

基于密切值改进TOPSIS的低碳经济评价研究

刘筱慧¹,王斌¹,陈凯¹,焦阳¹,李刚^{1,2}

(1.东北大学工商管理学院,沈阳110819;2.东北大学秦皇岛分校经济学院,河北,秦皇岛066004)

摘要:低碳经济是应对气候变化的必然选择,如何全面客观地评价一个国家或经济体低碳经济发展水平成为低碳经济研究中迫切需要解决的问题。本文充分考虑低碳经济发展规划和目标,采取修正的TOPSIS方法构建低碳经济评价模型。针对传统TOPSIS方法中存在两个不足:一是相对贴近度计算中将被评价对象到“正理想解”和到“负理想解”的距离直接相加,正向指标和负向指标直接相加是不合理的;二是传统的TOPSIS方法忽略了被评价对象与“正理想解”和“负理想解”的距离的权重分配问题。本文提出利用密切值法对传统TOPSIS方法进行修正,解决到正负理想解两个距离的组合问题。首先,通过密切值的引入将被评价对象到“正理想解”和“负理想解”的距离转化为同向指标,保证了两个距离可以进行运算;然后,对两个距离进行归一化,保证两个距离在相同的数量级上,保证备选方案到正理想解的距离和到负理想解的距离起相当的作用,再根据决策者的偏好,对两个归一化的距离进行权重分配,保证两个距离分配的权重确实体现了决策者的意愿;最后,通过对秦皇岛市的低碳经济评价验证修正TOPSIS评价模型在低碳经济评价下的可行性和有效性,解决了评价指标有目标约束下的低碳经济评价问题。

关键词:TOPSIS;密切值;低碳经济评价

中图分类号:N945.16;N945.25 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-980X(2021)12-0074-11

一、引言

低碳经济是低污染、低排放、低能耗的绿色经济,经济增长模式向低碳转型已成为世界经济的发展趋势,如何全面客观地评价一个国家或经济体低碳经济发展水平成为低碳经济研究中迫切需要解决的问题(鲍国强等,2008)。

国内外很多专家学者都对低碳经济评价方法进行了探索性的研究,郑林昌等(2011)、Jia et al(2012)、王宗军和潘文砚(2012)采用层次分析法对低碳经济发展水平进行了综合评价;郑少露等(2010)应用灰色关联分析方法确定低碳经济评价指标体系;田晴和杜丽娟(2017)通过因子分析法分析我国各省域低碳经济发展情况并构建了碳排放评价体系;史学飞等(2018)将主成分分析法与熵值法结合,建立了低碳经济评价模型;Sang(2016)采用层次分析法确定指标权重,对指标进行模糊评价构建城市低碳经济评价模型;谢传胜等(2010)运用模糊粗糙集理论对城市低碳经济进行了综合评价;谷建龙和胡吉敏(2013)应用可变模糊分析为区域低碳经济发展状况综合评价提供了一种可行的方法。现有研究在低碳经济评价方面做了大量工作,但是却忽略了低碳经济评价的特殊性,那就是对某些特定指标往往有一定的目标约束,比如要求某指标在十四五规划结束时达到某个理想值。对低碳经济的评价需要真实反映低碳经济发展水平与理想状态之间的距离,并能够根据该距离确定被评价对象的排序。已有研究主要通过传统的指标赋权和指标打分确定低碳经济评价结果的评价模型显然很难满足要求,而通过确定与理想点之间距离的TOPSIS(technique for order preference by similarity to an ideal solution)方法却非常适合有指标约束的低碳经济评价。

TOPSIS方法简单易行,在很多领域都得到了广泛应用,如刘峰和梁睿昕(2015)将TOPSIS方法应用到企业技术的选择;朱卫东和吴鹏(2015)将TOPSIS方法应用到风险预警;石宝峰等(2014)将TOPSIS方法应用到科学技术评价;孟凡生和邹韵(2018)将TOPSIS方法应用到能源结构评价;朱长征等(2019)利用TOPSIS法建立了机场竞争力评价模型。尽管TOPSIS方法的应用十分广泛,传统TOPSIS由于自身的局限,在确定备选方

收稿日期:2021-06-05

基金项目:国家社科基金重大项目“建立能源和水资源消耗、建设用地总量和强度双控市场化机制研究”(15ZDC034)

作者简介:刘筱慧,东北大学工商管理学院博士研究生,研究方向:区域经济;王斌,博士,东北大学秦皇岛分校副教授,研究方向:多属性决策、低碳经济;(通讯作者)陈凯,博士,东北大学工商管理学院教授,博士研究生导师,研究方向:区域经济;焦阳,东北大学工商管理学院博士研究生,研究方向:区域经济;李刚,中国科学院科技战略咨询研究院博士后,东北大学工商管理学院副教授,博士研究生导师,研究方向:多属性决策。

案的排序时仍然存在缺陷,主要体现在TOPSIS方法是根据相对贴近度大小来确定被评价对象的排序,但是相对贴近度是根据被评价对象与“正理想解”和“负理想解”的距离合成的,这两个距离可能会有排序不一致,甚至矛盾的情况,那么按相对贴近度就不能合理的反映出各评价对象的优劣性(华小义和谭景信,2004)。国内外专家学者对TOPSIS方法及其改进进行了较为深入的研究,胡永宏(2002),Zhang et al(2007),黄鲁成等(2019)提出使用“垂面”距离替换欧式距离改进TOPSIS方法;徐小湛等(2001),付巧峰(2007)提出可放弃全序而采用偏序,解决与“正理想解”距离更近的评价对象可能与“负理想解”的距离也更近问题,更合理地反映出方案的优劣性;陈伟(2005),李艳凯和张俊容(2008)提出通过构造“绝对理想点”来消除当增加新的评价对象影响到理想点的改变所产生的逆序现象;王先甲和汪磊(2012),Wang和Wang(2014),Chen和Lu(2015)采用马氏距离代替欧式距离来解决当属性之间存在线性关系时欧式距离失效的这一缺陷;刘树林和邱苑华(1996),徐泽水(2001),李美娟等(2020)利用目标方案与正理想点和负理想点的夹角余弦,定义了新的与理想点的相对贴近度。现有研究虽有改进,但是在TOPSIS方法中,被评价对象到“正理想解”的距离和到“负理想解”的距离,两个距离之间的关系还需要进一步深入研究,具体包括两个距离之间的运算关系和权重分配等两个方面。

基于此,本文在传统TOPSIS方法的基础上,利用密切值对传统TOPSIS方法进行修正,并通过秦皇岛的低碳经济评价验证修正TOPSIS评价模型在低碳经济评价下的可行性和有效性,解决评价指标有目标约束下的低碳经济评价问题。

二、TOPSIS方法的存在问题分析及改进思路

(一)TOPSIS方法的计算步骤

1. 决策信息矩阵及其处理

假设 Y_{ki} 表示第 k 个指标第 i 个评价对象的原始数据值; m 表示评价指标数; n 表示被评价对象数;则由原始决策信息构造的矩阵 Y 如式(1)所示。

$$Y_{m \times n} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{m1} & Y_{m2} & \cdots & Y_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (1)$$

