产品需求的碳排放量 ( $PR1$ ),  $C^r B^{rr} \sum_{s=1, s \neq r}^M A^{rs} X^s$  为满足其他地区中间产品需求的碳排放量 ( $PR2$ ),  $C^r B^{rr} \sum_{s=1, s \neq r}^M Y^{rs}$  为满足其他地区最终产品需求的碳排放量 ( $PR3$ )。

区域  $r$  基于消费者责任的碳排放量 ( $CR$ ) 为:

$$CR = C^r B^{rr} Y^{rr} + C^s B^{ss} \sum_{s=1, s \neq r}^M A^{sr} X^r + C^s B^{ss} \sum_{s=1, s \neq r}^M Y^{sr} \quad (4)$$

其中,  $C^r B^{rr} Y^{rr}$  表示区域  $r$  消费本地区最终产品所隐含的碳排放量 ( $CR1$ ),  $C^s B^{ss} \sum_{s=1, s \neq r}^M A^{sr} X^r$  表示区域  $r$  消费国内其他地区中间产品所隐含的碳排放量 ( $CR2$ ),  $C^s B^{ss} \sum_{s=1, s \neq r}^M Y^{sr}$  表示区域  $r$  消费国内其他地区最终产品所隐含的碳排放量 ( $CR3$ )。

共担责任下, 由于区域间贸易中商品隐含的经济利益也会和碳排放一同随商品转移, 产品的生产地和消费地均在商品贸易中获益。本文依据“受益原则”, 并借鉴王育宝和何宇鹏(2021)的国际增加值分解方法, 以各省产品流出中本地增加值占增加值总额的比重作为贸易隐含碳责任分担因子将交易主体的经济利益和所要承担贸易隐含碳责任相匹配。具体思路如下: 首先, 定义直接产出增加值系数矩阵 ( $V$ )、里昂惕夫逆矩阵 ( $B^*$ )、总产出流出矩阵 ( $V$ ); 其次, 计算出产品流出增加值矩阵为  $V \cdot B^* \cdot F$ , 该矩阵对角线上的元素为区域产品总流出的本地增加值, 记为  $LV^r$ , 矩阵中各列非对角元素加总为区域产品总流出中包含的其他地区的增加值总额, 记为  $FV^r$ , 则区域  $r$  的流出增加值表达式为:

$TV^r = LV^r + FV^r$ 。最后,计算贸易隐含碳责任分担因子为:  $\alpha^r = LV^r / TV^r$ , 则区域  $r$  基于共担责任的碳排放量 ( $VR$ ) 表达式为:

$$VR = C^r B^{rr} Y^{rr} + \alpha^r (PR2 + PR3) + \sum_{s=1, s \neq r}^M (1 - \alpha^s) (CR2 + CR3) \quad (5)$$

其中,定义  $VR1 = C^r B^{rr} Y^{rr}$ ,  $VR2 = \alpha^r (PR2 + PR3)$ ,  $VR3 = \sum_{s=1, s \neq r}^M (1 - \alpha^s) (CR2 + CR3)$ ,

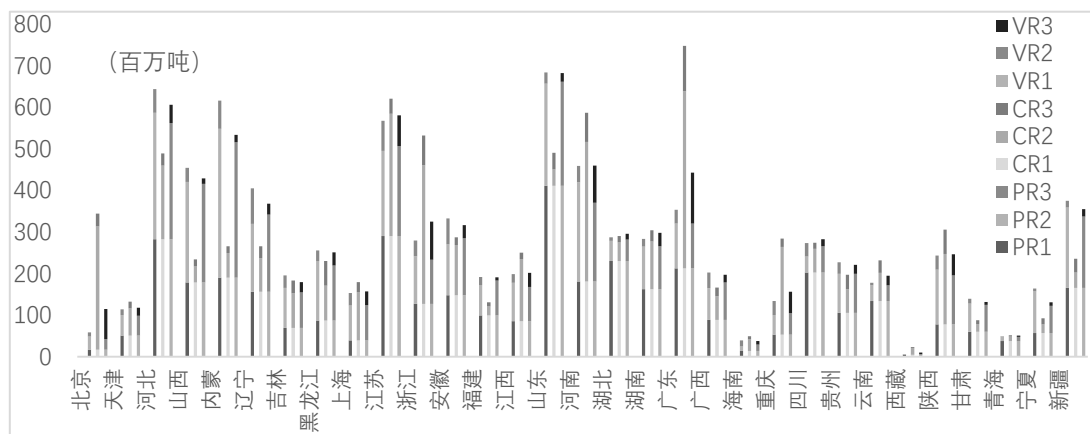
分别表示区域  $r$  为满足本地最终产品消费的碳排放、产品流出隐含碳的本地增加值部分、产品流入隐含碳剔除来源地增加值部分。

