

工业行业单要素和全要素碳排放效率的比较研究

——以云南省为例¹

林秀群¹，张杨杨¹，唐向阳²

(1. 昆明理工大学管理与经济学院，云南昆明 650093；

2. 云南昆船环保技术有限公司，云南昆明 650051)

【摘要】：文章利用单效率 and 全效率两种测算模型，计算云南省工业 35 个行业的碳排放效率。结果表明，2010 年、2015 年、2016 年单效率和全效率低碳目标完成的行业个数、排序、最大与最小值的比值等方面差异性较大。以碳排放量为分类变量，将工业行业分为 5 个单元，可见单效率的总体、单元间、单元内的泰尔指数均大于全效率，说明单效率法较全效率法易完成现阶段低碳经济目标，单效率法完成低碳目标的行业数、评价值、排序等显著优于全效率法。建议将排序均为后位的 6 个行业作为云南省“十四五”低碳经济发展的重点考核对象，并将全效率法作为“十四五”低碳经济的官方评价方法。

【关键词】：碳排放效率；单要素；全要素；超效率 DEA；低碳目标；行业差异性

【中图分类号】：F205；F062.2 **【文献标识码】：**A **【文章编号】：**1671-4407(2019)08-020-08

1 引言

碳排放效率是度量区域低碳经济发展水平最有效的指标之一^[1]。其中，“碳”是化石能源消费产生的 CO₂ 的简称。工业行业是我国主要的碳源，其化石能源消费量大约占我国总化石能源消费量的 80%，且其年均增长 8.18% 左右^[2-3]。白万平等^[4]明确了碳排放量与气温变化间的变化关系，表明碳排放量增加是气温升高的主要原因。自“十一五”以来，碳强度（一定程度上是单要素碳排放效率的倒数）成为我国工业行业低碳经济发展的考核目标。学界部分学者提出了我国应该采取全要素碳排放效率来评价我国的低碳经济发展。本文以云南省工业行业为例，采用单要素和全要素评价方法分别进行测算，比较低碳目标完成情况的行业差异性，探讨我国采取全要素碳排放效率的优劣和时机。

云南是我国低碳经济试点省份，也是世界基因宝库。苔藓、蕨类、竹类种类占中国的比例超过了 50%，被子植物、裸子植物、两栖类、淡水鱼类分别占中国的 43.9%、37%、42.3% 和 43.3%。虽然云南省的低碳经济发展评价为优秀，但是其现阶段的升温率为 0.14℃/10a，高于世界平均水平 0.13℃/10a。过快的气温升温率对云南省的生态屏障和基因宝库地位产生了较大的威胁。

¹**基金项目：**国家自然科学基金项目“云南少数民族贫困地区生态文明建设的关键因素和有效路径研究”（71463034）；云南省院省校合作项目“碳排放交易市场机制下云南企业碳减排效率研究”（SYSX201702）

第一作者简介：林秀群（1969—），女，湖南新宁人，硕士，副教授，研究方向为可持续发展。

通讯作者简介：唐向阳（1967—），男，四川蓬安人，博士，研究员级高级工程师，研究方向为可持续发展。E-mail: tangxiangyang@126.com

与此同时，云南省在国内经济排名由计划经济时期的 16 名下降到现阶段的 23 名。该研究有利于发现云南省工业行业低碳经济发展存在的主要问题。

2 国内外研究现状

2.1 关于碳排放效率的定义

碳排放效率的测度有单要素法和全要素法两种。为叙述方便，本文将其分为单效率（单要素碳排放效率的简称）和全效率（全要素碳排放效率的简称）。Kaya&Yokobori^[6]、Mielnik & Goldemberg^[6]、潘家华和张丽峰^[7]主张采用单效率（实质为碳生产率）来度量区域、行业的碳排放效率，其含义为“一定的生产技术条件下，一年时间内一个地区、行业的 GDP 与该年该地区、行业的化石能源消费产生的碳排放量的比值”。Greening 等^[8]、Sun^[9]主张选用区域或行业单位 GDP 的碳排放量（实质是碳强度）来评价其碳排放效率。Zhang 等^[10]指出应采用人均 GDP 的碳排放量，而不是由单位 GDP 的碳排放量来度量碳排放效率。Jobert 等^[11]认为采用区域、行业的碳强度来度量碳排放效率比较合理。Ramanathan^[12]指出，碳排放效率的评价应将能源消费指标、经济发展指标和碳排放量纳入统一的研究框架中，即采取全要素视角，以提高科学性和系统性。董锋等^[13]将碳排放效率定义为“碳排放量、固定资本和劳动力一定的条件下，实际产出所能达到的最大程度”。部分学者主张“在固定资本、劳动力一定的条件下，GDP（期望产出）达到最大时，碳排放量（非期望产出）为最小”^[14-17]。

2.2 碳排放效率的评价及应用

关于碳排放效率的研究主要有国家尺度、中国区域尺度（东部、中部、西部为主）、省域尺度和行业尺度。单效率方面，Canadell 等^[18]利用碳排放量与生产总值的比值，测算了全球地区、行业的碳排放效率；Zhang 等^[10]以人均碳排放量与人均国内生产总值做比，度量工业行业碳排放效率；潘家华和张丽峰^[7]借助碳排放量和国内生产总值的比值，评测 1995—2008 年我国各省份的碳排放效率；Podkorytova & Raskina^[19]指出地区、行业的碳排放量与工业增加值的比值可作为气候变化的标准。在全效率领域，Zaim & Taskin^[14]首次将碳排放量作为非期望产出，测度了经济合作组织国家的全效率。杜克锐和邹楚沅^[20]、刘亦文和胡宗义^[21]分别运用 SFA 方法、三阶段 DEA 和超效率 DEA 研究了我国省域尺度的全效率，发现“高、中、低效率地区分别为东部地区、中西部地区和西部地区，且地区之间的差距呈逐步扩大的态势”。周五七和聂鸣^[17]基于非期望产出 DEA 模型，测度了 1998—2009 年各省份碳排放效率的变化，发现：（1）工业行业碳排放效率不断增长，但 2008 年略有下降；（2）东部地区的工业碳排放效率明显高于西部地区，且递增速率快于西部地区。路正南和王志诚^[16]基于超效率 DEA 模型，测度了 2000—2011 年我国 36 个工业行业碳排放效率，分析了碳排放效率变化趋势。Wang 等^[22]运用非径向距离函数法，测度了 1996—2012 年我国 30 个省份的碳排放效率，认为区域间的碳排放效率存在显著差异。曲晨瑶等^[23]由超效率 DEA 模型，测算了我国制造业行业的碳排放效率，并将其分为高效率、中效率和低效率行业。

