

doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2025.06.014

矿业城市资源-环境-发展承载力耦合协调研究

——以鲁南地区为例

佟 帅¹, 秦嘉徽², 刘天龙³, 季 翔¹

(1.中国矿业大学力学与土木工程学院,江苏 徐州 221116)

(2.中国矿业大学环境与测绘学院,江苏 徐州 221116)

(3.中国矿业大学公共管理学院,江苏 徐州 221116)

[摘要] 矿业城市的综合承载力变化是一个复杂的多因素协同促进的结果,厘清矿业城市承载力内部的耦合协调特征对于促进城市转型发展具有重要意义.以往研究多从整体视角度量承载力变化,但对其内部组成的相互作用机理探究较少.因此本文构建了一个针对矿业城市资源-环境-发展承载力的耦合评价指标体系,试图通过 TOPSIS 模型分析 2012 到 2020 年鲁南矿业城市子系统承载力的耦合协调特征.结果表明:(1)2012—2020 年鲁南矿业城市综合承载力水平都呈稳步上升趋势,但大气排放状况与资源存量的数值变化会对综合承载力产生波动影响,成熟型矿业城市济宁的承载力高,提升速度更快;(2)三个子系统中,资源承载力与环境承载力相关性较高;(3)鲁南矿业城市的资源-环境-发展承载力都已从失调水平提升到协调水平;(4)耦合协调度提升过程中充满波折与挑战,特别是在发展初期资源枯竭和环境下降的双重影响下.研究为该地区矿业城市的产业转型升级和可持续发展提供借鉴,也可类似资源型城市在资源开发和环境保护中寻找平衡点提供科学依据.

[关键词] TOPSIS,矿业城市,承载力,耦合协调

[中图分类号] X821;TU993.2;TU985.12 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2025)06-0129-12

Research on the Coupling Coordination of Resource, Environment and Development Carrying Capacity of Mining City: a Case Study of Southern Shandong Province

Tong Shuai¹, Qin Jiahui², Liu Tianlong³, Ji Xiang¹

(1.School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

(2.School of Environment and Geomatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

(3.School of Public Administration, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The change of the comprehensive carrying capacity of mining cities is the result of complex multi-factor coordination. It is of great significance to clarify the coupling and coordination characteristics of the carrying capacity of mining cities to promote the urban transformation and development. Most of the previous studies measured the variation of carrying capacity from the perspective of the whole, but the interaction mechanism of its internal components was rarely explored. This paper constructed a coupling evaluation index system for resource-environment-development carrying capacity of mining cities, and attempted to analyze the coupling coordination characteristics of carrying capacity of various parts of mining city in southern Shandong province from 2012 to 2020 through TOPSIS model. The results showed that: (1) From 2012 to 2020, the comprehensive carrying capacity of mining cities in southern Shandong province showed a steady upward trend, but the numerical changes of atmospheric emissions and resource stocks would have a fluctuating effect on the comprehensive carrying capacity. Jining, a mature mining city, had a high carrying capacity and a faster rate of improvement; (2) Among the three subsystems, the correlation between resource carrying capacity and environmental carrying capacity was relatively high. (3) The resource-environment-development carrying capacity of the mining cities had

收稿日期:2021-11-09.

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0704900)、2024 年江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX24_2802).

通讯作者:季翔,博士,教授,博士生导师,研究方向:城乡生态环境与规划改造. E-mail:jixiang0615@Yeah.net

been improved from the imbalance level to the coordination level;(4)The process of improving the coupling coordination degree was full of twists and turns and challenges, especially under the dual influence of resource depletion and environmental decline in the early stage of development. The research provided reference for the industrial transformation and upgrading and sustainable development of mining cities in this region, and also provided a scientific basis for similar resource-based cities to find a balance between resource development and environmental protection.

Key words: TOPSIS, mining cities, carrying capacity, coupling coordination

工业文明时期产生以矿业城市为代表的城市文明,矿业城市向生态文明发展过渡时期,在资源环境承载力方面有着不同于非矿业城市的变化特征.我国现有矿业城市 244 个,其中地级市 125 个,约占全国总地级市的 42.6%,比例较高^[1].因此处理好矿业城市资源、环境、社会发展的的问题,对于提升综合承载力、促进城市可持续发展尤为重要.矿业城市是一种依托资源开发成长起来,以矿产资源开采加工为主导产业的特殊类型城市^[2].作为一种典型的资源型城市,它在发展过程中需要为自身和其他城市提供大量能源、资源,这个过程难以避免破坏环境^[3],从而造成承载力的下降.矿业城市常见的生态问题包括土壤污染、水体污染^[4]、空气污染、地下采空区^[5]、矿业废弃地、地表破坏等方面.这些问题甚至可能进一步导致严重的社会经济问题,因为随着矿产资源的枯竭,城市主导产业衰退、收入降低、人口外流、基建停滞会进一步加速矿业城市的消亡^[6].

综合承载力是指一定时间及区域范围内,在不影响自然资源合理开发和生态环境保护的前提下,资源、环境和社会发展系统所能承受的经济活动的最大规模^[7].Park 等^[8]最早在生态学领域提出了承载力的概念,用来研究地区所能正常供养目标物种的最大数量,之后 Allan^[9]在关于非洲经济的研究中首次提到了土地承载力的概念.后来关于承载力的研究逐步渗透到经济、环境、社会等领域^[10].其主要研究方法目前有层次分析法^[11]、系统动力学模型^[12]、模糊数学法^[13]、综合指数法^[14]、熵权 Topsis 模型法^[15-16]等.其中熵权 Topsis 模型法结合了熵权法能够客观赋权以及 Topsis 法能够有效地排序并评估各对象优劣的优势,能够提升决策的准确性、客观性和科学性,因此特别适用于复杂的系统评价问题.相关研究既有对资源环境承载力的评估和监测,又有对承载力评估框架^[17]的拓展和改进.这些研究在提高人们对资源环境承载力问题的认识,推动环境保护和可持续发展方面具有重要意义.从区域范围来看综合承载力研究有着从大到小的趋势,即国家^[18]、地区^[19-20]、城市^[21-22]、景区^[23]、岛屿^[24]等,研究范围越来越细致,内容越来越丰富.但是在矿业城市领域,目前仍在探究单个矿业城市承载力变化^[7],从矿产资源集中区域的角度对城市承载力的研究还相对较少.而且当前研究多着眼于整体承载力^[10],对矿业城市承载力子系统内部变化关系及相互作用规律揭示尚不充分.因此有必要加强煤炭集中区域城市的综合承载力变化规律以及内部系统即资源-环境-发展承载力耦合协调规律的研究.

本文对鲁南矿业资源集中区域的三个城市(临沂、枣庄、济宁)2012—2020 年的资源、环境、发展三个子系统的相关数据进行分析研究,全面考量其综合承载力的时空变化特征,并对子系统进行耦合协调研究.从而揭示矿产资源集中区域城市综合承载力动态变化的规律并分析出变化的主导因素.这些研究可以为鲁南矿业城市生态经济转型、矿业城市资源开发、环境保护以及可持续发展方面提供针对性策略,同时也可以为同类型矿业城市的转型发展提供参考依据.

