

基于熵权-TOPSIS法的低碳城市评价 ——以辽宁省为例

王飞飞¹, 徐露露¹, 王伟光²

¹辽宁大学环境学院, 辽宁 沈阳

²榆树市新庄镇综合服务中心, 吉林 榆树

收稿日期: 2023年12月6日; 录用日期: 2023年12月20日; 发布日期: 2024年1月29日

摘 要

低碳城市评价可以客观地评价城市低碳经济的发展水平, 也可以尽快地找到低碳经济发展过程的问题。本文以辽宁省为例建立了综合经济增长、社会进步、能源消耗和环境保护等的低碳水平评估指标体系, 并通过熵权-TOPSIS法评估我国辽宁省的低碳发展水平。研究结果表明: 按照王玲确定的划分标准, 辽宁省2013年属于低级阶段, 说明2013年低碳转型所表现出来的效果最差; 2014年~2017年属于初级阶段, 说明资源型城市的经济发展问题已经得到一定的解决; 2018年~2021年属于中级阶段, 说明经济发展状况良好, 经济发展与资源、环境的矛盾得到一定程度的缓和, 碳排放有所降低。整体来说, 资源型城市正在向着可持续的方向发展, 但城市经济尚未完全摆脱资源约束、环境问题依然存在。总体来说, 辽宁省在低碳转型的方面已经取得了阶段性的进展, 如今辽宁省城市环境已经得到较大改善, 工业整体结构呈现多层次、多元化的发展态势, 工业体系得到不断完善。但是, 低碳转型的过程是比较漫长的, 这就需要资源型城市积极探索有益于低碳发展的对策, 并在具体的实践中不断学习和总结。

关键词

熵权法, TOPSIS, 低碳城市评价, 辽宁省, 低碳城市评价体系

Low Carbon City Evaluation Based on Entropy Weight-TOPSIS Method —Taking Liaoning Province as an Example

Feifei Wang¹, Lulu Xu¹, Weiguang Wang²

¹College of Environment, Liaoning University, Shenyang Liaoning

²Yushu Xinzhuang Town Comprehensive Service Center, Yushu Jilin

Received: Dec. 6th, 2023; accepted: Dec. 20th, 2023; published: Jan. 29th, 2024

Abstract

Low carbon city evaluation can objectively evaluate the development level of urban low carbon economy, but also as soon as possible find the problems in the development process of low carbon economy. This paper takes Liaoning Province as an example to establish a comprehensive economic growth, social progress, energy consumption and environmental protection and other low carbon level evaluation index system, and evaluate the low-carbon development level of Liaoning Province in China through entropy weight-TOPSIS method. The results show that during the study period, the fit degree of economic development capacity increased from 0.352 in 2013 to 0.817 in 2021 except for 2020; the fit degree of social development capacity increased from 0.171 in 2013 to 0.921 in 2021; the fit degree of low-carbon energy consumption increased from 0.252 in 2013 to 0.866 in 2021 except for 2020; the environmental fit increased from 0.298 in 2013 to 0.695 in 2021. In general, the level of low-carbon development in Liaoning Province is generally on the rise. In general, Liaoning Province has made phased progress in the aspect of low-carbon transformation. However, the process of low-carbon transformation is relatively long, which requires resource-based cities to actively explore countermeasures conducive to low-carbon development, and continue to learn and summarize in specific practices.

Keywords

Entropy Weight Method, TOPSIS, Low-Carbon City Evaluation, Liaoning Province, Low Carbon City Evaluation System

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

低碳城市即通过低碳的发展理念重新锻造城市，既是人类针对“气候变化”这个全球性的环境问题进行的主动应对，它也很有效地教育和分享给全球各地的人。2003年，“低碳”的概念第一次在英国能源白皮书《我们能源的未来：创造一个低碳经济体》中明确地指出来，并对相关概念的研究进行了展开；我国政府也很重视低碳环保，从2008年就积极支持低碳城市的健康发展。因此，如何全面客观地评价低碳试点城市的建设水平，进而优化城市低碳建设过程中各子系统的结构配置，进一步提升低碳城市建设整体水平，已成为当今学术界研究讨论的热点问题。

