

# 碳排放强度与能耗强度线性关系研究

葛斌<sup>1</sup>, 王军霞<sup>2</sup>, 陈乾坤<sup>2\*</sup>

(1. 南通市生态环境局, 江苏 南通 226007; 2. 中国环境监测总站, 北京 100012)

**摘要:**碳排放强度与能耗强度是国家和地方2个重要的政策管控指标,二者存在潜在的逻辑关系,但就二者定量关系还存在分析不足,部分认识不统一的现象。通过建立碳排放强度同比变化率与能耗强度同比变化率之间关系的数学模型,分析能耗强度同比变化场景下碳排放强度同比变化趋势。对单位地区生产总值碳排放强度与单位地区生产总值能耗强度之间的线性关系进行了研究。结果表明,碳排放强度同比变化率与能耗强度同比变化率不是必然呈现“同正或同负”的关系,即能耗强度上升,碳排放强度也有可能下降;能耗强度下降,碳排放强度也有可能上升。研究为推动碳排放强度、能耗强度“双下降”的研究和决策提供参考。

**关键词:**碳排放强度;能耗强度;线性关系

中图分类号:X24

文献标志码:A

文章编号:1674-6732(2022)04-0090-05

## Study on the Linear Relationship between Carbon Emission Intensity and Energy Consumption Intensity

GE Bin<sup>1</sup>, WANG Jun-xia<sup>2</sup>, CHEN Qian-kun<sup>2\*</sup>

(1. Ecology Environment Bureau of Nantong Municipality, Nantong, Jiangsu 226007, China; 2. China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Carbon emission intensity and energy consumption intensity are two important national and local policy control indicators. There is a potential logical relationship between carbon emission intensity and energy consumption intensity, but the quantitative relationship between them is still insufficient and inconsistent. The paper studies the linear relationship between carbon emission intensity per unit of regional gross domestic product and energy intensity per unit of regional gross domestic product. By establishing the mathematical model, the relationship between the year-on-year change rate of carbon emission intensity and the year-on-year change rate of energy consumption intensity is analyzed. The results show that the relationship of year-on-year change rate of carbon emission intensity and the year-on-year change rate of energy consumption intensity is not “simultaneously positive or simultaneously negative”, that is, the intensity of energy consumption increases, and the intensity of carbon emissions may also decreases; the energy consumption intensity may decrease while the carbon emission intensity may increase. It is expected to provide reference for promoting the research and decision-making of “double decline” of carbon emission intensity and energy consumption intensity.

**Key words:** Carbon emission intensity; Energy consumption intensity; Linear relationship

2020年9月22日,国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布,中国将提高应对气候变化国家自主贡献力度,二氧化碳(CO<sub>2</sub>)力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。2020年12月12日,国家主席习近平在气候雄心峰会上进一步宣布,到2030年,中国单位国内生产总值CO<sub>2</sub>排放将比2005年下降65%以

上,非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右,森林蓄积量将比2005年增加60亿m<sup>3</sup>,风电、太阳能发电总装机容量将达到12亿kW以上<sup>[1]</sup>。

随着碳达峰目标年日趋临近,国家从全力抓好能耗双控和坚决遏制“两高”项目盲目发展着手,同时将能耗强度和碳排放强度下降率列为约束性

收稿日期:2021-12-28;修订日期:2022-02-15

作者简介:葛斌(1975—),男,高级工程师,硕士,从事排放统计核算工作。

\* 通讯作者:陈乾坤 E-mail: chenqk@cnemc.cn

指标来考核地方政府<sup>[2]</sup>。但在实践中,社会对于能耗强度和碳排放强度下降率之间潜在逻辑关系的认识还不够统一,现对碳排放强度与能耗强度之间的线性关系进行研究,通过建立数学模型和实证分析,分析能耗强度同比变化场景下碳排放强度同比变化趋势。以期为推动碳排放强度、能耗强度“双下降”的研究和决策提供参考。

