

基于生态位视角的陕西省区域创新生态系统安全测度及预警

吴艳霞, 蒋明月, 杨帅帅

(西安理工大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710054)

摘要: [目的] 分析陕西省区域创新生态系统安全发展状况并对其安全演变趋势进行预警, 为实现陕西省区域创新生态系统的经济可持续的高质量发展提供科学依据。[方法] 基于生态位视角构建了一个包含开放性、生长性、协同性和可持续性 4 个维度的区域创新生态系统安全测度指标体系, 利用生态位适宜度模型对 2011—2020 年陕西省区域创新生态系统安全状况进行了测度分析, 并利用 BP 神经网络模型预测 2021—2024 年陕西省区域创新生态系统安全警情演变趋势。[结果] ① 陕西省区域创新生态系统安全水平在 2011—2020 年间总体呈现出稳定上升的态势, 表明区域创新发展具有良好的基础和潜力。② 陕西省区域创新生态系统安全警情在 2021—2024 年间将继续保持向好的趋势, 但仍呈南北低、中部高的分布特征。[结论] 陕西省区域创新生态系统安全状况整体呈现良好的演变趋势, 但各地级市的创新生态系统安全存在明显的两极分化现象。因此仍需采取相关措施进一步缩小其区域间的差距从而促进陕西省区域创新生态系统的健康发展。

关键词: 生态位; 生态系统安全; 生态位适宜度模型; 预警; BP 神经网络模型; 区域创新; 陕西省

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2024)01-0086-11

中图分类号: X321, F127

文献参数: 吴艳霞, 蒋明月, 杨帅帅. 基于生态位视角的陕西省区域创新生态系统安全测度及预警[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 86-96. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.010; Wu Yanxia, Jiang Mingyue, Yang Shuaishuai. Security measurement and early warning of regional innovation ecosystem in Shaanxi Province from ecological niche perspective [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 86-96.

Security Measurement and Early Warning of Regional Innovation Ecosystem in Shaanxi Province from Ecological Niche Perspective

Wu Yanxia, Jiang Mingyue, Yang Shuaishuai

(School of Economics and Management, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: [Objective] Developing condition and early warning research was studied with regard to the security of Shaanxi regional innovation ecosystem in order to provide a theoretical basis for the safe development of Shaanxi regional innovation ecosystem. [Methods] A security measurement index system of the regional innovation ecosystem was constructed based on the niche perspective that included the four dimensions of openness, growth, synergy, and sustainability. The security status of the regional innovation ecosystem in Shaanxi Province from 2011 to 2020 was measured and analyzed by using a niche suitability model. The BP neural network model was used to predict the evolution trend of the regional innovation ecosystem security alarm in Shaanxi Province from 2021 to 2024. [Results] ① The security status of the regional innovation ecosystem in Shaanxi Province showed a steady increase during 2011—2020, indicating that regional innovation development had a good foundation and potential. ② The security status of the regional innovation ecosystem in Shaanxi Province would continue to improve from 2021 to 2024, but the status would still be lower in the north and south and higher in the central part of the province. [Conclusion] The security status of regional innovation ecosystem in Shaanxi Province shows a good trend of evolution,

收稿日期: 2023-06-02

修回日期: 2023-08-11

资助项目: 陕西省社会科学资助项目“基于生态位视角的陕西区域创新生态系统安全测度及预警研究”(2020D044); 国家社会科学基金一般项目“新发展阶段黄河流域生态安全评价、预警及实现机制研究”(21BJY169)

第一作者: 吴艳霞(1964—), 女(汉族), 江苏省南京市人, 博士, 教授, 主要从事技术经济及管理、区域经济发展方面的研究。Email: 2214861742@qq.com。

通信作者: 蒋明月(1997—), 女(汉族), 四川省绵阳市人, 硕士研究生, 研究方向为技术经济及管理。Email: 1103926122@qq.com。

but the innovation ecosystem security of prefecture-level cities has obvious polarization. Therefore, it is still necessary to take relevant measures to further narrow the gap between regions so as to promote the healthy development of Shaanxi regional innovation ecosystem.

Keywords: ecological niche; ecosystem security; niche suitability model; early warning; BP neural network mode; regional innovation; Shaanxi Province

近年来,国内外学者对区域创新生态系统的研究主要集中在区域创新生态系统的内涵、运行演化及评价方法 3 个方面的研究。关于内涵方面,至今对区域创新生态系统的定义尚未形成统一,国外有学者提出区域创新生态系统是生态系统^[1]—创新生态系统^[2]—国家创新系统^[3]—区域创新系统^[4]的延展;国内有学者提出区域技术创新生态系统是指在一定空间范围内技术创新复合组织与技术创新复合环境,通过创新物质、能量和信息流动而相互作用、相互依存形成的系统^[5]。关于运行演化方面,曹祎遐等^[6]构建了技术创新生态系统的模型,强调了整个创新生态系统的运行与发展是系统内部的相互影响作用。张妮等^[7]在区域创新生态视角研究通过实证研究得出其可持续性运行机制的 4 条发展建设路径。关于评价方面,区域创新生态系统的测度研究逐渐受到学者的青睐,而生态位作为生态学的一个重要概念,逐渐被引入到其研究之中。生态位理论概念的研究大致分为:萌芽时期,规范化时期,定量化时期,成熟完善时期;从最初的“空间生态位”^[8]、到“功能生态位”^[9]再到“N 维超体积生态位”^[10-11]等理论。本文基于 McInerny G. J. 等^[12]学者的研究,认为生态位是指一个用来表示有机体和生态系统之间的某种关系的抽象术语,它不仅包括有机体的位置,还包括有机体与环境之间的相互关系。他们认为,这种关系可以是一种动态的和可持续发展的关系,并且认为这种关系可以通过时间和空间来进行测量和控制。因此,现阶段众多学者开始了对区域创新生态系统生态位评价的相关研究。周青等^[13]从区域创新生态系统结构;创新群体、创新资源、经济环境、技术环境方面构建生态位适宜度测度指标体系;覃荔荔等^[14]从创新资源、效率、潜力及活力构建指标体系并基于绝对生态位及相对生态位模型测度湖南省区域创新生态系统的可持续性。此外,区域创新生态系统的生态位的协同性^[15-16]、健康性^[17-19]也颇受关注。

纵观已有研究,目前对区域创新生态系统的基础性研究已较为成熟,这些研究为深入理解区域创新生态系统安全的本质和规律提供了有益的启示。但也存在一些不足之处,主要表现在以下两个方面:第一,少有研究在构建区域创新生态系统安全测度指标体系时,充分考虑区域创新生态系统运行的有机性和