其中:矩阵中的行表示某指标在所有被评价对象的取值,矩阵中的列表示某被评价对象所有指标的取值。

一般情况下,评价指标体系中的评价指标的量纲和指标类型是不同的,首先要对指标数据进行标准化处理。为了消除量纲和指标类型对评价结果的影响,需要对评价指标进行无量纲化处理和指标类型转换,类似的方法有很多种,代表性的有隶属度法、标准化法、线性比例法、归一化法、向量标准化法和功效系数法等。本文将采用隶属度法对数据进行处理,具体是利用式(2)和式(3)对正向和负向指标进行标准化(李刚等,2011)⁴⁰³。

$$x_{ki} = \frac{Y_{ki} - \min_{1 \leq i \leq n} (Y_{ki})}{\max_{1 \leq i \leq n} (Y_{ki}) - \min_{1 \leq i \leq n} (Y_{ki})} \quad (2)$$

$$x_{ki} = \frac{\max_{1 \leq i \leq n} (Y_{ki}) - Y_{ki}}{\max_{1 \leq i \leq n} (Y_{ki}) - \min_{1 \leq i \leq n} (Y_{ki})} \quad (3)$$

其中: x_{ki} 表示第 k 个指标第 i 个评价对象的标准值。则原始决策信息矩阵 Y 转换为标准化决策信息矩阵 X ,如式(4)所示。

$$X_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (4)$$

2. “正理想解”和“负理想解”的确定

根据式(4)标准化决策矩阵 X 中的元素 x_{ki} 可以确定“正理想解”和“负理想解”。

令 x_k^+ 为第 k 个指标的最大值, x_k^- 为第 k 个指标的最小值,则:

$$x_k^+ = \max_{1 \leq i \leq n} (x_{ki}) \quad (5)$$

$$x_k^- = \min_{1 \leq i \leq n} (x_{ki}) \quad (6)$$

由式(5)、式(6)得到评价方案的正理想解 $x^+ = (x_1^+, x_2^+, \dots, x_m^+)$, 负理想解 $x^- = (x_1^-, x_2^-, \dots, x_m^-)$ 。

通过式(5)、式(6)确定的是等权重下的“正理想解”和“负理想解”, 由于评价指标体系中每个指标的权重是不一样的, 不妨假设 w_k 是第 k 个指标权重, 则第 k 个指标第 i 个评价对象的标准化数据 x_{ki} 的加权处理值 y_{ki} 如式(7)所示(李刚等, 2011)⁴⁰³。

$$y_{ki} = x_{ki} w_k \quad (7)$$

令 y_k^+ 为第 k 个指标加权标准化后数据的最大值; y_k^- 为第 k 个指标加权标准化后数据的最小值, 则:

$$y_k^+ = \max_{1 \leq i \leq n} (y_{ki}) \quad (8)$$

$$y_k^- = \min_{1 \leq i \leq n} (y_{ki}) \quad (9)$$

由式(8)、式(9)得到加权之后的评价方案的正理想解 $y^+ = (y_1^+, y_2^+, \dots, y_m^+)$, 负理想解 $y^- = (y_1^-, y_2^-, \dots, y_m^-)$ 。

3. 被评价对象与“正理想解”和“负理想解”的距离计算

一般情况下, 通过欧式距离度量各个被评价对象与“正理想解”和“负理想解”的距离(俞立平等, 2012; Buyukozkan 和 Cifci, 2011)。

设: d_i^+ 为第 i 个被评价对象与“正理想解”的欧氏距离, d_i^- 为第 i 个被评价对象与“负理想解”的欧氏距离, 则各个被评价对象与“正理想解”和“负理想解”的欧式距离可以通过式(10)、式(11)计算得到。

$$d_i^+ = \sqrt{(y_1^+ - y_{1i})^2 + (y_2^+ - y_{2i})^2 + \dots + (y_m^+ - y_{mi})^2} \quad (10)$$

$$d_i^- = \sqrt{(y_1^- - y_{1i})^2 + (y_2^- - y_{2i})^2 + \dots + (y_m^- - y_{mi})^2} \quad (11)$$

4. 相对贴近度的计算

通过与“正理想解”的欧氏距离 d_i^+ , 与“负理想解”的欧式距离 d_i^- , 定义被评价对象的相对贴近度, 判断被评价对象的综合得分, 则第 i 个被评价对象的相对贴近度 c_i 如式(12)所示(李刚等, 2011)⁴⁰⁴。

$$c_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (12)$$

其中: $i=1, 2, \dots, n$ 。相对贴近度 c_i 的大小顺序即各评价对象的优劣顺序, 其值越大, 评价结果越优。

(二) TOPSIS 方法的存在问题分析

尽管 TOPSIS 具有计算简单, 应用广泛等诸多优势, 但 TOPSIS 方法自身依然有如下问题需要完善和解决。

(1) 到“正理想解”的负向距离和到“负理想解”的正向距离直接相加运算不合理。TOPSIS 方法是根据相对贴近度大小来确定被评价对象的排序, 但是相对贴近度是根据被评价对象与“正理想解”和“负理想解”的距离合成的, 根据式(12)计算的相对贴近度可以发现: 其分母把被评价对象到“负理想解”的距离 d_i^- 和到“正理想解”的距离 d_i^+ 进行相加是不合适的, 因为 d_i^- 是一个正向指标, 而 d_i^+ 是一个负向指标, 正向指标和负向指标的相加无法确定结果是正向还是负向, 也就是说无法比较结果的大小或说指标的类型不确定, 相加后的含义也难以解释。

(2) 到“正理想解”和“负理想解”的两个距离的权重分配问题。TOPSIS 重点考虑的是被评价对象与“正理想解”和“负理想解”的距离, 当被评价对象与“正理想解”和“负理想解”的距离不在同一数量级上, 比如一个距离可能是 9, 而另一个距离可能是 0.03, 这样两个不在相同数量级上的数相加减, 小的数很可能对最后结果起不到任何作用。此外, 被评价对象到“正理想解”和“负理想解”的距离被赋予的权重不同, 对最终的排序结果所起的作用大小也不同, 那么是赋予到“正理想解”的距离权重更大些? 还是赋予到“负理想解”的距离权重更大些? 到底是哪一个距离对最终排序结果起到的作用大更好。

(三) TOPSIS 方法的改进思路

针对以上问题, 本文提出基于密切值法对传统 TOPSIS 方法进行修正, 并通过实例验证修正后的 TOPSIS 的可行性和有效性。具体思路如下:

一是通过密切值方法将被评价对象到“正理想解”和“负理想解”的距离转化为同向指标, 解决正向距离和负向距离相加不合理问题。通过密切值的引入, 将被评价对象到“负理想解”的距离由正向指标转化为负

向指标,而被评价对象到“正理想解”的距离依然为负向指标,两个同向指标运算合理,其结果可解释,且求得的密切值也是负向指标,方向唯一。

二是通过对被评价对象到“正理想解”和“负理想解”的距离进行归一化,解决两个距离对最终排序结果作用大小的权重分配问题。对被评价对象到“正理想解”和“负理想解”的距离进行标准化处理,使两个距离都映射到 $[0,1]$ 区间,首先保证两个距离大小在相同的数量级上,能够对最终排序结果起到大致相当的作用,再根据决策者的偏好对两个距离进行权重分配,确定两个距离对最终排序结果的作用大小。

本文的主要贡献体现在如下方面:

(1) 利用TOPSIS方法构建低碳经济评价模型解决了有目标约束的低碳经济评价问题。对于低碳经济评价等目标约束的评价问题,TOPSIS方法是一种比较合适的评价方法,可以将各个指标的目标约束转化为TOPSIS的“正理想解”和“负理想解”,解决有目标约束下的低碳经济评价问题。

