

# 基于三维生态足迹模型的山西省矿区2010—2019年 自然资本存量动态评估

蒋毓琪, 杨怡康, 朱少英

(山西大同大学 商学院, 山西 大同 037009)

**摘要:** [目的] 对山西省矿区自然资本存量进行动态评估, 为矿区生态环境保护及生态补偿提供理论依据。[方法] 以矿区自然资本为视角, 基于生态足迹与生态承载力核算结果, 运用三维生态足迹模型, 测算山西省矿区2010—2019年生态足迹深度与足迹广度, 借助足迹深度与足迹广度的剪刀差分析其动态演变特征并阐释矿区自然资本存量动态演变的作用机理。[结果] ① 山西省矿区人均生态赤字由2010年的 $4.40 \text{ hm}^2/\text{人}$ 增加到2016年的 $6.31 \text{ hm}^2/\text{人}$ , 随之降低到2019年的 $5.02 \text{ hm}^2/\text{人}$ , 生态足迹与生态承载力的差距总体趋于缩小; ② 2010—2019年, 人均生态足迹广度大致呈递减趋势, 由 $0.63 \text{ hm}^2/\text{人}$ 降到 $0.47 \text{ hm}^2/\text{人}$ , 而人均生态足迹深度呈现出先增后减的“倒U”形变化趋势; ③ 矿区自然资本存量时空动态演化是由煤炭资源禀赋、开采规模、矿区生态供求、生态足迹与承载力以及资本流量、存量的深度、广度等多重因素综合作用的结果。[结论] 山西省矿区生态足迹与承载力差距趋于好转, 但生态赤字仍然严重存在。

**关键词:** 自然资本; 三维生态足迹; 矿区; 存量

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2021)06-0165-06

**中图分类号:** X37, X24

**文献参数:** 蒋毓琪, 杨怡康, 朱少英. 基于三维生态足迹模型的山西省矿区2010—2019年自然资本存量动态评估[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 165-170. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.023; Jiang Yuqi, Yang Yikang, Zhu Shaoying. Dynamic evaluation of natural capital stocks by three-dimension ecological footprint model of mining areas in Shanxi Province during 2010—2019 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 165-170.

## Dynamic Evaluation of Natural Capital Stocks by Three-dimension Ecological Footprint Model of Mining Areas in Shanxi Province During 2010—2019

Jiang Yuqi, Yang Yikang, Zhu Shaoying

(School of Business, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China)

**Abstract:** [Objective] The natural capital stocks in Shanxi mining areas were dynamically assessed, in order to provide theoretical basis for the ecological environment protection and ecological compensation for the mining area. [Methods] In terms of natural capital of mining area, and based on the ecological footprint and ecological carrying capacity of the mining area, a three-dimensional ecological footprint model was used to calculate the depth and breadth of the ecological footprint in the Shanxi mining area during 2010—2019. Its dynamic evolution characteristics were further analyzed with the help of the scissors difference between the depth of the footprint and the breadth of the footprint, and then explains the mechanism of the dynamic evolution of the ecological occupation of the mining area. [Results] ① The ecological deficit per capita in Shanxi mining areas increased from  $4.40 \text{ hm}^2$  in 2010 to  $6.31 \text{ hm}^2$  in 2016, and then decreased to  $5.02 \text{ hm}^2$  in 2019. The gap between ecological footprint and ecological carrying capacity tends to narrow overall. ② From 2010 to 2019, the breadth of the per capita ecological footprint generally showed a declining trend, from  $0.63 \text{ hm}^2$  to  $0.47 \text{ hm}^2$ , and the depth of the per capita ecological footprint showed an inverted U-shaped change trend that

收稿日期: 2021-06-04

修回日期: 2021-07-13

资助项目: 教育部人文社会科学研究规划青年项目“山西省矿区生态占用赤字的负外部效应与补偿机制研究”(20YJC630052); 山西省哲学社会科学规划课题(2019B292)

第一作者: 蒋毓琪(1983—), 男(汉族), 山西省大同市人, 博士, 副教授, 主要从事资源与环境经济方面的研究。Email: jiangyuqi1913@163.com。

通讯作者: 杨怡康(1990—), 女(汉族), 山西省大同市人, 硕士研究生, 研究方向为资源与环境经济。Email: yangyikang1433@163.com。

first increased and then decreased. ③ The temporal and spatial dynamic evolution of the natural capital stocks for the mining area was the comprehensive effect of multiple factors such as the endowment of coal resources, the scale of mining, the ecological supply and demand of the mining area, the ecological footprint and carrying capacity, the flow of capital, and the depth and breadth of the stock. [Conclusion] The gap between the ecological footprint and carrying capacity in the Shanxi mining area tends to be improved, but the ecological occupation deficit still exists.