1 区域与特征

1.1 矿业城市特征

矿业城市主导产业是矿产资源开发及相关加工产业,其经济结构单一性较强,资源依赖程度较高,所以发展模式往往面临资源消耗和环境压力的双重挑战.这类城市由于矿业活动导致的环境污染和资源枯竭问题较为严重,因而转型难度较大,社会发展也随着资源开发进入衰退期而出现问题,失业率和稳定问题可能加剧.根据 2013 年中国国务院的通知分类,矿业资源型城市分为成长型、成熟型、衰退型和再生型四种类型.成长型城市通常资源尚未枯竭,经济依赖资源开采,发展迅速;成熟型城市资源开发达到顶峰,经济相对稳定但依赖传统产业;衰退型城市资源枯竭,经济下滑,失业严重,人口流失;再生型城市一般是通过产业转型、创新和可持续发展努力恢复经济活力,逐渐走向复兴.其中临沂、枣庄、济宁分别属于

再生、衰退和成熟型.

1.2 研究区域介绍

鲁南位于华东、华北交接地区,它北启齐鲁、南承江淮、东连黄海、西接中原,战略位置非常重要.从全国的矿业城市中来看,鲁南也是全国最重要的煤炭基地之一^[25](如图1).该片区矿业开发历史悠久,历史积累问题较多,区域内集合了再生型、衰退型以及成熟型的资源城市,极具典型性与代表性.因此鲁南地区矿业城市承载力研究及其生态化转型对于其他矿业城市具有极强的借鉴作用.该区域三个城市在发展过程中承担着能源供给的角色,各具特点.临沂矿产资源丰富,经济结构相对多元化,物流和电商产业发展突出,转型基础较好,已经实现了转型发展;枣庄曾以煤炭经济为支柱,现通过发展文化旅游和新能源产业应对资源枯竭问题,但阻力依旧较大;济宁以煤炭开采和能源化工为核心,近年来依托运河文化和高端制造业,加速产业多元化转型,城市经济结构逐渐趋于成熟.

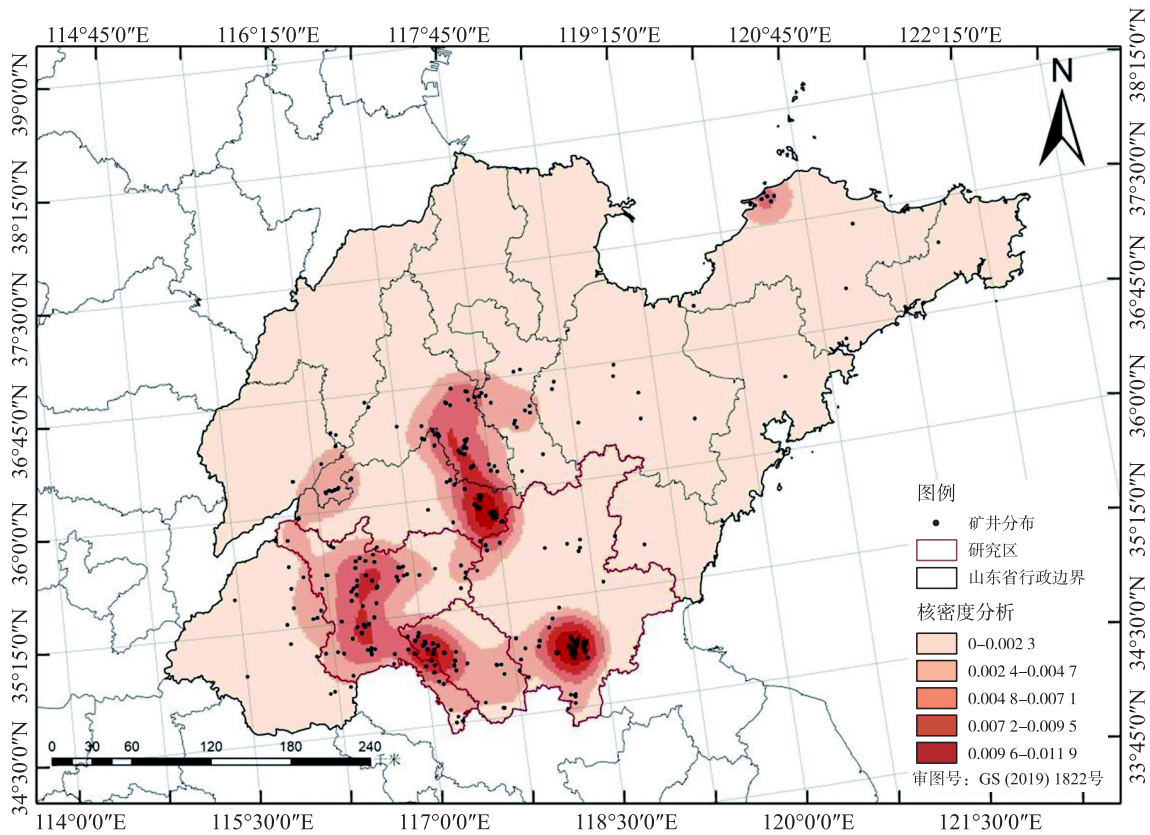


图1 山东省矿井分布图

Fig. 1 Distribution map of mines in Shandong Province

2 研究方法

2.1 指标体系构建

近年来,许多学者就资源环境承载力评价指标体系的构建进行了相关研究,如 Graymore 等^[26]就将资源环境承载力分为资源、生态和社会发展三个子系统来研究,封志明等^[27]认为承载力的概念是从种群承载力、资源承载力、环境承载力、生态承载力一步步演化发展过来的,焦露等^[28]认为资源、环境、经济三个方面更能反映资源环境系统所能承受人类各种社会经济活动的的能力.基于这些学者在资源环境承载力方面的研究方法以及矿业城市的资源类型与产业特征,本文将综合承载力分为资源承载力(RCC)、环境承载力(ECC)和发展承载力(DCC)3个子系统作为一级指标.又从资源种类和利用效率角度选取了水、耕地、矿产、利用效率4个二级指标;从生态环境类别的角度选取绿地、水、大气、土壤环境4个二级指标;从城市发展角度选取GDP状况、经济收入、居住能力、教育水平、交通能力、医疗卫生6个二级指标.最终总共选取了3个一级指标,14个二级指标,28个三级指标(如表1).

表 1 城市资源-环境-发展承载力耦合评价指标体系表
Table 1 Coupled evaluation index system of RCC,ECC and DCC

