

山区产业生态系统适应性与资源环境承载力的 时空耦合协调关系

——以秦巴山区 81 个区县为例

杨卫丽¹, 谭景柏¹, 范兵², 王子亮³, 杨云辉¹, 刘惠¹

(1.西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710129;

2.太原理工大学 软件学院, 太原 030024; 3.西北工业大学 管理学院, 西安 710129)

摘要:为了揭示秦巴山区产业生态系统适应性与资源环境承载力之间的耦合协调关系,基于 P-S-R 模型、熵权-TOPSIS 模型、Pearson 相关性指数及耦合协调度模型分析秦巴山区县域 2010—2019 年产业生态系统适应性及资源环境承载力的时空格局特征,并对两者的相关性及耦合协调关系进行了时空分析。结果表明:(1)山区产业生态系统适应性随时间呈现出先增后降的波动趋势,空间上为整体均匀分布,高值区散点迸发、局部锐减,低值区部分集聚。(2)山区资源环境承载力在时间尺度上先急速上升后缓步下降,在空间尺度上呈现出较为明显的“凹”字型空间结构。(3)山区产业生态系统适应性与资源环境承载力存在较高的相关性但随时间下降;二者的耦合协调度逐渐提升,空间上表现为“散点初级协调”到“边缘初级协调”的西北向“口袋”型分布态势。秦巴山区产业经济发展初期整体偏低,此时的产业生态系统适应性与资源环境承载力耦合性协调性较弱;发展后期,交通通达、人口集聚、产业规模逐步提升,资源环境承载力韧性进一步提升,耦合协调性增强。

关键词:山区产业生态系统;资源环境承载力;耦合协调;秦巴山区;县域经济高质量发展

中图分类号:F129.9; X24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0363-12

Spatial-Temporal Coupling Coordination Relationship Between Industrial Ecosystem Adaptability and Resource Environmental Bearing Capacity in County-level Mountain Region

—A Case Study of 81 Districts and Counties in the Qinba Mountain Region

YANG Weili¹, TAN Jingbai¹, FAN Bing², WANG Ziliang³, YANG Yunhui¹, LIU Hui¹

(1.School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical

University, Xi'an 710129, China; 2.School of Software, Taiyuan University of Technology,

Taiyuan 030024, China; 3.School of Management, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: In order to reveal the coupled coordination relationship between the industrial ecosystem adaptability, resource and environmental carrying capacity in the Qinba Mountain Region, the spatial and temporal adaptability of the mountainous industrial ecosystem, resource and environmental carrying capacity within Qinba Mountain counties from 2010 to 2019 were analysed based on P-S-R model, entropy-TOPSIS model, Pearson correlation index and the coupled coordination degree model. The spatiotemporal analysis of the coupling and coordination relationship between the two was conducted. The results show that: (1) The adaptability of mountain industrial ecosystems show a fluctuating trend of increasing then decreasing over time, with an overall uniform distribution in space, scattered bursts and sharp local decreases in high-value areas, and partial clustering in low-value areas; (2) The bearing capacity of mountain resources and the surrounding environment rises sharply, then decreases slowly on a time scale, and shows a more obvious

收稿日期:2021-09-22

修回日期:2021-10-09

资助项目:陕西省自然科学基金(2021JM-066);中央高校基本科研业务布局培育类资助项目(3102018xyzzl002)

第一作者:杨卫丽(1970—),女,湖北襄阳人,博士,副教授,主要从事城乡规划、城乡发展研究。E-mail:yangweili@nwpu.edu.cn

‘concave’ spatial structure on a space scale; (3) The adaptation of the mountain industrial ecosystem, resource and environmental carrying capacity has a high correlation but declines with time; the degree of coupling coordination of the two gradually increases, and the spatial performance is a ‘scattered primary coordination’ to a ‘edge primary coordination. The spatial coordination of the two is gradually increasing, and the spatial distribution is from a ‘scattered primary coordination’ to a ‘marginal primary coordination’ following a northwestern ‘pocket’ pattern. The overall industrial economy is in its early stages of development in the Qinba Mountain Region, and the coordination between the adaptability of the industrial ecosystem and the coupling of resources and environmental carrying capacity is weak at this time; in the later stages of development, traffic access, population concentration and the industrial scale has gradually improved, and the resilience of resources and environmental carrying capacity has been increased, and the coupling coordination has been enhanced.

Keywords: mountainous industrial ecosystem; environmental bearing capacity; coupling coordination relationship; Qinba Mountain Region; county economy high-quality development

生态系统适应性是生态学的基础理论之一,随着人类经济社会的不断扩张发展,人-地生态系统的和谐发展逐渐成为全球环境变化-人文要素研究的主题之一^[1-4]。2021年3月颁布的《中华人民共和国国民经济和社会发展的第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》明确指出:要坚持生态优先、绿色发展,推进资源总量管理、科学配置、全面节约、循环利用,协同推进经济高质量发展和生态环境高水平保护。这充分证明,以人类为主体的社会经济活动与自然资源环境间的协同性、适应性是保证人地和谐的基础^[5]。中国正处在从资源导向发展转向创新导向发展的关键时期,未来仍有大量产业亟待发展,而受自然资源特别是土地、环境资源限制,传统产业的空间有限,亟需进一步拓展产业生态空间,协调产业-生态关联关系。我国国土空间中,山区占据约2/3的国土面积,拥有大量的发展空间,但同时山区也是人类与自然环境关系最为密切的区域之一,其区域内产业发展与资源环境承载力之间的矛盾较为突出,研究山区产业生态系统适应性与自然资源环境承载力之间的关系是科学规划产业空间布局和发展的基础,对于科学利用资源环境、实现产业经济高质量可持续发展具有重要意义。

目前关于产业生态系统适应性的研究大多侧重于对其科学评价和时空特征及演化的分析,主要包括:特殊经济区产业生态系统适应性的评价,如海洋产业的生态系统适应性时空演变^[6-10]、矿区城市产业生态系统适应性评介与分析等^[11-16],其中仇方道等^[15]基于生物学家达尔文的进化论中对生态适应性的阐述,首先提出产业生态系统适应性的内涵界定理论,并应用于东北矿业城市的产业生态系统适应性评价分析,为人文、经济地理学关于产业生态系统适应

性的研究奠定理论与方法基础。资源环境承载力是指一定时期内在保证自然环境不受损害并维系生态系统良好的前提下,特定区域的资源禀赋和环境容量所能承载的经济社会活动规模^[17],关于资源环境承载力,现有研究主要集中于以下几个方面:(1)资源环境承载力的概念及内涵界定与提出^[18-23],其首次提出于1972年,Meadows等^[24]在《增长的极限》中提出著名“世界模型”——DYNAMO模型论述;(2)资源环境承载力评价体系构建与评估,如从资源和环境两个层面构建资源环境承载力的评价指标体系的评估^[25-27]以及从“资源-环境-社会-经济”四维复合视角构建完善健全的综合评价指标体系等^[28-30];(3)资源环境承载力的时空演变分析,包括与开发强度的耦合时空演变^[31]、欠发达地区资源环境承载力的特征与影响因素研究等^[32]。山区产业相关研究方面,多数聚焦于以下几个方面:(1)山区产业的高效发展,如从特色旅游视角探究山区旅游业的发展路径等^[33-35];(2)山区人口-产业经济的分布格局及协调性关系,如从人口-经济-社会三元复合视角构建山区人口经济的分析体系等^[36-38]。

虽然国内外学者对产业生态系统适应性、资源环境承载力及山区产业经济展开了多方面的系统研究,但是在山区产业生态系统适应性与自然资源环境承载力两者之间的关联方面较为缺乏。生态系统适应性是否影响山区产业的生态化发展?资源环境承载力是否能承载山区产业的迅速扩张发展?山区产业生态系统适应性与自然资源环境承载力之间的关联关系到底如何?学术界并未给出明确答案,而两者的关系却是山区产业高质量可持续发展研究的基础。在不同资源环境承载力条件下组织合理的产业布局对协调生态保护与经济发展尤为重要,是国家“十四五”规划、各级国土空间规划的