**Keywords:** natural capital; three-dimensional ecological footprint; mining area; stock

山西省作为黄河流域的煤炭资源型地区,工业化与城市化进程加快推进、资源高度损耗的粗放型经济增长方式,使得环境污染严重与生态系统退化等严峻形势加剧。基于“要素禀赋理论”,丰裕的自然资产成为资源型城市经济增长的逻辑起点和路径依赖<sup>[1]</sup>。煤炭资源开采推动经济增长的同时,使得矿区环境污染严重与生态服务功能衰退,从而引致自然资本容量空间占用超载的负外部性加剧。自然资本存量主要通过测算生态足迹来体现。生态足迹概念是由 Ree 提出并建立一维模型,随后 Wackemagel<sup>[2]</sup>于 1999 年将其扩展到二维模型,侧重自然资本的消费量与流量,而非维持区域生态系统平衡的自然资本存量。Niccolucci 等<sup>[3]</sup>学者对模型改进,分别引入生态足迹深度和广度,量化存量资本消耗与流量资本占用,构建三维立体模型。生态足迹方法具有架构清晰、易于操作的特点,为评估区域自然资本利用状况与生态环境可持续发展提供理论依据。国内外学者围绕自然资本,聚焦于三维生态足迹模型,从理论与实证方面进行了相关研究。在理论层面,由于地类的差异性导致其生态占用盈余与赤字不可替代、自然资本尚未耗竭使得足迹深度难以表征流量占用程度。针对生态足迹模型存在的缺陷,方恺等对其进行改进,建立了改进的三维生态足迹模型<sup>[4]</sup>。实证方面的成果集中于研究区域、研究方法、研究对象等。在研究区域方面,Niccolucci<sup>[5]</sup>基于 40 a 的数据从全球视角分析了生态足迹深度和广度两个维度的时空演化特征。方恺等<sup>[6]</sup>基于 G20 的环境监测数据,探究其自然资本的空间演化时序与格局分异,得出各国自然资本利用变化趋势表现为资本流量占用减弱、资本存量消耗增强。秦超等<sup>[7]</sup>基于陕西省 30 a 数据对其自然资本动态变化进行研究,资本存量消耗是支撑区域资源需求的主要来源。在研究方法方面,自然资本测算主要包括能值法、空间分析法与生态足迹分析法,其中三维生态足迹模型被普遍应用到诸多领域<sup>[8]</sup>。在研究对象方面,程钰等<sup>[9]</sup>对黄河三角洲地区自然资本动态评估并分析其动态演变特征,提出该区域资本流量不足,需引入外区域资本存量加以弥补。吴健生等<sup>[10]</sup>基于改进三维足迹模型,并引入足迹广度基尼系数等

指标,分别从产品、地类、区域 3 个维度评估关中地区土地自然资本利用状况,结果表明中心城市的资本存量消耗严重,生态赤字严重,其他城市资本存量消耗处于低值区,生态环境压力较小。矿区作为陆地生态系统的重要地理单元,是资源型城市经济增长的核心要素,更是煤炭产业发展的空间载体。矿区具有生态环境空间的公共品性质和外部性特征,煤炭资源开采这一驱动因素使得在有限生态环境容量和资源承载力的约束条件下不同类型生态服务伴随着生态过程发生变化。基于生态足迹理论,生态占用强调对生态空间的需求,生态承载力侧重生态空间的供给侧,且为经济发展提供资源并净化污染。生态占用超出生态承载力范围导致生态系统失衡。针对矿区生态占用失衡,部分学者<sup>[11]</sup>提出解决思路:在定性方面,理清采矿权产权,明确责任主体,制定强制性制度与税收、财政补贴相结合,倒逼其发展循环经济使外部成本最小化;在定量方面,运用直接市场法、使用者成本法与影子工程法等测度负外部成本。薛建春<sup>[12]</sup>基于 20 a 时间序列数据,运用 EMD 和动力学预测法,探究矿区人均生态足迹的演化规律并利用系统动力学模型对矿区人均生态足迹进行预测。此外,基于市场价值与环境经济学理论,煤炭开采导致矿区生态足迹赤字主要表现为大气污染、水体污染、地表塌陷等,应从这些方面测算其负外部效应带来的环境经济损失<sup>[13]</sup>。综上所述,自然资本已有研究成果集中于理论与实证两个方面,以研究区域、研究方法、研究对象等为视角对其进行动态评估。矿区生态环境的相关研究仅限于生态足迹的测算方法、生态占用与生态承载力之间的关系以及从市场价值、生态服务价值等视角定量测度负外部成本,但很少从矿区自然资本角度剖析,尚未在有限生态环境容量和资源承载力的约束条件下对矿区自然资本的足迹深度与广度两个维度进行定量研究,更未深入地系统地解析煤炭开采对矿区自然资本存量产生的直接作用,这为本文提供了探讨空间。