2. 文献综述

本研究主要测定了低碳城市绩效评价的3个方面：

首先是研究评价体系关于低碳城市绩效方面的。杨艳芳等[1]以中国社科院颁布的评价低碳城市的标准体系的为基础，列出了关于环境保护、城市的规划、生产、支出等方面的低碳城市发展的评价体系，对2004年至2009年北京市低碳的综合水平进行了数量化评价。朱守先等[2]通过可持续发展的方面，提出资源、环境经济、社会、设施等5个指标来建立适合国情的低碳城市评价体系。李献士等[3]采用DPSIR模型建立了关于河北省低碳经济的评价体系，评价了2005年至2010年河北省的低碳城市的发展状况，并且得出结论：经济对环境的压力以及生态负荷在增加。武盈盈等[4]构造出了比较先进的理论模型，这个模型是关于能源效率的，利用这个模型估算了山东省2006年至2013年的部分工业面板数据。Su [5]等建立低碳城

市发展的评价体系，这个体系考虑了经济发展、社会进步、能源结构及其利用效率、生活消费和发展环境等因素。Jia 等[6]在评价模型之中加入了 TOPSIS 方法，以及在计算指标权重时利用了模糊层次分析。

二是低碳城市评价的影响因素。王爱兰[7]针对制约低碳城市的社会、制度、经济和能源等八类原因，共选取了二十二项指标，并对比和分析了成都、广州、深圳、北京、上海、天津与全国城市的平均水平。武静静等[8]将低碳城市体系当成一个具有许多相互交叉耦合关联的组元的非线性复杂体系加以考察研究，并以建成资源节约型、经济持续发展、环境友好、社会和谐型为总体目标，共选择了十八项指标体系，设置了最大信息熵模型来评价低碳城市的发展水平，计算了天津市 2007 年至 2011 年低碳发展水平的变化，并提出了相应的改进措施。Zhang 等[9]研究结果发现中国碳排放强度发生是受产业结构的影响。

3. 数据来源与研究方法

3.1. 数据来源

本文的数据主要来自于辽宁省统计年鉴(2013~2021)、中国统计年鉴(2013~2021)、国民经济和社会发展统计公报(2013~2021)、环境状况公报(2013~2021)，还有部分数据是采用相关公式计算得出。

3.2. 评价指标体系的构建

根据相关理论以及文献，本文将经济发展、社会进步、能源消耗及环境保护作为指标体系的四个准则层，并根据构建原则，选取了 16 个具体的指标，用以表示城市的低碳发展状况，得到低碳城市的评价指标体系如下表 1：

Table 1. Low carbon city evaluation system
表 1. 低碳城市评价体系

目标层	准则层	指标层	指标编号	指标性质	单位
低碳城市 发展水平	经济发展 能力	人均 GDP	E1	正向	元/人
		GDP 增长率%	E2	正向	%
		城镇居民人均可支配收入	E3	正向	元/人年
		农村居民人均纯收入	E4	正向	元/人年
		外商投资企业货物进出口总额	E5	正向	万美元
		第三产业占 GDP 比重	E6	正向	%
	社会发展 能力	民用汽车拥有量	E7	正向	万辆
		城市化率%	E8	正向	%
		城市居民消费水平	E9	正向	元/人年
		农村居民消费水平	E10	正向	元/人年
		城市燃气普及率	E11	正向	%
	低碳能耗	万元 GDP 能耗	E12	负	吨标准煤/万元
		单位工业增加值能耗	E13	负	吨标准煤/万元
		万元增加值电耗	E14	负	千瓦时/万元
		煤炭消费占能源消费比重	E15	负	%
	环境	工业废水排放达标量	E16	正	万 t
		工业固体废物综合利用率	E17	正	%
		工业 SO ₂ 排放量	E18	负	t
		工业烟尘排放量	E19	负	t
		森林覆盖率	E20	正向	%

3.3. 指标权重的确定

熵权法是依据指标变异程度的多少进而明确权重大小的方法。此方法可以保持了原始数据的特征，因此得到的权重很客观。计算步骤如下：

通过标准化处理原始数据后获得标准化矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ ； $i = 1, 2, \dots, m$ ； $j = 1, 2, \dots, n$ ，其中， r_{ij} 为第 i 个评价对象对应的第 j 个指标的标准化后的数值， m 表示研究对象的个数， n 为指标的数量。

计算第 i 个评价对象的第 j 个指标的标准化数值的比重 p_{ij} ：
$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}}$$

第 j 个指标的熵值的计算，如下：

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}$$

第 j 个指标的熵权的确定，如下：

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)}$$

3.4. 评价模型的构建

3.4.1. 改进的 TOPSIS 模型

TOPSIS 方法的基本机理：一、将每个指标计算出来的结果中取其中的最大值当作此指标的正理想解、取最小值当作该指标的负理想解；二、经过计量评价单元与正理想解以及负理想解的欧氏距离，进而可以根据优劣性的排序得到备选方案，这样就会得到了最优方案。传统的 TOPSIS 模型的缺点是每个评价指标权重是一样的，因此反映不了指标之间的相对紧要性。本文以传统的 TOPSIS 为基础，通过指标的紧要程度以及熵权法的计算，确定了相对权重的大小，因此选择改良后的 TOPSIS 模型对辽宁省低碳城市水平进行评价。具体步骤如下：