## 1 碳排放核算与能耗统计口径

### 1.1 碳排放核算口径

按照《省级二氧化碳排放达峰行动方案编制指南》(以下简称《指南》)规定的碳排放核算边界,CO<sub>2</sub>排放包含本行政区域内化石能源(煤炭、油品、天然气)消费产生的CO<sub>2</sub>直接排放,以及电力净调入蕴含的CO<sub>2</sub>间接排放,侧重于从生产端核算<sup>[3]</sup>。

### 1.2 能耗统计口径

按照《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2020)规定的计算范围及计算方法,用能单位综合能耗包含各种能源的实物消耗量及耗能工质消耗的能源量,其中用电量、热力消耗量及耗能工质消耗的能源量按等价值折算成标煤,其余按当量值折算成标煤。能耗统计时以消费端按终端消费量统计,包含可再生能源和原料用能<sup>[4]</sup>。

### 1.3 碳排放核算与能耗统计主要差别

二者差别在于:一是核算方法不一样,碳排放从生产端按各能源消耗情况及排放因子核算碳排放总量,能耗指标从消费端按综合能耗直接汇总统计,不需要二次系数核算;二是核算边界不一样,能耗统计包括可再生能源,碳排放核算不包括可再生能源<sup>[5-8]</sup>。

## 2 建立模型

### 2.1 碳排放强度计算模型

根据《指南》中碳排放强度计算方法,建立碳排放强度计算模型,计算公式如下:

$$q_{\text{碳}} = N \times a_{\text{碳}} \times \sum_{i=1}^n (a_i \times \text{EF}_i) \div \text{GDP} \quad (1)$$

式中: $q_{\text{碳}}$ ——CO<sub>2</sub>排放强度,t/万元; $N$ ——综合能耗总量,tce; $a_{\text{碳}}$ ——碳排放核算能耗(煤炭、油品、天然气及净调入电力)占综合能耗比例,%; $a_i$ ——煤炭、油品、天然气及净调入电力占碳排放核算能耗比例,%; $\text{EF}_i$ ——第*i*种能源CO<sub>2</sub>排放因子,t/tce; $\text{GDP}$ ——地区生产总值(2015年

价格),万元。

通过对公式(1)的化简( $N \div \text{GDP}$ 即为能耗强度),得到碳排放强度与能耗强度的关系模型,计算公式如下:

$$q_{\text{碳}} = q_{\text{能}} \times a_{\text{碳}} \times \sum_{i=1}^n (a_i \times \text{EF}_i) \quad (2)$$

式中: $q_{\text{能}}$ ——能耗排放强度,tce/万元。

由公式(2)可以看出,碳排放强度与能耗强度的线性关系和碳排放核算能耗占综合能耗比例有关。

### 2.2 碳排放强度同比模型

碳排放强度同比变化率计算公式如下:

$$\beta_{\text{碳}} = \left[ \frac{q_{\text{能}2021} \times a_{\text{碳}2021} \times \sum_{i=1}^n (a_{i2021} \times \text{EF}_i)}{q_{\text{能}2020} \times a_{\text{碳}2020} \times \sum_{i=1}^n (a_{i2020} \times \text{EF}_i)} - 1 \right] \times 100 \quad (3)$$

式中: $\beta_{\text{碳}}$ ——碳排放强度同比变化率(负值为下降、正值为上升),%。

公式(3)中, $q_{\text{能}2021} = \frac{q_{\text{能}2020} \times (100 + \beta_{\text{能}})}{100}$ ,化简后得到公式(4):

$$\beta_{\text{碳}} = (100 + \beta_{\text{能}}) \times \frac{a_{\text{碳}2021} \times \sum_{i=1}^n (a_{i2021} \times \text{EF}_i)}{a_{\text{碳}2020} \times \sum_{i=1}^n (a_{i2020} \times \text{EF}_i)} - 100 \quad (4)$$