一级指标	二级指标	三级指标	承载力效益(+/-)	指标参考来源
资源承载力	水资源	人均水资源量/t	+	王西琴等 ^[29]
		年用水量/亿 t	-	Chen 等 ^[30]
	耕地资源	人均播种面积/km ²	+	Zhang 等 ^[31]
		耕地面积/km ²	+	Liao 等 ^[32] 、Hsu 等 ^[33]
		煤矿储量/万 t	+	鲍珂宇 ^[34]
	矿产资源	铁矿储量/万 t	+	苏丹等 ^[35]
		煤炭开采量/万 t	-	安琪儿等 ^[36] 、郑欣等 ^[7]
	资源利用效率	原煤消耗量/万 t	-	鲍珂宇 ^[34]
		万元 GDP 耗煤/t	-	郑欣等 ^[7] 、陈丹等 ^[37]
		万元 GDP 耗水/t	-	李昭楠等 ^[38] 、孟菲等 ^[39]
环境承载力	绿地环境	建成区绿地率/%	+	Xiao 等 ^[40]
		人均面积/m ²	+	陈丹等 ^[37]
	水环境	污水排放量/t	+	王西琴等 ^[29]
		污水处理率/%	+	Liao 等 ^[32]
	大气环境	工业 SO ₂ 排放量/万 t	-	韩家彬等 ^[41]
		工业烟(粉)尘处理率/%	-	鲍珂宇 ^[34]
	土壤环境	工业固体废物产生量/万 t	-	Wang 等 ^[42]
		工业固体废物处理率/%	+	Tan 等 ^[43]
发展承载力	居住能力	城镇人均住房面积/m ²	+	陈丹等 ^[37]
		乡村人均住房面积/m ²	+	陈丹等 ^[37]
	交通能力	路网面积/m ²	+	Tan 等 ^[43]
	教育水平	高等教育在校生人数/万人	+	金悦等 ^[44]
		恩格尔系数/%	+	金悦等 ^[44]
	收入消费	城镇人均可支配收入/万元	+	韩家彬等 ^[41]
		城市 GDP 总量/亿元	+	Wang 等 ^[42]
	GDP 状况	人均 GDP/万元	+	韩家彬等 ^[41]
		万人拥有医生数量/个	+	鲍珂宇 ^[34]
	医疗卫生	卫生机构数/个	+	郑欣等 ^[7]

2.2 指标特征阐释

从资源承载力角度来看,矿业城市的资源消耗和依赖性是其经济发展的基础。煤矿储量、铁矿储量、煤炭开采量、原煤消耗量等指标能够反映城市在资源开采方面的基础状况,有助于评估城市的资源消耗量。而万元 GDP 耗煤和耗水的指标,则可揭示城市在经济增长过程中资源的使用效率,帮助判断城市可持续发展特征。其次,环境承载力指标关注的是矿业城市在资源开采和工业化过程中所面临的环境压力。因此污水排放量、工业 SO₂ 排放量、工业固体废物产生量等指标能够反映出城市在污染物排放方面的现状和环境治理的力度,而污水处理率、工业烟尘处理率和工业固体废物处理率等指标,则有助于评估城市在治理污染、提升环境质量方面的能力,进而衡量其在可持续发展中的环境承载力。最后,从社会发展承载力角度选取的指标能够有效反映城市的经济发展水平、居民生活质量和社会福利。城镇人均可支配收入、人均 GDP 和城市 GDP 总量等经济指标,能够反映矿业城市在转型过程中经济增长的水平及收入分配情况;而恩格尔系数则提供了一个衡量居民生活质量的重要视角,揭示了家庭收入与基本生活需求之间的关系,能够反映矿业城市的社会福利水平。此外,高等教育在校生人数等指标则反映了矿业城市在人才培养和创新能力方面的投入,是支撑其经济多元化与绿色发展的关键。这些指标从资源、环境和社会三个维度进行了综合考量,既能全面反映矿业城市的资源依赖性和环境压力,又能够揭示其在转型过程中的社会发展潜力,具有较强针对性。这一指标体系为评估鲁南矿业城市的可持续发展提供相对科学的分析框架。本文研究中所用的数据来自临沂、济宁、枣庄市的统计年鉴、山东省统计年鉴以及中国经济社会大数据研究平台和中国城市建设统计年鉴。

2.3 熵权 TOPSIS 计算过程

面对数据的无序性、信息量大等特点,本文采用熵权 TOPSIS 模型对鲁南地区矿业城市综合承载力进行评价。熵值法赋权能有效地避免定量分析中主观性过强的缺点^[45],TOPSIS 算法最大的优点是通过逐步

寻找距离最优解最近的解决方案.改进后的熵权 TOPSIS 模型计算过程简单,能相对客观、科学、准确地反映出真实权重,能更有效地帮助选择最优解^[46].本文首先采用熵值法确定各个矿业城市的综合承载力的指标权重,然后针对某一指标取三个矿业城市的权重均值当做最终权重.最后构建加权矩阵,运用 TOPSIS 模型对鲁南地区矿业城市承载力进行分析.

计算首先要确定目标序列.由 2012—2020 年的 28 个承载力分析指标构建原始数据矩阵,因为数据量纲不同,在此需要对原始数据矩阵进行标准化处理.因为数据的波动性太大,这里对标准化结果采用取根号的方法进行处理.

正向指标

$$x_{ij} = 0.6 + 0.4 \sqrt{\frac{X_{ij} - \min(X_{ij})}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})}}, \quad (1)$$

负向指标

$$x_{ij} = 0.6 + 0.4 \sqrt{\frac{\max(X_{ij}) - X_{ij}}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})}}, \quad (2)$$

式中, X_{ij} 为第 i 个指标第 j 年的初始值; x_{ij} 为第 i 个指标第 j 年的标准化后数值; i 为评价指标数, $i = 1, 2, \dots, m$; j 为评价年份数, $j = 1, 2, \dots, n$. 经公式计算后得到标准化矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

接着采用熵值法计算权重,熵值法能有效兼顾评价指标的变异程度,客观反映其重要性,熵权计算公式为:

$$w_i = \frac{1 - e_i}{m - \sum_{i=1}^m e_i}, \quad (4)$$

式中, w_i 为承载力指标权重; e_i 为信息熵. 熵值越低系统越有序,熵值越高系统越混乱或者越分散. e_i 的计算公式如下:

$$e_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}, \quad (5)$$

式中, $f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}}$, 如果 $f_{ij} = 0$, 则 $\lim_{f_{ij} \rightarrow 0} f_{ij} \ln f_{ij} = 0$.

为了增加矩阵客观性,本文根据之前确定的权重 w_j 创建规范化承载力分析矩阵 Y :

$$Y = |y_{ij}|_{m \times n} = |w_j \times x_{ij}|_{m \times n}. \quad (6)$$

接下来需要确定正负理想解,正理想解 Y^+ 是承载力分析各指标的最优解,为评价数据中第 i 个指标在 j 年内的最大值;负理想解 Y^- 是承载力分析各指标的最劣解,为评价数据中第 i 个指标在 j 年内的最小值. 具体计算公式为:

$$Y^+ = \max \{y_{ij}\}, \quad (7)$$

$$Y^- = \min \{y_{ij}\}. \quad (8)$$

本文选用欧氏距离计算矿业城市资源环境承载力各指标到正负理想解的距离. 令 D_j^+ 表示第 i 个指标和 y_i^+ 的距离, D_j^- 表示第 i 个指标和 y_i^- 的距离. 具体计算公式为:

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i^+ - y_{ij})^2}, \quad (9)$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i^- - y_{ij})^2}. \quad (10)$$

在确定到理想解的距离之后,可以计算承载力数值,其综合评价指数计算公式如下所示:

$$C_j = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-}, \tag{11}$$

式中, C_j 为第 j 年城市资源环境承载力综合评价指数, 取值范围为 $[0, 1]$. 当 $C_j = 0$ 时, 表明该区域资源环境承载力最低; 当 $C_j = 1$ 时, 表明该区域资源环境承载力最优.