第 1 步：规范地处理数据。采用极值法处理数据标准化，指标类型包含三种：正向指标、对数据以及负向指标。正向指标的公式：
$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}$$

负向指标的公式：

$$r_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}$$

由于居中型指标不能通过上述的公式进行修订，应先明确适合该指标的居中值 a 后，采用以下公式：

$$X_{ij}^* = |X_{ij} - a|$$

从而把居中型的指标转换成负向指标后再处理，即：

$$r_{ij} = \frac{\max x_{ij}^* - x_{ij}^*}{\max x_{ij}^* - \min x_{ij}^*}$$

根据以上的公式进行计算，处理后的指标会有零值，令后面的公式没有意义，所以利用下面的公式调整：

$$r_{ij}^* = r_{ij} * 0.4 + 0.6$$

其中， x_{ij} 为第 i 个评价对象对应的第 j 各指标的具体数值， $\max x_{ij}$ 表示所有数值中的最大值， $\min x_{ij}$ 表

示所有数值中的最小值。进而得到标准化矩阵 R 。

3.4.2. 创建具有决策矩阵的规范化

通过矩阵 R 的每行指标乘以其相应的权重，得到加权后的规范化矩阵 $X_{ij} = x_{ij} \times w_j$ 。

3.4.3. 确定正理想解以及负理想解

依据加权后的规范化的矩阵 X ，得到关于每年每个指标的最小值和最大值，进一步得到正理想解以及负理想解，用 X^+ 和 X^- 分别进行表示，详见公式：

$$X^+ = \{\max x_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, 20\} = \{X_1^+, X_2^+, \dots, X_{120}^+\}$$
$$X^- = \{\min x_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, 20\} = \{X_1^-, X_2^-, \dots, X_{120}^-\}$$

3.4.4. 距离的计算

用 D^+ 表示不同年份的评价对象与正理想解之间的间隔， D^- 表示不同年份的评价对象与负理想解之间的间隔，计算公式如下：

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{20} (x_{ij} - X_j^+)^2} \quad (j = 1, 2, \dots, 9)$$
$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{20} (x_{ij} - X_j^-)^2} \quad (j = 1, 2, \dots, 9)$$

3.4.5. 计算各年评价对象与最优方案之间的贴近程度

贴近程度 N_j ：

$$N_j = \frac{D^-}{D^+ + D^-} \quad (j = 1, 2, \dots, 9)$$

N_j 的取值范围大于 0 且小于 1，代表第 j 个评价对象贴近正理想解的程度大小， N_j 代表的值越大，代表该评价对象离正理想解越贴近，那么计算出来的结果就越贴近最优的水平；反过来说： N_j 表示的数值越小，其代表结果离最优越远，结果越不好。

4. 结果与分析

4.1. 数据收集及计算

根据以上步骤计算出辽宁省的低碳城市评价指标值，见表 2~4。根据表 3 贴合度可知辽宁省的经济发展能力贴合度从 2013 年的 0.352 至 2021 年的 0.817，社会发展能力贴合度从 2013 年的 0.171 至 2021 年的 0.921，低碳能耗贴合度从 2013 年的 0.252 至 2021 年的 0.866，环境贴合度从 2013 年的 0.298 至 2021 年的 0.695。从整体上看：辽宁省的经济发展、社会进步、能源消耗及环境呈上升趋势。

Table 2. Standardized data
表 2. 标准化数据

年份	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
2013	0.600	1.000	0.600	0.600	0.856	0.600	0.600	0.600	0.600	0.600
2014	0.637	0.854	0.680	0.631	0.965	0.706	0.624	0.638	0.696	0.634
2015	0.648	0.712	0.727	0.671	0.745	0.829	0.671	0.701	0.736	0.692