2.3 文献综述

单效率的概念尚未统一，部分专家认为采用碳生产率或碳强度的倒数，部分主张采用人均 GDP 的碳排放量。该方法因只涉及 GDP 和碳排放量两个变量，其计算相对简单，易于操作，受到了政府的推崇。我国现阶段低碳目标的评价指标——“碳强度”，实质是单要素碳排放效率的倒数。而 Zaim & Taskin^[14]、董锋等^[13]、Wang 等^[22]主张采用全效率来评价地区、行业的低碳经济发展水平。该概念至今未达成一致，主要分歧在于碳排放量，部分学者认为将其作为投入变量更为妥当，而另一部分学者认为将其作为非期望产出更为合理。本文采用董锋等^[13]、曲晨瑶等^[23]的观点，即将碳排放量作为投入变量。原因如下：（1）产生 CO₂ 的化石能源绝大部分是工业生产的基本投入，故碳排放量可以作为化石能源消耗的“替代物”；（2）碳排放量作为投入变量有利于超效率 DEA 模型分析变量关系。

国内外对单效率、全效率的研究成果颇丰，但采用两者结合的方法分别测度工业行业碳排放效率并加以比较的研究还不多

见。本文以碳生产率作为单效率的概念，全效率采用董锋等^[13]对碳排放效率的定义，分别测算云南省工业行业的碳排放效率，探究两种方法的优劣，为我国“十四五”碳排放效率的评价和工业行业碳排放效率的提高提供实践指导依据。

3 研究方法

3.1 单效率测算方法

单效率指单位时间内某行业的工业增加值与该行业化石能源消费所产生的碳排放量的比值，见式(1)。其中， Y_{Ti} 为第 T_i 行业的单效率(万元/吨)； I_{Ti} 为第 T_i 行业的工业增加值(亿元)； X_{iTi} 为第 T_i 行业化石能源消费产生的碳排放量(万吨)。

$$Y_{Ti} = \frac{I_{Ti}}{X_{iTi}} \tag{1}$$

碳排放量 X_{iTi} 主要是工业生产中化石能源的消费，参考《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》能源消费的碳排放系数，工业行业的碳排放量由能源消费量与相应碳排放系数的乘积获得，公式见式(2)。其中， X_{iTi} 为 T_i 行业化石能源消耗产生的碳排放量(万吨)； $E_{Ti,j}$ 为 T_i 行业第 j 种能源的消费量； η_j 为第 j 种能源的碳排放系数(表 1)。

$$X_{iTi} = \frac{44}{12} \cdot \sum_j E_{Ti,j} \times \eta_j \tag{2}$$

表 1 能源折算标准煤系数和碳排放系数

能源种类	原煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气
折算标准煤系数	0.714	0.971	1.429	1.471	1.471	1.457	1.429	1.330
碳排放系数	0.756	0.855	0.586	0.554	0.571	0.574	0.619	0.448

3.2 全效率测算方法—超效率 DEA

运用超效率 DEA-CCR 模型对云南省工业行业的全效率进行测算。相较于传统 DEA 模型，超效率 DEA 模型效率值取值范围广，可大于 1，方便效率的比较和排序，便于确定云南省工业行业全效率的变化形态。超效率 DEA-CCR 模型构建如下：

$$\begin{aligned} &\max h_0 \\ &\text{s.t.} \begin{cases} W^T X_j - Q^T Y_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, k \\ W > 0, Q > 0 \end{cases} \end{aligned} \tag{3}$$

式(3)等价于以下线性规划问题，如式(4)所示：

$$\begin{aligned} & \max Q^T Y_0 \\ & \text{s.t.} \begin{cases} W^T X_j - Q^T Y_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, k \\ W^T X_0 = 1 \\ W > 0, Q > 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)的对偶规划为：

$$\begin{aligned} & \min \theta \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^k X_j \lambda_j \leq \theta X_0 \\ \sum_{j=1}^k Y_j \lambda_j \geq Y_0 \\ \lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, k \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

式中： λ_j 为决策单元的要素； θ 为综合效率评价指数， $0 < \theta < 1$ 。

式(5)中引入松弛变量 S^+ 、 S^- ，得式(6)。

$$\begin{aligned} & \min \theta \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^k X_j \lambda_j + S^+ = \theta X_0 \\ \sum_{j=1}^k Y_j \lambda_j - S^- = Y_0 \\ \lambda \geq 0, j = 1, 2, \dots, k \\ S^+ \geq 0, S^- \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