2.4 耦合协调计算

本研究借助物理学上的耦合原理, 对 2012—2020 年鲁南矿业城市资源-环境-发展承载力的数值进行耦合协调计算. 具体构建资源承载力、环境承载力和发展承载力的耦合协调模型, 以定量方式测度三者间的耦合效应. 计算公式如下:

$$C = \frac{\sqrt[3]{R * E * D}}{\sqrt{\left(\frac{R+E+D}{3}\right)^3}} = \frac{\sqrt[3]{R * E * D}}{R+E+D}, \tag{12}$$

式中, C 代表资源-环境-发展承载力的耦合度, 取值范围为 $[0, 1]$, C 取值越大说明三者之间的相互作用、相互影响程度越强. R 代表资源承载力水平; E 代表环境承载力水平; D 代表发展承载力水平. 由于耦合度只能反映三者的相互作用程度, 并不能表征各耦合状态之间的协调程度, 因此需要进一步引入耦合协调度来分析三者的协调状况. 计算公式可简化^[47]如下:

$$X = \sqrt{C * T} = \sqrt[6]{R * E * D}, T = \alpha U + \beta R + \gamma E, \tag{13}$$

式中, X 为协调度, C 为耦合度, T 为综合评价指数, 即资源承载力、环境承载力和发展承载力的综合评价指数. α, β, γ 为待定系数, 并且根据本文实际, 将三者重要性并列, 待定系数均取值为 $1/3$, 同时参考相关文献^[48], 将耦合度和协调度分为若干级.

3 研究结果与讨论

3.1 权重结果与原因剖析

根据熵权法结果可知, 所有一级指标里环境对综合承载力影响程度最明显(如表 2), 其权重达到 0.471; 其次是资源, 其权重达到 0.362; 影响程度最小的是发展, 其权重为 0.167. 在二级指标里, 重要性由大到小的指标分别是大气环境、水资源、矿产资源和资源利用效率, 其指标权重分别是 0.434、0.145、0.125 和 0.079. 在三级指标里, 对资源环境承载力水平影响最大的是工业 SO_2 排放量, 指标权重达到 0.256; 其次是工业烟(粉)尘排放量(权重 0.178), 接着是水资源总量(0.121)、铁矿储量(0.067)、万元 GDP 耗水(0.046)、煤炭开采量(0.046). SO_2 排放量、工业烟(粉)尘排放量指标权重重大是因为矿业城市的生产关系中存在环境破坏的基础性问题, 随着环保意识增强、产业调整 and 环境保护, 这两项指标数值从 2012 年到 2020 年间变化剧烈, 数值离散程度高最终导致权重最高. 水资源直接关系到人类的生存发展, 因此权重也较高. 铁矿储量是矿业城市的重要指标之一, 它反映了基础资源的承载力水平. 铁矿既会因为资源开发储量逐渐变少, 也会因为找矿水平进步储量变大, 数据波动性会导致权重占比较大. 万元 GDP 耗水反映了一个城市自然资源的有效利用水平, 煤炭开采量能够反映矿业城市资源开发的程度. 从数值和权重来看, 这三个城市逐步实现了资源集约利用和城市建设快速发展. 因为煤炭开采量和消耗量稳步下降, 人均住房面积和绿地率迅速提高.

表 2 指标权重表

Table 2 Indicator weight table

一级指标	二级指标	三级指标	作用效益	济宁	枣庄	临沂	平均	
资源承载力 36.2%	水资源 14.5%	水资源总量	+	8.97%	9.83%	17.39%	12.06%	
		年用水量	-	0.16%	4.79%	2.50%	2.48%	
	耕地资源 1.3%	农业播种面积	+	0.02%	2.80%	0.12%	0.98%	
		耕地面积	+	0.18%	0.00%	0.65%	0.28%	
	矿产资源 12.5%	煤矿储量	+	0.80%	0.03%	0.10%	0.31%	
		铁矿储量	+	10.92%	6.05%	3.12%	6.70%	
	资源利用效率 7.9%	煤炭开采量	煤炭开采量	-	0.36%	4.53%	8.80%	4.56%
			原煤消耗量	-	0.50%	1.41%	0.88%	0.93%
		万元 GDP 耗煤	-	1.52%	4.08%	4.42%	3.34%	
			万元 GDP 耗水	-	1.45%	5.80%	6.55%	4.60%

续表 2

Table 2 Continued

一级指标	二级指标	三级指标	作用效益	济宁	枣庄	临沂	平均
环境承载力 47.1%	绿地环境	建成区绿地率	+	0.09%	0.31%	0.01%	0.14%
	2.1%	公园面积	+	3.74%	1.41%	0.57%	1.91%
	水环境	河流水质达标率	+	0.02%	0.04%	0.00%	0.02%
	0.05%	污水处理率	+	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%
	大气环境	工业 SO ₂ 排放量	-	33.87%	26.87%	15.96%	25.57%
	43.4%	工业烟(粉)尘排放量	-	23.79%	13.70%	16.03%	17.84%
	土壤环境	工业固体废物产生量	-	0.72%	0.49%	3.36%	1.52%
发展承载力 16.7%	1.6%	工业固体废物处理率	+	0.08%	0.00%	0.13%	0.07%
	居住能力	城镇人均住房面积	+	2.03%	5.85%	1.85%	3.24%
	4.55%	乡村人均住房面积	+	0.25%	2.68%	1.01%	1.31%
	交通能力 0.3%	公路里程	+	0.22%	0.22%	0.46%	0.30%
	教育水平 3.9%	高等教育在校生人数	+	5.21%	2.57%	4.06%	3.95%
	收入消费	地方财政收入	+	1.55%	1.16%	3.68%	2.13%
	3.6%	城镇人均可支配收入	+	1.37%	1.04%	2.02%	1.48%
	GDP 状况	城市 GDP 总量	+	0.65%	1.31%	2.16%	1.37%
	2.8%	人均 GDP	+	0.79%	1.70%	1.80%	1.43%
	医疗卫生	综合性医院数量	+	0.70%	1.03%	0.76%	0.83%
	1.5%	卫生机构数	+	0.03%	0.27%	1.60%	0.63%

3.2 鲁南矿业城市综合承载力变化分析

鲁南地区资源环境承载力研究结果表明 2012 年到 2020 年鲁南地区矿业城市的资源环境承载力整体呈上升趋势(如图 2),从 2012 年的 2.128 迅速提升到 2020 年的 2.959。主要原因是 2012 年鲁南矿业城市主导产业造成的环境污染问题比较突出,特别是工业废气、废水、废物排量较高导致了当年资源环境承载力普遍偏低。2012 年之后,城市加快转型发展,加大了环境保护的力度,同时也减少了矿产资源的开发,因此综合承载力水平迅速提高。其中 2012 到 2014 年资源环境承载力处于波动状态,水平先提高后降低;而 2014 到 2020 年之间,环境承载力提升较快。三个城市中提升速度最快的是济宁市,八年间升高了 50.15%;水平提升最慢的是临沂市,八年间升高了 27.42%。临沂市的资源环境承载力从 2012 年的 0.773 提升到 2020 年 0.985,整个过程先降低后提高,即:2012—2014 年逐年下降,下降比率为 6.34%,2014—2020 年又逐年提高,整体提升了 36.05%。枣庄市的资源环境承载力从 2012 年的 0.698 上升到 2020 年的 0.990,整体承载力处于波动上升状