发展性,而这两个特征是影响系统安全的重要因素。因此区域创新生态系统的安全测度是一个多维度、多层次、多标准的问题,需要综合考虑系统内部和外部的各种因素的整合与适应;第二,现有关创新生态系统的安全测度研究缺乏对陕西省各地级市进行分析,且大多集中在对区域的现阶段分析,对未来的安全发展演变趋势研究较少。鉴于此,本文选择能表征区域创新生态系统有机性和发展性的关键生态特征(生长性、协同性、开放性和可持续性)来构建多维度的陕西省区域创新生态系统安全测度体系,并根据安全测度值分析陕西省及其各市在研究期间的区域创新生态系统安全状况。同时运用 BP 神经网络模型预测其未来 4 a 的发展趋势,针对陕西省区域创新生态系统安全方面存在的问题和挑战提出相应的建议。

1 研究方法

1.1 生态位视角下的区域创新生态系统机理分析

本文借鉴生态位理论,将区域创新生态系统定义为是在一定的地区内,创新主体之间及其与资源、技术及环境之间形成了一种相互依存的协调创新链,从而构建了一个均衡系统,使得这个地区实现了共生和协调的发展。此外本文根据已有研究认为区域创新生态系统划分为物种维度和非物种维度,其中物种维度由创新主体代表^[19-20]。非物种维度包括资源、环境、技术等生态位。资源生态位,涉及创新主体在创新生态系统中所占有和所需求的各类相关资源,如人力、经费、设施等。环境生态位,指创新主体在技术创新、成果转化过程中所依赖的环境,即与创新群落成长发展相关的环境生态因子,如经济环境、生态环境、社会环境。技术生态位,反映创新主体进行成果转化所需要具备的技术资源状况。

为了探讨生态位视角下的区域创新生态系统的运行机理,本文根据刘钊等^[10]研究成果选择开放性、多样性、成长性和可持续性 4 个维度,反映创新主体与资源、技术和环境生态位之间的关系。具体来说:①创新主体与资源生态位之间要保持开放性,开放是创新生态系统演化的重要外部条件,开放程度影响着资源要素的丰富程度。通过这种联系以获取和利用更多的外部资源和更高质量的信息,促进创新资源的

流动和交换,增加创新主体的选择和机会,提高创新效率和效果。②创新主体与技术生态位之间要保持生长性,推动创新主体不断探索和突破技术边界,且创新主体从低级向高级成长过程必然依赖于技术生态位,才能实现创新主体的价值增值,提升创新活动的质量和水平。以探索和突破技术边界,提高创新质量和水平。③创新主体与环境生态位之间要保持可持续性,使创新主体在形成多样性共生的生态特征的前提下进行创新活动,以实现自我修复调节、抗风险应变、绿色发展等目标,最终实现创新活动的长期

发展和社会效益。④创新主体与资源、技术及环境各生态位之间要保持协同性,在不同生态位之间建立有效的沟通和协作关系,实现创新活动的协调和优化,提高创新活动的综合效益和竞争力。以上这 4 个维度构成了区域创新生态系统运转机制的基本框架,在这个框架下各个子系统之间通过物质能量传递和信息交流实现有序链接,形成“链环回路”结构,保障了区域创新生态系统各环节功能常态化运转。本文具体的生态位视角下创新生态系统运行机理如图 1 所示。

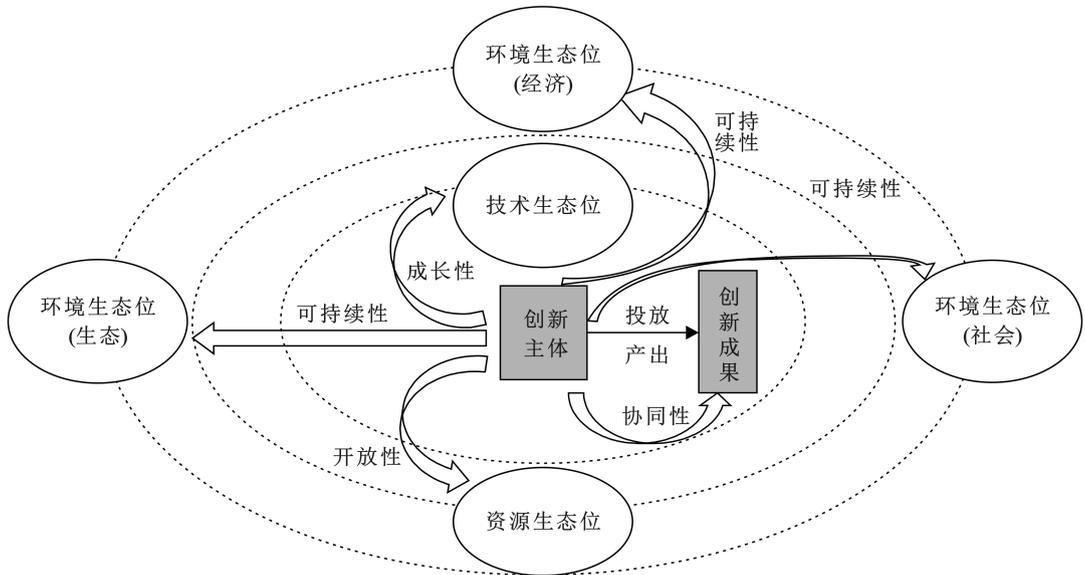


图 1 生态位视角下的区域创新生态系统运行机理

Fig.1 Operation mechanism of regional innovation ecosystem from perspective of niche

1.2 指标体系构建

本文遵循科学性、可比性、可获得性、可靠性、完备性和代表性等原则,在刘钊等^[10]、吴艳霞等^[17]、韩英等^[19]的研究成果基础上,测度指标体系从创新生态系统特性的出发,选择了开放性、协同性、持续性、生长性 4 个维度作为生态因子的评价指标(表 1),能够更为清晰地展示区域创新生态系统的安全演化特性。

1.3 创新生态系统安全测度模型

对于区域创新生态系统的安全测度,生态位适宜度模型可以提供有价值的信息。根据文献^[11, 21-23]可知该模型可以评估不同物种在该生态系统中的适宜度,包括其与其他物种的关系以及与环境的互动关系等,这些信息可以用于预测和评估不同组成部分对生态系统的可持续发展和稳定性的影响。因此,本文利用生态位适宜度模型对陕西区域创新生态系统安全进行测度以及进化动量的测算,并将生测度值进行安全等级划分,即将安全测度值与一个预先确定的

安全等级阈值进行比较,如果其值高于阈值则划分为安全等级较高,反之则划分为安全等级较低。基于此,获得更真实可靠的陕西区域创新生态系统安全测度结果,并分析各生态因子在创新生态系统中的所处的安全状况,使测度结果更具客观性。

一般情况下,生态位模型设有 m 个区域创新生态系统, n 个创新生态因子。 X_{ij} ($i=1, 2, 3 \dots m, j=1, 2, 3 \dots n$) 指第 i 个区域创新生态系统的第 j 个生态因子的实际生态位,则不同区域的生态因子构成了 $m \times n$ 维生态位空间。具体的生态位适宜度模型构建如下:

(1) 标准化处理。由于实测指标的单位存在差异,对数据进行标准化处理,消除量纲影响:

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \min X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} \quad (1)$$

式中: $\max X_{ij}$ 为 X_{ij} ($i=1, 2 \dots m; j=1, 2 \dots n$) 中第 j 个生态因子序列的最大值; $\min X_{ij}$ 为 X_{ij} ($i=1, 2 \dots m; j=1, 2 \dots n$) 中的第 j 个生态因子序列的最小值。

表 1 区域创新生态系统安全测度指标体系
Table 1 Security measurement index system of regional innovation ecosystem

测度目标	一级指标	二级指标	权重
开放性		每万人吸引外商投资额/万元	0.073
		进出口总额/万元	0.081
	成长性	高科技企业数/个	0.058
		规模以上工业企业数/个	0.041
		年末金融机构贷款余额增长率/%	0.037
		城市化水平/%	0.035
		城镇居民人均可支配收入/元	0.026
		地均 GDP/亿元	0.036
		地方财政教育投入占地方财政支出比重/%	0.037
		每万人在校大学生数/人	0.040
可持续性		每百人公共图书馆藏书拥有量/册	0.050
		每万人移动电话用户数/部	0.037
	可持性	每万人互联网宽带接入用户数/户	0.058
		城市污水处理率/(10 ⁴ t/d)	0.026
		生活垃圾无害化处理率/(10 ⁴ t/d)	0.027
		每千人口拥有医院床位数/张	0.037
		第三产业增加值占地区 GDP 比重/%	0.063
		万名从业人口中科学技术人员数/人	0.035
		第二产业劳动生产率/(元/人)	0.038
		城市人均绿地面积/m ²	0.052
协同性		每万人发明专利授权量	0.057
		地方财政科技投入占地方财政支出比重/%	0.055

域创新生态系统适宜度的影响程度; $\epsilon (0 \leq \epsilon \leq 1)$ 为模型的参数,其值通过 $S_i = 0.5$ 计算得出。

(5) 计算进化动量 EM, 进化动量体现的是评价对象生态位适宜度的进化空间。

$$EM_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n |Z_{ij} - Z_{aj}|}{n}} \quad (7)$$

式中: $i = 1, 2 \dots m; j = 1, 2 \dots n$ 。

1.4 创新生态系统安全预警模型

区域创新生态系统安全是一个非线性、复杂、开放的系统,在预警之前必须选择合适的模型对区域创新生态安全各影响因素的发展态势进行预测。人工神经网络具有出色的非线性识别、自适应、自组织和自学习能力,可以“识别”生态系统中的安全系统中各影响因素之间有复杂的因果关系,并利用系统结构来进行预测。此外,人工神经网络的设计很灵活,可以更真实地模拟真实的生态安全系统。基于以上考虑,本文选择了 BP 神经网络模型来预测陕西省未来 4 a 创新生态系统安全的状况。

BP 神经网络一般包括输入层 (input layer)、隐含层 (hide layer)、输出层 (output layer) 或 3 层以上的结构,是一种并行且多层的前馈网络。其具体计算过程及学习效果检验如下:

1.4.1 BP 神经网络计算过程

(1) 确定层数及神经元数。

BP 神经网络的输入层、输出层以及隐含层的层数以及神经元数需要在神经网络初始化伊始给予确定,输入层与输出层的层数只有一层,因此只需要对隐含层层数进行确定,通常都是使用单一隐含层。

关于隐含层的神经元个数的确定,不同学者给出了不同方法,各类公式为:

$$k < \sum_{i=0}^n C\left(\frac{n_1}{i}\right) \quad (8)$$

式中: k 为样本数量; n_1 是隐含层神经元个数,若是 $i > n_1, C\left(\frac{n_1}{i}\right) = 0$; n 为输入层的神经元个数。

$$n_1 = \sqrt{n+m} + a \quad (9)$$

式中: m 是输出层神经元个数; a 为取值在 $0 \sim 1$ 之间的常数项,

$$n_1 = \log_2 n \quad (10)$$

式中: 在应用时利用上一个的公式计算出取值范围,

$$n_1 = 2m + 1 \quad (11)$$

$$s = \sqrt{0.43mn + 2012n^2 + 2.54m + 0.77n + 0.35} + 0.51 \quad (12)$$

$$n_2 = \begin{cases} n + 0.618(n - m) & (n \geq m) \\ n - 0.618(m - n) & (n \leq m) \end{cases} \quad (13)$$

(2) 生态因子权重的确定。采用熵值赋权法对各子系统内序参量指标权重进行确定,具体步骤为:首先计算第 i 个样本第 j 个指标的比重 λ_{ij} 。

$$\lambda_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^m Z_{ij}} \quad (2)$$

接着计算指标熵值

$$e_j = \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m \lambda_{ij} \ln \lambda_{ij} \quad (3)$$

最后确定指标权重

$$\omega_j = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j} \quad (4)$$

(3) 最佳生态位的确定。假设 Z_{ij} 表示第 i 个创新生态系统生态因子 j 的现实生态位, $Z_{aj} (j = 1, 2 \dots n)$ 表示第 j 个生态位因子的最佳生态位。即:

$$Z_{aj} = \max Z_{ij} \quad (5)$$

式中: $j = 1, 2 \dots n$ 。

(4) 创建生态位适宜度。

$$S_i = \sum_{j=1}^n \omega_j \frac{\min |Z_{ij} - Z_{aj}| + \epsilon \max |Z_{ij} - Z_{aj}|}{|Z_{ij} - Z_{aj}| + \max |Z_{ij} - Z_{aj}|} \quad (6)$$

式中: S_i 表示第 i 个区域创新生态系统的生态位适宜度; ω_j 为生态因子的权重,反映第 j 个生态因子对区

(2) 正向传播过程。

3 个网络层的神经元数分别为 m, n, h 个, 分别以向量表示为:

$$x \in R_m, x = (x_1, x_2 \cdots x_m) \quad (14)$$

$$y \in R_n, y = (y_1, y_2 \cdots y_n) \quad (15)$$

$$z \in R_h, z = (z_1, z_2 \cdots z_h) \quad (16)$$

隐含层节点和输出层节点的计算公式分别见式(17)和式(18), 传递函数见式(19), W_{ij} 和 b_j 分别为隐含层和输入层之间的权值和阈值, W_{jk} 和 b_k 分别是隐含层和输出层之间的权值和阈值:

$$y_j = f\left(\sum_{i=1}^m W_{ij} X_i - b_j\right) \quad (17)$$

$$Z_k = f\left(\sum_{j=1}^n W_{jk} Y_j - b_k\right) \quad (18)$$

$$f(x) = \frac{1 - \exp(-x)}{1 + \exp(-x)} \quad (19)$$

输出节点误差的计算公式为:

$$e = \frac{1}{2} \sum_k (t_k - Z_k)^2 = \frac{1}{2} \sum_k \{t_k - f[\sum_{j=1}^n W_{jk} f(\sum_{i=1}^m W_{ij} x_i - b_j) - b_k]\}^2 \quad (20)$$