重要内容之一,对于今后山区产业布局规划和资源利用政策的制定具有较强的指导借鉴价值。

本文以秦巴山区 81 个区县为研究区域,以 2010 年、2013 年、2016 年、2019 年为时间断面,运用 P-S-R 模型、熵权-TOPSIS 模型、Pearson 相关性指数及耦合协调度模型测算分析山区产业生态系统适应性指数与资源环境承载力指数,并对二者进行相关性及时空耦合协调关系分析,旨在为各级政府山区产业生态布局、资源环境保护战略的制定实施提供参考依据。

1 研究区概况

秦巴山区位于我国西南与西北交界地区(102°54′—112°40′E,30°50′—34°59′N),地势西高东低,海拔高度悬殊,地貌类型多以山地丘陵为主,间有盆地。国家发展和改革委员会于 2012 年 5 月颁布《秦巴山片区区域发展与扶贫攻坚规划(2011—2020 年)》,其中界定秦巴山区包含四川、河南、湖北、陕西、重庆、甘肃 6 个省市、80 个区县。2013 年 1 月 18 日,经国务院批准,撤销原巴中市巴州区恩阳镇,设立巴中市恩阳区,因此秦巴山区由原 80 个区县增加至 81 个。秦巴山区国土总面积约为 $2.25 \times 10^5 \text{ km}^2$,总人口约为 3 765 万人,为国务院于 2012 年确立的 11 个连片特困地区之一,经济发展水平较低,生态环境保护任务较为艰巨,亟需在保护自然资源生态的前提下,加大产业布局力度。因此,对秦巴山区产业生态系统适应性 with 资源环境承载力之间的关联分析具备一定的时效性与实践意义。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文社会经济数据来源于秦巴山区涉及的 5 省 1 市 2011—2020 年版的《统计年鉴》、政府相关部门官方网站以及各区县相应年份的《国民经济与社会发展统计公报》《中国县域统计年鉴》等。地理信息数据来源于自然资源部标准地图服务网站(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)的标准地图,利用 ArcGIS 10.3 提取制作秦巴山区研究区,底图无修改。

2.2 研究方法

2.2.1 数据归一化 由于数据单位指标、内涵意义各不相同,数据均处在不同量纲体系,无法直接参与模型计算,故参考相关研究^[39],利用 log 函数转换方法对山区产业生态系统适应性及资源环境承载力两个系统的原始数据进行标准化处理,使得研究数据均落在[0,1]区间,具体计算模型为:

$$X_i = \frac{\lg x_i}{\lg x_{\max}} \quad (1)$$

式中: X_i 为标准化后数据; x_i 为原始数据; x_{\max} 为该列原始数据的最大值。

2.2.2 山区产业生态系统适应性评价模型

(1) 评价指标体系构建。产业生态系统适应性是区域产业对生态环境系统反应程度的定量化表征,适应性综合指数越高,表示区域产业对自然生态环境变化的适应能力越强。参考相关学者关于产业生态系统适应性的分析模型,结合秦巴山区特殊自然资源环境及区位因素,考虑数据的获得性及科学性,研究将山区产业生态系统适应性分为山区产业及山区环境两个子系统,分别从敏感性、弹性以及稳定性 3 个层面,建立 4 层级 24 小项的评价指标体系,见表 1。其中,敏感性是指系统对内外环境变化反应灵敏度,敏感性与适应性一般呈现负相关关系,故指标选取时应考虑各子系统对环境变化反映的程度,产业子系统方面选取产业结构、采矿业、梯田、森林面积等反映山区产业的发展状况;环境子系统方面则从灾害、污染、能耗等方面选取研究指标。弹性是指系统受到压力扰动后的恢复力,反映了系统在承受环境变化时的自动调整能力,弹性越大,系统的适应能力越强,故指标选取应加大对系统上下弹性的关注,产业子系统通过经济产值、产业结构等定量表征其弹性;环境子系统则需更加关注环境提升方面能力,如从事科技生产人员数量、废弃物处理效率等。稳定性是指在遇到内外环境变化时,系统维持原有状态能力,系统内部越稳定,适应能力越强,在指标选取时应对应系统的稳定能力加以关注,产业子系统方面,产业非农化、能源再生化等皆为重点考虑指标;环境子系统方面则更多需要关注山区本身具有的资源禀赋、人类提供的区位优势等,如交通、山地面积等指标。指标体系中大多数指标能够从相应资料中直接获得,部分需经过初步计算获得,主要有:① 山区产业系统结构熵(Z_1)。 $Z_1 = \sum_{j=1}^n C_j \cdot \ln C_j$, C_j 为第 j 种产业比重, n 为第 n 种产业。② 非农产业结构指数。非农产业结构指数 = 第二、三产业产值之和/山区就业人口。③ 山区产业结构转换速率(Z_2)。 $Z_2 = \sqrt{[\sum (P_i - P_j)^2] \cdot N_i / P_j}$, P_i 为 i 产业平均增速, P_j 为地区 GDP 年平均增速, N_i 为第 i 产业占地区 GDP 的比重。

(2) 指标权重的确定。为消除主观性误差,考虑研究结论的科学性和客观性,研究采用均方差赋权方法确定山区产业生态系统适应性评价指标体系中各层次具体指标的权重。对二级(X_r)和三级(M_k)指标采用客观赋权方法计算其权重。计算步骤如下:

① 采用线性加权求和的方法计算二、三级指标的属性值;② 采用均方差赋权法计算二、三级指标权重,以二、三级指标属性值为随机变量,计算二、三级指标的权重值 W_r 和 W_k 。

(3) 评价模型。采用递阶多层次综合评价法对二级子系统适应性评价指数(XB_k)进行测算,采用加权求和方法计算各样本区县产业生态系统适应性综

合指数(N),具体计算步骤如下:

$$XB_k = \prod [\sum (Y_{ij} W_i)]^{W_k} \quad (2)$$

$$N = \sum_{r=1}^2 (XB_k W_r) \quad (3)$$

式中: Y 为产业子系统、环境子系统; Y_{ij} 为各具体指标的标准化值; W_i 为各具体指标的权重值; W_k 为第三层次指标的权重值; W_r 为子系统 r 的指标权重。

表 1 山区产业生态系统适应性评价指标体系

一级	二级	三级	具体指标	指标说明	权重
山区 产业 生态 系统 适应 性综 合指 数	山区 产业 子系 统适 应性 指数	敏感性	山区产业系统结构熵	反映山区产业系统的结构发育程度	0.046
			采矿业固定资产投资总额	反映山区产业的发展对矿产资源的攫取	0.045
		0.182	山区梯田面积	反映山区农业对水土流失的反应	0.049
			山区森林覆盖率	反映山区林业的发展	0.042
			地区生产总值	反映山区经济实力	0.041
		弹性	人均生产总值	反映山区经济质量	0.030
			第三产业增长弹性系数	反映山区第三产业增长与 GDP 增长	0.036
		0.146	第二产业增加值	反映山区主导产业增长状况	0.039
			山顶风能发电能力	反映山区电力及山区新能源发展状况	0.021
		0.472	稳定性	特色文化旅游收入占比	反映山区特色文化、旅游业发展状况
	非农产业结构指数			反映山区产业抵御风险能力	0.039
	每万人受教育指数			反映山区社会及教育基础发展状况	0.031
	泥石流、山体滑坡灾害影响面积			反映自然灾害对山区的影响	0.062
	工业废水排放量			反映山区环境污染状况	0.059
	0.223		万元 GDP 能耗	反映山区产业能耗水平	0.055
			工业固体废物产生量	反映山区垃圾填埋等固体废物产生状况	0.047
	弹性		山区产业结构转换速率	反映山区产业对环境变化的调整能力	0.052
			从事科技研究人员数量	反映山区产业科技支撑力度	0.026
			工业固体废物综合利用率	反映山区固体废物循环能力	0.044
		城乡居民收入比	反映山区城乡生活差距	0.054	
山区公路里程总数		反映山区基础设施发展状况	0.031		
0.528	稳定性	人均土地资源量	反映山区人均土地资源占有量	0.020	
		山地面积占国土面积比重	反映山地面积与国土面积的比重	0.026	
	山区自然保护区面积	反映山区自然保护区的发展状况	0.049		