(2) 利用密切值方法改进了传统的TOPSIS方法,提高了低碳经济评价结果的合理性和可解释性。由于传统的TOPSIS方法中对备选方案到“正理想解”和“负理想解”的距离运算不合理,且无法直观区分备选方案到“正理想解”和“负理想解”的两个距离的权重大小,通过密切值方法的改进,解决了传统TOPSIS方法的不足,保证了基于密切值改进的TOPSIS方法的低碳经济评价模型的有效性,进一步解决了有目标约束的低碳经济评价问题。

三、基于密切值修正的TOPSIS法

(一)密切值法的概述

密切值法是多目标决策中的一种有效方法,其基本思想是:对正向指标和负向指标进行同向标准化处理,然后找出各评价指标的“最优点”和“最劣点”,分别计算各评价对象与“最优点”及“最劣点”的距离,将这些距离转化为能综合反映各评价对象优劣的综合指标密切值,并根据密切值的大小确定各评价对象的优劣顺序(陆菊春和韩国文,2002;王登瀛,1989)。

(二)修正TOPSIS的方法步骤

基于密切值的基本思想,引入密切值对传统TOPSIS方法进行修正,具体步骤如下:

1. 最优距离的定义

通过式(10)和式(11)计算第 i 个备选方案与“正理想解”的距离 d_i^+ 和“负理想解”的距离 d_i^- 。其中, $i=1, 2, \dots, n$ 。

考虑到备选方案到“正理想解”的距离是越小越优,所以 d_i^+ 是一个负向指标。而备选方案到“负理想解”的距离是越大越优,所以 d_i^- 是一个正向指标。 d_i^+ 和 d_i^- 的最优值定义如式(13)、式(14)所示。

$$d^+ = \min_{1 \leq i \leq n} (d_i^+) \quad (13)$$

$$d^- = \max_{1 \leq i \leq n} (d_i^-) \quad (14)$$

2. 密切值的计算

根据 d_i^+ 的最优距离 d^+ 和 d_i^- 的最优距离 d^- 即可构造备选方案 i 的密切值 C_i 为

$$C_i = \frac{d_i^+}{d^+} - \frac{d_i^-}{d^-} \quad (15)$$

根据式(13)和式(14)可知, $\frac{d_i^+}{d^+} \geq 1$,依然是负向指标; $\frac{d_i^-}{d^-} \leq 1$,依然是正向指标,所以

$C_i = \frac{d_i^+}{d^+} - \frac{d_i^-}{d^-} \geq 0$,且是一个负向指标,当 $C_i=0$ 时,刚好表示 $d^+ = d_i^+, d_i^- = d^-$,也就是备选方案 i 刚好与“理想点”重合,达到最优。

3. 密切值的修正

考虑到 d_i^+ 与 d_i^- 可能不在相同的数量级上,直接对二者进行相加减可能会导致数值小的距离不起作用,而通过最优距离的引入,也无法保证 $\frac{d_i^+}{d^+}$ 和 $\frac{d_i^-}{d^-}$ 统一到相同的数量级上,当两个不在相同数量级上的数相加减的时候,小的数很可能对最后的结果不起作用。基于此,对被评价对象到“正理想解”和“负理想解”的距离进行修正处理。同时,考虑到 d_i^+ 是负向指标和 d_i^- 是正向指标,可以根据式(2)和式(3)对指标原始数据进行标准化的处理方法对 d_i^+ 和 d_i^- 进行标准化,具体如(16)和式(17)所示。

$$D_i^+ = \frac{\max_{1 \leq i \leq n} (d_i^+) - d_i^+}{\max_{1 \leq i \leq n} (d_i^+) - \min_{1 \leq i \leq n} (d_i^+)} \quad (16)$$

$$D_i^- = \frac{d_i^- - \min_{1 \leq i \leq n} (d_i^-)}{\max_{1 \leq i \leq n} (d_i^-) - \min_{1 \leq i \leq n} (d_i^-)} \quad (17)$$

其中: D_i^+ 表示第*i*个被评价对象到“正理想解”的距离 d_i^+ 的标准化值,不同的是,根据式(16)的转换, D_i^+ 被映射到 $[0, 1]$ 区间,且是一个正向指标,越大越好。

同理, D_i^- 表示第*i*个被评价对象到“负理想解”的距离 d_i^- 的标准化值,根据式(17)的转换, D_i^- 被映射到 $[0, 1]$ 区间,依然是一个正向指标,越大越好。

改进后的密切值可由式(18)给出。

$$D_i = D_i^+ + D_i^- \quad (18)$$

其中: D_i 是一个正向指标,因为根据式(16)和式(17)对 d_i^+ 和 d_i^- 的方向调整, D_i^+ 和 D_i^- 均为正向指标,两者相加同样为正向指标,越大越好。

4. 到正负理想解距离的加权

根据式(16)和式(17)对 d_i^+ 和 d_i^- 的转换,使 D_i^+ 和 D_i^- 被映射到了相同的区间 $[0, 1]$ 上,可以认为二者具有相同的数量级,所以 D_i 值的计算相当于考虑了等权重的 d_i^+ 和 d_i^- 。而在实际评价中,决策者可能更加偏重到“正理想解”的距离或到“负理想解”的距离。因此,式(18)可以加入决策者的偏好权重 λ ,加权后,式(18)变为式(19)。

$$D_i = \lambda D_i^+ + (1 - \lambda) D_i^- \quad (19)$$

四、实证检验

(一)原始数据及指标权重的确定

为了验证本文提出的TOPSIS改进模型的可行性和有效性,本文选取秦皇岛市2005—2015年间的低碳经济发展情况作为样本进行实证检验,指标体系构建见文献(王斌等,2017)¹⁸⁰¹,指标数据见表1。

(1)指标数据的标准化。利用式(2)和式(3)对原始数据中正向和负向指标进行标准化,列入表1第(5)~(15)列。

(2)指标权重的计算。为了使指标权重既反映专家经验又反映指标数据的客观信息,本文根据文献(王斌等,2017)¹⁸⁰²利用Gini修正G1组合赋权法确定低碳经济评价指标的主客观组合权重,具体算法及过程见文献(王斌等,2017)¹⁸⁰²,将计算得到的指标组合权重,列入表1第(16)列。

(二)传统TOPSIS方法求解

(1)“正理想解”和“负理想解”的确定。根据式(7)对表1的标准化数据进行加权处理,具体如表第(17)~27(列)所示。再把表1中第(17)~(27)列中的数据代入式(8)和式(9)计算低碳经济评价的“正理想解”和“负理想解”,列入表1。

(2)各年份与“正理想解”和“负理想解”的距离。通过比较不同年份的各个指标数据与“正理想解”和“负理想解”的距离,确定不同年份下低碳经济发展水平的评价结果及其排序,具体是把表1中第(17)~(29)列中的数据代入式(10)和式(11)计算各年份与“正理想解”和“负理想解”的距离,列入表2。

(3)相对贴近度的计算。把表2中的距离代入式(12)计算得到低碳经济评价各年份的相对贴近度,列入表2。

同理也可以得到低碳经济评价下6个评价准则的相对贴近度,结果列入表2。对所有评价结果进行排名,结果列入表3。

(三)修正TOPSIS方法求解

(1)最优距离的确定。根据表2中到“正理想解”的距离 d_i^+ 和到“负理想解”的距离 d_i^- ,利用式(13)和式(14)确定 d_i^+ 的最优距离 d^+ , d_i^- 的最优距离 d^- 。具体如表2中加粗的数字。

(2)密切值的计算。把表2中的相关数据代入式(15)计算各个被评价对象的密切值 C_i ,列入表2,同时为了更加清楚的比较 d_i^+ 和 d_i^- 经过最优值处理后的情况,将计算密切值所需要的 d_i^+/d^+ 和 d_i^-/d^- 列入表2。