式中: Z_k 和 t_k 分别为实际输出值和期望输出值。

总误差为下列公式, 其中 p 为样本数:

$$E = \sum_{i=1}^p e_i < \epsilon \quad (21)$$

(3) 反向传播过程。

隐含层与输出层之间的误差计算公式为下列第一个式子, 权值更新和阈值更新计算公式分别为后两个公式, 式中的 n_0 为迭代次数:

$$\delta_k = (t_k - Z_k) Z_k (1 - Z_k) \quad (22)$$

$$W_{jk}(n_0 + 1) = W_{jk}(n_0) + \eta \sum_{pi=1}^p \delta_k h_j \quad (23)$$

$$b_k(n_0 + 1) = b_k(n_0) + \eta \sum_{pi=1}^p \delta_k \quad (24)$$

隐含层与输入层的误差计算公式为:

$$\delta_j = h_j (1 - h_j) \sum_{k=1}^l \delta_k W_{jk} \quad (25)$$

权值更新的计算公式为:

$$W_{ij}(n_0 + 1) = W_{ij}(n_0) + \eta \sum_{pi=1}^p \delta_j x_i \quad (26)$$

阈值更新的计算公式为:

$$b_j(n_0 + 1) = b_j(n_0) + \eta \sum_{pi=1}^p \delta_j \quad (27)$$

1.4.2 BP 神经网络模型学习效果检验 将 BP 神经网络的输出数据与真实数据进行对比, 以检验所建模型的正确性。当输出值与真实值之间的差异的绝对值在规定的范围内时, 则表示所建立的 BP 神经网络模型能够对输出值与真实值之间的联系进行有效的度量, 并且该模型有很好的推广和预测能力。相对来

说, 当输出量和真实量之间的绝对差距超过了这个定义的极限时, 这个模型就被认为是不具有有效性的。本研究采用均方根误差 RMSE 对第 j 个神经元输出值的 BP 学习结果进行误差检验。计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (y_{jt} - Y_{jt})^2}{T}} \quad (28)$$

式中: y_{jt} 和 Y_{jt} 分别为第 t 个样本的第 j 个神经元的实际值、输出值; $\overline{y_{jt}}$ 为 y_{jt} 的平均值; T 为样本数。

当 $RMSE < 0.04$ 时, 就可以认为模型的学习效果较好。

最后, 根据以上模型的安全测度及预警结果进行等级划分, 并参照大量相关学者的成果^[20,24-29], 具体的创新生态系统安全状况划分等级见表 2。

表 2 创新生态系统安全等级划分及预警判别标准
Table 2 Classification of innovation ecosystem security levels and early-warning criteria

生态位适宜度指数	安全等级	安全预警状态
[0.00, 0.20)	不安全	重警
[0.20, 0.40)	较不安全	中警
[0.40, 0.60)	临界安全	轻警
[0.60, 0.80)	较安全	良好
[0.80, 1.00)	安全	理想

2 实证分析

2.1 研究区域及数据来源

陕西省位于中国内陆中部地区, 北邻内蒙古, 南边与湖北、四川及重庆接壤, 西靠甘肃、宁夏, 东接河南、山西。位置上介于东经 $105^{\circ}29' - 111^{\circ}15'$, 北纬 $31^{\circ}42' - 39^{\circ}35'$ 之间, 总面积 $2.06 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。主要包括榆林、延安、铜川、西安、咸阳、渭南、宝鸡、商洛、汉中及安康 10 个地级市, 是西北地区重要的交通枢纽, 也是中华民族和华夏文化的发祥地之一。全省有高原、平原、山地和盆地等多种地形地貌, 呈现出南北高、中间低的形态。横跨 3 个气候带, 因此南北气候差异较大。同时拥有丰富的自然资源: 拥有黄河和长江两大流域, 动植物资源多样性突出, 矿产资源种类颇多。截至 2021 年, 陕西省实现地区生产总值 3.01×10^{12} 元, 总人口达到 3.95×10^7 人。作为西部的重要核心发展地区, 陕西省总体经济实力、科技创新能力以及人才培育发展都位于西北地区前列。伴随着陕西省经济社会的不断提升与发展, 能源消耗却不断增加, 人类所处的生态环境也会伴随着不断恶化, 而生态环境是整个人类生存发展的根基, 因此陕西省区域创新生态系统安全成为关注焦点。

本文研究时间段为 2011—2020 年,其中每万人吸引外商投资额、进出口总额、城市化水平、人均 GDP 和城镇居民可支配收入等指标均来自陕西省各市的统计年鉴及《中国城市统计年鉴》;高科技企业数、万名从业人口中科学技术人员数、每万人发明专利授权量均来源于《中国科技统计年鉴》;每万人在校大学生数、每百人公共图书馆藏书量、每万人移动电话用户数等简单指标来源于陕西省各地级市的统计公报及各市政府官网的相关规划报告。对于部分缺失数据,利用插值法、相邻年份平均值法以及指数平滑等方法进行补齐。

2.2 创新生态系统安全测度结果分析

2.2.1 综合测度结果分析 为了更好地探究生态位视角下陕西省各市创新生态系统安全状况,本文按全省和各市两个角度进行分析区域创新生态系统安全发展状况。①从整体的角度看(图 2),陕西省在 2011—2020 年期间呈现出上升趋势,从 0.577 上升到 0.687,增长幅度为 0.11。这说明陕西省在近 10 a 来在创新资源、创新功能和创新环境等方面有所改善,提高了创新能力和经济发展质量。另外,从图 2 中可以明显看出安全状况与进化动量呈现出负相关关系,即创新生态系统安全值越高,进化动量越低;反之亦然。即当创新生态系统安全值较低时,有更强的动力和空间去调整自身的创新要素,从而提高创新生态系统安全水平。②各地级市的创新生态系统安全值随时间的变化幅度有所不同,为了更好地把握和直观地比较各市的安全发展水平,按年平均增长率的大小分布原则划分为 3 种发展趋势,其划分原则是:年平均增长率处于 $-2\% \sim 0\%$ 之间的为下降;年平均增长率处于 $0\% \sim 3\%$ 之间的为缓慢增长;年平均增长率在 3% 及以上的为快速增长。

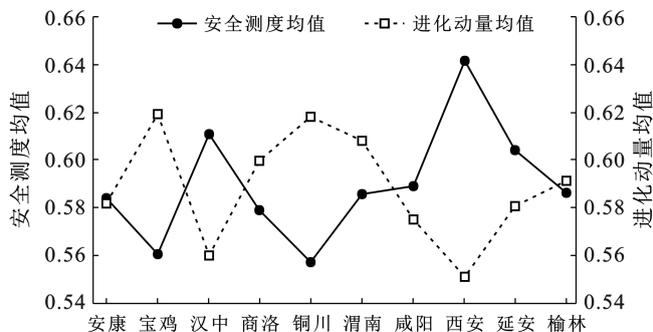


图 2 2011—2020 年陕西区域创新生态系统安全测度均值与进化动量均值

Fig.2 Mean value of security measure and mean value of evolutionary momentum of regional innovation ecosystem in Shaanxi Province from 2011 to 2020