3.3 泰尔指数

采用泰尔(Theil)指数比较单效率和全效率评价结果的行业目标完成的差异性。泰尔指数可将总体差异分解为单元内差异和单元间差异,可更好地对行业差异性进行描述。借鉴陈德湖等^[24]关于泰尔系数及其结构分解的方法,得到工业行业单效率和全效率的泰尔指数,见式(7)。其中, n_p ($p=1, 2, \dots, k$) 表示第 p 单元的个体数目; e_p 表示各单元的样本数值; e 表示各单元样本数值的总和; $Theil$ 代表样本总体差异的泰尔指数; $Theil_p$ 表示某个单元内样本差异的泰尔指数; $Theil_w$ 和 $Theil_b$ 分别表示样本单元内和样本单元间的差异的泰尔指数。 $Theil$ 、 $Theil_w$ 、 $Theil_b$ 都有单要素(single)和全要素(full)之分,分别用 $Theil_s$ 和 $Theil_f$ 、 $Theil_{sw}$ 和 $Theil_{fw}$ 、 $Theil_{sb}$ 和 $Theil_{fb}$ 表示。

$$Theil = Theil_w + Theil_b = \frac{1}{35} \sum_{i=1}^5 \frac{e_i}{e} \ln \frac{e_i}{e} \quad (7)$$

$$Theil_p = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^{n_p} \frac{e_{pi}}{e_p} \ln \frac{e_{pi}}{e_p} \quad (8)$$

$$Theil_w = \sum_{p=1}^5 \frac{n_p}{35} \left(\frac{e_p}{e} \right) Theil_p \quad (9)$$

$$Theil_b = \sum_{p=1}^5 \frac{n_p}{35} \left(\frac{e_p}{e} \right) \ln \left(\frac{e_p}{e} \right) \quad (10)$$

4、云南省工业行业单要素和全要素碳排放效率实证结果

4.1 数据来源

本文以国家统计局规模以上工业行业的划分为基础,结合云南省工业行业统计数据,分析云南省碳排放效率。由于云南省煤炭开采和洗选业、石油和天然气开采业、其他采矿业 3 个行业的统计数据不完整,因此,剔除上述 3 个行业,将剩余 35 个工业行业作为研究对象。

统计数据中,云南省 35 个公业行业的工业增加值(Y_{Ti})、碳排放量(X_{1Ti})、资本(X_{2Ti})、劳动力(X_{3Ti})和化石能源消费量(ET_i)均来源于 2006—2017 年《云南统计年鉴》。参照曲晨瑶等^[23]的测算方法,资本用年末固定资产净值表示;劳动力用年均就业人数表示。