目前针对碳转移,区域  $r$  消费其他地区产品所隐含的碳排放量即为向其他地区转移的碳排放量。由此,区域  $r$  净碳转移量 ( $NCT$ ) 为区域  $r$  转移到其他所有地区的碳排放与其他所有地区转移到区域  $r$  的碳排放量之差,核算公式为:

$$NCT = CR2 + CR3 - (PR2 + PR3) \quad (6)$$

若式(6)的值为正,则表明区域  $r$  向其他地区转移了  $CO_2$ , 反之,则表明其他所有地区向区域  $r$  转移了  $CO_2$ 。

附图1 我国31个省份生产者责任、消费者责任和共担责任下碳排放测算结果



附图1 基期我国31省份生产者责任、消费者责任和共担责任下碳排放测算(单位:百万吨)

## 附录2 投入导向的碳配额分配的 ZSG-DEA 模型(效率维度下的方案设计)

基于效率视角,本文利用 ZSG-DEA 模型得到实现 DEA 有效的省域碳排放权分配方案。由于各省的投入产出与技术效率存在较大差异,因此选择可变规模报酬模型(DEA-BCC 模型)来分析初始 DEA 效率值。参考 Gomes 和 Lins (2008) 的做法,在投入导向碳配额分配的 ZSG-DEA 模型中,假设一个评价系统有  $m$  个相同类型的决策单元(Decision Making Unit,  $DMU$ ),我国碳排放总量目标约束既定。若被评价的  $i$  省份  $DMU_i$  在给定的投入和产出条件下效率值低于 1,要提高其效率值达到有效,需要减少其碳配额,减少量为  $\Delta CQ_i = CQ_i(1-\varphi_i)$  (碳配额定义为  $CQ$ ,  $\varphi_i$  是  $DMU_i$  的 ZSG-DEA 效率值)。同时将减少的部分按照比例分配给其他省份  $DMU_j$ ,其他省份  $DMU_j$  增加的碳配额为:

$$\frac{CQ_j}{\sum_{j \neq i}^m C_j} \cdot CQ_i(1-\varphi_i) \quad (7)$$

所有无效  $DMU$  按照式 (7) 比例消减后,  $DMU_j$  最终得到的碳配额调整量为:

$$CQ_j^i = \sum_{j \neq i}^m \left[ \frac{CQ_j}{\sum_{j \neq i}^n CQ_j} \cdot CQ_i(1-\varphi_i) \right] - CQ_j(1-\varphi_j) \quad (8)$$

将非期望产出碳排放量(即碳配额  $CQ$ )作为投入要素,将 GDP ( $Y$ )、就业人口 ( $L$ )、资本存量 ( $K$ ) 和能源消耗量 ( $E$ ) 作为产出变量。投入导向的碳配额分配的 ZSG-DEA 模型可表示如下:

$$\begin{aligned} & \min \varphi_i \\ & \left. \begin{aligned} & \sum_{j=1}^m \mu_j Y_j \geq Y_i, \\ & \sum_{j=1}^m \mu_j L_j \geq L_i, \\ & \sum_{j=1}^m \mu_j K_j \geq K_i, \\ & \sum_{j=1}^m \mu_j E_j \geq E_i, \\ & \sum_{j=1}^m \mu_j CQ_j \left( 1 + \frac{CQ_i(1-\varphi_i)}{\sum_{j \neq i}^m CQ_j} \right) \leq \varphi_i CQ_i, \\ & \sum_{j=1}^m \mu_j = 1, \mu_j \geq 0 \end{aligned} \right\} s.t. \quad (9) \end{aligned}$$