本研究以山西省矿区为例,以自然资本为视角,基于生态足迹与生态承载力核算结果,运用三维生态足迹模型,测算足迹深度与足迹广度,旨在分析自然

资本存量的动态演变特征并阐释其作用机理,以期为山西省矿区生态修复、环境保护及生态补偿提供理论依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

山西省作为典型的资源型地区,煤炭资源具有储量大、煤质优、煤层厚、易开采的特点,保有储量为  $3.00 \times 10^{11}$  t,主要分布于大同、宁武、河东、西山、霍西、沁水这 6 大煤田,其中,尚未利用资源量为  $1.70 \times 10^{11}$  t。在煤炭资源开发方面,山西省共有生产煤矿 616 座,合计产能  $9.63 \times 10^8$  t/a,意味着山西煤炭生产以大型煤矿为主。煤炭工业大规模开采、利用对大气环境产生影响,主要表现为煤矿抽放瓦斯利用率较低、煤矸石自燃易产生  $\text{CO}$ 、 $\text{SO}_2$  等有害气体;对水资源影响,主要表现为矿井水排出引起地下水位严重下降,洗煤过程废水排放具有重金属离子以及降水冲刷煤矸石将其有害物质带进地表水循环<sup>[14]</sup>,通过大气与地表、地下水等介质流转,对山西省矿区生态环境带来负外部效应。

### 1.2 数据来源

确定具体的消费项目是测算生态足迹的前提,自然资本消费由生物资源消费和能源消费两部分构成。山西省矿区资源消费主要来自煤炭开采,涉及到耕

地、草地、林地、水域、建筑用地与工矿用地等不同地类(表 1),其面积所用数据均来自 2010—2019 年《中国城市统计年鉴》《中国环境年鉴》《中国能源统计年鉴》《山西统计年鉴》以及山西省各城市国民经济和社会发展统计公报等。由于山西省六大煤田不是完整的行政区域,获取准确消费数据难度较大,本文依据不同煤田所在地市的消费情况整体分析,得到山西省矿区自然资本具体消费量。自然资本消耗量通常用生态足迹来衡量。生态足迹的核心是将研究区域发展所损耗的资源以及排放的废弃物转化为一定面积的生物生产性土地。基于不同地类生产能力不同,难以直接比较,生态足迹测算需要引入产量因子与均衡因子两个参数。由于同一地类生物生产能力在不同地区具有显著差异,需借助产量因子,比较不同区域间生物生产性土地面积。产量因子表征某区域生态系统的服务能力与全国范围生态服务能力均值的差异。此外,不同地类的生物生产能力存在差异,难以直接比较,须借助均衡因子将其转化为同一生产性质的土地面积进行核算。均衡因子表征某一生态系统的不同地类的生态服务能力与区域生态系统的服务能力均值的差异<sup>[15]</sup>。因此,本文选取了山西省的西山、大同、沁水、宁武、霍西与河东 6 大矿区为研究对象,不同地类的均衡因子和产量因子借鉴 Wackernagel 等<sup>[16]</sup>对中国生态足迹计算时的取值进行估算。

表 1 山西省矿区 2019 年不同地类面积统计

$10^4 \text{ hm}^2$

土地利用类型	西山矿区	大同矿区	沁水矿区	宁武矿区	霍西矿区	河东矿区	均衡因子	产量因子
耕地	0.23	7.12	68.57	4.76	20.19	43.28	2.80	1.66
草地	6.88	3.00	29.35	7.44	13.20	32.10	0.50	0.91
林地	11.03	5.90	180.24	17.62	24.77	61.34	1.10	0.19
水域	0.22	0.21	1.49	0.16	0.37	0.62	0.20	1.00
建筑用地	0.18	0.62	11.07	0.37	1.68	6.21	2.80	0.60
化石能源用地	0.24	0.96	14.28	0.52	2.35	8.91	1.11	1.00
总计	18.78	17.81	305.00	30.87	62.56	152.46		