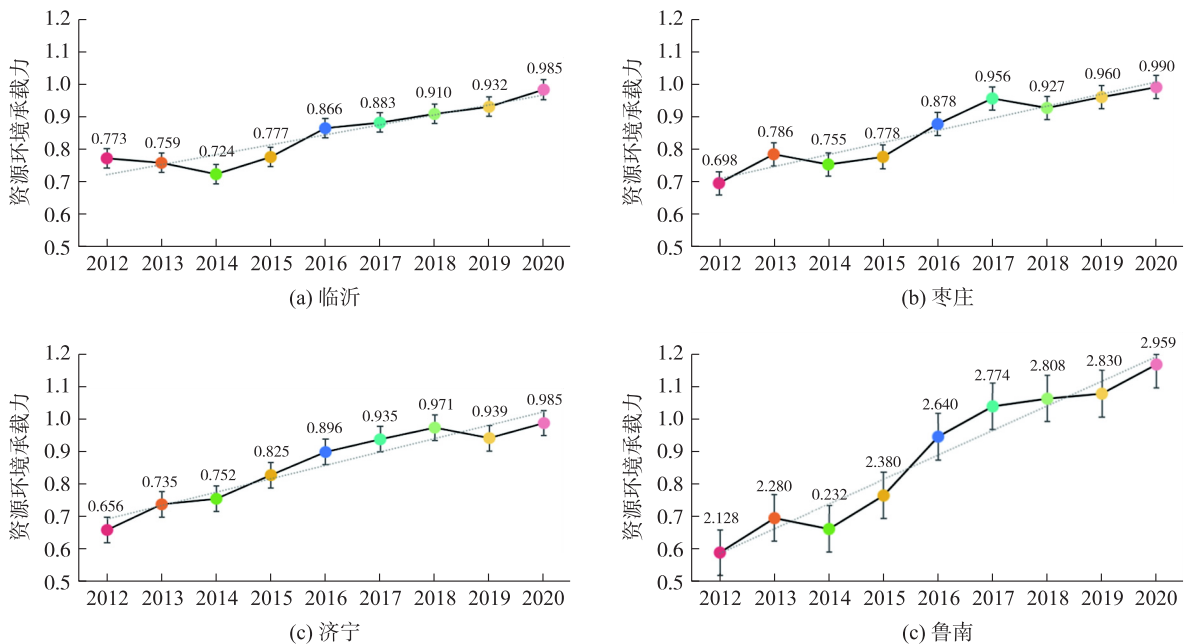


图 2 各个城市综合承载力变化图

Fig. 2 The comprehensive carrying capacity change chart of each city

态.波动的主要原因在于 2014 和 2015 年工业二氧化硫和烟尘排放量不降反升,导致综合承载力比趋势线低;而 2017 年的水资源总量增加,且用水量相对减少,造成承载力远高于趋势线水平.济宁市的资源环境承载力从 2012 年的 0.656 提升到 2020 年 0.985,水平提升较为平稳,但是 2012—2018 年属于匀速上升期,2018—2020 年之间出现了轻微的波动上升.济宁综合环境承载力的起点较低,但提升速度迅猛,到 2020 年承载力已逐渐赶上其他城市水平.

研究证明矿业城市的承载力普遍经历了波动提升的过程,特别是枣庄、临沂市较为明显.这种现象的主要原因是 2014 年前后的采矿活动和城市生产活动较为激烈,造成生态环境承载力下降.之后城市建设强度逐渐降低,城市生态转型加快,承载力开始处于稳步提升状态.这个过程中,作为衰退型城市代表的枣庄市明显波动程度最为激烈,发展过程充满波折.

3.3 子系统资源环境承载力变化特征与机理分析

子系统承载力分为资源承载力(RCC)、环境承载力(ECC)和发展承载力(DCC).八年之间三个子系统承载力分别从 2012 年的 0.795、1.033 和 0.300 提升到了 2020 年的 0.977、1.369 和 0.485,整体分别提升了 22.89%、32.53%和 61.67%,其中 DCC 提升速度最快,RCC 提升速度最慢(如图 3).由于资源的有限性和不可再生性,RCC 提升速度相对较慢,这也反映出矿业城市综合承载力的提高某种程度上是通过消耗自然资源而实现的.图 3 显示 RCC 整体呈现稳步上升趋势,这是由于自然资源增加值大于消耗值.从 ECC 的数据来看,所有城市都实现了生态环境的改善,ECC 改善过程存在明显波动上升的状态.从 DCC 数值来看,无论是鲁南矿业城市整体还是单个城市,发展承载力都得到了有效的提升.

根据 2012—2020 年鲁南地区三个子系统数值的相关性分析来看(如表 3 所示),三者相关性较强.RCC 与 ECC、RCC 与 DCC 以及 ECC 与 DCC 的相关系数分别为 0.973,0.924 和 0.905,显著性水平小于 0.01.说明三者呈显著正相关.从变化可以看出,资源承载力(RCC)的提升与环境承载力(ECC)的改善关系最紧密,三个子系统增长变化轨迹大体上一致.但因为资源的有限性、不可再生性以及存量资源的波动性,RCC 与 DCC 关系相对 RCC 与 ECC 关系较弱,这反映该地区资源的集约化利用对环保减排作用较大.济宁、枣庄、临沂市的三个子系统也都具有较强的正相关关系,这表明矿业城市各子系统之间存在着强相关性的普遍现象.相关性分析亦说明矿业城市是通过对一定自然资源的消耗,才实现社会经济和生态环境的改善,最终呈现出 RCC、ECC 波动提升和 DCC 稳步提升的效果(如图 3).