2.2.3 山区资源环境承载力评价模型

(1) 评价指标体系构建。“压力-状态-响应(P-S-R)”模型是一种能够描述人类-自然复合生态系统可持续性变化的因果关系的经典模型^[40-41]。当前 P-S-R 模型已广泛应用于人地关系、生态环境可持续性发展等方面。资源环境承载力本质上是自然环境对人类社会生产活动的接纳能力,与产业、资源等密切相关。因此,基于前人研究基础,综合考虑社会、经济、资源、环境等构建 P-S-R 模型下的资源环境承载力评价指标体系,见表 2。其中,“压力”指标反映的是人类活动对自然环境的攫取载荷,主要包括人口、经济、固投等社会经济压力指标以及水耗、电耗、污染物使

用与排放等资源环境压力指标;“状态”指标反映的是自然环境以及人类活动的实际状况,主要包括环境基础状态(森林面积)、资源禀赋基础(水资源、粮食等)和社会经济发展现状(城镇化率、居民收入等)三方面;“响应”指标反映的是人类社会为保证自然环境稳定和提高区域承载力而采取的响应措施,主要为工业(废水、废气处理)和生活(环保支出、社销额等)两个方面的环境保护措施。

(2) 指标权重确定评价模型。为避免主观因素影响,得到较为客观的评价结论,参考借鉴相关研究成果,研究采用熵权-TOPSIS 模型计算各层级指标权重,测算资源环境承载力综合指数,具体计算过程

如下:

① 确定指标权重。熵权法客观赋权,计算指标权重:

$$W_i = \frac{1 - E_i}{m - \sum_{i=1}^m E_i} \quad (4)$$

$$E_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (5)$$

$$P_{ij} = Y_{ij} / \sum_{j=1}^n Y_{ij} \quad (6)$$

式中: W_i, E_i, P_{ij} 分别为指标的权重、信息熵以及特征比例;定义 $\ln 0 = 0$ 。

表 2 山区资源环境承载力评价指标体系

目标层	准则层	指标层	权重				
			2010 年	2013 年	2016 年	2019 年	
资源环境承载力	压力(P)	X ₁ 人口密度	0.0433	0.0247	0.0251	0.0452	
		X ₂ 地均 GDP	0.0636	0.0767	0.0849	0.0647	
		X ₃ 固定资产投资密度	0.0774	0.0387	0.0672	0.0474	
		X ₄ 万元 GDP 电耗	0.0075	0.0183	0.0233	0.0435	
		X ₅ 万元 GDP 水耗	0.0244	0.0212	0.0139	0.0337	
		X ₆ 万元工业增加值废水排放量	0.0225	0.0148	0.0130	0.0032	
		X ₇ 万元工业增加值废气排放量	0.0052	0.0120	0.0198	0.0096	
		X ₈ 化肥使用强度	0.0242	0.0124	0.0161	0.0364	
		X ₉ 森林覆盖率	0.1018	0.1041	0.1004	0.1101	
		X ₁₀ 人均耕地面积	0.0529	0.0529	0.0640	0.0443	
	状态(S)	X ₁₁ 人均水资源量	0.1215	0.1283	0.1505	0.1402	
		X ₁₂ 人均粮食产量	0.0602	0.0619	0.0397	0.0594	
		X ₁₃ 非农产业产值占 GDP 比例	0.0212	0.1222	0.0343	0.0146	
		X ₁₄ 城镇化率	0.0544	0.0497	0.0403	0.0605	
		X ₁₅ 农村居民人均纯收入	0.0282	0.0469	0.0377	0.0175	
		X ₁₆ 环境保护支出占 GDP 比例	0.0825	0.0424	0.0787	0.0589	
		X ₁₇ 工业废水中 COD 去除率	0.0711	0.0567	0.0344	0.0541	
		响应(R)	X ₁₈ 工业废气中烟粉尘去除率	0.0115	0.0189	0.0424	0.0522
			X ₁₉ 工业固体废物综合利用率	0.0480	0.0111	0.0112	0.0014
			X ₂₀ 人均社会消费品零售总额	0.0395	0.0589	0.0502	0.0706
			X ₂₁ 财政自给率	0.0390	0.0272	0.0529	0.0325

② 计算权重规范化矩阵。运用熵权 W_i 构建加权规范化矩阵 $\{Y_{ij}\}_{m \times n}$:

$$\{Z_{ij}\}_{m \times n} = \{Y_{ij} \times W_i\}_{m \times n} \quad (7)$$

③ 确定正(负)理想解。设 S_j^+ 和 S_j^- 分别为评价数据中第 i 个指标在 j 年内的最大值和最小值,即正理想解与负理想解。

$$S_j^+ = \{\max Z_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, m\} = \{Z_1^+, Z_2^+, \dots, Z_m^+\}$$

$$S_j^- = \{\min Z_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, m\} = \{Z_1^-, Z_2^-, \dots, Z_m^-\} \quad (8)$$

④ 计算与正(负)理想解的欧式距离。令 D_j^+ 为第 i 个指标与 S_j^+ 的距离, D_j^- 为第 i 个指标与 S_j^- 的距离。

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (S_j^+ - Z_{ij})^2}; D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (S_j^- - Z_{ij})^2} \quad (9)$$

⑤ 计算贴近度。令 M_j 为第 j 年评价对象接近

最优理想解的程度。

$$M_j = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-} \quad (10)$$

式中: M_j 取值范围 $(0, 1)$, 其中, M_j 越大, 说明该年评价对象越优。

2.2.4 山区产业生态系统适应性 with 资源环境承载力的相关性测算 对两个系统进行耦合协调性分析之前, 需先确定两者是否具有相关性, 研究以 Pearson 相关性系数^[42] 表征秦巴山区县域产业生态系统适应性及资源环境承载力之间的相关性大小, 以观测两个系统之间是否值得进行协调性分析。

2.2.5 山区产业生态系统适应性 with 资源环境承载力的耦合协调模型 耦合度是表征系统之间契合度高度的主要模型之一, 但由于产业生态系统适应性 with 资源环境承载力的相互作用, 不仅仅取决于二者的耦合度高低, 更重要的在于二者是否相互协调发展。因

此,为准确反映出两个系统之间的协同发展状态,引入耦合协调度模型,用以探究二者之间彼此影响、相互作用、和谐一致的程度^[31,43]。具体计算步骤如下:

$$L = \sqrt{D \times V}, D = \sqrt{\frac{N \times M}{(N+M)^2}}, V = \alpha \cdot N + \beta \cdot M \quad (11)$$

表3 系统耦合协调性判断矩阵

$L \in (0 \sim 0.09]$ 极度失调	$L \in (0.09 \sim 0.19]$ 严重失调	$L \in (0.19 \sim 0.29]$ 中度失调	$L \in (0.29 \sim 0.39]$ 轻度失调	$L \in (0.39 \sim 0.49]$ 濒临失调
$L \in (0.49 \sim 0.59]$ 勉强协调	$L \in (0.59 \sim 0.69]$ 初级协调	$L \in (0.69 \sim 0.79]$ 中级协调	$L \in (0.79 \sim 0.89]$ 良好协调	$L \in (0.89 \sim 1]$ 优质协调