## 2 研究方法

### 2.1 三维生态足迹模型

自然资本是指生态系统承载的自然资源与提供的生态服务,某区域经济增长、社会进步需要消耗自然资本维系其可持续发展。生态足迹作为评估自然资源利用状况的有效途径,为衡量自然资本损耗提供了理论依据,而三维生态足迹模型较好地阐释了其消耗与占用的状态,揭示自然资本存量和流量的动态关系。基于人类对自然资本存量消耗与自然资本流量占用的时间和空间两个维度的思想, Niccolucci 等<sup>[5]</sup>

引入足迹深度和足迹广度,用以表征人类对自然资本存量和流量的利用水平,构建三维生态足迹模型。足迹广度阈值为  $[0, \text{EC}]$ ,意味着生态系统的资本供给侧数量的上限是生态承载力;足迹深度阈值为  $[1, \infty]$ ,表示其值越大,对自然资本需求量越大(图 1)。

基础三维生态足迹模型测算自然资本生态占用赤字是基于生态承载力与生态足迹的差值,忽视了赤字与盈余性质的差异,使两者作用相互抵消,导致生态足迹广度偏大而足迹深度被低估是该模型存在的缺陷。因此,本文借鉴方恺提出的改进三维生态足迹模型进行测算。

人均生态足迹深度与广度,表示为:

$$EF_{\text{depth,region}} = 1 + \frac{\max\{EF_i - EC_{i,0}\}}{EC_i} \quad (1)$$

$$EF_{\text{size,region}} = \sum_i^n \min\{EF_i - EC_i\} \quad (2)$$

$$EF_{3D,region} = EF_{\text{depth},i} \cdot EF_{\text{size},i} \quad (3)$$

式中:  $EF_{3D,region}$  为山西省矿区人均生态足迹面积;  $EF_{\text{depth,region}}$  为人均生态足迹深度;  $EF_{\text{size,region}}$  为人均生态足迹广度;  $i$  为不同地类面积;  $EC_i, EF_i$  分别为生态承载力与生态足迹。

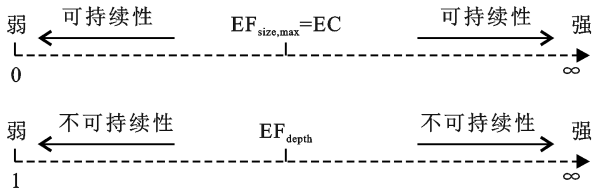


图 1 自然资本广度与深度的物理意义<sup>[17]</sup>

## 2.2 模型补充指标

自然资本包括资本存量和资本流量,人类活动的生态足迹分别对地理空间自然资本存量消耗与流量实际占用程度产生影响。为了表征人均生态足迹处于自然深度时煤炭开采对矿区实际生态占用,引入自然资本流量占用率。自然资本存量消耗导致其存量发生变化,煤炭资源开采引致其存量动态变化。为了探究煤炭开采对煤炭存量的动态关系,引入自然资本存量流量利用比。

自然资本流量占用率( $OR_{\text{flow}}$ ),表示为:

$$OR_{\text{flow}} = \frac{EF_{\text{size}}}{EC_i} \times 100\% \quad (EF < EC) \quad (4)$$

自然资本存量流量利用比( $OR_{\text{flow}}^{\text{stock}}$ ),其表示为:

$$OR_{\text{flow}}^{\text{stock}} = \frac{EF - EF_{\text{size}}}{EF_{\text{size}}} = \frac{ED}{EC} = EF_{\text{depth}} - 1 \quad (5)$$

## 2.3 自然资本变化率

自然资本流量占用率与存量流量利用比表征生态足迹的动态关系。为了阐释煤炭开采对矿区自然资本消耗的足迹深度与足迹广度空间时序演变的趋势与速度,引入自然资本变化率,借助多项式回归模型,表示为:

$$EF_{\text{depth}} = EF_{\text{depth}}(t) = u_0 + u_1 t + u_2 t^2 + \dots + u_n t^n \quad (6)$$

$$EF_{\text{size}} = EF_{\text{size}}(t) = v_0 + v_1 t + v_2 t^2 + \dots + v_n t^n \quad (7)$$

式中: $t$  为时间变量;  $EF_{\text{depth}(t)}, EF_{\text{size}(t)}$  分别求导,即  $t$  年矿区生态足迹深度与广度的变化率。此外,2010年起始, $t=0$ ; 2015年时, $t=5$ ,依此类推。

## 2.4 剪刀差

自然资本变化率反映了生态足迹深度与广度的

时空演变,自然资本在不同空间时序呈现出差异性。为了进一步探究煤炭开采对矿区自然资本存量消耗的足迹深度与足迹广度空间时序演变趋势与速度的差异,引入剪刀差模型,表示为:

$$\alpha = \arccos \frac{1 + EF'_{\text{depth}}(t) \times EF'_{\text{size}}(t)}{\sqrt{1 + [EF'_{\text{depth}}(t)]^2} \times \sqrt{1 + [EF'_{\text{size}}(t)]^2}} \quad (8)$$