从各个地级市的角度看(图 3)主要分为 3 种变化趋势:①快速增长。西安、铜川、汉中的创新生态系统安全呈现出较快速上升趋势,其中铜川增长率较大达到 4.41% 。②缓慢增长。安康、宝鸡、渭南、咸阳及榆林的安全值呈现出波动上升趋势,其中咸阳的增长速率最大为 2.87% 。③商洛的创新生态系统安全值呈现出下降趋势。综合而言,可以发现陕西省各地级市的创新生态位安全水平存在着很大的差异,呈现出明显的两极化趋势,究其原因可能由于各区域之间存在着较大的创新资源储备与创新需求之间的差距,另一方面也说明陕西省各区域创新生态系统的创新动力与潜力较强。

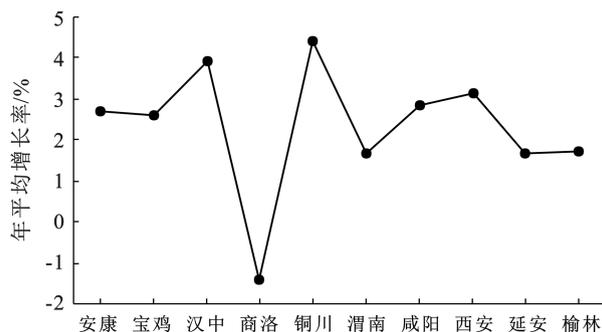


图 3 2011—2020 年陕西各市创新生态系统适宜度年平均增长率

Fig.3 Average annual growth rate of innovation ecosystem suitability in Shaanxi Province from 2011 to 2020

2.2.2 各维度测度结果分析 为了深入研究区域创新生态系统中各生态因子在对陕西区域创新生态系统安全运行机制的作用及影响,依据图 4 从开放性、生长性、协同性以及可持续性 4 个维度的安全状况进行全面分析。

(1) 开放性。宝鸡、商洛、渭南 3 个市呈现较低的开放性水平,总体变化趋势不大,其中有几年呈现出上升趋势但总体开放水平仍不高。西安、安康、汉中、安康、铜川、延安、咸阳、榆林 7 个市的开放性水平逐年递增,呈现出较好的对外开放性水平。在生态适宜度的生态因子中,开放性维度的生态因子权重分别为 0.073 和 0.081 ,其中占比较高的是进出口总额费用。究其原因,可能是陕西省在近年来积极融入“一带一路”建设,通过“走出去”“引进来”扩大了对外开放。但和沿海地区的城市相比陕西的经济发展外向度明显具有劣势,因此进出口的贸易额是近几年来西安、咸阳等市的经济发展战略重点,同时也取得了明显的成效。此外,吸引外商投资也是提高开放性的方法之一,宝鸡、商洛等市的开放性水平呈现逐年降低的趋势,表明它们的经济外向度仍没有显著提升反而下降,由此可见其对外开放水平不高,经济发展活力

不足,这可能制约了陕西深度融入“一带一路”建设,影响陕西实现经济高质量发展^[30]。

(2) 生长性。陕西省各市的生长性水平总体呈现出以西安市为首的缓慢上升的趋势。截止 2020 年,陕西各省区域创新生态系统的成长性安全值除铜川外均达到 0.1 以上,可以看出各区域创新生态系统都在从形成阶段到成长阶段过程中,系统总体呈现良好的发展态势。此外,在生长性生态因子中高科技技术企业数量的权重最高,即自主创新能力对区域创新生态系统的成长发展和健康有着十分重要的作用。由此说明,大力提高创新技术,提升创新系统要素的配置效率,实现要素之间的有效流动,渭南、西安等位于前

列的区域创新生态系统仍然具有很大的成长空间。

(3) 协同性。延安、咸阳、商洛的协同性水平有所下降,其余以西安为首的区域呈现缓慢增长的趋势。在协同性生态因子中,第三产业增加值占 GDP 比重、地方财政科技投入占地方财政支出和每万人发明专利授权量 3 个生态因子的权重较高,这一现象说明创新主体的投入与产出之间的要素协同的重要性。由此说明,咸阳及商洛协同性水平降低可能是其第三产业增加值、科技投入费用及发明专利数量减少所致,而其他区域在创新主体的科技投入与创新产出之间在有序协调的合作,因此西安、渭南等市的协同性保持着总体平稳,稳中有进的态势。

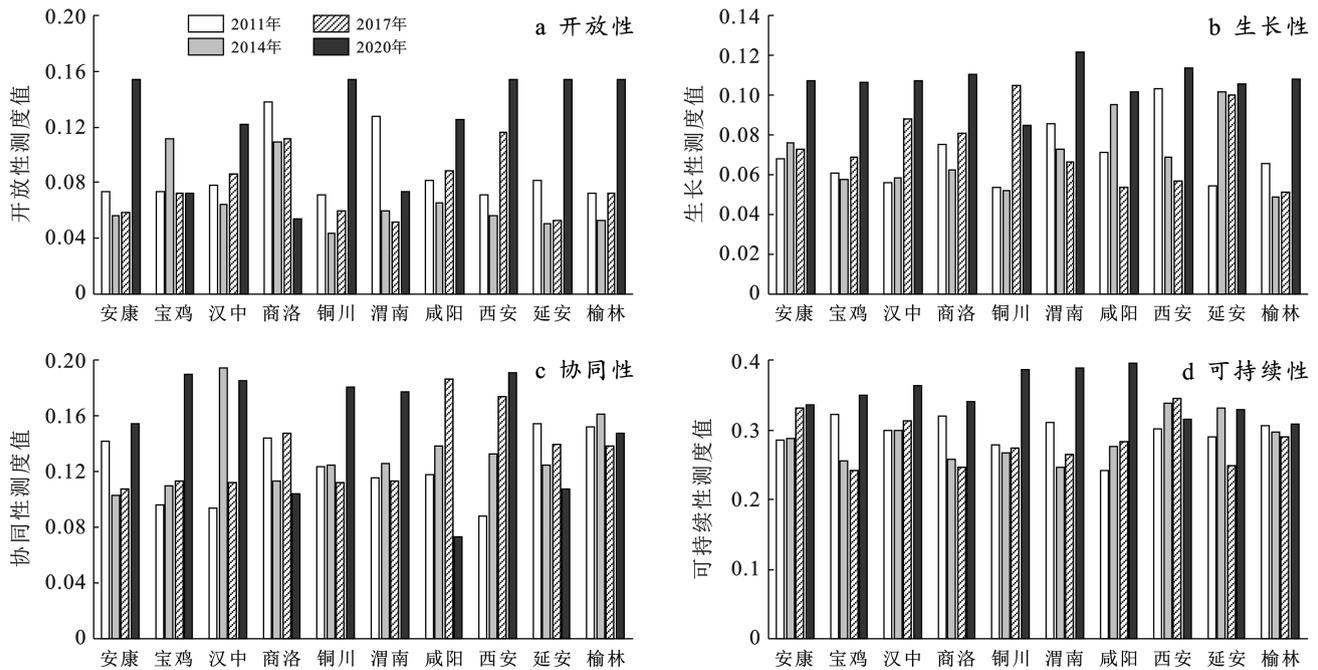


图 4 2011—2020 陕西省区域创新生态系统开放性、生长性、协同性及可持续性值

Fig.4 Values of openness, growth, synergy and sustainability of regional innovation ecosystem in Shaanxi Province from 2011 to 2020