其中,  $\varphi_i$  是决策单元  $DMU_i$  的 ZSG-DEA 效率值;  $DMU_i$  表示被评价的  $i$  省份;  $\mu_j$  为相对组合比例。所有决策单元按照式 (8) 重新分配碳配额后,按式 (9) 计算 ZSG-DEA 效率,通过多次迭代,可实现对碳配额的多次再分配,最终所有决策单元均会达到有效 DEA 边界,此时的碳配额分配结果就是使得效率最优的分配方案。

### 附录3 熵值法具体计算步骤(兼顾公平和效率维度下的方案设计)

参考王文举和陈真玲(2019),本文采用熵值法将公平维度下的三种碳配额分别与效率维度下的碳配额进行综合得到兼顾公平和效率维度下的三种碳排放权分配方案,并分别定义为生产-效率原则、消费-效率原则、共担-效率原则。熵值法通过计算熵值来判断某个指标的离散程度,离散程度越大,该指标对综合评价的影响越大。具体计算步骤如下:

首先将碳配额数据标准化。

$$CQ_{iz} = \frac{\max\{cq_{iz}\} - cq_{iz}}{\max\{cq_{iz}\} - \min\{cq_{iz}\}} \quad (10)$$

其中,  $cq_{iz}$  代表  $z$  原则(公平/效率)下  $i$  省的碳配额;  $i = 1, 2, L, 30$ ;  $z = 1, 2$ 。为消除 0 值的影响,令  $Q_{iz} = CQ_{iz} + 0.0001$ 。

其次计算  $z$  方案下  $i$  省的碳配额所占的比重。

$$q_{iz} = \frac{Q_{iz}}{\sum_{i=1}^{30} Q_{iz}} \quad (11)$$

再计算  $z$  方案碳配额此指标的熵值。

$$h_z = -\frac{1}{\ln(30)} \sum_{i=1}^{30} q_{iz} \ln q_{iz} \quad (12)$$

随后计算各方案的权重。

$$\omega_z = \frac{1 - h_z}{2 - \sum_{z=1}^2 h_z} \quad (13)$$

最后计算兼顾公平和效率维度下的分配方案的碳配额。

$$W_i = \omega_1 cq_{iz1} + \omega_2 cq_{iz2} \quad (14)$$

其中,  $\sum_{z=1}^2 \omega_z = 1$ ,  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  分别表示公平原则的权重、效率原则的权重,  $cq_{iz1}$ 、 $cq_{iz2}$  分别

表示公平维度下的分配方案的碳配额、效率维度下的分配方案的碳配额。

附表1 不同方案下碳配额的权重

方案 权重	公平原则(生产/消费/共担)权重 w1	效率原则权重 w2
生产-效率方案	0.6563	0.3437
消费-效率方案	0.4481	0.5519
共担-效率方案	0.5801	0.4199