式中: $EF'_{\text{depth}(t)}, EF'_{\text{size}(t)}$  分别表征矿区生态足迹深度与广度在  $t$  时刻的变化率;  $\alpha$  为矿区生态足迹深度与广度的剪刀差,即  $\alpha$  值越大,两者变化趋势的差异越大。

## 3 研究结果与分析

### 3.1 生态足迹与生态承载力分析

依据生态足迹模型<sup>[18]</sup>,测算山西省矿区生态足迹与生态承载力(图 2)。结果显示,人均生态足迹由 2010 年的  $5.03 \text{ hm}^2/\text{人}$  增加到 2016 年为最大值的  $6.75 \text{ hm}^2/\text{人}$ ,增幅为 34.19%,年均增长 5.70%,自 2017 年后,人均生态足迹在逐步减少,降低到 2019 年的  $5.49 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。人均生态承载力由 2010—2016 年逐年下降,2017 年以后 3 a 略有小幅增加。人均生态赤字具有“先增后减”的特点,虽然 2016 年后,生态足迹与生态承载力的差距总体趋于缩小,但生态赤字现象仍然严重存在。

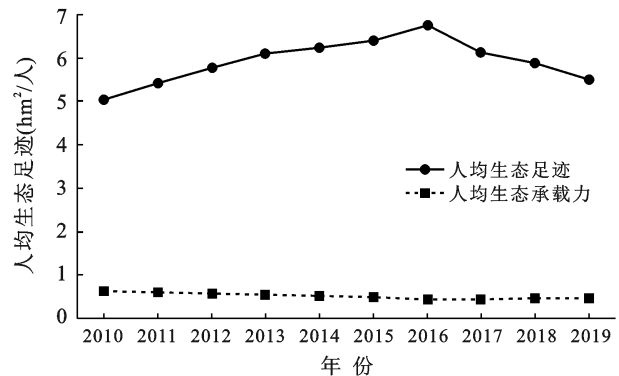


图 2 山西省矿区 2010—2019 年生态足迹与生态承载力变化趋势

### 3.2 生态足迹深度与广度动态变化分析

基于人均生态足迹与承载力的计算结果,利用公式(1)–(3),得到山西省矿区人均生态足迹深度与广度(表 2)。2010—2019 年,人均生态足迹广度大致呈递减趋势,由  $0.63 \text{ hm}^2/\text{人}$  降到  $0.47 \text{ hm}^2/\text{人}$ ,其中 2016—2019 年由降低变为增长,但幅度较小且平稳。人均生态足迹深度呈现出“倒 U”形特征,由  $7.98 \text{ hm}^2/\text{人}$  增加到  $15.34 \text{ hm}^2/\text{人}$ ,随之减少到  $11.68 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。人均生态足迹广度与深度的变化趋势在 2017 年后发生转变,主要归因于山西省加强生态文

明建设,着重强调矿区生态环境修复、治理,减少煤炭资源开采、提升煤炭化工产品附加值,使得能源消耗账户中的工矿用地对矿区生态足迹赤字贡献率降低。这与山西煤炭资源合理利用、布局,降低生态赤字、提升生态承载力的发展思路保持一致。

表 2 山西省矿区 2010—2019 年人均生态足迹深度与广度  $\text{hm}^2/\text{人}$

年份	人均生态足迹	人均生态承载力	人均生态赤字	人均生态足迹广度	人均生态足迹深度
2010	5.03	0.63	4.40	0.63	7.98
2011	5.41	0.61	4.80	0.61	8.87
2012	5.78	0.56	5.22	0.56	10.32
2013	6.09	0.55	5.54	0.55	11.07
2014	6.24	0.53	5.71	0.53	11.77
2015	6.39	0.49	5.90	0.49	13.04
2016	6.75	0.44	6.31	0.44	15.34
2017	6.14	0.44	5.70	0.44	13.95
2018	5.88	0.46	5.42	0.46	12.78
2019	5.49	0.47	5.02	0.47	11.68

### 3.3 资本存量消耗与流量占用的动态变化趋势分析

基于改进的三维生态足迹模型,计算研究区域资本流量占用率是建立于生态承载力大于生态足迹的基础上。在现实情况中,山西省矿区由于煤炭开采,使得矿井瓦斯、矸石自燃产生  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  等有害气体,尤其大量的  $\text{NO}_x$ , 形成化学污染与酸雨,对土壤、农林业与水体等造成破坏,给耕地、林地、草地、水域等不同地类带来严重的负外部成本,与公式(4)矛盾,因此,资本流量占用率未能测算。依据公式(5),可得山西省矿区资本存量与流量之间的动态关系(表 3)。