3 结果与分析

3.1 山区产业生态系统适应性时空特征分析

利用数据分析工具,基于均方差赋权及递阶多层

式中: N 为山区产业生态系统适应性指数; M 为资源环境承载力指数; D 为二者耦合度; V 为总系统发展水平; α 和 β 用来描述两个子系统对总系统的贡献度,在此系统中两者同等重要,故 $\alpha = \beta = 0.5$ 。 L 为协调度,取值范围为 $[0, 1]$, L 越大,则二者越协调,协调性判断矩阵见表3。

次综合评价法,计算81个区县的山区产业生态系统适应性指数(N),并通过ArcGIS 10.3的自然间断点分级法(Jenks)将其划分为5个层次,以分析秦巴山区产业生态适应性时空特征,见图1、表4。

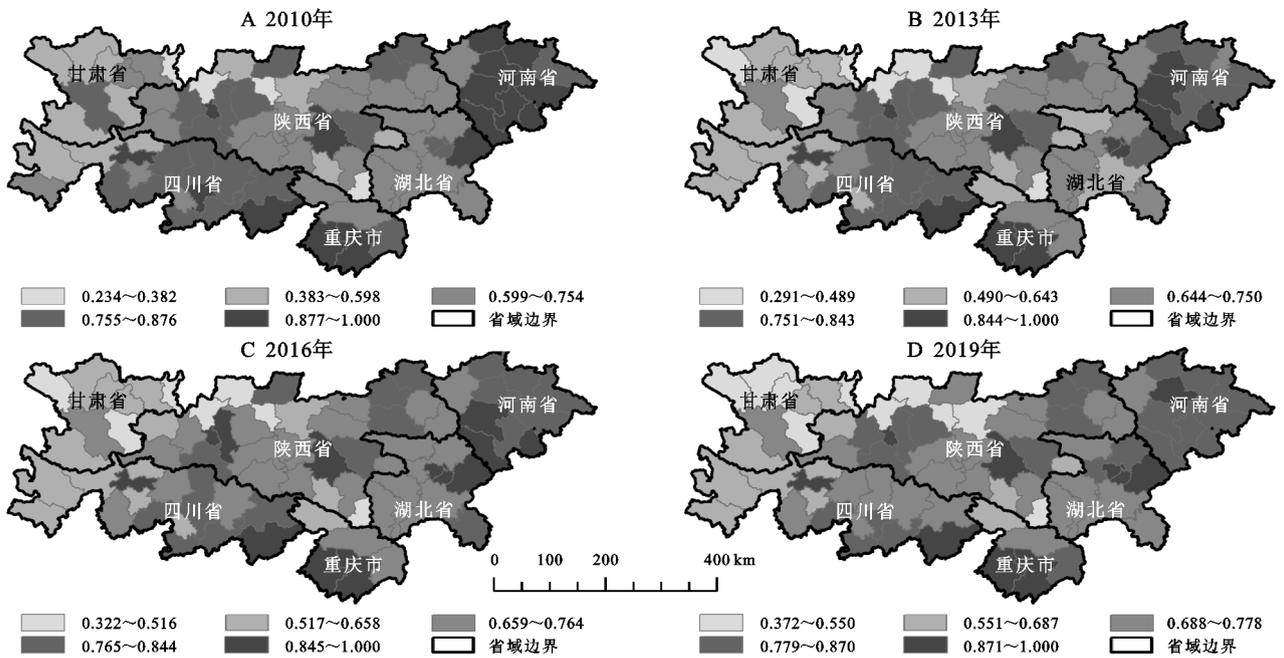


图1 秦巴山区产业生态系统适应性时空特征

表4 秦巴山区产业生态系统适应性相关指数均值变化

相关指数	2010年	2013年	2016年	2019年
山区产业生态系统适应性综合指数	0.720	0.749	0.788	0.766
山区产业子系统适应性指数	0.751	0.771	0.781	0.773
山区环境子系统适应性指数	0.692	0.729	0.794	0.760

秦巴山区产业生态系统适应性2010—2019年,呈现出先增后降的波动趋势。2010年、2013年、2016年和2019年产业生态系统适应性均值分别达到0.720,0.749,0.788,0.766,综合指数在数值上均处于0.7这个数量级,相互之间差别较小,分析发现,秦巴山区为中国集中连片特困区之一、扶贫的主战场、重要的生态保护区,在产业发展与自然生态保护层面的矛盾关系处理能力较差,对生态环境系统的适应能力也较差,长期保持在低效率的初级工业阶段,难以发

挥区域产业经济的稳定能力。从两个子系统来看,山区产业子系统及环境子系统的变化趋势与总系统综合指数的变化趋势高度一致,均表现为先增长后下降的趋势,也从另一方面反映出秦巴山区产业生态系统适应性的总体特征是产业与环境两者共同作用的结果。数据表明,2016—2019年山区产业生态系统适应性综合指数下降(0.788~0.766)的主要原因在于环境子系统适应性指数的大幅度下降(0.794~0.760)。深入分析发现,这4年间,秦巴山区产业经济的发展较为迅速,国家出台《秦巴山片区区域发展与扶贫攻坚规划(2011—2020年)》支持区域大力发展产业经济,而涉及的各省市也相继出台地方性扶贫规划措施,各区县的各项产业经济活动在此时间段较为

活跃,社会生产活动对自然资源环境的攫取较为频繁、力度较大,这使得原本生态系统较为敏感的秦巴山区遭受到进一步的威胁,从而导致环境子系统适应性在此期间波动较大,进而最终影响整个区域产业生态适应性的良性、高质量发展。

从区域分析,秦巴山区 2010—2019 年期间,产业生态系统适应性指数在整个区域内呈现出“整体均匀分布,高值区散点迸发、局部锐减,低值区部分集聚”的空间格局。研究发现,高产业生态系统适应性指数在 10 a 间大体上均为各山区各地级市市区所在行政区内,基本处于 $[0.8, 1]$ 的高位区间内,这与其实际经济社会发展水平分布较为一致。从典型的省级空间格局变化分析,发现在 2010—2019 年这 10 a 间,河南省从 2010 年的 8 个高值区县锐减到 2019 年的仅 1 个区县,减少幅度巨大。探究发现,河南省山区区县整体偏少,产业经济类型分布从 2010 年的自然资

源依赖型逐渐向平原产业经济发展,对山区自然资源的适应性随时间呈现逐渐下降的趋势,到时间截面末期的 2019 年,河南相关区县的社会经济产业活动已基本已全部聚集于平原区域,较少与山区自然环境交互,产业生态系统适应性自然下降。山区产业生态系统适应性低值区主要分布于陕西西北部及甘肃省大部,且均处于 $[0.2, 0.4]$ 这一低值区间,此区域山高且密,是秦岭、巴山腹地深处,经济发展水平极低,对环境的弹性及稳定性较差,适应自然资源环境变化的能力较低。

3.2 山区资源环境承载力时空特征分析

基于 P-S-R 模型,利用熵权-TOPSIS 模型计算秦巴山区资源环境承载力指数(M),并通过 ArcGIS 10.3 的自然间断点分级法(Jenks)将其划分为 5 个层次,以分析资源环境承载力在 2010—2019 年这 10 a 间的时空特征,见图 2、表 5。