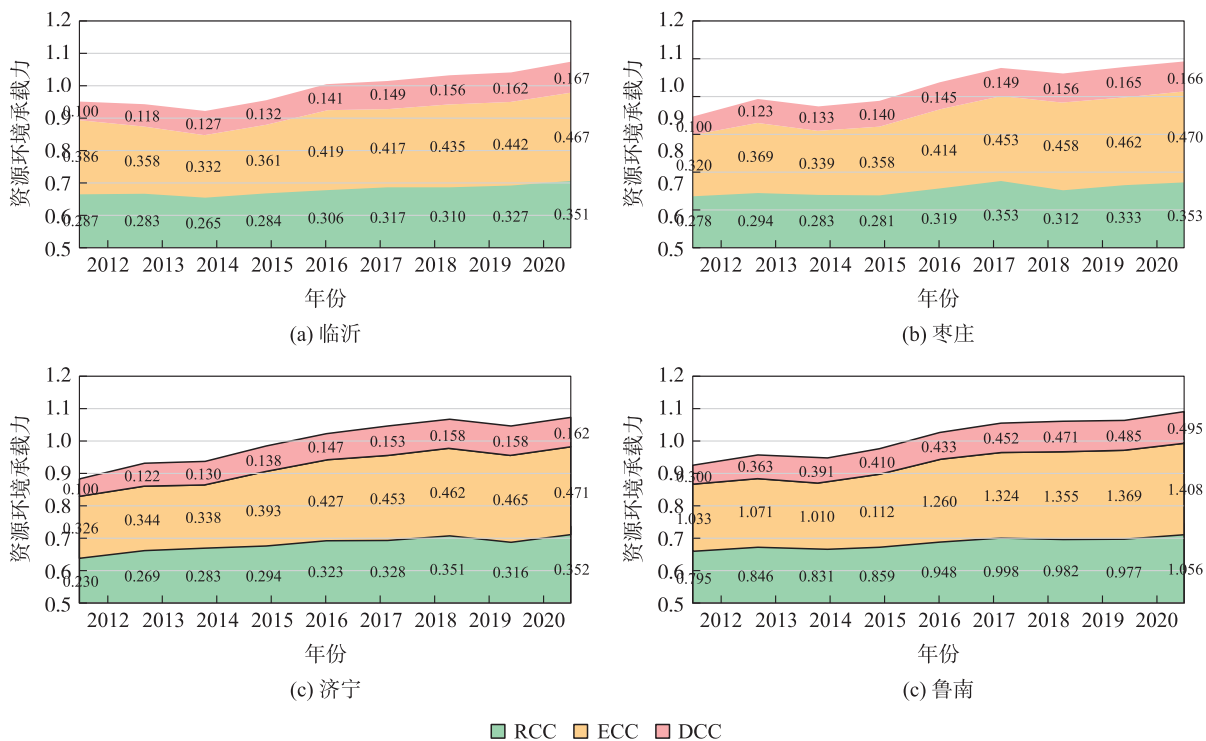


图 3 各个城市承载力子系统变化图

Fig. 3 The changes of carrying capacity subsystems in each city

表 3 子系统承载力相关性数据表
Table 3 Subsystem carrying capacity correlation data table

承载力类型	济宁市			枣庄市			临沂市			鲁南地区			
	RCC	ECC	DCC	RCC	ECC	DCC	RCC	ECC	DCC	RCC	ECC	DCC	
RCC	相关系数 P 值	1		1			1			1			
ECC	相关系数 P 值	0.922** 0	1	0.910** 0.001	1		0.975** 0	1		0.973** 0	1		
DCC	相关系数 P 值	0.971** 0	0.944** 0	1	0.769* 0.015	0.897** 0.001	1	0.836** 0.005	0.778* 0.014	1	0.924** 0	0.905** 0.001	1

注: $P < 0.05$ 代表相关性显著; $P < 0.01$ 代表相关性高度显著.

3.4 耦合协调特征

根据耦合协调度 D 值[0.0~1.0], 可以将其等划分为 10 个区间, 协调等级为 1-10, 分别对应极度失调(0-0.1)、严重失调(0.1-0.2)、重度失调(0.2-0.3)、轻度失调(0.3-0.4)、濒临失调(0.4-0.5)、勉强协调(0.5-0.6)、初级协调(0.6-0.7)、中级协调(0.7-0.8)、良好协调(0.8-0.9)、优质协调(0.9-1.0). 临沂市的耦合协调度整体符合对数函数的上升线性关系(如图 4), 但是 2014 年耦合协调度出现明显下降. 原因是临沂市 2014 年资源承载力和环境承载力出现双重下降, 而发展承载力依旧提升, 导致耦合协调度出现严重失调. 随后几年中临沂市加强了对传统产业的淘汰和升级, 尤其是在节能减排、污染治理方面取得了显著进展. 通过产业结构调整和城市转型发展, 临沂市的耦合协调度逐步回升, 并最终在 2020 年达到了优质协调的水平. 这一变化反映了临沂市在资源和环境承载力下降的初期面临了巨大挑战, 长期以来的矿业资源开采和工业化进程对环境造成了巨大的压力, 尤其是水资源的短缺和煤炭开采造成的环境污染会对耦合协调度造成严重影响.

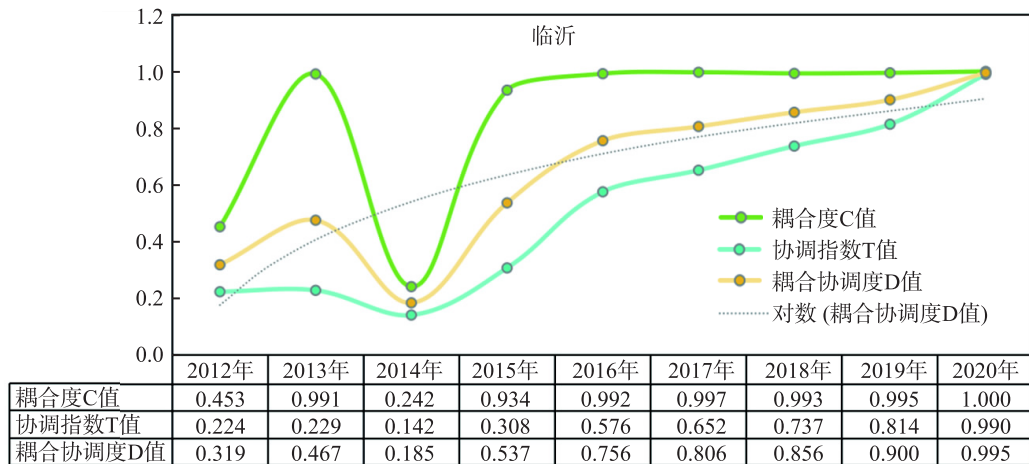


图 4 临沂市资源-环境-发展承载力耦合协调变化图

Fig. 4 The coupled and coordinated changes of resource-environment-development carrying capacity in Linyi City

枣庄市的耦合协调度(如图 5)呈现波动性提升的特征, 但依旧大致符合对数函数的线性关系. 波动最为严重的时期出现在 2013—2016 年之间. 数值从 2013 年勉强协调(0.542), 到 2014 和 2015 年的濒临失调(0.414 和 0.444), 最后到 2016 年的中级协调(0.783). 波动特征反映了枣庄转型的过程较为曲折, 背后深刻反映了该衰退型资源枯竭城市面临的资源减少与环境治理的巨大压力. 作为一个以煤炭、钢铁和机械制造为主的矿业城市, 枣庄在过去的几十年里, 过度依赖资源型产业, 导致资源消耗过大, 环境承载力水平低. 因此在 2014 年, 随着煤炭和钢铁产能过剩、资源枯竭, 城市的资源和生态承载力出现了明显的下降. 虽然城市发展承载力仍有提升, 但耦合协调性不可避免出现下降. 2017 年后, 枣庄市加大了经济结构调整的力度, 特别是通过推进产业多元化发展和绿色低碳技术的应用, 有效缓解了资源、生态与发展之间的矛盾, 最终使得耦合协调度逐步提升并稳定在较高水平.

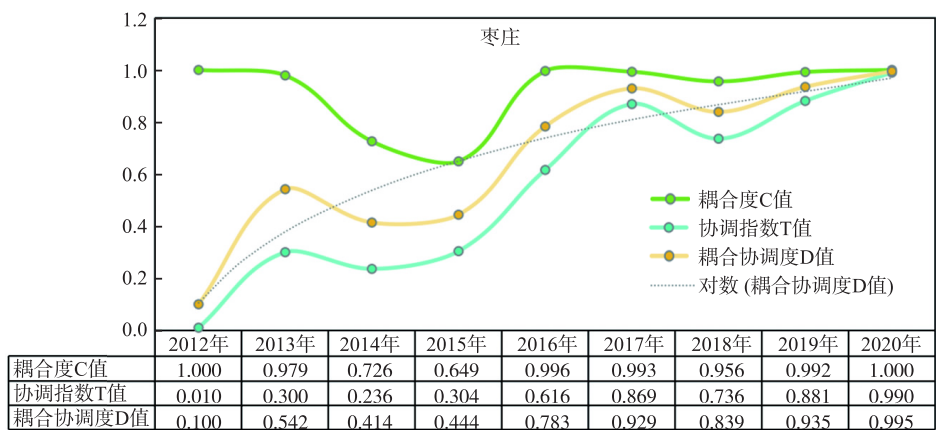


图 5 枣庄市资源-环境-发展承载力耦合协调变化图

Fig. 5 The coupled and coordinated changes of resource-environment-development carrying capacity in Zaozhuang City