2010—2019 年,存量流量利用比呈现出先增后减的“倒 U”形变化趋势。2016 年前,存量流量利用比逐年上升,煤炭资源过度开采是矿区化石能源用地存量消耗速度加快的主要原因。2017 年,存量流量利用比开始下降,表明山西社会经济发展对矿区煤炭资源流量的占用越来越小,意味着经济增长对煤炭资源开采的依赖程度有所缓解。其原因归结为 2016 年,山西实施煤炭供给侧结构性改革,关闭多家煤矿,化解过剩产能,使得山西省矿区自然资本存量消耗逐年减少。

表 3 山西省矿区 2010—2019 年资本流量占用率与存量流量利用比

项目	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年
资本流量占用率/%	—	—	—	—	—
存量流量利用比	6.98	7.87	9.32	10.07	10.77
项目	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
资本流量占用率/%	—	—	—	—	—
存量流量利用比	12.04	14.34	12.95	11.78	10.68

### 3.4 生态足迹广度与深度剪刀差

依据公式(6)—(8),计算得到山西省矿区生态足迹深度与广度的剪刀差(表 4)。2010—2019 年,矿区生态足迹深度与广度差异由大变小,其中 2010—2016 年,剪刀差由 1.13 上升到 1.56,其值处于  $[0, \pi/2]$ ,表明矿区生态足迹深度呈递增趋势,其与足迹广度同向变动;2017—2019 年,剪刀差由 -1.53 下降到 -1.48,其值处于  $[-\pi/2, 0]$ ,表明矿区生态足迹深度呈递减趋势,其与足迹广度同向变动。因此,矿区生态足迹深度与广度的剪刀差主要取决于足迹深度的变化。

表 4 山西省矿区 2010—2019 年足迹深度与足迹广度剪刀差

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
剪刀差	1.13	1.25	1.38	1.43	1.47	1.51	1.56	-1.53	-1.50	-1.48

基于“要素禀赋理论”,丰裕的煤炭资源成为山西经济增长的逻辑起点,以损耗矿区生态环境、采用粗放式煤炭开采为路径依赖。随着煤炭“高污染、高能耗”的开采规模扩大,经济实现快速发展的同时,矿区环境遭受严重污染、生态服务功能衰退,自然资本存量消耗逐年增加,生态占用需求远远超过生态承载供给侧。人均生态赤字由 2010 年的  $4.40 \text{ hm}^2/\text{人}$  增加到 2016 年的  $6.31 \text{ hm}^2/\text{人}$ ,增幅为 43.41%,尽管 2019 年降为  $5.02 \text{ hm}^2/\text{人}$ ,矿区自然资本存量的生态赤字所减缓,但依然严重。基于生态足迹理论,有限生态环境容量、资源承载力与煤炭开采引致生态系统失衡的矛盾突出。经济处于高速发展时期,有限的生

态存量与环境容量作为经济增长的前提基础,矿区自然资本存量赤字抑制了山西省经济绿色健康发展。为了扭转矿区生态赤字与经济发展失衡,山西省制定环境规制政策、实行控煤政策,倒逼煤炭企业转型升级,使得年煤炭产量有所下降,煤炭资源开采与矿区自然资本存量转为良性互动。矿区生态资本存量与流量的消耗变动有所减缓,甚至出现下降趋势,但矿区自然资本存量赤字仍然显著存在。总之,山西矿区自然资本存量时空动态演变受资源禀赋、煤炭开采规模、矿区生态供给与需求、生态足迹与承载力以及资本流量、存量的深度、广度等诸多因素共同作用(图 3)。