式中: $\beta_{\text{能}}$ ——能耗强度同比变化率(负值为下降、正值为上升),%。

根据2021年中央经济工作会议确定的可再生能源和原料用能不纳入能源消费总量控制的政策实施后,公式(4)中的 $a_{\text{碳}}$ 为恒定值,即100%。此时, $a_{\text{碳}}$ 变化值恒为0,根据公式(4), $\beta_{\text{碳}}$ 与 $\beta_{\text{能}}$ 的关系取决于煤炭、油品、天然气及净调入电力占综合能耗的比例变化。

## 3 实例分析

### 3.1 2020年实例现状

某市2020年综合能耗总量2300万t标煤,2020年GDP为9100亿元(2015年价格,下同),能耗强度为0.2527t标煤/万元。其中2020年消耗煤炭1200万t标煤、油品250万t标煤、天然气14.8亿m<sup>3</sup>(180万t标煤,按1.2143kg标煤/m<sup>3</sup>折算),净调入电力量70亿kWh(210万t标煤,按300g标煤/kWh折算),合计碳排放核算能耗1840万t标煤,煤炭、油品、天然气、净调入电力占比分

别为 65.2% ,13.6% ,9.8% ,11.4% 。碳排放核算能耗占综合能耗比例为 80.0% ,按照公式(2)计算碳排放强度为 0.481 6 t/万元。其中煤炭、油品、天然气排放因子分别采用 2.66,1.73,1.56 t/tce,净调入电力排放因子采用 2.28 t/tce(采用江苏省电网平均 CO<sub>2</sub>排放因子 0.683 t/MWh 折算)。

### 3.2 2021 年预测及线性关系分析

#### 3.2.1 能耗强度单一变量时线性关系

假设 2021 年碳排放核算能耗中各能源占比不变 ( $a_{i2021} = a_{i2020}$ ),能耗强度变量  $\beta_{能}$  于 -4%(下降 4%)至 4%(上升 4%)时,分析以下 2 种场景下碳排放强度同比变化情况。

情景 1:碳排放核算能耗占综合能耗比例由  $a_{碳}$  由 2020 年的 80% 提高至 2021 年的 81%,碳排放强度与能耗强度同比变化率的线性关系典型数据见表 1,碳排放强度与能耗强度趋势见图 1。

表 1 情景 1 的碳排放强度与能耗强度同比变化率线性关系典型数据 %

能耗强度同比 $\beta_{能}$	碳排放强度同比 $\beta_{碳}$	$\beta_{碳} - \beta_{能}$
-4.0	-2.8	1.2
-3.0	-1.8	1.2
-2.0	-0.8	1.2
-1.2	0.0	1.2
-1.0	0.2	1.2
0.0	1.3	1.3
1.0	2.3	1.3
2.0	3.3	1.3
3.0	4.3	1.3
4.0	5.3	1.3

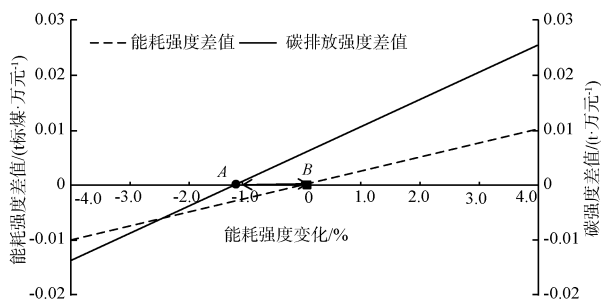


图 1 情景 1 的碳排放强度与能耗强度趋势变化

当  $a_{碳}$  提高 1% 后,由表 1 可见,  $\beta_{碳}$  均  $> \beta_{能}$  1.2% ~ 1.3%。由图 1 可见,  $\beta_{碳}$  由负变正,即由下降到上升的临界点为 A 点,此时横坐标对应的能耗强度同比变化率为 -1.2%;  $\beta_{能}$  由负变正,即由

下降到上升的临界点为 B 点,此时横坐标对应的能耗强度同比变化率为 0%。在 A 点之前,能耗强度、碳排放强度同为下降;A 点至 B 点之间,能耗强度下降、碳排放强度上升;在 B 点之后,能耗强度、碳排放强度同为上升。