济宁的耦合协调度(如图 6)从 2012 年的极度失调(0.100)到 2020 年的优质协调(0.995)大幅提升,表明该市在资源、环境、发展三者之间的协调性逐年增强,而且其变化曲线与对数函数近乎一致。这说明成熟型资源型城市通过加强环境治理、推动产业转型和绿色发展,是相对容易平衡资源消耗与经济发展之间的矛盾。具体来说,济宁市的资源承载力提升相对缓慢,主要是受煤炭资源枯竭影响;但环境承载力提升较快,主要原因在于空气污染治理水平和水源涵养能力提升明显;在发展承载力方面提升速度很快,城市基础设施建设、科技创新能力提升和经济多元化发展协同并进,有效推动了耦合协调度的快速提升。

从整体上看,济宁、枣庄、临沂三市的耦合协调度的提升,反映了鲁南矿业城市在国家资源枯竭型城市名单公布后加速了城市转型。这些城市在经历了资源的枯竭和环境承载力下降的阶段后,通过积极推进经济结构转型和提升城市发展承载力,逐步解决了资源与环境之间的不平衡。耦合协调度的提升是这些城市在资源、环境、发展三者之间逐步实现平衡的标志。资源型城市的转型进程往往经历了“资源枯竭—环境恶化—转型升级”的阶段,而在这个过程中,发展承载力往往是最为稳定且逐年提升的,而资源和环境承载力则相对容易受外部因素影响波动。这种失调主要出现在转型过程中产业结构调整尚未完善、资源和环境承载力出现下降的年份。

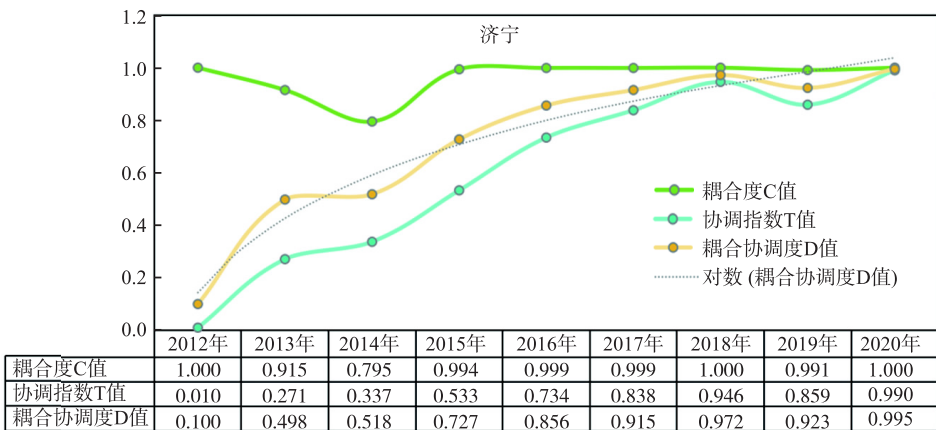


图 6 济宁市资源-环境-发展承载力耦合协调变化图

Fig. 6 The coupled and coordinated changes of resource-environment-development carrying capacity in Jining City

4 结论

本研究通过对鲁南地区矿业城市 2012—2020 年资源-环境-发展承载力时空变化特征的分析,得出以下结论:(1)从时间序列上看,鲁南地区矿业城市资源环境承载力在 2012 到 2020 年间呈整体稳步上升态势,但在 2014 年前后上升过程有所波动。成熟型的济宁市在综合承载力提升速度上表现迅速且稳定;再生型的临沂市综合承载力先下降,后快速提升;衰退型的枣庄市长期处于波动提升状态。(2)从子系统承载力变化特征上看,该地区发展承载力(DCC)逐年提升;环境承载力(ECC)呈现先下降后提升;资源承载

力(RCC)呈现波动上升。(3)相关性分析证明 RCC 与 DCC、ECC 有明显正相关性,该特征反映出资源的高效利用可以改善生态环境与发展环境。鲁南三城的资源-环境-发展承载力耦合协调水平逐年提高,证明这些城市已经逐步克服资源枯竭和环境压力所带来的困境,并且逐渐实现了经济发展与资源利用、环境保护之间的良性互动。

因此,矿业城市的转型和可持续发展必须依赖于发展承载力的持续提升,同时需要在资源利用和环境保护方面采取更加积极的政策措施,推动绿色低碳转型,实现更加协调的资源-环境-发展关系。本文提出建议如下:(1)首先在资源方面,水资源、矿产资源的总量稳定对于提高综合承载力作用明显。矿业城市应注重水资源的保护与高效利用,类似济宁这种煤炭资源保有量大的成熟型矿业城市应适当减少对不可再生资源的依赖,积极加快能源结构转型,发展新能源并提高能源利用效率;(2)临沂保有大量铁矿资源,济宁、枣庄也保有大量煤矿资源,三座城市应积极引进绿色开采技术和矿区生态修复技术,减少并修复资源开采对环境的负面影响。此外还应该加强数字化、智慧化手段进行检测监督,全面评估企业“三废”排放状况,不达标企业需整改或退出;(3)在生态环境治理方面,城市应加强污染物排放控制,特别是大气中 SO₂ 和烟尘的排放,它们对地区综合承载力影响最为严重。当前临沂的排放量远高于其他两座城市,亟需治理。同时还应加大公园绿地建设,提升绿地率,改善城市环境,提升生态质量。(4)类似枣庄这种衰退型的矿业城市承载力提升慢、波折多,转型压力最大。除常规方法之外更应积极寻求相关的政策照顾与财政支持。枣庄在人才培养与储备方面也远落后其他两座城市,应加大对高等教育和技术人才的投入,通过优惠政策吸引和留住创新型人才,推动产业结构转型和高新技术产业的发展。

[参考文献]