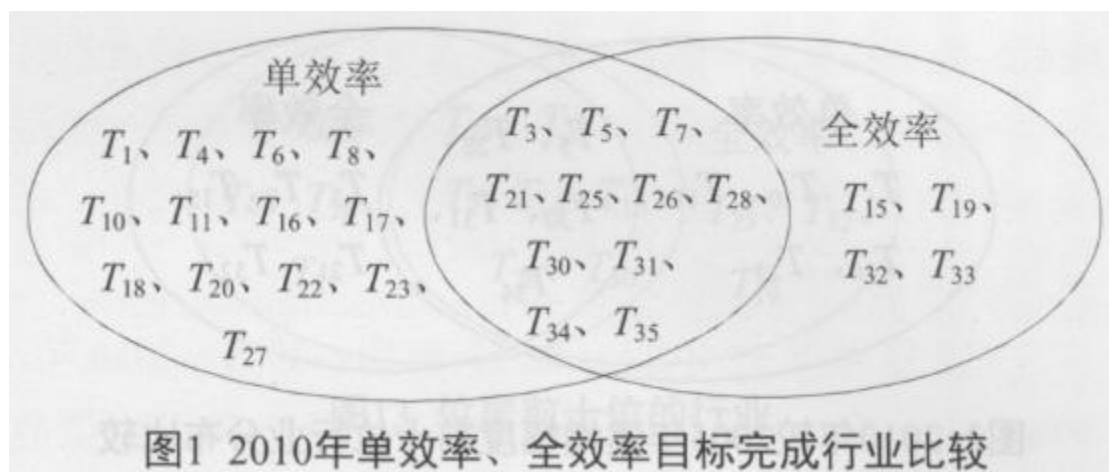
4.2 单效率和全效率低碳目标完成情况的行业差异性比较

表 2 是对 2005—2016 年云南省工业行业单效率、全效率两种方法的效率均值排序和增长率情况的描述。

表 2 2005—2016 年云南省工业行业单效率 and 全效率的均值排序及增长率比较

行业名称及编号	单效率 测算均 值/(万 元/吨)	全效率 测算均 值	单效率 均值排 序	全效率 均值排 序	2010 年较 2005 年单效 率增长 率/%	2010 年较 2005 年全效 率增长 率/%	2015 年较 2005 年单效 率增长 率/%	2015 年较 2005 年全效 率增长 率/%	2016 年较 2005 年单效 率增长 率/%	2016 年较 2005 年全效 率增长 率/%	单效率 年均增 长率/%	全效率 年均增 长率 /%
黑色金属矿采选业 T ₁	0.582	0.153	22	16	272.79	15.44	821.08	78.24	810.63	102.85	27.99	9.16
有色金属矿采选业 T ₂	2.952	0.175	12	15	-20.97	-18.59	823.90	124.40	717.78	71.68	60.07	15.53
非金属矿采选业 T ₃	0.251	0.126	26	18	58.11	50.84	441.57	65.72	292.50	49.61	17.40	6.68
农副食品加工业 T ₄	0.632	0.076	21	26	118.27	-10.57	724.48	16.96	673.72	5.41	27.24	1.85
食品制造业 T ₅	0.492	0.056	24	32	645.94	259.02	1565.5	287.56	1322.4	253.03	35.57	15.04
饮料制造业 T ₆	0.559	0.070	23	29	89.01	-36.32	513.19	6.75	397.82	0.20	21.81	3.42
烟草制品业 T ₇	13.87	9.325	4	1	83.30	99.89	339.83	166.08	354.55	271.66	16.46	20.97
纺织业 T ₈	0.140	0.032	28	35	25.43	-47.62	428.04	-42.83	392.29	-21.36	22.29	15.15
纺织服装、鞋、帽制造业 T ₉	4.726	0.114	8	20	-95.92	-93.81	11385	15.49	9186.3	6.93	482.46	72.95
皮革、毛皮、羽毛(绒)及其制品业 T ₁₀	0.996	0.048	18	34	12073	-26.08	95630	89.53	110266	99.49	312.9	84.63
木材加工及木、竹、藤、棕、草制品业 T ₁₁	1.1136	0.059	17	31	512.11	19.50	2239.2	78.73	5580.2	237.11	104.9	27.09
家具制造业 T ₁₂	3.464	0.050	11	33	11.18	-9.76	8253.3	308.01	1875.3	305.79	157.2	38.38
造纸及纸制品业 T ₁₃	0.096	0.073	29	28	11.57	-61.14	110.49	-46.90	94.07	-36.82	7.69	-0.85
印刷业和记录媒介的复制业 T ₁₄	13.72	0.782	5	5	-37.88	-56.16	149.19	-68.08	-16.17	-85.06	8.38	-6.68
文教体育用品制造业 T ₁₅	100.9	1.126	2	3	-52.81	348.59	67337	4588.9	47866	920.52	155152	2350
石油加工、炼焦及核燃料加工业 T ₁₆	0.017	0.188	35	12	380.63	-61.33	354.16	-83.38	285.49	-86.59	26.31	-13.4
化学原料及化学制品制造业 T ₁₇	0.042	0.088	32	23	53.32	16.27	51.01	31.71	49.73	9.14	4.89	2.20
医药制造业 T ₁₈	1.592	0.151	15	17	114.11	18.31	306.74	-0.37	246.99	1.89	13.69	5.12
化学纤维制造业 T ₁₉	0.236	0.892	27	4	9.30	24.39	183.26	-36.50	165.55	-74.55	11.64	24.63
橡胶和塑料制品业 T ₂₀	0.996	0.080	19	25	103.36	-68.57	364.27	-71.02	261.92	-76.23	20.14	-6.73
非金属矿物制品业 T ₂₁	0.027	0.065	34	30	104.76	46.66	230.27	65.39	200.75	74.00	11.92	6.95
黑色金属冶炼及压延加工业 T ₂₂	0.030	0.087	33	24	77.54	-18.67	71.42	-47.11	22.29	-56.80	4.02	-5.73
有色金属冶炼及压延加工业 T ₂₃	0.317	0.1147	25	19	190.17	-4.05	205.49	12.78	223.21	2.70	15.94	2.82
金属制品业 T ₂₄	1.610	0.099	14	22	-35.39	-13.49	460.41	-24.77	381.45	-12.96	60.11	12.71
通用设备制造业 T ₂₅	2.750	0.201	13	10	127.85	33.16	1932.7	267.44	3251.9	388.31	49.68	167.5
专用设备制造业 T ₂₆	4.246	0.192	9	11	136.04	32.00	1164.4	56.90	1310.8	64.01	40.52	10.32
交通运输设备制造业 T ₂₇	3.591	0.183	10	13	52.83	-16.40	1011.6	61.08	1532.4	91.42	78.58	14.62
电气机械及器材制造业 T ₂₈	8.743	0.381	7	7	822.19	223.37	380.43	-40.44	426.12	-32.92	29.74	3.02
计算机、通信和其他电子设备制造业 T ₂₉	327.3	3.741	1	2	-49.35	-68.44	246.42	-75.60	1989.1	106.89	93.00	71.65
仪器仪表制造业 T ₃₀	10.23	0.329	6	8	526.98	245.15	2895.8	107.17	2308.4	9.57	381.98	11.25
工艺及其他制造业 T ₃₁	0.094	0.102	30	21	856.37	182.17	-60.81	-39.15	-71.85	-61.99	30.71	74.60
废弃资源综合利用业 T ₃₂	1.207	0.292	16	9	-97.84	98.16	-88.83	-1.27	-90.27	-48.24	356.45	98.69
电力、热力的生产和供应业 T ₃₃	0.062	0.181	31	14	19.79	23.88	556.25	64.96	799.13	70.99	24.75	6.44
燃气生产和供应业 T ₃₄	0.948	0.074	20	27	1521.8	759.39	11688	974.44	16443	1836.2	100.92	72.27
水的生产和供应业 T ₃₅	43.44	0.418	3	6	61.37	44.79	409.09	-37.19	395.66	-49.99	50.42	3.23

(1) 2010 年单效率 and 全效率目标完成的行业分布比较。我国现阶段低碳经济的发展目标为“2020 年碳强度较 2005 年下降 40%~45%”，转换为碳排放效率目标则是“2020 年较 2005 年提升 66%~80%”。2010 年，完成单效率目标的行业为 24 个，而完成全效率目标的行业仅仅为 15 个，且全效率中 11 个行业包含在单效率中（图 1）。单效率的增长率为 25.43%~12 073.91%，而全效率的增长率仅仅为 23.88%~759.39%，单效率的最大增长率约是全效率的 16 倍。



按增长幅度从高到低排列，2010 年单效率、全效率目标完成位居前十位和后十位的行业分别有 5 个和 4 个行业相同（图 2 和图 3）。其中， T_{10} 和 T_{34} 分别是单效率和全效率位居第 1 名的行业，其 2010 年单效率和全效率较 2005 年分别递增 12 073.91% 和 759.39%； T_{10} 位居单效率和全效率的第 1 名和第 27 名； T_{34} 位居全效率和单效率的第 1 名和第 2 名（见表 2）。

(2) 2015 年单效率和全效率目标完成的行业分布比较。2015 年，完成单效率目标的行业为 33 个，而完成全效率目标的行业仅仅为 16 个，且全效率中有 16 个行业包含在单效率中（图 4）。单效率的增长率为 51.01%~95 630.38%，而全效率的增长率仅仅为 56.90%~4 588.94%。单效率的最大增长率约是全效率的 20 倍（表 2）。