续表

2016	0.659	0.600	0.767	0.708	0.666	0.962	0.727	0.752	0.868	0.750
2017	0.719	0.780	0.816	0.748	0.780	0.976	0.780	0.791	0.882	0.795
2018	0.803	0.849	0.869	0.790	1.000	0.979	0.835	0.840	0.924	0.831
2019	0.867	0.839	0.925	0.857	0.819	0.986	0.887	0.899	0.958	0.862
2020	0.879	0.605	0.939	0.919	0.600	1.000	0.944	0.958	0.862	0.877
2021	1.000	0.859	1.000	1.000	0.865	0.938	1.000	1.000	1.000	1.000
年份	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20
2013	0.800	0.600	0.904	0.600	0.600	0.920	0.831	0.600	0.783	0.600
2014	0.800	0.696	0.978	0.744	0.616	1.000	0.713	0.610	0.600	0.600
2015	0.600	0.625	1.000	0.933	0.800	0.951	0.600	0.637	0.657	0.600
2016	0.786	0.710	0.753	0.726	0.812	0.786	0.780	0.858	0.813	0.600
2017	0.643	0.801	0.830	0.829	0.875	0.745	0.748	0.911	0.855	0.600
2018	0.729	0.888	0.910	0.747	0.925	0.668	0.827	0.953	0.883	1.000
2019	0.800	0.873	0.872	0.845	0.937	0.624	0.857	0.972	0.905	1.000
2020	1.000	0.780	0.600	0.799	0.945	0.600	0.852	0.980	0.994	1.000
2021	0.914	1.000	0.856	1.000	1.000	0.608	1.000	1.000	1.000	1.000

Table 3. Index weight
表 3. 指标权重

指标	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
权重(最优解)	0.187	0.162	0.156	0.177	0.153	0.165	0.233	0.219	0.184	0.189
权重(最劣解)	0.112	0.097	0.094	0.106	0.092	0.099	0.140	0.131	0.110	0.113
指标	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20
权重(最优解)	0.175	0.278	0.207	0.213	0.303	0.200	0.095	0.212	0.136	0.356
权重(最劣解)	0.105	0.167	0.124	0.128	0.182	0.120	0.057	0.127	0.082	0.214

再次确定标准化加权决策矩阵及计算出正负理想解，从而得到各评价对象到正负理想解的距离以及相应的贴进度，结果见表 4。

Table 4. Positive and negative ideal solutions and schedule
表 4. 正负理想解及贴进度

	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
D^+	0.334	0.303	0.282	0.257	0.223	0.140	0.124	0.171	0.091
D^-	0.127	0.146	0.159	0.153	0.192	0.273	0.286	0.285	0.347
贴进度	0.275	0.325	0.360	0.373	0.462	0.661	0.697	0.624	0.792

4.2. 等级划分

依据王玲[10]确定的资源型城市低碳转型评价的五个等级。具体的划分标准见表 5。

Table 5. Classification of low-carbon transformation evaluation grade of resource cities
表 5. 资源型城市低碳转型评价等级的划分

等级	距离值	低碳转型的阶段
I	$C_i < 0.3$	低级阶段
II	$0.3 \leq C_i < 0.6$	初级阶段
III	$0.6 \leq C_i < 0.8$	中级阶段
IV	$0.8 \leq C_i < 0.9$	高级阶段
V	$0.9 \leq C_i < 1$	理想阶段

C_i 表示各评价对象与正理想解的接近程度。

1) 低级阶段

当资源型城市低碳转型的评价结果 $C_i < 0.3$ 时, 说明该城市低碳转型所表现出来的效果最差, 城市经济、社会、资源、生态环境等系统没有实现低碳发展, 能耗大、碳排放多。经济转型是资源型城市低碳转型的核心内容, 也是城市转型的基础, 只有在资源型城市经济充分发展的前提下, 才有能力进行社会的低碳发展和环境的优化治理。因此, 评价结果处于低级阶段时, 很大程度上显示了经济转型不成功, 资源型城市就应当在兼顾生态环境的前提下着重提升低碳经济发展的速度和质量。

2) 初级阶段

当评价结果 $0.3 \leq C_i < 0.6$ 时, 资源型城市低碳转型才进入到初级阶段, 这一时期, 资源型城市的经济发展问题已经得到一定的解决, 城市经济逐步恢复, 暂时避免了经济的衰竭, 但是经济发展与资源短缺、环境恶化的矛盾依然存在, 城市碳排放仍然很高, 可持续发展仍然是资源型城市面临的重大问题。

3) 中级阶段

当评价结果 $0.6 \leq C_i < 0.8$ 时, 资源型城市低碳转型进入到中级阶段, 此时, 城市经济发展状况良好, 经济发展与资源、环境的矛盾得到一定程度的缓和, 碳排放有所降低。整体来说, 资源型城市正在向着可持续的方向发展, 但城市经济尚未完全摆脱资源约束、环境问题依然存在。