附表2 碳减排量

附表2		东、中、西三大区域各省碳减排量						(百万吨)
地区	生产原则	消费原则	共担原则	效率原则	生产-效率原则	消费-效率原则	共担-效率原则	
北京	-235.64	31.16	-85.65	-34.50	-168.62	-4.21	-64.99	
天津	91.70	95.29	89.68	14.46	65.96	51.75	59.29	
河北	583.13	430.23	540.21	122.93	429.80	264.70	371.63	
辽宁	364.18	240.64	333.76	25.70	251.40	124.86	209.31	
上海	45.89	55.80	40.65	-34.65	19.05	7.08	10.23	
江苏	321.21	319.12	303.41	30.58	224.38	163.70	193.19	
浙江	-136.77	93.42	-88.56	-101.16	-124.90	-11.39	-93.65	
福建	-71.35	-281.90	-94.09	-23.70	-55.47	-142.81	-65.65	
山东	354.70	41.51	317.78	-351.73	119.32	-170.32	47.31	
广东	-1066.55	-263.42	-809.27	-225.07	-786.17	-242.76	-573.26	
海南	-50.79	-39.55	-61.59	-16.77	-39.45	-27.28	-43.48	
东部平均	18.16	65.66	44.21	-53.99	-5.88	1.21	4.54	
山西	462.53	339.40	449.22	112.82	346.01	217.35	313.32	
吉林	83.35	60.36	62.57	90.56	85.75	76.63	73.88	
黑龙江	103.26	63.12	88.90	50.00	85.51	56.05	73.19	
安徽	-21.34	-141.53	-72.08	136.38	31.21	8.17	12.13	
江西	-160.19	-107.35	-177.23	35.45	-95.00	-30.43	-91.31	
河南	-329.44	-210.43	-377.40	-97.51	-252.16	-149.60	-264.33	
湖北	-127.52	-169.61	-142.00	-20.43	-91.84	-89.25	-92.89	
湖南	-289.74	-303.09	-294.53	-8.06	-195.88	-144.17	-178.80	
中部平均	-34.89	-58.64	-57.82	37.40	-10.80	-6.91	-19.35	
四川	-676.31	-774.59	-702.29	-122.52	-491.79	-423.34	-468.07	
重庆	-125.86	15.77	-99.05	4.93	-82.28	9.93	-57.04	
贵州	17.76	-49.93	-4.86	72.86	36.12	16.21	26.54	
云南	-283.78	-206.20	-267.98	-78.70	-215.45	-137.52	-191.51	
陕西	48.17	79.61	36.84	25.88	40.74	50.67	32.41	
甘肃	-13.26	-148.79	-35.74	30.12	1.20	-52.42	-9.13	
青海	27.71	26.36	26.85	-20.70	11.58	1.01	7.64	
宁夏	193.56	182.11	189.55	81.55	156.24	127.94	145.92	
广西	-225.70	-386.11	-267.77	6.25	-148.41	-174.76	-157.07	
内蒙	729.05	669.61	720.43	238.93	565.75	437.62	525.91	
新疆	388.03	338.99	380.22	56.10	277.43	186.61	249.28	
西部平均	7.22	-23.01	-2.16	26.79	13.74	3.81	9.53	

附表3 7种碳排放权分配方案的边际减排成本

附表3		7种碳排放权分配方案的边际减排成本					(元/吨)	
地区	生产原则	消费原则	共担原则	效率原则	生产-效率原则	消费-效率原则	共担-效率原则	
北京	1304	6399	3762	5695	2194	3999	5007	
天津	6443	6793	6262	3138	4731	4135	4416	
河北	3291	2274	2924	1500	2333	1770	2090	
辽宁	4490	2687	3853	1551	2720	1914	2374	
上海	4327	2149	4051	2884	5163	3006	4944	
江苏	6295	6269	6079	3922	5212	4713	4939	
浙江	537	1723	507	799	632	1975	542	
福建	3573	2218	3352	3787	3643	2875	3522	
山东	4099	2678	3857	1807	2854	2115	2612	
广东	1990	3832	2353	3927	2397	3884	2829	
海南	1612	1826	1449	2520	1840	2153	1764	
东部平均	3451	3532	3495	2866	3065	2958	3185	
山西	3192	943	2695	124	1720	276	849	
吉林	2523	2145	2176	2642	2563	2394	2350	
黑龙江	2962	2424	2744	2382	2733	2400	2579	
安徽	2430	1910	2179	3596	2734	2577	2611	
江西	1827	1883	1754	2751	2186	2280	2219	
河南	1913	2227	1810	3219	2223	2683	2218	
湖北	2548	2345	2474	3360	2779	2814	2782	
湖南	1943	1690	1928	2751	2318	2147	2408	
中部平均	2417	1946	2220	2603	2407	2196	2252	
四川	1355	1235	1321	3056	1676	1840	1735	
重庆	2622	5047	2884	4637	3082	4812	3429	
贵州	1524	1205	1400	1906	1637	1512	1576	
云南	1274	1510	1316	2391	1518	1896	1622	
陕西	2689	3075	2573	2367	2569	2639	2482	
甘肃	453	249	313	1038	551	164	479	
青海	2813	2684	2730	1059	1792	1453	1642	
宁夏	14038	3998	5844	651	1634	1043	1344	
广西	513	325	455	1014	618	519	592	
内蒙古	5913	1854	6156	289	646	465	573	
新疆	6112	3500	5463	999	2216	1470	1900	
西部平均	3573	2244	2769	1764	1631	1619	1579	
全国平均	3220	2636	2889	2392	2364	2264	2348	