(3)修正密切值的计算。把表2中的相关数据代入式(16)和式(17)计算到“正理想解”的距离 d_i^+ 和到

“负理想解”的距离 d_i^- 的标准化值。把标准化值代入式(18)即可计算被评价对象的改进密切值 D_i ，列入表2。根据修正密切值大小进行排名，列入表3。

(4) 正负理想解距离的加权。把表2中的相关数据代入式(19)计算被评价对象到正负理想解的距离在不同偏好权重 λ 下的 D_i ，并按照 D_i 值大小进行排名，列入表4。由于篇幅所限，本文只给出了修正 TOPSIS 在部分权重情况下的结果。

表1 秦皇岛市低碳经济评价指标体系及指标数据

(1) 序号	(2) 准则	(3)指标	(4) 类型	2005—2015年 标准化得分			(16) 组合 权重	加权数据		理想解	
				(5) 2005年	...	(15) 2015年		(17) 2005	(27) 2015	(28) 正	(29) 负
1	X_1 低碳 经济 发展 水平	X_{11} GDP(万元)	正	0.0000	...	1.0000	0.1087	0.0000	0.1087	0.1087	0.0000
2		X_{12} 人均GDP(元)	正	0.0000	...	1.0000	0.0989	0.0000	0.0989	0.0989	0.0000
3		X_{13} 第三产业占GDP比重(%)	正	0.7111	...	0.8667	0.0495	0.0352	0.0429	0.0495	0.0000
4		X_{14} 旅游总收入(亿元)	正	0.0000	...	1.0000	0.0495	0.0000	0.0495	0.0495	0.0000
5		X_{15} 第三产业增加值(万元)	正	0.0000	...	1.0000	0.0268	0.0000	0.0268	0.0268	0.0000
6	X_2 低碳 技术 发展 水平	X_{21} 污水处理率(%)	正	0.1501	...	1.0000	0.0669	0.0100	0.0669	0.0669	0.0000
7		X_{22} 生活垃圾无害化处理率(%)	正	1.0000	...	1.0000	0.0334	0.0334	0.0334	0.0334	0.0000
8		X_{23} 生活垃圾无害化处理能力(吨/日)	正	0.6667	...	0.0000	0.0334	0.0223	0.0000	0.0334	0.0000
9		X_{24} 工业固体废物综合利用比率(%)	正	0.9044	...	0.4302	0.0330	0.0298	0.0142	0.0330	0.0000
10	X_3 低碳 能耗	X_{31} 万元GDP能耗(吨标准煤/万元)	负	0.0000	...	1.0000	0.0476	0.0000	0.0476	0.0476	0.0000
11		X_{32} 单位工业增加值能耗(吨标准煤/万元)	负	0.0000	...	1.0000	0.0476	0.0000	0.0476	0.0476	0.0000
12		X_{33} 万元增加值电耗(千瓦时/万元)	负	0.2874	...	1.0000	0.0238	0.0068	0.0238	0.0238	0.0000
13		X_{34} 能源消费弹性系数	负	0.4695	...	0.9318	0.0238	0.0112	0.0222	0.0238	0.0000
14		X_{35} 规模以上工业企业能源消费量(吨标准煤)	负	1.0000	...	0.7334	0.0119	0.0119	0.0087	0.0119	0.0000
15		X_{36} 工业企业水消费量(万立方米)	负	1.0000	...	0.8444	0.0119	0.0119	0.0100	0.0119	0.0000
16	X_4 低碳 污染 减排 排放	X_{41} 万元GDP工业废水排放量(吨)	负	0.0000	...	0.9184	0.0318	0.0000	0.0292	0.0318	0.0000
17		X_{42} 万元GDP工业固体废物产生量(吨)	负	1.0000	...	0.8569	0.0318	0.0318	0.0272	0.0318	0.0000
18		X_{43} 万元GDP二氧化硫排放量(吨)	负	0.0000	...	1.0000	0.0286	0.0000	0.0286	0.0286	0.0000
19		X_{44} 万元GDP烟尘排放量(吨)	负	0.6186	...	0.6262	0.0286	0.0177	0.0179	0.0286	0.0000
20		X_{45} 万元GDP工业粉尘排放量(吨)	负	0.0000	...	1.0000	0.0229	0.0000	0.0229	0.0229	0.0000
21		X_{46} 万元GDP危险废物(吨)	负	0.9513	...	0.3454	0.0229	0.0218	0.0079	0.0229	0.0000
22	X_5 低碳 社会 发展 水平	X_{51} 城市居民可支配收入(元)	正	0.0000	...	1.0000	0.0303	0.0000	0.0303	0.0303	0.0000
23		X_{52} 农村居民家庭纯收入(元)	正	0.0000	...	1.0000	0.0303	0.0000	0.0303	0.0303	0.0000
24		X_{53} 城市人均住房面积(平方米)	正	0.0000	...	1.0000	0.0151	0.0000	0.0151	0.0151	0.0000
25		X_{54} 农村人均住房面积(平方米)	正	0.0000	...	0.8264	0.0076	0.0000	0.0063	0.0076	0.0000
26	X_6 低碳 生态 环境 质量	X_{61} 公园面积(公顷)	正	0.0000	...	1.0000	0.0255	0.0000	0.0255	0.0255	0.0000
27		X_{62} 人均公园绿地面积(平方米)	正	0.0000	...	0.9297	0.0231	0.0000	0.0215	0.0231	0.0000
28		X_{63} 建成区绿化覆盖率(%)	正	0.2545	...	0.0000	0.0116	0.0030	0.0000	0.0116	0.0000
29		X_{64} 建成区绿地率(%)	正	0.0000	...	0.1914	0.0116	0.0000	0.0022	0.0116	0.0000
30		X_{65} 公园个数(个)	正	0.0000	...	1.0000	0.0116	0.0000	0.0116	0.0116	0.0000

表2 各评价对象的评价结果

准则	距离	秦皇岛市2005—2015年低碳经济评价结果及排名										
		2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年
X_1 低碳 经济 发展 水平	d_i^+	0.1580	0.1417	0.1244	0.1156	0.0979	0.0818	0.0568	0.0507	0.0436	0.0338	0.0066
	d_i^-	0.0352	0.0521	0.0426	0.0571	0.0706	0.0910	0.1190	0.1320	0.1390	0.1465	0.1631
	c_i	0.1822	0.2686	0.2551	0.3308	0.4188	0.5266	0.6768	0.7225	0.7610	0.8124	0.9611
	d_i^+/d_i^+	23.942	21.476	18.852	17.511	14.840	12.392	8.608	7.682	6.613	5.127	1.000
	d_i^-/d_i^-	0.216	0.319	0.261	0.350	0.433	0.558	0.729	0.809	0.852	0.898	1.000
	C_i	23.726	21.157	18.591	17.161	14.407	11.834	7.879	6.873	5.761	4.229	0.000
	D_i^+	0.000	0.107	0.222	0.280	0.397	0.503	0.668	0.709	0.755	0.820	1.000
	D_i^-	0.000	0.132	0.058	0.171	0.277	0.436	0.655	0.757	0.811	0.870	1.000
	D_i	0.000	0.239	0.280	0.452	0.673	0.940	1.323	1.465	1.566	1.690	2.000
X_2 低碳 技术 发展 水平	d_i^+	0.0580	0.0678	0.0447	0.0551	0.0545	0.0348	0.0343	0.0344	0.0474	0.0366	0.0383
	d_i^-	0.0510	0.0520	0.0529	0.0426	0.0407	0.0644	0.0660	0.0627	0.0688	0.0719	0.0761
	c_i	0.4679	0.4338	0.5418	0.4363	0.4275	0.6493	0.6581	0.6459	0.5918	0.6625	0.6651
	d_i^+/d_i^+	1.692	1.977	1.304	1.605	1.589	1.014	0.999	1.002	1.383	1.068	1.117
	d_i^-/d_i^-	0.670	0.683	0.695	0.560	0.535	0.846	0.867	0.824	0.904	0.945	1.000