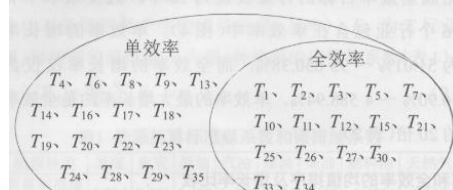
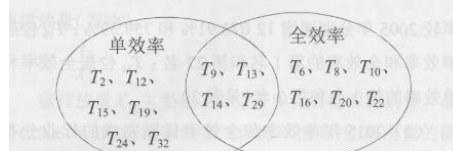
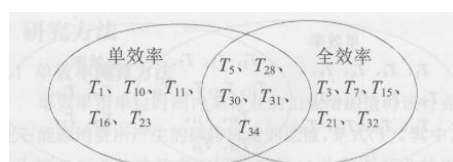
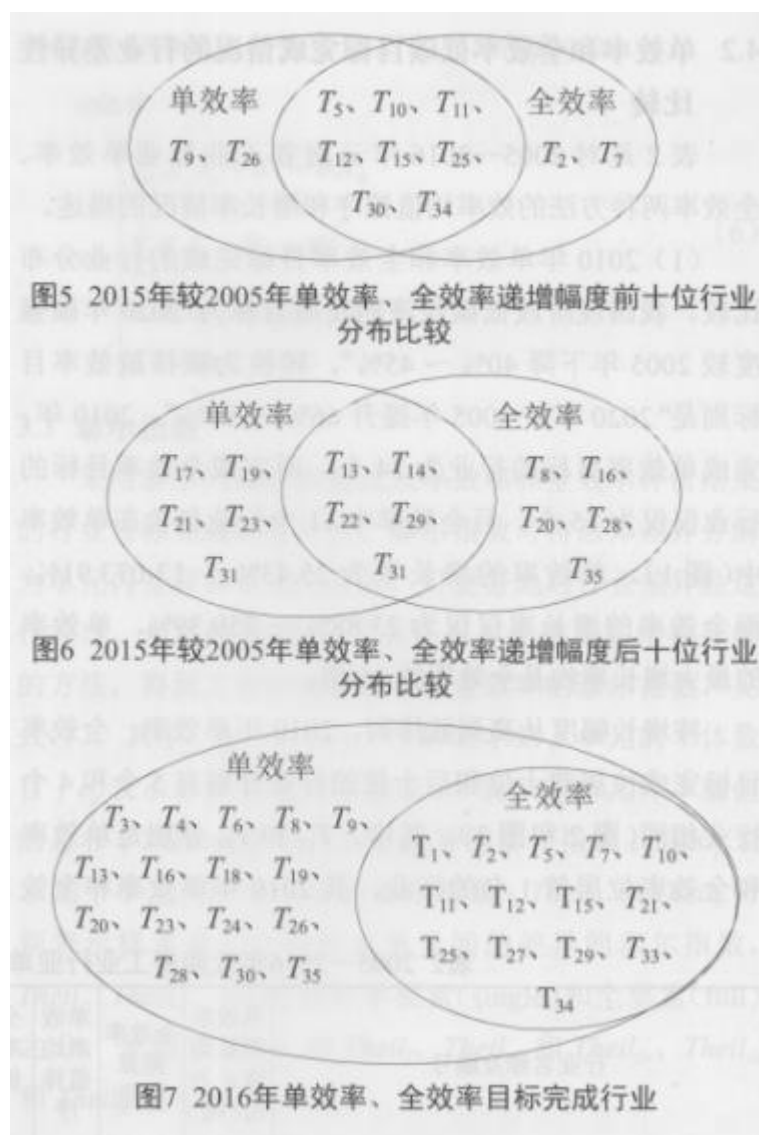


图 5、图 6 分别是 2015 年单效率、全效率目标完成位居前列和后位的行业分布比较。其中，位居前十位和后十位的行业中分别有 8 个、5 个行业相同。其中， T_{10} 和 T_{15} 分别是单效率和全效率位居第 1 名的行业，其 2015 年单效率和全效率较 2005 年分别递增 95 630.38%和 4 588.94%； T_{10} 位居单效率和全效率的第 1 名和第 9 名； T_{15} 位居全效率和单效率的第 1 名和第 2 名（表 2）。

(3) 2016 年单效率和全效率目标完成行业分布比较。2016 年，完成单效率目标的行业为 30 个，而完成全效率目标的行业仅仅为 14 个，且这 14 个全部包含在单效率的 30 个行业中（图 7）。单效率的增长率为 94.07%~110 266.00%，而全效率的增长率仅仅为 70.99%~1 836.21%。单效率的最大增长率约是全效率的 60 倍（表 2）。

图 8、图 9 分别是 2016 年单效率、全效率目标完成位居前列和后位的行业分布比较。其中，位居前十位和后十位的行业中分别有 7 个、6 个相同。其中， T_{10} 和 T_{34} 分别是单效率和全效率位居第 1 名的行业，其 2016 年碳排放效率较 2005 年分别递增 110 266.00%和 1 836.21%； T_{10} 位居单效率和全效率的第 1 名和第 10 名； T_{34} 位居全效率和单效率的第 1 名和第 3 名。



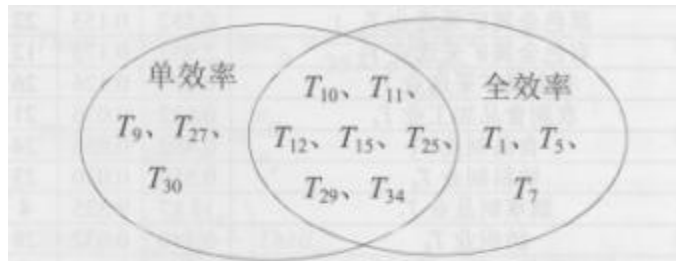


图8 2010年较2005年递增幅度前十位行业分布比较

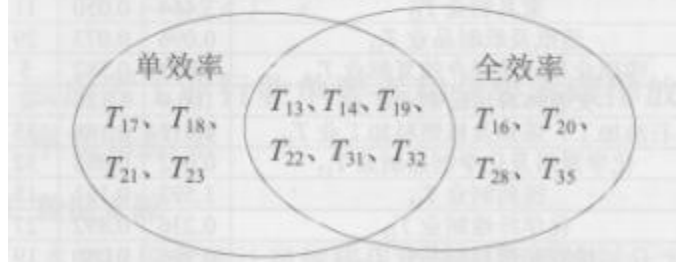


图9 2010年较2005年递增幅度后十位行业分布比较

(4) 单效率和全效率年均目标完成情况比较。将我国现阶段(2006—2020年)碳强度的年均下降目标为2.67%~3.00%,实质是“碳排放效率的年均提升目标为4.40%~5.34%”。单效率和全效率完成了年均提升4.40%目标的行业分别为34个和24个,其行业分布见图10。两者的年增长率均值区间分布分别是4.89%~155.152.00%、5.12%~2.350.00%,且年增长率最大的行业均为文教体育用品制造业(T_{15})。图11、图12是单效率和全效率年均增长率位居前十名和后十名的行业分布,二者分别有7个和5个行业是相同的。