情景 2:碳排放核算能耗占综合能耗比例由  $a_{碳}$  由 2020 年的 80% 下降至 2021 年的 79%,碳排放强度与能耗强度同比变化率的线性关系典型数据见表 2,碳排放强度与能耗强度趋势见图 2。

表 2 情景 2 碳排放强度与能耗强度同比变化率的线性关系典型数据 %

能耗强度同比 $\beta_{能}$	碳排放强度同比 $\beta_{碳}$	$\beta_{碳} - \beta_{能}$
-4.0	-5.2	-1.2
-3.0	-4.2	-1.2
-2.0	-3.2	-1.2
-1.0	-2.2	-1.2
0.0	-1.3	-1.3
1.0	-0.3	-1.3
1.3	0.0	-1.3
2.0	0.7	-1.3
3.0	1.7	-1.3
4.0	2.7	-1.3

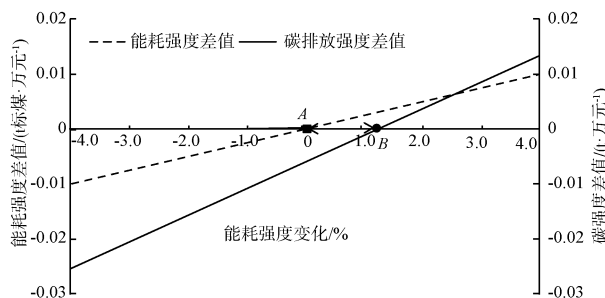


图 2 情景 2 的碳排放强度与能耗强度趋势变化

当  $a_{碳}$  下降 1% 后,由表 2 可见,  $\beta_{碳}$  均  $< \beta_{能}$  1.2% ~ 1.3%。由图 2 可见,当  $\beta_{能}$  由负变正,即由下降到上升的临界点为 A 点,此时横坐标对应的能耗强度同比变化率为 0%;  $\beta_{碳}$  由负变正,即由下降到上升的临界点为 B 点,此时横坐标对应的能耗强度同比变化率为 1.3%。在 A 点之前,能耗强度、碳排放强度同为下降;A 点至 B 点之间,能耗强度上升、碳排放强度下降;在 B 点之后,能耗强度、碳排放强度同为上升。

对比图 1 和图 2 发现,碳排放核算能耗占综合能耗比例的变化不同,能耗强度与碳排放强度变化趋势方向发生改变的先后有所差异,情景 1 中碳排

放强度变化趋势改变早于能耗, 情景 2 中碳排放强度变化晚于能耗, 预判二者关系必须对碳排放核算能耗占综合能耗比例进行分析。

3.2.2 多变量时线性关系

假设 2021 年碳排放核算能耗占综合能耗比例及碳排放核算能耗中各能源占比基于 2020 年上下浮动 5%, 2021 年能耗强度同比 2020 年界于 -4% ~ 4% 之间, 各占比步长为 1%, 能耗强度同比步长为 0.1%, 对公式(4)进行编程, 分析碳排放强度同比变化情况。多变量计算碳排放强度同比程序流程见图 3。由图 3 可见, 流程图中采用碳排放核算能耗占综合能耗比例 ( $\alpha_{\text{碳}}$ )、煤炭占比 ( $\alpha_{\text{煤炭}}$ )、油品占比 ( $\alpha_{\text{油品}}$ )、天然气占比 ( $\alpha_{\text{天然气}}$ )、能耗强度同比 ( $\beta_{\text{能}}$ ) 5 个变量设置 5 层循环嵌套, 各循环变量均由小至大按设定步长自增, 共执行

118.6 万次循环计算碳排放强度同比 ( $\beta_{\text{碳}}$ ), 输出有效数据组合 116.8 万条。表 3 列举了各占比不同方向变化时,  $\beta_{\text{碳}}$  与  $\beta_{\text{能}}$  的比较结果。