续表

准则	距离	秦皇岛市 2005—2015 年低碳经济评价结果及排名										
		2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年
	C_i	1.021	1.294	0.609	1.045	1.054	0.168	0.132	0.178	0.479	0.123	0.117
	D_i^+	0.292	0.000	0.688	0.380	0.397	0.984	1.000	0.997	0.608	0.930	0.879
	D_i^-	0.291	0.318	0.344	0.054	0.000	0.670	0.714	0.621	0.793	0.881	1.000
	D_i	0.583	0.318	1.032	0.434	0.397	1.654	1.714	1.618	1.401	1.811	1.879
X_3 低碳 能耗	d_i^+	0.0706	0.0689	0.0649	0.0475	0.0501	0.0318	0.0301	0.0227	0.0151	0.0092	0.0040
	d_i^-	0.0213	0.0161	0.0149	0.0331	0.0326	0.0521	0.0551	0.0588	0.0655	0.0706	0.0759
	c_i	0.2321	0.1896	0.1863	0.4101	0.3943	0.6210	0.6471	0.7210	0.8130	0.8847	0.9498
	d_i^+/d_i^+	17.640	17.217	16.224	11.885	12.537	7.943	7.513	5.684	3.769	2.301	1.004
	d_i^-/d_i^-	0.281	0.212	0.196	0.436	0.430	0.686	0.726	0.774	0.864	0.931	1.001
	C_i	17.359	17.004	16.028	11.450	12.107	7.257	6.787	4.910	2.905	1.370	0.003
	D_i^+	0.000	0.025	0.085	0.346	0.307	0.583	0.609	0.719	0.834	0.922	1.000
	D_i^-	0.106	0.020	0.000	0.298	0.291	0.609	0.659	0.719	0.830	0.913	1.000
	D_i	0.106	0.046	0.085	0.644	0.598	1.192	1.268	1.438	1.664	1.835	2.000
X_4 低碳 污染 减排 排放	d_i^+	0.0497	0.0358	0.0252	0.0103	0.0134	0.0242	0.0491	0.0461	0.0398	0.0402	0.0191
	d_i^-	0.0424	0.0417	0.0488	0.0600	0.0580	0.0590	0.0373	0.0417	0.0436	0.0446	0.0576
	c_i	0.4603	0.5379	0.6593	0.8541	0.8118	0.7092	0.4317	0.4745	0.5227	0.5258	0.7507
	d_i^+/d_i^+	4.848	3.494	2.458	1.000	1.310	2.356	4.790	4.497	3.878	3.920	1.866
	d_i^-/d_i^-	0.707	0.695	0.813	1.000	0.966	0.982	0.622	0.694	0.726	0.743	0.960
	C_i	4.142	2.799	1.645	0.000	0.344	1.374	4.168	3.803	3.152	3.177	0.906
	D_i^+	0.000	0.352	0.621	1.000	0.919	0.648	0.015	0.091	0.252	0.241	0.775
	D_i^-	0.224	0.193	0.505	1.000	0.910	0.953	0.000	0.190	0.275	0.319	0.894
	D_i	0.224	0.545	1.126	2.000	1.829	1.600	0.015	0.282	0.527	0.561	1.669
X_5 低碳 社会 发展 水平	d_i^+	0.0461	0.0433	0.0392	0.0356	0.2296	0.0290	0.0221	0.0167	0.0109	0.2296	0.0013
	d_i^-	0.0000	0.0030	0.0069	0.0105	0.0136	0.0172	0.0244	0.0299	0.0355	0.0410	0.0459
	c_i	0.0000	0.0656	0.1505	0.2280	0.0558	0.3723	0.5247	0.6424	0.7656	0.1514	0.9720
	d_i^+/d_i^+	35.434	33.272	30.131	27.360	176.639	22.320	17.026	12.811	8.356	176.639	1.015
	d_i^-/d_i^-	0.000	0.066	0.151	0.229	0.296	0.375	0.532	0.652	0.773	0.892	0.999
	C_i	35.434	33.206	29.980	27.131	176.344	21.945	16.494	12.159	7.583	175.747	0.016
	D_i^+	0.804	0.816	0.834	0.850	0.00	0.879	0.909	0.933	0.958	0.000	1.000
	D_i^-	0.000	0.066	0.151	0.229	0.296	0.375	0.533	0.652	0.774	0.893	1.000
	D_i	0.804	0.882	0.985	1.079	0.296	1.254	1.442	1.585	1.732	0.893	2.000
X_6 低碳 生态 环境 质量	d_i^+	0.0391	0.0375	0.0364	0.0262	0.0223	0.0035	0.0037	0.0035	0.0037	0.0062	0.0150
	d_i^-	0.0030	0.0038	0.0046	0.0153	0.0189	0.0383	0.0378	0.0381	0.0383	0.0369	0.0354
	c_i	0.0702	0.0912	0.1122	0.3683	0.4585	0.9168	0.9118	0.9154	0.9126	0.8572	0.7021
	d_i^+/d_i^+	11.250	10.783	10.463	7.531	6.417	1.000	1.053	1.014	1.057	1.771	4.319
	d_i^-/d_i^-	0.077	0.098	0.120	0.398	0.493	0.998	0.986	0.994	1.000	0.964	0.923
	C_i	11.173	10.685	10.343	7.133	5.925	0.002	0.067	0.019	0.057	0.808	3.396
	D_i^+	0.000	0.046	0.077	0.363	0.471	1.000	0.995	0.999	0.994	0.925	0.676
	D_i^-	0.000	0.023	0.046	0.348	0.450	0.998	0.985	0.994	1.000	0.961	0.916
	D_i	0.000	0.068	0.123	0.711	0.922	1.998	1.980	1.993	1.994	1.885	1.592
X 低碳 城市 综合 评价	d_i^+	0.1986	0.1844	0.1587	0.1439	0.1297	0.1017	0.0907	0.0818	0.0781	0.0652	0.0461
	d_i^-	0.0781	0.0862	0.0854	0.1006	0.1077	0.1427	0.1580	0.1700	0.1816	0.1914	0.2118
	c_i	0.2823	0.3186	0.3497	0.4115	0.4538	0.5839	0.6353	0.6752	0.6993	0.7458	0.8213
	d_i^+/d_i^+	4.311	4.002	3.445	3.124	2.815	2.208	1.969	1.775	1.695	1.416	1.000
	d_i^-/d_i^-	0.369	0.407	0.403	0.475	0.509	0.674	0.746	0.803	0.857	0.904	1.000
	C_i	3.942	3.595	3.042	2.648	2.307	1.534	1.222	0.972	0.838	0.512	0.000
	D_i^+	0.000	0.093	0.262	0.359	0.452	0.635	0.707	0.766	0.790	0.874	1.000
	D_i^-	0.000	0.061	0.054	0.168	0.222	0.483	0.598	0.687	0.774	0.848	1.000
	D_i	0.000	0.154	0.316	0.527	0.673	1.119	1.305	1.453	1.564	1.722	2.000