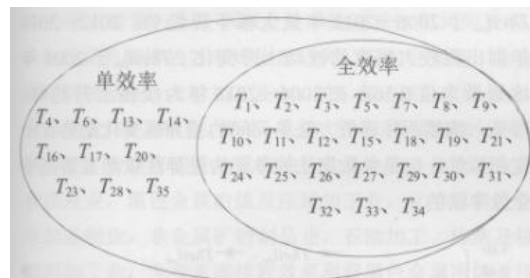


图10 现阶段单效率、全效率碳排放效率目标完成行业

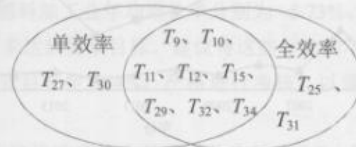


图11 年均增长率位居前十位的行业分布比较



图12 年均增长率位居后十位的行业分布比较

4.3 单效率 and 全效率统计描述布比较

(1)单效率 and 全效率统计描述。2005—2016 年云南省工业行业两种方法测算的效率均值排序和增长率情况见表 2。其中，单效率的均值范围是 0.018~327.383 万元/吨标准煤，均值最大值是最小值的 18 289 倍；全效率的均值范围是 0.032~9.326，均值最大值是最小值的 287 倍。

(2)单效率均值 and 全效率均值排序的行业差异性比较。将 2005—2016 年单效率 and 全效率的均值从高到低进行排序，排序结果见图 13、图 14。结果显示，位居前十位和后十位的行业中分别有 7 个、3 个相同。本文采用 $T_i(a, b)$ 表示第 T_i 行业 2005—2016 年单效率 and 全效率均值排名分别为第 a 名 and 第 b 名， $T_9(8, 20)$ 、 $T_{12}(11, 33)$ 、 $T_{11}(17, 31)$ 、 $T_{10}(18, 34)$ 、 $T_{19}(27, 4)$ 、 $T_{33}(31, 14)$ 、 $T_{16}(35, 12)$ 表明其排序结果相差 12~23 名。

4.4 基于泰尔指数的单效率 and 全效率评价的行业差异性分析

4.4.1 碳排放效率单元划分及效率年均增长率目标完成比较

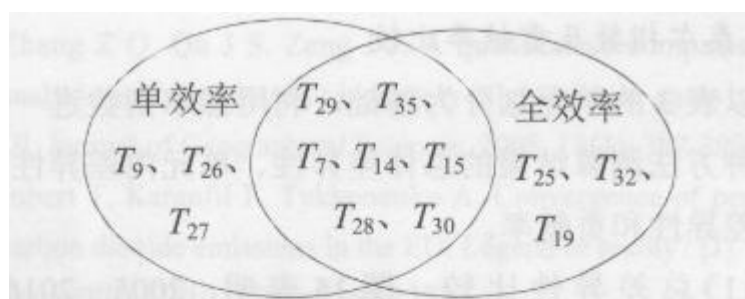


图13 位居前十位的行业

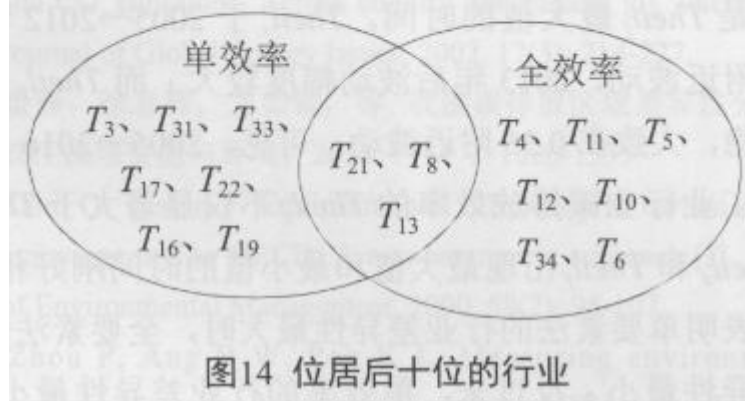


图14 位居后十位的行业

(1)碳排放效率的单元划分。单效率 and 全效率测算中，前者的投入变量为碳排放量，后者的投入变量分别为碳排放量、资本和劳动力。所以，碳排放量是二者共有的投入变量。

为了更详细、准确地描述云南省工业行业单效率 and 全效率评价的行业差异性，本文将“2005—2016 年的碳排放量均值”作为单元划分变量。运用聚类分析法，将 35 个行业分为 7 个单元。由于前 3 个单元中行业个数分别为 1 个 (T_{33})、2 个 (T_{22} 、 T_{17}) 和 2 个 (T_{21} 、 T_{16})，不利于差异性分析，故将前 3 个单元合并为 1 个单元。因此，35 个行业被细分为 5 个单元 (Unit)，分别是高碳单元 (U_1)、次高碳单元 (U_2)、中碳单元 (U_3)、次低碳单元 (U_4) 和低碳单元 (U_5)，见表 3。