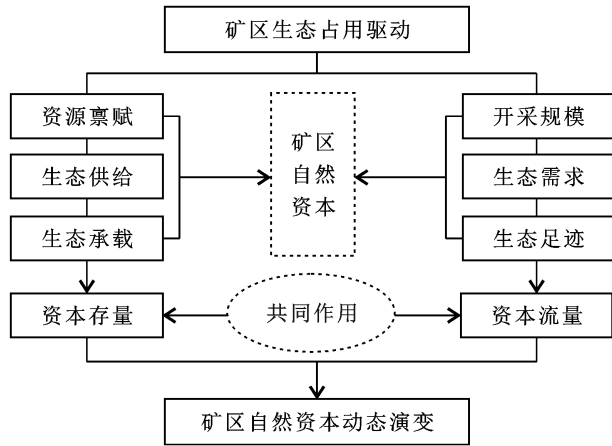


图 3 山西省矿区自然资本演化的作用机理

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

(1) 区域生态占用动态评估作为一项复杂的系统工程,三维生态足迹是衡量其可持续性的主要方法,诸多学者针对不同区域、研究对象开展研究<sup>[19]</sup>。从生态占用损耗程度看,山西省矿区生态赤字减小、足迹广度、足迹深度对矿区生态占用的依赖性降低,与黄河三角洲、珠江三角洲等的生态赤字呈逐年扩大态势、足迹广度相对较大且足迹深度相对较高的研究结果存在差异<sup>[20]</sup>。原因在于山西省作为能源革命综合改革试点,为了实现煤炭经济绿色转型,通过制定环境规制政策、调整煤炭产业结构与创新清洁能源技术等一系列措施,减缓矿区生态资本消耗增幅,这充分表明政策合理制定、产业合理布局、技术创新驱动为缓解生态超额占用、提升生态承载力提供有益思路。

(2) 自然资本供需动态均衡是区域绿色可持续发展的重要保障。矿区生态环境具有公共品性质和外部性特征,煤炭开采使得矿区在有限生态环境容量和资源承载力的约束条件下环境污染和生态服务功能衰退,表现为生态占用赤字引致负外部效应。为了有效解决煤炭开采带来的负外部成本,依据“谁受益,谁付费”的原则,需要通过生态补偿的方式修复、治理矿区生态环境。我国矿区生态补偿依靠政府财政转移支付很难实现,需要横向转移支付与之互相配合解决资金需求,包括征收生态补偿税费、设立生态补偿基金、建立生态银行与生态公益捐赠等多元化补偿方式<sup>[21]</sup>。确定何种补偿方式、精准测算补偿标准、合理构建补偿机制,以此实现降低煤炭资源的消耗程度、减少矿区生态占用赤字、提升生态承载力,确保矿区生态供需平衡,保障煤炭经济增长与山西省矿区生态环境保护协同发展还有待进一步探讨。

### 4.2 结论

(1) 2010—2019年,山西省矿区人均生态足迹由2010年的 $5.03 \text{ hm}^2/\text{人}$ 增加到2016年为最大值的 $6.75 \text{ hm}^2/\text{人}$ ,增幅为34.19%,自2017年后,人均生态足迹在逐步减少,降低到2019年的 $5.49 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。人均生态承载力由2010—2016年逐渐下降,2017年以后3 a略有小幅增加。人均生态赤字具有“先增后减”的特点,表明生态足迹与生态承载力的差距总体趋于缩小。

(2) 2010—2019年,山西省矿区人均生态足迹广度大致呈递减趋势,由 $0.63 \text{ hm}^2/\text{人}$ 降到 $0.47 \text{ hm}^2/\text{人}$ ,其中2016—2019年由降低变为增长,但幅度较小且平稳。人均生态足迹深度具有“倒U”形特征,作为其重要影响指标的存量流量利用比与之对应,也呈现出先增后减的“倒U”形变化趋势。此外,生态足迹深度与广度的剪刀差主要取决于足迹深度的变化。这充分表明山西省矿区人均生态足迹广度与深度的变化趋势趋于好转,其原因归结为山西省推进煤炭经济绿色转型,经济增长对煤炭资源开采的依赖程度降低,使得能源消耗账户中的工矿用地对矿区生态环境的胁迫作用减小。

(3) 山西省矿区生态占用是一个复杂的自然—社会—经济时空动态演变过程,是由资源禀赋、煤炭开采规模、矿区生态供给与需求、生态足迹与承载力以及资本流量、存量的深度、广度等诸多因素共同作用的结果。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 厉以宁.摆脱路径依赖,在新思路指导下前进[J].全国新书目,2018(8):8-9.
- [2] Wackernagel M, Lewan L. Evaluating the use of natural capital with the ecological footprint [J]. *Ambio*, 1999, 28(7):604-612.
- [3] Niccolucci V, Bastianoni S, Tiezzi E, et al. How deep is the footprint? A 3D representation [J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220(20):2819-2823.
- [4] 方恺, Reinout H. 自然资本核算的生态足迹三维模型研究进展[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(12):1700-1707.
- [5] Niccolucci V, Galli A, Reed A, et al. Towards a 3D national ecological footprint geography [J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(16):2939-2944.
- [6] 方恺. 1999—2008年G20国家自然资本利用的空间格局变化[J]. *资源科学*, 2014, 36(4):793-800.
- [7] 秦超,李君轶,陈宏飞,等.基于三维生态足迹的陕西省自然资本动态研究[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(4):837-842.
- [8] 张俊杰,范振林,王翻羽,等.自然资本核算的中国路径[J]. *中国国土资源经济*, 2020, 33(10):31-38.