(四)评价结果对比分析

(1) 两种方法评价结果的相关性比较。采用简单回归分析传统 TOPSIS 评价结果(Y)与修正 TOPSIS 评价结果(X)的相关性,结果列入表 3。从回归结果看,在低碳经济评价 6 个准则和综合评价的评价结果中, R^2 最小值为 0.889,并且两种评价方法的评价结果具有较高度度的相关性。

(2) 两种方法正负理想解距离运算的合理性比较。根据表3比较发现,传统TOPSIS和修正TOPSIS的评价结果排序是不一致的。以低碳经济评价准则 X_1 为例,采用两种评价方法对 X_1 的排序结果基本一致,但在2006年和2007年两个年份的排序发生了互换。这是因为修正TOPSIS的相对贴近度计算公式的分母将被评价对象到“负理想解”的距离正向指标和到“正理想解”的距离负向指标相加不合理。而修正TOPSIS经过对到“正理想解”和“负理想解”距离的同向转化和归一化,使两个距离转化为了同向指标,其标准化值 D_i^+ 和 D_i^- 都是正向值,两者运算求得改进后的密切值 D_i 也为正向值,越大越好。这就说明,修正TOPSIS中被评价对象到“正理想解”和“负理想解”的距离运算更合理,使得排序结果更科学。

表3 传统TOPSIS与修正TOPSIS评价结果比较

准则	排名	秦皇岛市2005—2015年低碳经济评价结果及排名											R^2	相关性
		2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年		
X_1 低碳 经济 发展 水平	传统TOPSIS	0.1822	0.2686	0.2551	0.3308	0.4188	0.5266	0.6768	0.7225	0.761	0.8124	0.9611	0.998	0.999
	排序	11	9	10	8	7	6	5	4	3	2	1		
	修正TOPSIS	0	0.239	0.28	0.452	0.673	0.94	1.323	1.465	1.566	1.69	2		
	排序	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
X_2 低碳 技术 发展 水平	传统TOPSIS	0.4679	0.4338	0.5418	0.4363	0.4275	0.6493	0.6581	0.6459	0.5918	0.6625	0.6651	0.993	0.997
	排序	8	10	7	9	11	4	3	5	6	2	1		
	修正TOPSIS	0.583	0.318	1.032	0.434	0.397	1.654	1.714	1.618	1.401	1.811	1.879		
	排序	8	11	7	9	10	4	3	5	6	2	1		
X_3 低碳 能耗	传统TOPSIS	0.2321	0.1896	0.1863	0.4101	0.3943	0.621	0.6471	0.721	0.813	0.8847	0.9498	0.999	0.999
	排序	9	10	11	7	8	6	5	4	3	2	1		
	修正TOPSIS	0.106	0.046	0.085	0.644	0.598	1.192	1.268	1.438	1.664	1.835	2		
	排序	9	11	10	7	8	6	5	4	3	2	1		
X_4 低碳 污染 减量 排放	传统TOPSIS	0.4603	0.5379	0.6593	0.8541	0.8118	0.7092	0.4317	0.4745	0.5227	0.5258	0.7507	0.987	0.994
	排序	10	6	5	1	2	4	11	9	8	7	3		
	修正TOPSIS	0.224	0.545	1.126	2	1.829	1.6	0.015	0.282	0.527	0.561	1.669		
	排序	10	7	5	1	2	4	11	9	8	6	3		
X_5 低碳 社会 发展 水平	传统TOPSIS	0	0.0656	0.1505	0.228	0.0558	0.3723	0.5247	0.6424	0.7656	0.1514	0.972	0.889	0.943
	排序	11	9	8	6	10	5	4	3	2	7	1		
	修正TOPSIS	0.804	0.882	0.985	1.079	0.296	1.254	1.442	1.585	1.732	0.893	2		
	排序	10	9	7	6	11	5	4	3	2	8	1		
X_6 低碳 生态 环境 质量	传统TOPSIS	0.0702	0.0912	0.1122	0.3683	0.4585	0.9168	0.9118	0.9154	0.9126	0.8572	0.7021	0.999	0.999
	排序	11	10	9	8	7	1	4	2	3	5	6		
	修正TOPSIS	0	0.068	0.123	0.711	0.922	1.998	1.98	1.993	1.994	1.885	1.592		
	排序	11	10	9	8	7	1	4	3	2	5	6		
X 低碳 城市 综合 评价	传统TOPSIS	0.2823	0.3186	0.3497	0.4115	0.4538	0.5839	0.6353	0.6752	0.6993	0.7458	0.8213	0.999	1
	排序	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
	修正TOPSIS	0	0.154	0.316	0.527	0.673	1.119	1.305	1.453	1.564	1.722	2		
	排序	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		

(3) 两种方法正负理想解距离权重对评价结果的作用比较。传统TOPSIS没有考虑被评价对象到“正理想解”和“负理想解”的距离对最终排序结果的作用大小,因为无论到正负理想解距离的权重如何变化,其评价结果的排序都是不发生变化的。而在修正TOPSIS中,根据表2比较发现,密切值的计算中 d_i^+/d_i^+ 经常是远大于 d_i^-/d_i^- ,也就是说到“正理想解”的距离被赋予了更大的权重,而权重小的到“负理想解”的距离对排序结果起不到作用。在对两个距离进行归一化后,根据表2可知,两个距离的标准化值 D_i^+ 和 D_i^- 都被映射到了 $[0,1]$ 区间上,对排序结果起到了大致相当的作用。最后,根据表4比较可知,在对到正负理想解的距离采用不同偏好权重 λ 的情况下,评价结果的排序发生了变化。以低碳经济评价准则 X_5 为例,当 λ 取值0.1,排序结果除了排在第1位的2015年不变,其他年份的排序均发生了变化。这就说明,修正TOPSIS可以根据决策者的偏好确定被评价对象到“正理想解”和“负理想解”的距离对排序结果的作用大小。

表 4 修正 TOPSIS 正负理想解距离的加权结果比较

准则	λ	排名	秦皇岛市 2005—2015 年低碳经济评价结果及排名										
			2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年
X_1 低碳 经济 发展 水平	—	D_i	0.0000	0.2390	0.2800	0.4520	0.6730	0.9400	1.3230	1.4650	1.5660	1.6900	2.0000
		排名	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	$\lambda=0.9$	D_i	0.0000	0.1095	0.2056	0.2691	0.3850	0.4963	0.6667	0.7138	0.7606	0.8250	1.0000
		排名	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

	$\lambda=0.2$	D_i	0.0000	0.1270	0.0908	0.1928	0.3010	0.4494	0.6576	0.7474	0.7998	0.8600	1.0000
		排名	11	9	10	8	7	6	5	4	3	2	1
	$\lambda=0.1$	D_i	0.0000	0.1295	0.0744	0.1819	0.2890	0.4427	0.6563	0.7522	0.8054	0.8650	1.0000
		排名	11	9	10	8	7	6	5	4	3	2	1
	X_2 低碳 技术 发展 水平	—	D_i	0.5830	0.3180	1.0320	0.4340	0.3970	1.6540	1.7140	1.6180	1.4010	1.8110
排名			8	11	7	9	10	4	3	5	6	2	1
$\lambda=0.9$		D_i	0.2919	0.0318	0.6536	0.3474	0.3573	0.9526	0.9714	0.9594	0.6265	0.9251	0.8911
		排名	10	11	6	9	8	3	1	2	7	4	5
...	
$\lambda=0.2$		D_i	0.2912	0.2544	0.4128	0.1192	0.0794	0.7328	0.7712	0.6962	0.7560	0.8908	0.9758
		排名	8	9	7	10	11	5	3	6	4	2	1
$\lambda=0.1$		D_i	0.2911	0.2862	0.3784	0.0866	0.0397	0.7014	0.7426	0.6586	0.7745	0.8859	0.9879
		排名	8	9	7	10	11	5	4	6	3	2	1
X_3 低碳 能耗		—	D_i	0.1060	0.0460	0.0850	0.6440	0.5980	1.1920	1.2680	1.4380	1.6640	1.8350
	排名		9	11	10	7	8	6	5	4	3	2	1
	$\lambda=0.9$	D_i	0.0106	0.0245	0.0765	0.3412	0.3054	0.5856	0.6140	0.7190	0.8336	0.9211	1.0000
		排名	11	10	9	7	8	6	5	4	3	2	1