(4) 可持续性。各区域的可持续性生态适宜度均达到 0.3 以上,其中咸阳市、渭南市位居前列,陕西省总体的区域创新生态系统呈现高水平的可持续性运行态势。从生态因子的权重来看,互联网接入宽带用户数以及城市人均绿地面积都占有较大的比重,这表明信息时代的高速发展及绿色发展会对区域创新生态系统的可持续性有较大的相关性,且可持续性生态因子的权重在整体评价中占有绝大部分的比重,由此可以解释区域创新生态系统的安全状况与可持续性水平紧密相关。

2.3 创新生态系统安全预警结果分析

本文在对陕西省区域创新生态安全预警指数进行预测时,选择输入层的神经元数为 8,输出层神经

元数为 2,对应的就是预测目标年的区域创新生态系统安全状况的预警指数。运用表 3 中 2011—2020 年陕西省区域创新生态系统安全值,以年为单位建立神经网络预测模型,对 2021—2024 年陕西省下辖地级市区域创新生态系统安全预警变化趋势进行预测。在这之前需进行神经网络学习效果检验,即利用 2011—2018 年安全预警评价结果,同样用 8 a 数据作为样本输入,用 2019—2020 年数据作为样本期望输出值,构造一个学习样本,然后运用 Matlab 2016 应用软件进行设计程序,构造 BP 网络模型进行网络学习。本文以渭南市为例,选用 2011—2018 年区域创新生态系统安全预警指数进行学习效果检验,样本数据如表 3 所示,学习效果如表 4 所示。

表 3 2011—2020 年陕西省区域创新生态系统安全值及平均值排序

Table 3 Security value and its mean value of regional innovation ecosystem in Shaanxi Province from 2011 to 2020

地区	生态系统安全值											排序
	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	年均值	
安康	0.590	0.537	0.553	0.532	0.531	0.620	0.570	0.596	0.562	0.751	0.584	7
宝鸡	0.571	0.541	0.498	0.544	0.555	0.536	0.495	0.553	0.597	0.718	0.561	9
汉中	0.550	0.569	0.638	0.624	0.571	0.573	0.597	0.545	0.666	0.777	0.611	2
商洛	0.693	0.617	0.533	0.551	0.515	0.510	0.585	0.573	0.604	0.610	0.579	8
铜川	0.547	0.532	0.518	0.497	0.528	0.558	0.550	0.496	0.540	0.807	0.557	10
渭南	0.655	0.609	0.620	0.515	0.522	0.515	0.495	0.580	0.586	0.761	0.586	6
咸阳	0.535	0.553	0.538	0.583	0.580	0.570	0.611	0.663	0.570	0.691	0.589	4
西安	0.585	0.530	0.611	0.603	0.618	0.653	0.692	0.679	0.673	0.774	0.642	1
延安	0.599	0.609	0.589	0.615	0.539	0.582	0.539	0.604	0.669	0.696	0.604	3
榆林	0.614	0.572	0.564	0.569	0.541	0.556	0.552	0.573	0.609	0.717	0.587	5

根据表 4 所示的数据进行模型预测,并与对应年份实际值进行比对,检验模型拟合效果,结果见图 5。由学习效果图可以看出,模型的输出值与期望值差距很小,同时再结合 RMSE 值,安全预警基本指数学习效果的 RMSE 值为 0.000 82,小于 0.04,由此说明,模型的学习效果较好,具有一定的可信度。因此,可以利用该模型对陕西省各地级市区域创新生态系统安全预警指数进行预测。

表 4 渭南市区域创新生态系统安全预警指数预测 BP 样本数据
Table 4 BP sample data of Weinan regional innovation ecosystem innovation early warning index prediction

样本序号	年份	样本输入值	期望输出值	
			2019 年	2020 年
1	2011	0.654 7		
2	2012	0.609 2		
3	2013	0.620 4		
4	2014	0.515 3		
5	2015	0.521 9	0.585 8	0.761 4
6	2016	0.515 1		
7	2017	0.494 8		
8	2018	0.580 3		

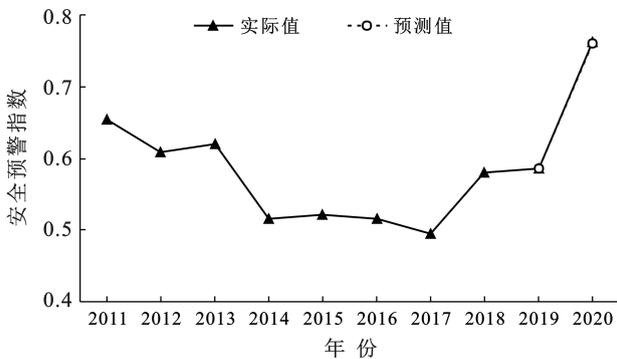


图 5 渭南市区域创新生态系统安全预警指数 BP 学习情况
Fig.5 BP learning of security early warning index of regional innovation ecosystem in Weinan City

2.3.1 时间演变趋势分析 在学习效果检验满足要求的前提下,依据 2011—2020 年的样本数据构成神经网络的输入层,由此得到 2021—2024 年区域创新生态系统安全预警警情指数,具体结果见图 6。

整体来看,在 2021—2024 年间,陕西省 10 个地市的的安全预警值逐渐增大,说明陕西省 10 个地市的生态环境在小幅度的波动中得到较平稳的改善。具体到各市来看:①波动上升型。这类地级市的安全预警值在 2021—2024 年期间呈现出波动上升的趋势,即有时上升有时下降,但总体呈现出上升的方向。由图 7 可以看出包括榆林市、宝鸡市、铜川市、商洛市和渭南市。这说明这类地级市在未来几年内在创新资源、创新功能和创新环境等方面有所改善,但改善程度不稳定,需要进一步加强创新能力和经济发展质量。②稳步上升型。这类地级市的安全预警值在 2021—2024 年期间呈现出稳步上升的趋势,即每年都有一定程度的上升,总体呈现出上升的方向。这类地级市包括汉中市、西安市、延安市和安康市。这说明这几个市在未来几年内在创新资源、创新功能和创新环境等方面有持续的改善,提高了创新能力和经济发展质量及生态系统的稳定可持续性。③基本不变型。这类地级市的安全预警值在 2021—2024 年期间呈现出大幅下降随后大幅上升的趋势,即有时下降有时上升,但总体呈现出小幅度上升的方向。这类地级市为咸阳市,表明其未来几年内在创新资源、创新功能和创新环境等方面有不稳定,导致其创新能力和经济发展质量,生态环境、生态经济和生态社会等方面时而退步时而进步,降低了生态系统的稳定性和可持续性。