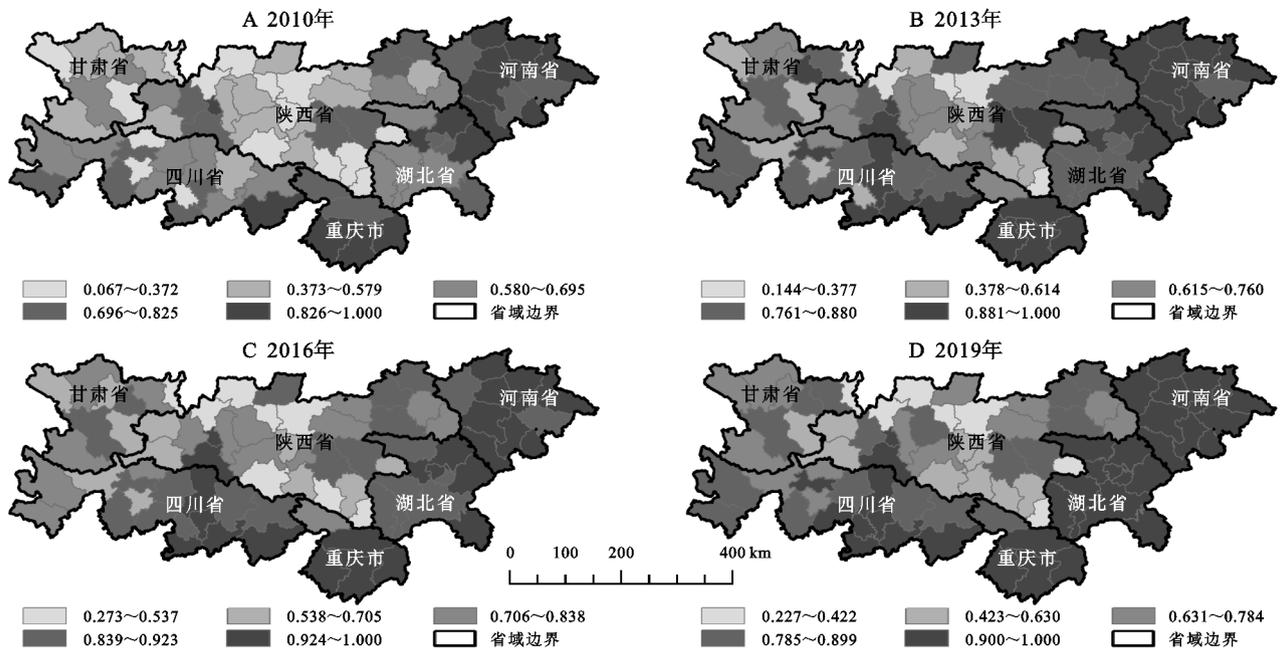


图 2 秦巴山区资源环境承载力时空特征

表 5 秦巴山区资源环境承载力相关指数均值变化

相关指数	2010年	2013年	2016年	2019年
资源环境承载力综合指数	0.622	0.776	0.815	0.796
压力指数(P)	0.689	0.869	0.899	0.899
状态指数(S)	0.702	0.781	0.734	0.678
响应指数(R)	0.440	0.672	0.873	0.883

从结果来看,秦巴山区资源环境承载力在 2010—2019 年呈先急速上升后缓步下降的趋势,整体维持在较高水平。2010 年、2013 年、2016 年、2019 年,81 个区县的均值分别达到 0.622,0.776,0.815,0.796,其中 2016 年均值最高,综合指数为 0.815,压力(P)指数达到 0.899,状态(S)指数偏低为 0.734,而响应(R)指

数则达到 0.873 的水平。导致此现象的原因是该区域 2013—2016 年为经济高速发展时期,由于产业经济发展而产生的对自然资源环境负压力,使得此区域的压力系数达到峰值($P=0.776\sim 0.899$),从而进一步提升区县对资源环境的响应力($R=0.672\sim 0.883$),但同时导致的结果就是原本维持高位的环境状态指数开始下降($S=0.781\sim 0.678$),最终产生高值资源环境承载力的出现。通过数据可知,2010 年秦巴山区 81 个区县的资源环境承载力综合指数最低,仅 0.622,从次级指标分析发现,该年的响应(R)指数仅为 0.440,在整个 10 a 间处于较低水平。究其原因,2010 年的秦

巴山区是中国集中连片特困地区的典型区域, 社会发展极端落后, 从而导致其对自然资源环境的响应 ($R=0.440$) 极低, 进而影响整体资源环境承载力的提高。2016—2019年4 a间, 秦巴山区区县资源环境承载力指数出现小幅度的下降 ($M=0.815\sim 0.796$), 研究发现, 从2016—2019年, 此区域经历了较为明显的状态 (S) 指数下降 ($S=0.734\sim 0.678$) 的情况, 原因是由于经济快速发展的同时, 忽略了当地的资源环境保护, 对环境不断的破坏和资源的不断攫取是使得状态 (S) 指数显著下降的主要原因。

由资源环境承载力综合指数时空分布分析可知 (图2), 秦巴山区2010—2019年整体呈现出较为明显的“凹”字型结构, 中间低四周高的分布特征显著。高值区域主要以“豫—鄂—渝—川”区县带的断续分布为主, 主要处在 $[0.8, 1]$ 区间范围内, 此区域为秦巴山区少有的“平原—盆地”分布带, 经济社会发展相对良好, 所属区县对自然资源环境的响应 (R) 和应压力 (P) 较高, 整体资源环境承载力较高。低值区域则主

要分布于陕西—甘肃一带狭长的西北—东南走向的秦岭、巴山走廊地区, 是 $[0.06, 0.2]$ 数值区间的主要分布区域, 此区域主要以连绵的高山为主要地形类型, 交通建设难度较大, 对外连通性较低, 区域经济联系较弱, 形成较为闭塞孤立的“区县岛”, 其内部可发展利用的土地资源等极度匮乏, 产业经济发展所需的物力、人力基础较为缺失, 区域整体由于产业发展对自然资源环境产生的压力 (P) 以及响应力 (R) 较小, 而相对较高的自然资源状态 (S) 指数不足以平衡较低的压力 (P) 和响应 (R) 指数, 进而使得资源环境承载力较小。

3.3 山区产业生态系统适应性与资源环境承载力的相互影响分析

3.3.1 相关性分析 利用递阶多层次综合评价法得到的山区产业生态系统适应性指数 (N), 以及通过 P-S-R 模型、熵权-TOPSIS 模型计算得到秦巴山区资源环境承载力指数 (M), 在相同时间截面对二者做相关性分析, 见图3。