附表4 7种碳排放权分配方案的减排总成本

附表4		7种碳排放权分配方案的减排总成本					(百亿元)	
地区	生产原则	消费原则	共担原则	效率原则	生产-效率原则	消费-效率原则	共担-效率原则	
北京	-32.80	13.58	-36.94	-19.92	-38.86	-3.92	-35.87	
天津	59.40	65.11	56.43	5.38	31.41	21.67	26.26	
河北	194.68	98.96	160.13	26.17	104.58	51.56	81.73	
辽宁	165.68	65.21	130.20	1.96	67.04	22.15	47.79	
上海	13.78	9.02	10.73	-8.01	5.87	1.05	1.84	
江苏	195.31	193.16	177.54	0.14	106.18	65.16	83.75	
浙江	-7.64	16.03	-4.71	-13.80	-9.65	-10.58	-6.86	
福建	-21.26	-60.93	-27.74	-14.99	-19.19	-41.68	-22.76	
山东	148.86	11.53	125.54	-72.63	28.60	-42.84	5.22	
广东	-218.27	-105.68	-196.13	-99.87	-193.44	-102.51	-167.01	
海南	-8.66	-7.71	-9.38	-4.64	-7.65	-6.26	-7.99	
东部总和	489.08	298.27	385.68	-200.21	74.89	-46.20	6.10	
山西	157.69	34.70	129.45	2.22	66.34	7.29	30.04	
吉林	19.11	11.21	11.86	21.61	19.94	16.41	15.50	
黑龙江	30.50	15.02	24.23	13.80	23.91	14.34	19.49	
安徽	-8.74	-30.33	-19.14	39.70	3.92	-2.64	-1.20	
江西	-30.90	-21.68	-32.72	8.64	-21.91	-7.82	-21.09	
河南	-71.91	-56.63	-76.92	-8.36	-56.83	-34.42	-57.09	
湖北	-36.33	-43.52	-38.94	-7.53	-28.14	-26.89	-28.02	
湖南	-61.99	-56.24	-62.46	-5.43	-50.11	-34.36	-47.25	
中部总和	-2.57	-147.49	-64.64	64.65	-42.87	-68.08	-89.62	
四川	-95.64	-99.53	-96.74	-40.91	-85.33	-80.05	-83.44	
重庆	-36.32	3.15	-32.05	-3.51	-28.82	-0.66	-23.19	
贵州	1.04	-7.51	-2.28	11.25	4.05	0.70	2.42	
云南	-35.82	-30.50	-34.87	-10.68	-30.34	-21.83	-27.98	
陕西	18.19	30.67	14.42	7.74	14.29	16.56	11.48	
甘肃	-0.23	-3.58	-0.88	3.10	0.38	-0.79	-0.18	
青海	7.03	6.34	6.58	-2.36	1.57	-0.25	0.76	
宁夏	307.04	82.77	125.43	5.43	28.14	14.46	21.44	
广西	-10.80	-12.15	-11.53	2.49	-8.02	-8.01	-8.09	
内蒙古	479.50	139.05	493.76	7.17	39.87	21.99	32.60	
新疆	261.35	132.13	229.25	8.39	68.57	31.67	52.94	
西部总和	895.33	240.85	691.10	-11.91	4.37	-26.20	-21.24	
全国	1381.84	391.63	1012.13	-147.47	36.39	-140.48	-104.76	