表 3 基于 2005—2016 年云南省工业行业碳排放量均值的单元划分及行业构成

单元划分	$U_1: X_{\text{E}3} \in [2\ 000, +\infty)$	$U_2: X_{\text{E}3} \in [80, 2\ 000)$	$U_3: X_{\text{E}3} \in [20, 80)$	$U_4: X_{\text{E}3} \in [6, 20)$	$U_5: X_{\text{E}3} \in [0, 6)$
行业分布	$T_{33}, T_{22}, T_{17}, T_{21}, T_{16}$	$T_{23}, T_{13}, T_4, T_3, T_6, T_1$	$T_7, T_{31}, T_5, T_2, T_{18}, T_8, T_{11}, T_{19}, T_{27}$	$T_{24}, T_{25}, T_{32}, T_{20}, T_{34}, T_{26}, T_9$	$T_{28}, T_{14}, T_{10}, T_{30}, T_{12}, T_{35}, T_{15}, T_{29}$

(2) 单元单效率和全效率年均增长率目标完成比较。表 4 是单元单效率和全效率的年均增长率目标完成情况。 $U_1 \sim U_6$ 均完成了单效率的年均增长目标, 即年均增长率均大于 4.40%; U_1 和 U_2 未完成全效率的年均增长目标。

表 4 单元单效率和全效率年均增长率 (%) 目标完成情况比较

U_1		U_2		U_3		U_4		U_5	
单效率	全效率	单效率	全效率	单效率	全效率	单效率	全效率	单效率	全效率
14.38	0.71	19.68	3.30	41.55	21.28	158.61	53.47	19523.25	418.04

4.4.2 泰尔指数及贡献率比较

以表 3 的单元划分为基础, 利用泰尔指数进一步研究两种方法测算结果的总体差异性、单元内差异性、单元间差异性和贡献率。

(1) 总差异性比较。图 15 表明, 2005—2016 年, $Theil_s$ 值、变化幅度始终大于 $Theil_r$, 且 $Theil_s$ 最小值的时间是 $Theil_r$ 最大值的时间。 $Theil_s$ 于 2005—2012 年在 2.90 附近波动, 2013 年后波动幅度较大; 而 $Theil_r$ 值变化平稳, 大致在 0.35 附近波动。可见, 2005—2016 年云南省工业行业碳排放效率的 $Theil_s$ 不仅显著大于 $Theil_r$, 且 $Theil_s$ 和 $Theil_r$ 出现最大值和最小值的时间刚好相反。后者表明单要素法的行业差异性最大时, 全要素法的行业差异性最小; 反过来, 单效率的行业差异性最小时, 全效率的行业差异性最大。表明单效率行业差异性显著大于全效率。

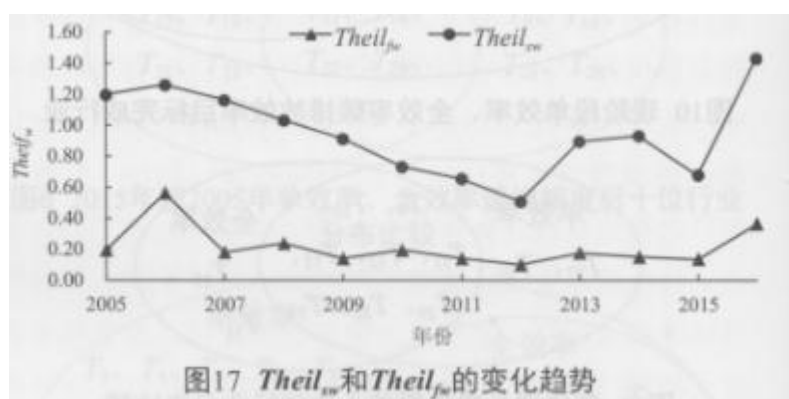


图15 $Theil_s$ 和 $Theil_r$ 的变化趋势

(2) 单元间差异性比较。图 16 表明，2005—2016 年， $Theil_{sb}$ 值、变化幅度始终大于 $Theil_{rb}$ 。2005—2012 年，云南工业行业碳排放效率的 $Theil_{sb}$ 在 2.99 附近变化，2012 年后开始大幅波动；而 $Theil_{rb}$ 在 0.13 附近变化。可见，2005—2016 年云南工业行业碳排放效率的 $Theil_{sb}$ 显著大于 $Theil_{rb}$ ，且其二者变化趋势基本一致；2015 年， $Theil_{sb}$ 值最大，而 $Theil_{rb}$ 值最小，表明 2015 年单效率单元间差异性最大，而全效率单元间差异性最小。可见，单效率的单元间差异性显著大于全效率。



单元内差异性比较。图 17 表明，2005—2016 年， $Theil_{sw}$ 值、变化幅度始终大于 $Theil_{rw}$ 。 $Theil_{sw}$ 和 $Theil_{rw}$ 在 2006—2012 年均呈现波动性下降，2013—2016 年均呈现波动性递增，但二者的变化幅度呈现较大差异性。 $Theil_{sw}$ 于 2006—2012 年呈大幅下降趋势，2012—2016 年则出现较大幅度的波动上升变化； $Theil_{rw}$ 于 2006 年达到最大值 0.56，在 2006—2015 年为缓慢上升趋势。可见，虽然两种评价方法单元间的差异性变化趋势有一定相似性，但是单效率法的单元内差异性依然显著高于全效率法的。



5 结论和建议

5.1 结论

(1) 单效率法实现低碳目标的行业个数多于全效率法。2010 年，云南省工业完成单效率目标的行业为 24 个，而完成全效率目标的行业仅仅为 15 个，且全效率中 11 个行业包含在单效率中；2015 年，完成单效率目标的行业为 33 个，而完成全效率目标的行业仅仅为 16 个，且全效率中 16 个行业包含在单效率中；2016 年，完成单效率目标的行业为 30 个，而完成全效率目标的行业仅仅为 14 个，且全效率的 14 个行业全部位于单效率的行业之列；单效率完成年度平均增长目标的行业为 34 个，而全效率仅仅为 24 个，且全效率的 24 个完成行业均属于单效率完成行业中。全效率测算 2010 年、2015 年、2016 年及年均碳排放效率递增目标完成的行业数比单效率的分别少 9 个、17 个、16 个、10 个。