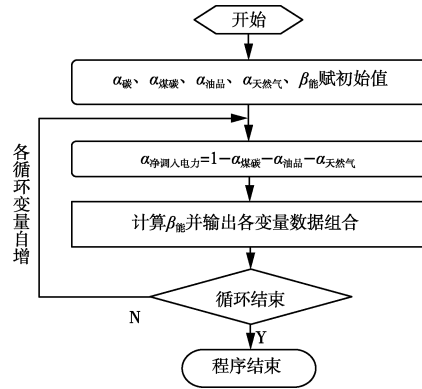


图 3 多变量计算碳排放强度同比程序流程

表 3 各占比变化方向组合  $\beta_{\text{碳}}$  与  $\beta_{\text{能}}$  关系

变量名称	变化方向	总组合数/个	$\beta_{\text{碳}} < \beta_{\text{能}}$		$\beta_{\text{碳}} > \beta_{\text{能}}$		$\beta_{\text{碳}} = \beta_{\text{能}}$	
			组合数/个	占比/%	组合数/个	占比/%	组合数/个	占比/%
$\alpha_{\text{碳}}$	下降	530 955	507 951	95.7	20 007	3.8	2 997	0.6
	持平	106 191	50 883	47.9	52 503	49.4	2 805	2.6
	上升	530 955	20 412	3.8	507 870	95.7	2 673	0.5
$\alpha_{\text{煤炭}}$	下降	539 055	287 241	53.3	248 427	46.1	3 387	0.6
	持平	107 811	53 622	49.7	53 379	49.5	810	0.8
	上升	521 235	238 383	45.7	278 574	53.4	4 278	0.8
$\alpha_{\text{油品}}$	下降	539 055	241 137	44.7	294 126	54.6	3 792	0.7
	持平	107 811	53 541	49.7	53 379	49.5	891	0.8
	上升	521 235	284 568	54.6	232 875	44.7	3 792	0.7
$\alpha_{\text{天然气}}$	下降	539 055	232 647	43.2	302 211	56.1	4 197	0.8
	持平	107 811	53 622	49.7	53 541	49.7	648	0.6
	上升	521 235	292 977	56.2	224 628	43.1	3 630	0.7
$\alpha_{\text{净调入电力}}$	下降	534 600	287 793	53.8	242 772	45.4	4 035	0.8
	持平	81 081	40 419	49.9	40 338	49.8	324	0.4
	上升	552 420	251 034	45.4	297 270	53.8	4 116	0.7

由表 3 可见, 碳排放核算能耗占综合能耗比例  $\alpha_{\text{碳}}$  对  $\beta_{\text{碳}}$  与  $\beta_{\text{能}}$  关系的影响最大, 当  $\alpha_{\text{碳}}$  下降时,  $\beta_{\text{碳}}$  大概率 (95.7%)  $< \beta_{\text{能}}$ ; 当  $\alpha_{\text{碳}}$  上升时,  $\beta_{\text{碳}}$  大概率 (95.7%)  $> \beta_{\text{能}}$ 。碳排放核算能耗中各能源占比

不同方向变化时,  $\beta_{\text{碳}}$  与  $\beta_{\text{能}}$  的关系分布相对较均匀。

碳排放核算能耗占比  $\alpha_{\text{碳}}$  变化时,  $\beta_{\text{碳}} - \beta_{\text{能}}$  的平均差值见表 4。

表 4 碳排放核算能耗占比变化时  $\beta_{\text{碳}}$  与  $\beta_{\text{能}}$  关系

变量	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4	情景 5	情景 6	情景 7	情景 8	情景 9	情景 10	情景 11
$\alpha_{\text{碳}}$ 变化	-5.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.0	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
$\beta_{\text{碳}} - \beta_{\text{能}}$	-6.2	-5.0	-3.7	-2.5	-1.2	0.0	1.3	2.5	3.8	5.0	6.3