2.3.2 空间演化格局分析 整体来看,2021 年到 2024 年陕西省的安全预警情况基本呈现南北部低,中间高的格局,其关中地区西安市以及陕北地区榆林市

的安全预警值为最优。2021 年陕南和陕北地区安全预警处于轻警状态,关中部西安和咸阳市处于良好状态;2022 年陕北和陕南大部分良好,关中铜川和渭南轻警。这反映了陕西省生态经济平衡性的整体提升和内部差异性的逐步扩大;到 2023 年,除了陕南地区的商洛市和关中地区的铜川市安全处于轻警状态,其余各市的安全预警都呈现出良好的状态;2024 年,整

个陕西省的安全预警等级有了明显的提升,其中陕北地区的榆林市及关中地区的西安市都达到了理想的状态,其余各地区均处于良好状态。总体来说,陕西省区域创新生态系统安全预警显著好转,陕北、陕南及关中 3 个地区创新生态系统安全状态都有所明显上升,区域间的差距明显缩小,其生态环境与经济发展呈现积极趋势。

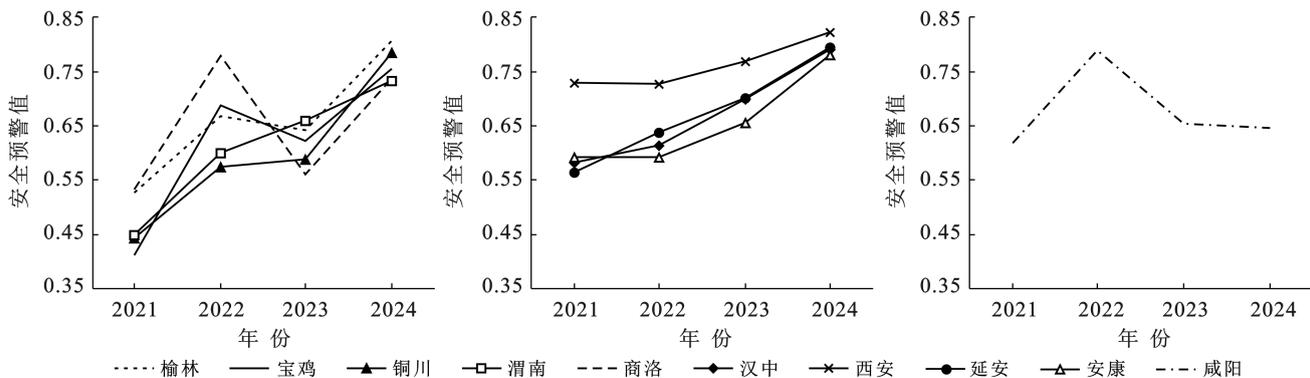


图 6 陕西省区域创新生态系统安全预警值趋势

Fig.6 Trend of security early warning value of regional innovation ecosystem in Shaanxi Province

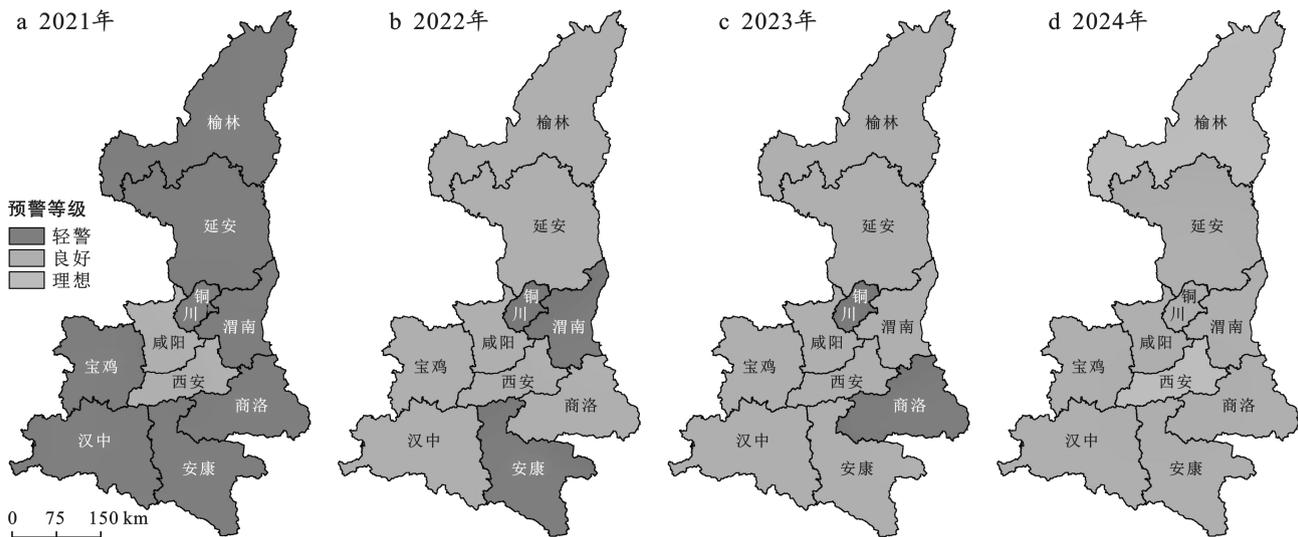


图 7 2021—2024 年陕西省区域创新生态系统安全预警空间格局分布

Fig.7 Spatial pattern of security early warning of regional innovation ecosystem in Shaanxi Province from 2021 to 2024

3 结论

(1) 2011—2020 年间,陕西区域创新生态系统安全保持稳定发展,西安、榆林、咸阳等地表现突出,其他地区也有进步。

(2) 从开放性、生长性、协同性和可持续性 4 个维度看,陕西区域创新生态系统的生态位适宜度总体呈现上升趋势,但各地之间仍存在差异。

(3) 陕西区域创新生态系统安全预警趋势向好,2024 年前各地都将达到良好及以上水平。

(4) 陕西区域创新生态系统安全预警空间演变呈现“南北部低,中间高”的特征,西安和榆林等地属于发展较快的区域,其他地区也在不断追赶。

针对以上研究结论,提出以下政策建议:①提高开放性生态位适宜度有利于促进区域对外开放和经济发展,应加强与外部创新主体的联系和互动,拓展国际合作渠道,吸引外来投资和人才。②提高生长性生态位适宜度有利于促进区域发展,应增加和优化创新要素的供给,形成良好的创新氛围和文化,激发创新主体的积极性和主动性,促进创新成果的产出和转