- [1] 李格锐,刘粤湘. 我国矿业城市的分布特征与发展态势分析[J]. 中国矿业,2014,23(6):63-70.
- [2] 李晟晖. 矿业城市产业转型研究:以德国鲁尔区为例[J]. 中国人口·资源与环境,2003(4):97-100.
- [3] 樊杰. 我国煤矿城市产业结构转换问题研究[J]. 地理学报,1993(3):218-226.
- [4] 张发旺,赵红梅,宋亚新,等. 神府东胜矿区采煤塌陷对水环境影响效应研究[J]. 地球学报,2007(6):521-527.
- [5] 杨坤. 煤矿开采沉陷的环境效应和生态修复技术[D]. 南京:南京理工大学,2011.
- [6] 孙平军. 矿业城市经济发展脆弱性及发展策略研究[D]. 长春:东北师范大学,2010.
- [7] 郑欣,程艳妹,任彩凤,等. 基于熵权 TOPSIS 模型的鄂尔多斯市资源环境承载力评价[J]. 生态科学,2020,39(2):95-103.
- [8] PARK R E,BURGESS E W. Introduction to the science of sociology[M]. Chicago:University of Chicago Press,1921.
- [9] ALLAN W. Studies in African land usage in Norther Rhodesia[M]. Cape Town:Oxford University Press,1949.
- [10] 顾康康,刘景双,王洋. 辽中地区矿业城市生态承载力分析与预测[J]. 地理科学进展,2009,28(6):870-876.
- [11] 丁赞,沈铭. 基于层次分析法和变异系数法的黄冈市地质环境承载力研究[J]. 资源环境与工程,2019,33(S1):70-74,91.
- [12] MEADOWS D H,MEADOWS D I,RANDERS J,et al. The limits to growth;a report to the club of rome[M]. New York: Universe Books,1972.
- [13] 张君,魏素洁,胡剑,等. 基于模糊二级评判模型的水资源承载力分析[J]. 人民黄河,2012,34(9):63-65.
- [14] 曾东东. 基于水气环境综合指数的贵州省环境承载力动态评价研究[D]. 重庆:重庆师范大学,2018.
- [15] 张伟萍,石培基,赵武生,等. 西北区域城镇化与资源环境承载力协调发展的时空特征:以兰西城市群为例[J]. 生态学杂志,2020,39(7):2337-2347.
- [16] 张静,宁凌,曹阳春. 基于熵权 TOPSIS 模型的海洋资源环境承载力评价研究:以广东省为例[J]. 生态经济,2020,36(3):162-167.
- [17] ZHOU J,CHANG S,MA W,et al. An unbalance-based evaluation framework on urban resources and environment carrying capacity[J]. Sustainable cities and society,2021,72:103019.
- [18] LEI K,ZHOU S. Per capita resource consumption and resource carrying capacity:a comparison of the sustainability of 17 mainstream countries[J]. Energy policy,2012,42:603-612.
- [19] 王兆峰,赵松松. 长江中游城市群旅游资源环境承载力与国土空间功能空间一致性研究[J]. 长江流域资源与环境,2021,30(5):1027-1039.
- [20] NAKAJIMA E S,ORTEGA E. Carrying capacity using emergy and a new calculation of the ecological footprint[J]. Ecological

- indicators, 2016, 60:1200-1207.
- [21] 秦海旭,段学军,赵海霞,等.南京市资源环境承载力监测预警研究[J].长江流域资源与环境,2020,29(12):2727-2736.
- [22] 封志明,游珍,杨艳昭,等.基于三维四面体模型的西藏资源环境承载力综合评价[J].地理学报,2021,76(3):645-662.
- [23] Butler R W. The concept of carrying capacity for tourism destinations; dead or merely buried? [J]. Progress in tourism and hospitality research, 1996, 2(3/4):283-293.
- [24] ARIF A A, MACHDAR I, AZMERI A, et al. Vulnerability factors in small islands and environmental carrying capacity by the AHP method. case study: Weh Island, Aceh, Indonesia [J]. IOP conference series; earth and environmental science, 2021, 1: 630.
- [25] 丁国峰,吕振福,曹进成,等.我国大型煤炭基地开发利用现状分析[J].能源与环保,2020,42(11):107-110,120.
- [26] GRAYMORE M L M, SIPE N G, RICKSON R E. Sustaining human carrying capacity: a tool for regional sustainability assessment [J]. Ecological economics, 2010, 69(3):459-468.
- [27] 封志明,杨艳昭,闫慧敏,等.百年来的资源环境承载力研究:从理论到实践[J].资源科学,2017,39(3):379-395.
- [28] 焦露,杨睿,郭琳.国家级新区资源环境承载力评估研究:以贵安新区为例[J].四川理工学院学报(社会科学版),2017,32(5):87-100.
- [29] 王西琴,贾宝珍,姜智强,等.基于产业结构的区域水环境承载力优化方法与例证[J].中国环境科学,2023,43(5):2652-2661.
- [30] CHEN Y, ZHANG D N. Evaluation of resources and environmental carrying capacity and its spatial-temporal dynamic evolution: a case study in Shandong Province, China [J]. Sustainable cities and society, 2022, 82:103916.
- [31] ZHANG G Y, LUO S, JING Z W, et al. Evaluation and forewarning management of regional resources and environment carrying capacity: a case study of Hefei City, Anhui Province, China. [J]. Sustainability, 2020, 12:1637.
- [32] Liao S J, Wu Y, Wong S W, et al. Provincial perspective analysis on the coordination between urbanization growth and resource environment carrying capacity (RECC) in China. [J]. Science of the total environment, 2020, 730:138964.
- [33] HSU W L, SHEN X, XU H, et al. Integrated evaluations of resource and environment carrying capacity of the huaihe river ecological and economic belt in China [J]. Land, 2021, 10(11):1168.
- [34] 鲍珂宇.成熟型煤炭城市环境承载力综合评价及仿真预测研究[D].淮南:安徽理工大学,2021.
- [35] 苏丹,赵珂.钢厂与城市共生关系[J].中国冶金,2017,27(10):1-6.
- [36] 安琪儿,王朗.矿业城市资源环境承载力的系统动力学模拟[J].资源与产业,2016,18(6):1-7.
- [37] 陈丹,王然.矿业城市资源环境承载力评价研究:以黄石市为例[J].中国国土资源经济,2015,28(9):57-61.
- [38] 李昭楠,胡垚坤,刘七军,等.内陆干旱区资源环境承载力预警评价与模拟分析:来自宁夏的实证分析[J].生态经济,2021,37(11):209-215,229.
- [39] 孟菲,赵海霞,牛铭杰,等.南京市环境承载力评价及其成因分析[J].中国环境科学,2019,39(9):4007-4016.
- [40] XIAO Y, TANG X, WANG J, et al. Assessment of coordinated development between tourism development and resource environment carrying capacity: a case study of Yangtze River economic belt in China [J]. Ecological indicators, 2022, 141:109125.
- [41] 韩家彬,石宁,韩梦莹.环境承载力对我国重化工行业跨区转移的影响研究[J].中国环境科学,2019,39(10):4464-4472.
- [42] WANG Z F, CHEN Q Q. Comprehensive partitions and optimisation strategies based on tourism urbanisation and resources environment carrying capacity in the Yellow River Basin, China [J]. Environmental science and pollution research, 2022, 29(16):23180-23193.
- [43] TAN S, LIU Q, HAN S. Spatial-temporal evolution of coupling relationship between land development intensity and resources environment carrying capacity in China [J]. Journal of environmental management, 2022, 301:113778.
- [44] 金悦,陆兆华,檀菲菲,等.典型资源型城市生态承载力评价:以唐山市为例[J].生态学报,2015,35(14):4852-4859.
- [45] 马艳梅,吴玉鸣,吴柏钧.长三角地区城镇化可持续发展综合评价:基于熵值法和象限图法[J].经济地理,2015,35(6):47-53.
- [46] 孙振清,陈文倩,兰梓睿.基于熵权TOPSIS法的区域绿色创新能力研究[J].企业经济,2019,38(2):20-26.
- [47] 王淑佳,孔伟,任亮,等.国内耦合协调度模型的误区及修正[J].自然资源学报,2021,36(3):793-810.
- [48] 郭玲霞,刘宇峰,封建民,等.中国省域新型城镇化与城乡融合发展的时空格局及其影响因素[J].地球科学与环境学报,2023,45(4):781-795.

[责任编辑:杜忆忱]