	$\lambda=0.2$	D_i	0.0848	0.0210	0.0170	0.3076	0.2942	0.6038	0.6490	0.7190	0.8308	0.9148	1.0000
		排名	9	10	11	7	8	6	5	4	3	2	1
	$\lambda=0.1$	D_i	0.0954	0.0205	0.0085	0.3028	0.2926	0.6064	0.6540	0.7190	0.8304	0.9139	1.0000
		排名	9	10	11	7	8	6	5	4	3	2	1
	X_4 低碳 污染 减排	—	D_i	0.2240	0.5450	1.1260	2.0000	1.8290	1.6000	0.0150	0.2820	0.5270	0.5610
排名			10	7	5	1	2	4	11	9	8	6	3
$\lambda=0.9$		D_i	0.0224	0.3361	0.6094	1.0000	0.9181	0.6785	0.0135	0.1009	0.2543	0.2488	0.7869
		排名	10	6	5	1	2	4	11	9	7	8	3
...	
$\lambda=0.2$		D_i	0.1792	0.2248	0.5282	1.0000	0.9118	0.8920	0.0030	0.1702	0.2704	0.3034	0.8702
		排名	9	8	5	1	2	3	11	10	7	6	4
$\lambda=0.1$		D_i	0.2016	0.2089	0.5166	1.0000	0.9109	0.9225	0.0015	0.1801	0.2727	0.3112	0.8821
		排名	9	8	5	1	3	2	11	10	7	6	4
X_5 低碳 社会 发展 水平		—	D_i	0.8040	0.8820	0.9850	1.0790	0.2960	1.2540	1.4420	1.5850	1.7320	0.8930
	排名		10	9	7	6	11	5	4	3	2	8	1
	$\lambda=0.9$	D_i	0.7236	0.7410	0.7657	0.7879	0.0296	0.8286	0.8714	0.9049	0.9396	0.0893	1.0000
		排名	9	8	7	6	11	5	4	3	2	10	1

	$\lambda=0.2$	D_i	0.1608	0.2160	0.2876	0.3532	0.2368	0.4758	0.6082	0.7082	0.8108	0.7144	1.0000
		排名	11	10	8	7	9	6	5	4	2	3	1
	$\lambda=0.1$	D_i	0.0804	0.1410	0.2193	0.2911	0.2664	0.4254	0.5706	0.6801	0.7924	0.8037	1.0000
		排名	11	10	9	7	8	6	5	4	3	2	1
	X_6 低碳 生态 环境 质量	—	D_i	0.0000	0.0680	0.1230	0.7110	0.9220	1.9980	1.9800	1.9930	1.9940	1.8850
排名			11	10	9	8	7	1	4	3	2	5	6
$\lambda=0.9$		D_i	0.0000	0.0437	0.0739	0.3615	0.4689	0.9998	0.9940	0.9985	0.9946	0.9286	0.7000
		排名	11	10	9	8	7	1	4	3	2	5	6
...	
$\lambda=0.2$		D_i	0.0000	0.0276	0.0522	0.3510	0.4542	0.9984	0.9870	0.9950	0.9988	0.9538	0.8680
		排名	11	10	9	8	7	2	4	3	1	5	6
$\lambda=0.1$		D_i	0.0000	0.0253	0.0491	0.3495	0.4521	0.9982	0.9860	0.9945	0.9994	0.9574	0.8920
		排名	11	10	9	8	7	2	4	3	1	5	6
X 低碳 城市 综合 评价		—	D_i	0.0000	0.1540	0.3160	0.5270	0.6730	1.1190	1.3050	1.4530	1.5640	1.7220
	排名		11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	$\lambda=0.9$	D_i	0.0000	0.0898	0.2412	0.3399	0.4290	0.6198	0.6961	0.7581	0.7884	0.8714	1.0000
		排名	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

	$\lambda=0.2$	D_i	0.0000	0.0674	0.0956	0.2062	0.2680	0.5134	0.6198	0.7028	0.7772	0.8532	1.0000
		排名	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	$\lambda=0.1$	D_i	0.0000	0.0642	0.0748	0.1871	0.2450	0.4982	0.6089	0.6949	0.7756	0.8506	1.0000
		排名	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

五、结论

针对低碳经济评价等有目标约束的评价问题,本文考虑通过TOPSIS方法构建低碳经济评价模型,考虑到传统TOPSIS方法中存在的到正负理想点的距离直接相加不合理和到正负理想点的距离加权问题,本文利用基于密切值方法对传统的TOPSIS方法进行改进。具体开展的工作有三:一是通过密切值的引入将被评价对象到“正理想解”和“负理想解”的距离转化为同向指标,使两个距离合理运算;二是对两个距离进行归一化,保证两个距离大小在相同的数量级上,能够对最终排序结果起到大致相当的作用,再根据决策者的偏好对两个距离进行权重分配,确定两个距离对最终排序结果的作用大小;三是经过低碳经济评价实例验证了本文提出的改进模型的合理性和有效性。

基于以上工作得到如下三个结论:

(1) 修正TOPSIS方法和传统TOPSIS方法的排序结果是不一致的,但两种评价方法具有较程度的相关性。其中,修正TOPSIS方法中被评价对象到“正理想解”和“负理想解”的距离的运算更合理,排序更科学。

(2) 修正TOPSIS方法赋予了被评价对象到“正理想解”和“负理想解”的距离等权重,能够对评价结果起到相同的作用,并可以根据决策者的偏好确定两个距离对排序结果的作用大小。

(3) 实证结果证明了修正TOPSIS方法的可行性和有效性,解决了评价指标有目标约束情况下的低碳经济评价问题,进一步完善了低碳经济评价的方法。

综上,不难看出,本文提出的基于密切值改进的TOPSIS方法具有良好的表现,理论层面上,避免了到正负理想解两个距离直接相加不合理的问题,又解决了两个距离的加权问题。基于本文的改进,TOPSIS方法的应用更加广泛,只要涉及多个备选方案的排序问题,均可以采用本文提出的改进的TOPSIS方法,此外,TOPSIS方法还可以有效解决有目标约束的评价问题,这是其他评价方法都不擅长的地方,同样,改进的TOPSIS方法依然具备有效解决有目标约束的评价、排序问题。