- 法研究[J].地理科学,2002,22(6):705-711.
- [19] 范丽丽,沈珍瑶,刘瑞民.基于 GIS 的大宁河流域土壤侵蚀评价及其空间特征研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2007,43(5):563-566.
- [20] Desmet P J, Govers G. A GIS procedure for the automated calculation of the USLE LS factor on topographically complex landscape units [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996,51(5):427-433.
- [21] Dai Z H, Feng X. B, Zhang C, et al. Assessment of mercury erosion by surface water in Wanshan mercury mining area [J]. *Environmental Research*, 2013, 125: 2-11.
- [22] Yang D W, Kanae S, Oki T, et al. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes [J]. *Hydrological Processes*, 2003,17(14),2913-2928.
- [23] Li Xiaosong, Wu Bingfang, Zhang Lei. Dynamic monitoring of soil erosion for upper stream of Miyun Reservoir in the last 30 years [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013,10(5):801-811.
- [24] 刘婷,邵景安.三峡库区不同土地利用背景下的土壤侵蚀时空变化及其分布规律[J].中国水土保持科学,2016,14(3):1-9.
- [25] 张鹏,尹忠东,尚河英.川中紫色土区林地型小流域不同用地类型的土壤侵蚀特征[J].生态科学,2017,36(3): 8-14.
- [26] 熊杰,曾源,朱亮,等.近 25 年三峡库区土地覆被变化及驱动力分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(10): 2368-2378.
- [27] 史铁丑,徐晓红.重庆市典型县撂荒耕地图斑的提取与验证[J].农业工程学报,2016,32(24):261-267.
- [28] 俱战省,文安邦,严冬春,等.三峡库区小流域修正通用土壤流失方程适用性分析[J].农业工程学报,2015,31(5):121-129,131,130.
- [29] Cammeraat E L H. Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in Southeast Spain [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004,104(2):317-332.
- [30] 刘宇.土壤侵蚀研究中的景观连通度:概念、作用及定量[J].地理研究,2016,35(1):195-202.
- [31] Prugh L R. An evaluation of patch connectivity measures [J]. *Ecological Applications*, 2009,19(5):1300-1310.
- [32] 高旭彪,孙厚才,赵永军,等.长江上游川中紫色土丘陵区小流域泥沙输移比空间尺度效应研究[J].水土保持通报,2007,27(6): 130-133,151.

(上接第 170 页)

- [9] 程钰,尹建中,王建事.黄河三角洲地区自然资本动态演变与影响因素研究[J].中国人口·资源与环境,2019,29(4):127-136.
- [10] 吴健生,李铠杨,赵宇豪.基于改进三维足迹模型的关中地区土地自然资本利用状况分析[J].地理科学进展,2020,39(8):1345-1355.
- [11] 刘勇生.煤炭开发负外部性及其补偿机制研究[D].北京:北京理工大学,2014.
- [12] 薛建春.基于 EMD 的平朔矿区生态承载力变化及动力学预测分析[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2014,35(5):63-68.
- [13] 张海莹.负外部成本内部化约束下的煤炭开采税费水平研究[J].中国人口.资源与环境,2012,22(2): 147-151.
- [14] 李小建.山西煤炭工业对周边环境及资源破坏的研究[J].山西化工,2018,38(3):211-212.
- [15] 李鹏辉,张茹倩,徐丽萍.基于生态系统服务价值的生态足迹计算与分析:以玛纳斯河流域为例[J].中国农业资源与区划,2021(5):1-13.
- [16] 徐菲.大同煤矿区农户生态足迹及其对环境的影响[D].山西 临汾:山西师范大学,2017.
- [17] 方恺,高凯,李焕承.基于三维生态足迹模型优化的自然资本利用国际比较[J].地理研究,2013,32(9): 1657-1667.
- [18] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept [J]. *Ecological Economics*, 1999,29:375-390.
- [19] 符正平,麦景琦.生态省试点与可持续发展能力:基于生态足迹视角[J].中山大学学报(社会科学版),2021, 61(2):176-186.
- [20] 刘家旗,茹少峰.基于生态足迹理论的黄河流域可持续发展研究[J].改革,2020(9):139-148.
- [21] 李国志,张景然.矿产资源开发生态补偿文献综述及实践进展[J].自然资源学报,2021,36(2):525-540.