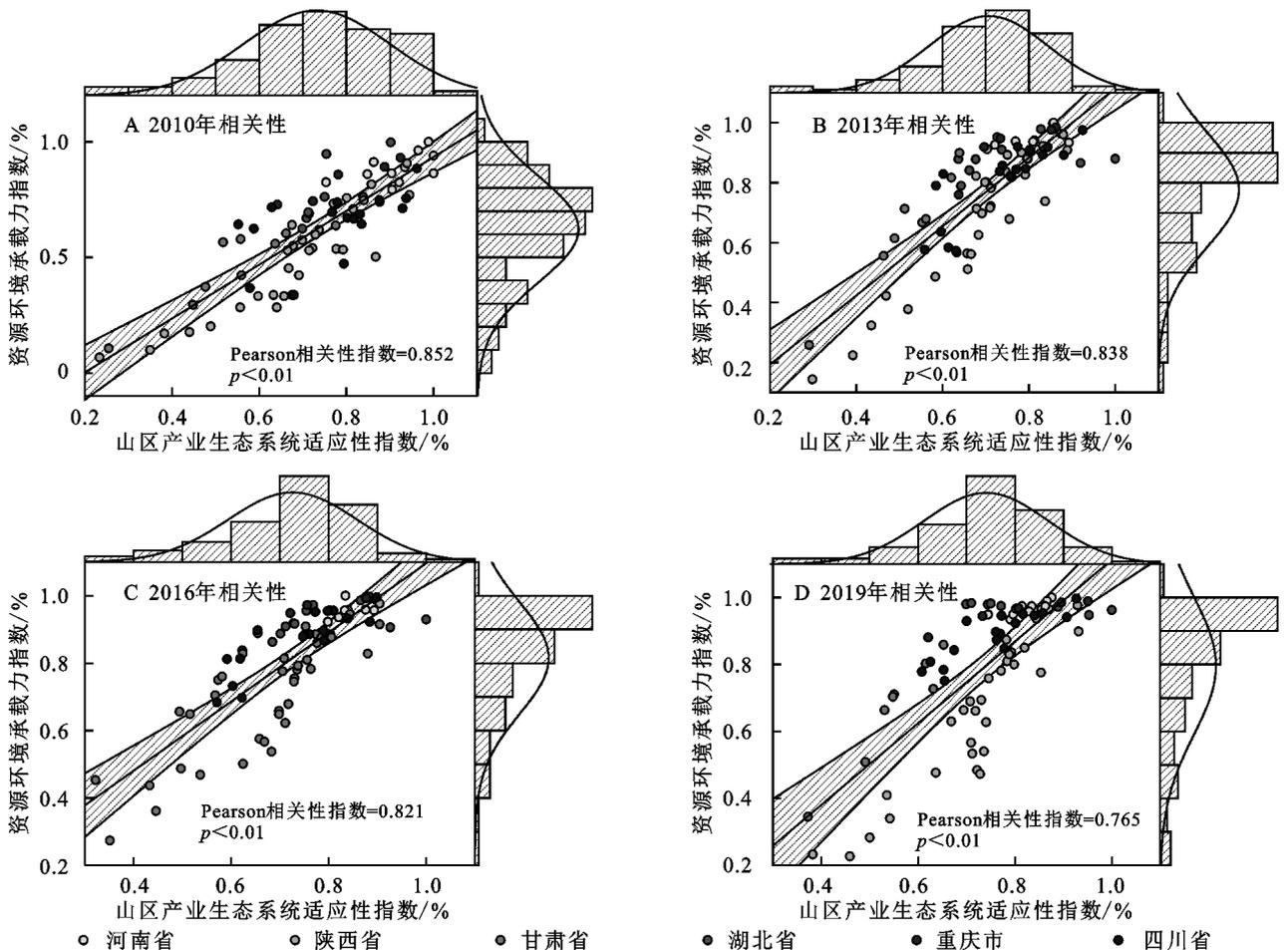


图3 不同时间点山区产业生态系统适应性与资源环境承载力的相关性

通过相关性分析发现, 秦巴山区2010—2019年10 a间, 山区产业生态系统适应性与资源环境承载力

存在较高的相关性关系, 4个时间断面的 Pearson 相关性指数分别达到 0.852, 0.838, 0.821, 0.765, 整体呈

现下降趋势。拟合回归结果表明,秦巴山区 81 个区县的产业生态系统适应性 with 资源环境承载力在 0.01 的置信水平下存在较为显著的正相关关系,即随着资源环境承载力的不断提高,产业生态系统适应性也在呈现上升趋势,要使得两者之间相互促进以达到较高水平,需通过较为明显的产业经济发展进程实现。

从相关性空间特征来看,河南、四川、重庆以及湖北较为集聚在散点图图像的右上角,表明这 4 个省的区县两者的相关性水平处于较高位置,产业生态系统适应性 with 资源环境承载力之间存在较为密切的相关性关系,拟合回归效果较好。通过边际直方图及分布曲线特征,发现产业生态系统适应性指数在 10 a 间

较为符合正态函数的统计分布特征,这也表示测算结果较为符合产业生态系统适应性的实际运行规律;而资源环境承载力的分布曲线仅 2010 年接近正态分布,其余年份则趋近于正态函数曲线的右侧阶段,整体发展水平滞后的分布规律特征明显。

3.3.2 耦合协调性分析 利用耦合协调分析模型,基于秦巴山区 81 个区县的产业生态系统适应性指数 (N) with 资源环境承载力指数 (M),测算 2010—2019 年的耦合协调度 (L),并根据表 3 的耦合协调性判断矩阵,利用 ArcGIS 10.3 绘制秦巴山区 2010 年、2013 年、2016 年、2019 年的耦合协调度空间分布图,进行时空演进分析,见图 4。

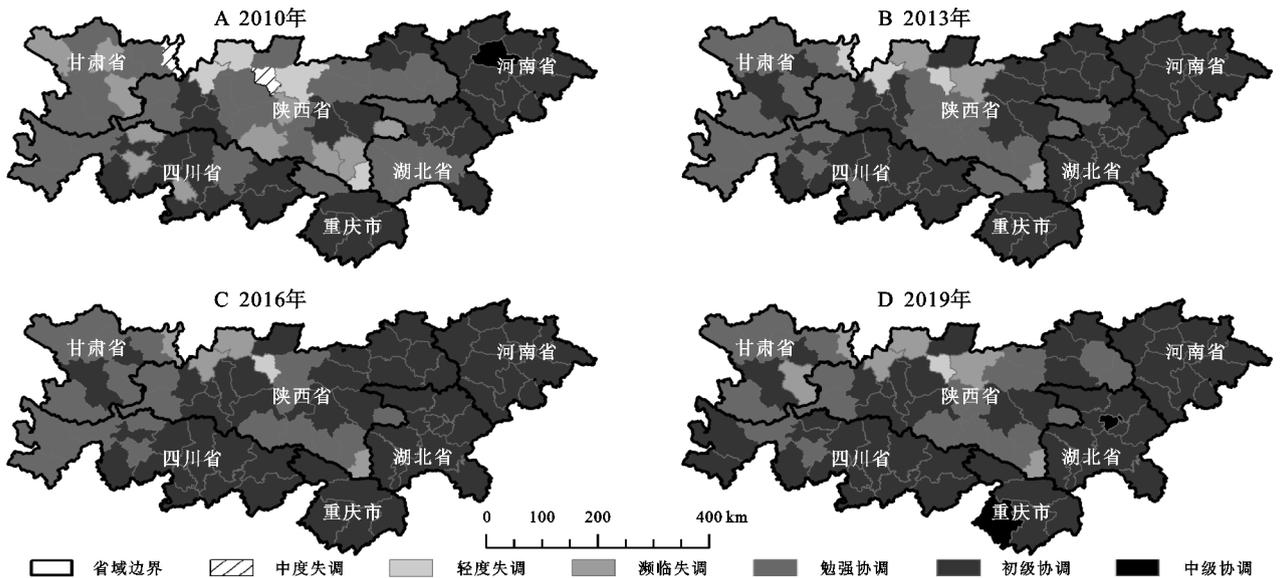


图 4 秦巴山区产业生态系统适应性 with 资源环境承载力的耦合协调性时空特征

秦巴山区 81 个区县山区产业生态系统适应性 with 资源环境承载力的协调度整体随时间推移逐渐呈现以初级协调为主,勉强协调为次的发展格局。2010 年、2013 年、2016 年、2019 年 4 个时间节点的耦合协调度均值分别为 0.571, 0.598, 0.612, 0.617, 前期大部分区县处于 (0.49~0.59] 的耦合协调度区间内,后期则以 (0.59~0.69] 区间为主。这表明秦巴山区大部分区县产业发展对资源环境的影响勉强能够达到适应性要求,山区产业生态系统适应性通过对自然资源环境稳定性的提高能够在一定程度上促进资源环境承载力对区域经济发展的支撑作用;反过来,资源环境承载力通过为产业发展提供基本的物质支持从而促进区域产业的进一步发展,进而使得山区产业生态系统适应性的敏感性与弹性提高,做出正确且高效的应对措施和反应。秦巴山区大部均处于轻度失调—初级协调之间,并且区县数量基本超过 40 余个,究其原因该片区初始经济发展水平较低,对资源环

境的利用不足,二者初步协调;但随时间推移,经济发展逐渐成为地区发展的主要目标,对资源环境的需求逐渐加大,二者开始趋向失调状态;而当经济发展水平达到一定高度,人们开始意识到对生态环境的保护,从而开始抑制对自然环境的开采,进而使得协调度持续上升,直到近年出现少数区县呈现出良好协调的状态。