参考文献

- [1] 鲍健强, 苗阳, 陈锋, 2008. 低碳经济: 人类经济发展方式的新变革[J]. 中国工业经济(4): 153-160.
- [2] 陈伟, 2005. 关于TOPSIS法应用中的逆序问题及消除的方法[J]. 运筹与管理, 14(5): 50-54.
- [3] 付巧峰, 2007. 一种修改的TOPSIS法[J]. 西北大学学报(自然科学版), 37(4): 531-533.
- [4] 谷建龙, 胡吉敏, 2013. 基于主成分-可变模糊分析的省区低碳经济评价体系探索[J]. 生态经济(2): 70-73.
- [5] 胡永宏, 2002. 对TOPSIS法用于综合评价的改进[J]. 数学的实践与认识, 32(4): 573-575.
- [6] 华小义, 谭景信, 2004. 基于“垂面”距离的TOPSIS法——正交投影法[J]. 系统工程理论与实践, 24(1): 114-119.
- [7] 黄鲁成, 刘春文, 吴菲菲, 等, 2019. 一种基于联系向量“垂面”距离的改进TOPSIS多属性决策方法[J]. 系统工程, 37(6): 119-129.
- [8] 李刚, 迟国泰, 程砚秋, 2011. 基于熵权TOPSIS法的人的全面发展评价模型及实证[J]. 系统工程学报(3): 400-407.
- [9] 李美娟, 袁宁, 陈磊, 2020. 基于投影法和夹角度量法的改进TOPSIS[J]. 系统科学与数学, 40(9): 1614-1627.
- [10] 李艳凯, 张俊容, 2008. TOPSIS法应用中的逆序问题[J]. 科技导报, 26(7): 47-49.
- [11] 刘峰, 梁睿昕, 2015. 基于改进TOPSIS的企业技术选择[J]. 技术经济, 34(2): 50-53.
- [12] 刘树林, 邱苑华, 1996. 多属性决策的TOPSIS夹角度量评价法[J]. 系统工程理论与实践, 16(7): 12-16.
- [13] 陆菊春, 韩国文, 2002. 企业技术创新能力评价的密切值法模型[J]. 科研管理, 23(1): 54-57.
- [14] 孟凡生, 邹韵, 2018. 基于SPA-TOPSIS方法的能源结构优化程度评价[J]. 运筹与管理, 27(11): 122-130.
- [15] 石宝峰, 迟国泰, 章穗, 2014. 基于矩阵距离时序赋权的科学技术评价模型及应用[J]. 运筹与管理, 23(1): 166-178.
- [16] 史学飞, 孙钰, 崔寅, 2018. 基于熵值-主成分分析法的天津市低碳经济发展水平评价[J]. 科技管理研究, 38(3): 247-252.
- [17] 田晴, 杜丽娟, 2017. 我国省域低碳经济发展评价及建议——基于因子分析法[J]. 华北理工大学学报(社会科学版), (1): 33-37.
- [18] 王斌, 李刚, 刘丽波, 等, 2017. 基于Gini修正G1组合赋权的低碳经济评价模型与实证[J]. 东北大学学报(自然科学版), 38(12): 1800-1804.
- [19] 王登瀛, 1989. 多目标决策方案优选的密切值法[J]. 系统工程, 7(1): 33-35, 71-72.
- [20] 王先甲, 汪磊, 2012. 基于马氏距离的改进型TOPSIS在供应商选择中的应用[J]. 控制与决策, 27(10): 1566-1570.
- [21] 王宗军, 潘文砚, 2012. 我国低碳经济综合评价-基于驱动力-压力-状态-影响-响应模型[J]. 技术经济, 31(12): 68-76.
- [22] 谢传胜, 徐欣, 侯文甜, 等, 2010. 城市低碳经济综合评价及发展路径分析[J]. 技术经济, 29(8): 29-32.

- [23] 徐小湛, 彭育威, 吴守宪, 2001. TOPSIS 偏序法[J]. 西南民族学院学报(自然科学版), 27(4): 398-401.
- [24] 徐泽水, 2001. 一种基于目标贴近度的多目标决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 21(9): 101-104.
- [25] 俞立平, 潘云涛, 武夷山, 2012. 修正 TOPSIS 及其在科技评价中的应用研究[J]. 情报杂志, 31(6): 103-107.
- [26] 郑林昌, 付加锋, 李江苏, 2011. 中国省域低碳经济发展水平及其空间过程评价[J]. 中国人口·资源与环境, 21(7): 80-85.
- [27] 郑少露, 吴仁海, 阮文刚, 2010. 基于低碳循环经济的规划环评指标体系的探讨[J]. 环境科学与技术, 33(6): 199-204.
- [28] 朱长征, 谷沛翔, 徐志刚, 2019. 基于熵权 TOPSIS 法的国内机场竞争力评价[J]. 北京交通大学学报, 43(2): 1240-130.
- [29] 朱卫东, 吴鹏, 2015. 引入 TOPSIS 方法的风险预警模型能提高模型的预警准确度吗? ——来自我国制造业上市公司的经验证据[J]. 中国管理科学(11): 96-104.
- [30] BUYUKOZKAN G, CIFCI G, 2011. A combined fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS based strategic analysis of electronic service quality in healthcare industry[J]. Expert Systems With Applications, 39(3): 2341-2354.
- [31] CHEN S Y, LU C C, 2015. Assessing the competitiveness of insurance corporations using fuzzy correlation analysis and improved fuzzy modified TOPSIS[J]. Expert Systems, 32(3): 392-404.
- [32] JIA J S, FAN Y, GUO X D, 2012. The low carbon development(LCD)levels' evaluation of the world's 47 countries(areas) by combining the FAHP with the TOPSIS method[J]. Expert Systems With Applications, 39(7): 6628-6640.
- [33] SANG J L, 2016. The comprehensive evaluation model of fuzzy mathematics based on third class cities' low carbon economy [J]. Chemical Engineering Transactions, 51: 13-18.
- [34] WANG Z X, WANG Y Y, 2014. Evaluation of the provincial competitiveness of the Chinese high-tech industry using an improved TOPSIS method[J]. Expert Systems with Applications, 41(6): 2824-2831.
- [35] ZHANG X Q, LIANG C, LIU H Q, 2007. Application of improved TOPSIS method based on coefficient of entropy to comprehensive evaluating water quality[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 39(10): 1670-1672.

Research on the Low-carbon Economy Evaluation Based on Osculating Value Improvement TOPSIS

Liu Xiaohui¹, Wang Bin¹, Chen Kai¹, Jiao Yang¹, Li Gang^{1,2}

(1. School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. School of Economics, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract: Low carbon economy is an inevitable choice to deal with climate change. How to evaluate the development level of low-carbon economy of a country comprehensively and objectively has become an urgent issue in the research of low-carbon economy. A low-carbon economy evaluation model was built by the modified TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution) method with the consideration of the development planning and goals of low-carbon economy. There are two shortcomings in traditional TOPSIS. First, the distance from the evaluated object to the "ideal solution" and to the "negative ideal solution" is added directly in the calculation of relative closeness, which is unreasonable to add the positive index and the negative index directly; second, the traditional TOPSIS method ignores the weight distribution problem of the two distances to the positive and negative ideal solution. The osculating value method was proposed to modify the combination problem of two distances to positive and negative ideal solutions in the traditional TOPSIS method. Firstly, the distance from the evaluated object to "ideal solution" and "negative ideal solution" was transformed into the same direction index through osculating value, which ensures that the two distances can be calculated. Secondly, normalized the two distances to ensure that they are in the same order of magnitude, and that the distance between the alternatives and the ideal solution is equivalent to the distance between the alternatives and the negative ideal solution. Then, according to the preference of the decision-maker, distributed the weight of the two normalized distances to ensure that the weight distribution of the two distances really reflects the will of the decision-maker. Finally, through the low-carbon economic evaluation of Qinhuangdao City, the feasibility and effectiveness of the modified TOPSIS evaluation model under the low-carbon economic evaluation were verified, and the problem of low-carbon economic evaluation with objective constraints was solved.

Keywords: TOPSIS; osculating value method; low-carbon evaluation