(2) 单效率评价的行业差异性大于全效率。单效率的均值范围是[0.018, 327.383] (单位:万元/吨标准煤), 最大值和最小值的比值为 18 289 倍; 而全效率的均值范围为[0.032, 9.326], 最大值和最小值的比值是 287 倍。有 7 个行业的单效率和全效率排序差距至少在 10 位以上。单效率的泰尔指数明显大于全效率。2005—2016 年, 单效率总泰尔指数的分布区间为[2.56, 6.94], 而全效率的为[0.20, 0.67]; 单效率单元间泰尔指数的分布区间为[1.3, 6.26], 而全效率的分布区间为[0.51, 1.43]; 单效率单元内泰尔指数的分布区间为[0.10, 0.56], 而全效率分布区间的为[0.06, 0.19]。

5.2 建议

(1) 将 6 个行业作为“十四五”云南省提高碳排放效率的重点对象。单效率和全效率的测算结果共同表明, 6 个行业的碳排放效率均位居后列, 它们分别是: 非金属矿物制品业, 木材加工及木、竹、藤、棕、草制品业, 食品制造业, 家具制造业, 皮革、毛皮、羽毛(绒)及其制品业, 纺织业。云南省碳排放量高的行业是电力、热力的生产和供应业, 黑色金属冶炼及压延加工业, 化学原料及化学制品制造业, 非金属矿物制品业, 石油加工、炼焦及核燃料加工业, 全要素碳排放效率测得黑色金属冶炼及压延加工业和化学原料及化学制品制造业, 石油加工、炼焦及核燃料加工业年均增长率分别为-5.73%、2.20%、-13.4%, 未达到低碳目标。建议将这些行业的年度碳排放效率提升目标定为 4%, 严格进行考核, 以督促其进行改革。

(2) 建议政府将全效率评价方法作“十四五”时期低碳经济发展的主流评价方法。因为全要素评价方法有助于发现行业碳排放效率低下的原因。

参考文献:

- [1]He J K, Deng J, Su M S. Emission from China's energy sector and strategy for its control [J]. Energy, 2010, 35(11): 4494-4498.
- [2]陈诗一. 能源消耗、二氧化碳排放与中国工业的可持续发展[J]. 经济研究, 2009 (4) : 41-55.
- [3]李湘梅, 叶慧君. 中国工业分行业碳排放影响因素分解研究[J]. 生态经济, 2015 (1) : 55-59.
- [4]白万平, 杨广仁, 张学敏. 碳排放增加与气温变化统计因果关系的多重检验[J]. 贵州财经大学学报, 2013 (5) : 46-51.
- [5]Kaya Y, Yokobori K. Environmenet, energy and economy:Strategies for sustainability [M]. New York: United Nations University Press, 1997.
- [6]Mielnik O, Goldemberg J. The evolution of the “carbonization Index” in developing countries [J]. Energy Policy, 1999, 27(5):307-308.
- [7]潘家华, 张丽峰. 我国碳生产率区域差异性研究[J]. 中国工业经济, 2011 (5) : 47-57.
- [8]Greening L A, Ting M, Davis W B. Decomposition of aggregate carbon intensity for freight: Trends from 10 OECD countries for period 1971-1993 [J]. Energy Economics, 1999, 21(4): 331-361.
- [9]Sun J W. The decrease of CO2 emission intensity is decarbonization at national and global levels [J]. Energy Policy, 2005, 33(8): 975-978.

-
- [10]Zhang Z Q, Qu J S, Zeng J J. A quantitative comparison and analysis on the assessment indicators of greenhouse gases emission[J]. Journal of Geographical Sciences, 2008, 18(4): 387-399.
- [11]Jobert T, Karanfil F, Tykhonenko A. Convergence of per capita carbon dioxide emissions in the EU: Legend or reality? [J]. Energy Economics, 2010, 32(6): 1364-1373.
- [12]Ramanathan R. Combining indicators of energy consumption and CO₂ emissions: Across country comparison [J]. International Journal of Global Energy Issues, 2002, 17(3): 214-227.
- [13]董锋, 徐喜辉, 龙如银, 等. 我国碳排放区域差异性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014 (11) : 1526-1533.
- [14]Zaim O, Taskin F. Environmental efficiency in carbon dioxide emissions in The OECD: A non-parametric approach [J]. Journal of Environmental Management, 2000, 58(2): 95-107.
- [15]Zhou P, Ang B W, Poh K L. Measuring environmental performance under different environmental DEA technologies [J]. Energy Economics, 2008, 30(1): 1-14.
- [16]路正南, 王志诚. 我国工业碳排放效率的行业差异及动态演进研究[J]. 科技管理研究, 2015 (6) : 230-235.
- [17]周五七, 聂鸣. 中国工业碳排放效率的区域差异研究——基于非参数前沿的实证分析[J]. 数量经济技术经济研究, 2012(9) : 58-70.
- [18]Canadell J G, Le Quere C, Raupach M R, et al. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(47): 18866-18870.
- [19]Podkorytova O, Raskina Y. Former Soviet Union countries and European Union: Overcoming the energy efficiency gap [R]. European University Institute: RSCAS Working Papers, 2014.
- [20]杜克锐, 邹楚沅. 我国碳排放效率地区差异、影响因素及收敛性分析——基于随机前沿模型和面板单位根的实证研究[J]. 浙江社会科学, 2011 (11) : 32-43.
- [21]刘亦文, 胡宗义. 中国碳排放效率区域差异性研究——基于三阶段 DEA 模型和超效率 DEA 模型的分析[J]. 山西财经大学学报, 2015 (2) : 23-34.
- [22]Wang S F, Chu C, Chen G Z, et al. Efficiency and reduction cost of carbon emissions in China: A non-radial directional distance function method [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 113(1): 624-634.
- [23]曲晨瑶, 李廉水, 程中华. 中国制造业行业碳排放效率及其影响因素[J]. 科技管理研究, 2017 (8) : 60-68.
- [24]陈德湖, 潘英超, 武春友. 中国二氧化碳的边际减排成本与区域差异研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016 (10) : 86-93.