选取任意 2 个情景分析: 如  $\alpha_{\text{碳}}$  由 2020 年的

80% 下降为 2021 年的 77% (情景 3) 时, 由表 4 可

见,与 $a_{\text{碳}}$ 变化 $-3.0\%$ 对应的 $(\beta_{\text{碳}} - \beta_{\text{能}})$ 差值为 $-3.7\%$ ,即当 $\beta_{\text{碳}}$ 为 $-3.7\%$ 时, $\beta_{\text{能}}$ 为 $0\%$ ;当 $\beta_{\text{碳}}$ 为 $0\%$ 时, $\beta_{\text{能}}$ 为 $3.7\%$ ;2个点之间能耗强度上升、碳排放强度下降。又如 $a_{\text{碳}}$ 由2020年80%上升为2021年的82%(情景8)时,与 $a_{\text{碳}}$ 变化 $2.0\%$ 对应的 $(\beta_{\text{碳}} - \beta_{\text{能}})$ 差值为 $2.5\%$ ,即当 $\beta_{\text{碳}}$ 为 $0\%$ 时, $\beta_{\text{能}}$ 为 $-2.5\%$ ;当 $\beta_{\text{碳}}$ 为 $2.5\%$ 时, $\beta_{\text{能}}$ 为 $0\%$ ;2个点之间能耗强度下降、碳排放强度上升。其他情景可参照上述2个情景进行分析判断。

#### 4 结论

碳排放强度同比变化率与能耗强度同比变化率不是必然呈现“同正或同负”的关系,即能耗强度上升,碳排放强度也有可能下降;能耗强度下降,碳排放强度也有可能上升。当能耗统计边界包含可再生能源和原料用能时,碳排放强度同比变化率和能耗强度同比变化率之间的关系同时受碳排放核算能耗占综合能耗的比例及能源结构所影响。当能耗统计边界不包含可再生能源和原料用能时,碳排放强度同比变化率和能耗强度同比变化率之间的关系主要取决于煤炭、油品、天然气及净调入电力占综合能耗的比例变化。

随着“双碳”工作的持续推进,碳排放强度日益受到重视,部分地方和决策者认为只要降低能耗强度一定会带来碳排放强度的降低,而本研究通过数据实证说明,在一定条件下,可能出现能耗强度下降而碳排放强度反而上升的情况。为了更好地推动碳排放强度、能耗强度的双下降,各地在管理决策时,应对本地能源结构进行分析,对能源结构

变化进行预判,从而根据实际情况分析能耗强度与碳排放强度的关系,避免仅关注能耗强度而影响碳排放强度目标的完成。

#### [参考文献]

- [1] 新华网. 习近平在气候雄心峰会上的讲话[EB/OL]. (2020-12-12)[2021-11-18]. [http://www.xinhuanet.com/2020-12/12/c\\_1126853600.htm](http://www.xinhuanet.com/2020-12/12/c_1126853600.htm).
- [2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于印发《完善能源消费强度和总量双控制度方案》的通知[EB/OL]. (2021-09-11)[2021-11-20]. [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202109/t20210916\\_1296857.html?code=&state=123](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202109/t20210916_1296857.html?code=&state=123).
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 省级二氧化碳排放达峰行动方案编制指南[Z]. 2021.
- [4] 中华人民共和国市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 综合能耗计算通则:GB/T 2589—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
- [5] 鲁亚霜,王颖,张岳武. 国家温室气体排放统计核算报告体系现状研究[J]. 环境影响评价,2017,39(2):72-75.
- [6] 宋杰鲲,江媿娜,赵志浩,等. 中国能耗、大气污染物排放与碳排放强度关系的协整检验[J]. 环境保护科学,2020,46(5):1-7.
- [7] HASANBEIGI A, LOBSCHIED A, LU H, et al. Quantifying the co-benefits of energy-efficiency policies: A case study of the cement industry in Shandong Province, China[J]. Science of the Total Environment, 2013,31(4):624-636.
- [8] LEE T, MEENE S. Comparative studies of urban climate cobenefits in Asian cities: An analysis of relationships between CO<sub>2</sub> emissions and environmental indicators[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 58:15-24.

栏目编辑 谭艳