空间分布上,2010—2019 年基本呈现由“散点初级协调”到“边缘初级协调”的“口袋”型分布态势,即前期初级协调状态主要以零散点蔓延在片区范围内,而随着进一步发展,边缘区县的初级协调状态逐渐聚集,形成一个朝向西北口的“口袋状”形态。陕西、甘肃两省的大部分区县为失调状态,原因在于产业经济发展水平低下而导致的产业生态系统适应性水平 (N) 处于“低稳”状态,而此处为自然资源较为丰富地区,秦岭、巴山在甘肃横向交汇,山区植物、动物等资源丰富度较高。因此,低的山区产业生态系统适应性

与高值资源环境承载力相耦合形成失调状的耦合协调度类型,而今后这一地区要提高二者协调度则应聚焦于产业经济的高效、高质量提升。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究是通过具有山区特色的量化指标将产业生态系统适应性基本理论与山区产业生态化相结合、将人地关系经典处理模型——PSR模型运用于山区资源环境承载力的评价及两者相关性与耦合关系的一次有益探索,针对县域山区产业生态系统适应性、资源环境承载力以及二者关联关系的相关启示与讨论如下:

(1) 县域山区产业生态系统适应性是处在山区的县域单元对自然资源环境变化的主动适应能力,它的高低表征了区域在当前资源环境下发展水平的高低。这种能力需要通过科学的方法和模型测算以获得相关县域的适应水平,为区域产业、生态、资源发展政策的提出提供科学且高效决策。山区产业子系统适应性表征了该区域产业在对外界刺激与变化而具有的反应力,这与当地的产业经济发展水平密切相关,而将其分解为敏感性、弹性以及稳定性3个方面衡量则从具体层面解答了产业适应性的基本含义。环境子系统则是基于作为客观物质实体的自然环境而提出的评价因素,环境本身对外界的变化如何衡量一直是较为复杂的问题,由于涉及自然、社会等多方面因素,始终处于较为缓慢的研究进展,但环境是整个产业生态系统的核心要素之一,自然生态环境是人类社会产业活动的基础,而目前山区产业结构不合理、生态环境保护联防联控的体制尚未成熟,极大地限制了生态环境的改善效率,进一步制约经济产业的高质量发展。随着国土空间规划及自然生态环境保护新要求的陆续提出,产业经济发展水平和自然生态环境保护意识逐渐提高,山区产业发展逐渐转向生态化、集约化发展,县域山区产业生态系统适应性也进一步提高,产业发展对山区环境的胁迫有所减弱。

(2) 资源环境承载力是自然生态环境最基本的内生力,人类社会生产活动的基础几乎都来自于自然环境,但世界资源不是无限的,具有一个较为清楚的承载力底线,其所能容纳和承载的人口以及相关社会性活动均有一个阈值,一旦突破自然资源环境的界限,资源环境将破裂而导致毁灭。因此,测算和衡量一个区域的资源环境承载力是有必要的,山区作为脆

弱性生态环境的典型,其所能提供给人们生产生活的物质极其有限,而如何在这样限制的条件下推动经济发展稳定而持续,值得深入探讨与研究。资源环境的压力来自于人类生产对其的攫取,从压力角度探究资源环境承载力有一定科学性,而当前环境所表现的状态则深刻影响着现在乃至未来产业的高质量发展,响应是资源环境对人类开采的具象化反映,是资源环境最直接、最根本的能力。“十四五”规划、国土空间规划较为明确地提出如何适应自然、尊重自然的新要求、新理念,而各级相关政府部门也相应出台法律法规以保障山区等生态敏感性地区的自然资源环境的持续稳定,山区资源环境承载力正逐渐提升,产业经济发展也逐渐转向生态化发展。

(3) 产业对自然生态的适应能力与自然生态对产业的承载能力是一对既相互促进又相互制约的共生体。一方面,产业适应能力的提高,导致对资源环境的攫取和破坏减小,使得资源环境承载力进一步提高。另一方面,资源环境承载力是产业适应性的前提,资源环境开放更高的承载能力,依托其发展的产业也将随之提升,而产业发展水平的提升则导致产业适应性稳定力的提高,二者在一定程度上具有相互促进、共同前进的特性。在山区这一特殊区域中,产业生态系统适应性 with 资源环境承载力之间的关联与矛盾作用更加突显,山区脆弱的生态制约着当地产业经济的持续向好发展,而低产值、低效率的初级产业经济又通过无形的压力掣肘着资源环境承载力的深度挖掘和提高,二者时常由于错位的发展而产生较为尖锐的矛盾。要解决产业生活与自然生态的冲突,需要从产业布局调整、技术创新实践以及专业人才引进等多项措施入手,以生态农业、技术型制造业等前瞻性的高附加值产业发展类型替代初级的资源依赖型产业,缓解社会产业活动压力,促使自然资源环境保持良性状态,优化自然生态响应力,提高资源环境承载力。

由于数据获取的限制,考虑的相关评价指标尚存在不足,如对于山区特色文化的具体量化变量考虑较少。下一步研究应基于实地调研、调查问卷等方式收集秦巴山区相关文化指标数据,增加文化旅游等指标对山区地域特色文化影响的综合分析。另外,自然资源环境的时变性规律、气候变化的地域差异也是未来山区资源环境承载力研究中需进一步深化的方面。

4.2 结论

研究基于产业生态系统适应性理论,构建山区产业生态系统适应性评价指标体系,以秦巴山区81个

区县为研究对象,测算和分析山区产业生态系统适应性时空格局特征;同时利用压力(P)-状态(S)-响应(R)模型及熵权-TOPSIS模型,分析秦巴山区资源环境承载力时空分异特征,并对二者进行相关性分析及耦合协调性分析,主要结论如下:

(1) 秦巴山区产业生态系统适应性 2010—2019年,时空分异特征明显。时间尺度上,2010年以来,秦巴山区产业生态系统适应性先上升后下降,由2010年的0.720上升到2016年的0.788,再开始下降到2019年的0.766,波动趋势明显,综合指数在数值上均处于0.7这个数量级,相互之间差别较小。山区产业子系统及环境子系统的变化趋势与总系统综合指数的变化趋势高度一致,环境子系统适应性指数的大幅度下降是导致山区产业生态系统适应性综合指数在2016—2019年下降的主要原因。空间分布方面,产业生态系统适应性指数在整个区域内呈现出“整体均匀分布,高值区散点迸发、局部锐减,低值区部分集聚”的空间格局。河南省相关区县下降程度最为显著,从2010年的8个高值区县迅速减少到2019年的仅1个区县,减少幅度巨大;而山区产业生态系统适应性低值区则主要分布于陕西西北部及甘肃省大部地区。

(2) 秦巴山区资源环境承载力在2010—2019年,时空演进较为显著,有较为明显演化过程。时间上为先急速上升后缓步下降的趋势,整体维持在较高水平,4个时间节点81个区县的均值分别达到0.622,0.776,0.815,0.796,而2016年均值最高是状态指数(S)偏低导致的结果。从2016—2019年,此区域经历了较为明显的状态指数(S)下降的情况,主要原因在于经济发展与自然生态保护相矛盾。时空分布方面,秦巴山区2010—2019年,整体呈现出较为明显的“凹”字型结构,中间低四周高的分布特征显著。高值区域主要以“豫—鄂—渝—川”区县带的断续分布为主,而低值区域则主要分布于陕西—甘肃一带狭长的西北—东南走向的秦岭、巴山走廊地区,形成较为明显的连续性闭塞“区县岛”。

(3) 秦巴山区产业生态系统适应性与资源环境承载力有较强的相关性,耦合协调关系较弱。相关性方面:秦巴山区2010—2019年10a间,山区产业生态系统适应性与资源环境承载力存在较高的相关性关系,4个时间断面的Pearson相关性指数分别达到0.852,0.838,0.821,0.765,整体呈现下降趋势;产业生态系统适应性与资源环境承载力在0.01的置信水