4) 高级阶段

当评价结果 $0.8 \leq C_i < 0.9$ 时, 资源型城市低碳转型处于高级阶段, 这是资源型城市长期发展的结果。此时, 经过前期的发展和积累, 资源型城市经济、社会转型已经基本完成, 资源约束已经基本摆脱、环境问题得到较好的化解、能耗碳排放大幅降低、城市空间布局趋于合理, 可持续发展的形势日趋显现。即便如此, 资源型城市经济、社会等系统之间的衔接性和协调性仍有一定的改善空间。

5) 理想阶段

当评价结果 $0.9 \leq C_i < 1$ 时, 资源型城市低碳转型进入理想阶段, 经济、社会、资源、环境等系统协调发展, 能耗碳排放进一步降低, 城市发展基本上摆脱了原有主导资源的限制, 低碳化的接续产业成为经济发展的支柱, 资源型城市已经基本上实现了低碳城市的转型目标, 可持续发展问题彻底得到解决。但是, 由于城市发展处于不断的变化之中, 仍然需要采取一定的措施来保持低碳城市的良性、低碳、可持续发展。

4.3. 结果分析

按照王玲确定的划分标准, 可以得到辽宁省在 2013 年~2021 年的低碳建设水平所处的阶段, 见表 6。

Table 6. Low carbon construction horizontal stage partition result table
表 6. 低碳建设水平阶段划分结果表

	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
阶段	低级阶段	初级阶段	初级阶段	初级阶段	初级阶段	中级阶段	中级阶段	中级阶段	中级阶段

按照王玲确定的划分标准，辽宁省 2013 年属于低级阶段，说明 2013 年低碳转型所表现出来的效果最差；2014 年~2017 年属于初级阶段，说明资源型城市的经济发展问题已经得到一定的解决；2018 年~2021 年属于中级阶段，说明经济发展状况良好，经济发展与资源、环境的矛盾得到一定程度的缓和，碳排放有所降低。整体来说，资源型城市正在向着可持续的方向发展，但城市经济尚未完全摆脱资源约束、环境问题依然存在。

总体来说，辽宁省在低碳转型的方面已经取得了阶段性的进展，如今辽宁省城市环境已经得到较大改善，工业整体结构呈现多层次、多元化的发展态势，工业体系得到不断完善。但是，低碳转型的过程是比较漫长的，这就需要资源型城市积极探索有益于低碳发展的对策，并在具体的实践中不断学习和总结。

5. 对策与建议

根据辽宁省低碳转型的评价结果，提出政策建议如下：

- 1) 优化产业结构，使其低碳化。辽宁省应当进一步强化低碳工业化的作用，增加文化旅游业等的比重，逐步形成结构合理、竞争能力强的现代化产业体系。
- 2) 能源消费结构进行优化。不合理的用能结构是导致高碳排放的主要原因之一。在辽宁省能源消费结构中，传统能源占比依然很大。因此，辽宁省应努力提升传统能源的利用率，加快新能源的开发利用，逐步降低传统能源在能源消费总量中的比例，从而推动用能结构的优化进程，使能源消费结构更加符合低碳转型的要求。
- 3) 着重循环经济的发展。把煤炭深加工和绿色化利用作为转型重点，提高煤炭资源的综合利用率。

参考文献

[1] 杨艳芳, 李慧凤. 北京市低碳城市发展评价指标体系研究[J]. 科技管理研究, 2012(15): 88-90.

[2] 朱守先, 梁本凡. 中国城市低碳发展评价综合指标构建与应用[J]. 城市发展研究, 2012(9): 93-98.

[3] 李献士, 王殿茹. 基于 DPSIR 模型的河北省低碳经济发展评价研究[J]. 河北经贸大学学报, 2014, 35(2): 106-109.

[4] 武盈盈, 李燕. 山东省工业能源效率及其影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015(6): 114-120.

[5] Su, M.R., Chen, L., Chen, B., et al. (2012) Low-Carbon Development Patterns: Observations of Typical Chinese Cities. *Energies*, 5, 291-304. <https://doi.org/10.3390/en5020291>

[6] Jia, J.S., Fan, Y. and 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. *Expert Systems with Applications*, 39, 6628-6640. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.12.039>

[7] 王爱兰. 我国低碳城市建设水平及潜能比较[J]. 城市环境与城市生态, 2010(5): 14-17.

[8] 武静静, 柴立和. 低碳生态城市发展水平评价的新模型及应用: 以天津市为例[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1563-1570.

[9] Zhang, M., Mu, H.L. and Ning, Y.D. (2009) Accounting for Energy-Related CO₂ Emission in China: 1991-2006. *Energy Policy*, 37, 767-773. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.11.025>

[10] 王玲. 资源型城市低碳转型评价与对策研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2014.