平下存在较为显著的正相关关系;河南、四川、重庆以及湖北的相关区县较为集聚在图像的右上角,这表明这4个省的区县两者的相关性水平处于较高位置,拟合回归效果较好。耦合协调性方面:秦巴山区81个区县山区产业生态系统适应性与资源环境承载力的协调度整体随时间推移逐渐呈现初级协调为主,勉强协调为次的发展格局;空间分布上,2010—2019年基本呈现由“散点初级协调”到“边缘初级协调”的“口袋型”分布态势,即前期初级协调状态主要以零散点蔓延在片区范围内,而随着产业经济进一步发展,边缘区县的初级协调状态逐渐聚集,形成朝向西北口的“口袋”状空间形态。

参考文献:

- [1] 尹莎,杨新军,陈佳.人地系统适应性研究进展:概念、理论框架与方法[J].地理科学进展,2021,40(2):330-342.
- [2] 刘志敏,叶超.社会-生态韧性视角下城乡治理的逻辑框架[J].地理科学进展,2021,40(1):95-103.
- [3] 史培军,王静爱,陈婧,等.当代地理学之人地相互作用研究的趋向:全球变化人类行为计划(IHDP)第六届开放会议透视[J].地理学报,2006,61(2):115-126.
- [4] 方修琦,殷培红.弹性、脆弱性和适应: IHDP 3个核心概念综述[J].地理科学进展,2007,26(5):11-22.
- [5] 冯漪,曹银贵,耿冰瑾,等.生态系统适应性管理:理论内涵与管理应用[J].农业资源与环境学报,2021,38(4):545-557.
- [6] 李博.海洋产业生态系统适应性研究初探及展望[J].海洋经济,2018,8(1):3-15.
- [7] 张志强.环渤海地区海洋产业生态系统适应性研究[D].辽宁大连:辽宁师范大学,2017.
- [8] 李博,张志强,苏飞,等.环渤海地区海洋产业生态系统适应性时空演变及影响因素[J].地理科学,2017,37(5):701-708.
- [9] 李博,张志强,苏飞,等.辽宁省海洋产业生态系统适应性测度研究[J].海洋开发与管理,2017,34(1):3-10.
- [10] 金校名,李博.中国沿海地区海洋渔业产业生态系统适应性循环过程及驱动机制[J].生态学报,2021,41(14):5857-5867.
- [11] 董长根.基于生态位理论的唐山市产业生态系统适应性研究[D].河北唐山:华北理工大学,2020.
- [12] 王晶,沙景华,周进生,等.霍邱矿业经济区产业生态系统适应性评价研究[J].资源与产业,2014,16(3):87-94.
- [13] 沈正平.《东北地区矿业城市产业生态系统适应性研究》评介[J].地理科学,2011,31(9):1157.
- [14] 董长根,甄翠敏,张亚楠.唐山市产业生态系统适应性水平综合评价[J].华北理工大学学报:社会科学版,2020,20(6):26-34.

- [15] 仇方道,佟连军,姜萌.东北地区矿业城市产业生态系统适应性评价[J].地理研究,2011,30(2):243-255.
- [16] 仇方道.东北地区矿业城市产业生态系统适应性研究[D].长春:东北师范大学,2009.
- [17] 邱鹏.西部地区资源环境承载力评价研究[J].软科学,2009,23(6):66-69.
- [18] UNESCO, FAO. Carrying Capacity Assessment With A Pilot Study of Kenya: A Resource Accounting Methodology for Exploring National Options for Sustainable Development[M]. Paris and Rome, Energy Studies Unit, Strathclyde University: 1985.
- [19] FAO. Potential population supporting capacities of lands in developing world[M]. Paris and Rome, Food & Agriculture Org.: 1982.
- [20] Bernard F E, Thom D J. Population pressure and human carrying capacity in selected locations of Machakos and Kitui districts[J]. Journal of Developing Areas, 1981, 15(3):381-406.
- [21] Garrett H. Cultural carrying capacity: a biological approach to human problems[J]. Focus, 1992,3(2):16-24.
- [22] Arrow K, Bolin B, Costanza R, et al. Economic growth, carrying capacity and the environment[J]. Ecological Economics, 1995,15(2):91-95.
- [23] Monte-Luna P D, Brook B W, Zetina-Rejón M, et al. The carrying capacity of ecosystems[J]. Global Ecology and Biogeography, 2004,13(6):485-495.
- [24] Meadows D H, Meadows D L, Randers J, et al. The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind[M]. New York: Universe Books, 1972.
- [25] 董文,张新,池天河.我国省级主体功能区划的资源环境承载力指标体系与评价方法[J].地球信息科学学报,2011,13(2):177-183.
- [26] 许明军,杨子生.西南山区资源环境承载力评价及协调发展分析:以云南省德宏州为例[J].自然资源学报,2016,31(10):1726-1738.
- [27] 陈晓雨婧,吴燕红,夏建新.甘肃省资源环境承载力监测预警[J].自然资源学报,2019,34(11):2378-2388.
- [28] 秦成,王红旗,田雅楠,等.资源环境承载力评价指标研究[J].中国人口·资源与环境,2011,21(S2):335-338.
- [29] 雷勋平,邱广华.基于熵权 TOPSIS 模型的区域资源环境承载力评价实证研究[J].环境科学学报,2016,36(1):314-323.
- [30] 杨亮洁,杨永春.甘肃省资源环境承载力时空分异[J].生态学报,2017,37(20):7000-7017.
- [31] 段佩利,刘曙光,尹鹏,等.中国沿海城市开发强度与资源环境承载力时空耦合协调关系[J].经济地理,2018,38(5):60-67.
- [32] 周侃,樊杰.中国欠发达地区资源环境承载力特征与影响因素:以宁夏西海固地区和云南怒江州为例[J].地理研究,2015,34(1):39-52.
- [33] 李瑛,黄丹,朱莹,等.景区带村扶贫模式下农户参与旅游的经济效率:以秦巴山区旅游扶贫重点村为例[J].资源科学,2020,42(9):1827-1836.
- [34] 宋小叶,王宜强.城市郊区新型城镇化建设的旅游经济效应特征:以重庆市璧山区为例[J].亚热带资源与环境学报,2020,15(2):49-56.
- [35] 常建霞,李君轶,李振亭,等.秦巴山区旅游资源分布与旅游经济耦合研究[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2020,48(1):1-10.
- [36] 程东亚,李旭东.贵州乌蒙山区人口-经济-农业生态环境耦合协调关系研究[J].世界地理研究,2021,30(1):125-135.
- [37] 唐波,肖欣.粤北山区社会-生态-经济系统恢复力及其协调度[J].水土保持通报,2020,40(5):218-226.
- [38] 敬博,李同昇,温伯清,等.基于地形因素的秦巴山区人口-经济空间格局及其影响机制研究[J].地理科学,2020,40(5):793-803.
- [39] 刘竞妍,张可,王桂华.综合评价中数据标准化方法比较研究[J].数字技术与应用,2018,36(6):84-85.
- [40] 彭建,吴健生,潘雅婧,等.基于 PSR 模型的区域生态持续性评价概念框架[J].地理科学进展,2012,31(7):933-940.
- [41] 孙永胜,佟连军.吉林省限制开发区域资源环境承载力综合评价[J].自然资源学报,2021,36(3):634-645.
- [42] 赵睿,焦利民,许刚,等.城市空间增长与人口密度变化之间的关联关系[J].地理学报,2020,75(4):695-707.
- [43] 杨卫丽,谭景柏,刘道辉,等.城市创新效率与经济高质量发展的耦合关系及其时空分异特征研究[J].统计与信息论坛,2021,36(6):104-119.