化。③提高协同性生态位适宜度有利于促进区域可持续发展,应充分发挥各地的优势和特色,建立有效的沟通和协调机制,实现资源共享和利益均衡,形成良好的竞争合作关系。④保持可持续性生态位适宜度有利于促进区域可持续发展,应保持创新生态系统的稳定,有效地激发区域内的创新活力,提高区域的创新能力和竞争力,促进区域经济社会的协调发展和生态环境的保护改善。⑤在促进创新生态系统安全演变的过程中,应在产业结构升级转型、区域带动一体化建设等方面采取战略措施,并建立完善预警机制,及时掌握自身创新生态系统安全状况,识别并消除潜在威胁因素,调整并优化创新政策和措施。

[参 考 文 献]

- [1] Cooke P. Regional innovation system: competitive regulation in the New Europe [J]. *Geoforum*, 1992, 23(3): 365-382.
- [2] Adner Ron. Match your innovation strategy to your innovation ecosystem [J]. *Harvard business review*, 2006, 84(4): 98-107, 148.
- [3] Freeman C, Soete L. *The Economics of Industrial Innovation* [M]. 3rd edition, Boston: MIT Press, 1997.
- [4] 包宇航,于丽英.创新生态系统视角下企业创新能力的提升研究[J]. *科技管理研究*, 2017, 37(6): 1-6.
Bao Yuhang, Yu Liying. Analysis on enterprise innovation ability promotion based on innovation ecosystem perspective [J]. *Science and Technology Management Research*, 2017, 37(6): 1-6.
- [5] 黄鲁成.区域技术创新生态系统的特征[J]. *中国科技论坛*, 2003(1): 23-26.
Huang Lucheng. The characteristics of regional technology innovation ecosystem [J]. *Forum on Science and Technology in China*, 2003(1): 23-26.
- [6] 曹祎遐,高文婧.企业创新生态系统结构发凡[J]. *改革*, 2015, (4): 135-141.
Cao Yixia, Gao Wenjing. The Structure of Enterprise Innovation Eco-system [J]. *Reform*, 2015(4): 135-141.
- [7] 张妮,赵晓冬.区域创新生态系统可持续运行建设路径研究[J]. *科技进步与对策*, 2022, 39(6): 51-61.
Zhang Ni, Zhao Xiaodong. Construction path of the sustainable operation of regional innovation ecosystem [J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2022, 39(6): 51-61.
- [8] 李契,朱金兆,朱清科.生态位理论及其测度研究进展[J]. *北京林业大学学报*, 2003, 25(1): 100-107.
Li jie, Zhu Jinzhao, Zhu Qingke. A review on niche theory and niche metrics. [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2003, 25(1): 100-107.
- [9] 刘洪久,胡彦蓉,马卫民.区域创新生态系统适宜度与经济发展的关系研究[J]. *中国管理科学*, 2013, 21(增刊2): 764-770.
Liu Hongjiu, Hu Yanrong, Ma Weimin. Ecological system suitability of regional innovation and correlation of economic development [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2013, 21(Suppl.2): 764-770.
- [10] 刘钊,张君宇,邓明亮.基于改进生态位适宜度模型的区域创新生态系统健康评价研究[J]. *科技管理研究*, 2019, 39(16): 1-10.
Liu Fan, Zhang Junyu, Deng Mingliang. Study of health evaluation of regional innovation ecosystem based on improved niche fitness model [J]. *Science and Technology Management Research*, 2019, 39(16): 1-10.
- [11] 孙丽文,李跃.京津冀区域创新生态系统生态位适宜度评价[J]. *科技进步与对策*, 2017, 34(4): 47-53.
Sun Liwen, Li Yue. Evaluation on niche suitability of the innovation ecosystem of Beijing-Tianjin-Hebei [J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2017, 34(4): 47-53.
- [12] McNerny G J, Etienne R S. Ditch the niche: Is the niche a useful concept in ecology or species distribution model-ing? [J]. *Journal of Biogeography*, 2012, 39(12): 2096-2102.
- [13] 周青,陈畴镛.中国区域技术创新生态系统适宜度的实证研究[J]. *科学学研究*, 2008, 26(增刊1): 242-246, 223.
Zhou Qing, Chen Chouyong. The empirical study of China regional technical innovation ecosystem suitability [J]. *Studies in Science of Science*, 2008, 26(Suppl.1): 242-246, 223.
- [14] 覃荔荔,王道平,周超.综合生态位适宜度在区域创新系统可持续性评价中的应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(5): 927-935.
Qin Lili, Wang Daoping, Zhou Chao. Sustainability evaluation of regional innovation system based on synthetic niche-fitness [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2011, 31(5): 927-935.
- [15] 武翠,谭清美.基于生态位适宜度的区域创新生态系统与产业协同集聚研究[J]. *科技管理研究*, 2021, 41(3): 1-9.
Wu Cui, Tan Qingmei. Research on regional innovation ecosystem and industry synergy agglomerate based on niche adaptability [J]. *Science and Technology Management Research*, 2021, 41(3): 1-9.
- [16] 梁中.基于生态学视角的区域主导产业协同创新机制研究[J]. *经济问题探索*, 2015(6): 157-161, 182.
Liang Zhong. Research on collaborative innovation mechanism of regional leading industries from the perspective of ecology [J]. *Inquiry into Economic Issues*,

- 2015(6):157-161,182.
- [17] 吴艳霞,李芳菲,陈步宇.长江经济带区域创新生态系统安全性评估研究[J].华东经济管理,2021,35(9):39-48. Wu Yanxia, Li Fangfei, Chen Buyu. Research on the security evaluation of regional innovation ecosystem in the Yangtze River economic zone [J]. East China Economic Management, 2021,35(9):39-48.
- [18] 苗红,黄鲁成.区域技术创新生态系统健康评价初探[J].科技管理研究,2007(11):101-103. Miao Hong, Huang Lucheng. Study on health evaluation of regional technological innovation ecosystem [J]. Science and Technology Management Research, 2007(11):101-103.
- [19] 韩英.基于生态位模型的中国区域创新生态系统适宜度的评价研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古财经大学,2018. Han Ying. Study of evaluation on suitability degree of the regional innovation ecosystem in China based on niche model [D]. Hohhot, Inner Mongolia: University of Finance and Economics, 2018.
- [20] 李芳菲.陕西省区域创新生态系统安全预警体系研究[D].陕西西安:西安理工大学,2022. Li Fangfei. Study on security early warning system of regional innovation ecosystem in Shanxi Province [D]. Xi'an, Shanxi: Xi'an University of Technology, 2022.
- [21] 叶爱山,邓洋阳,夏海力.生态位下中国区域创新生态系统适宜度评价与预测研究[J].科学与管理,2022,42(5):16-26. Ye Aishan, Deng Yangyang, Xia Haili. Research on the evaluation and prediction of the suitability of China's regional innovation ecosystem under ecological niche [J]. Science and Management, 2022,42(5):16-26.
- [22] 解学梅,刘晓杰.区域创新生态系统生态位适宜度评价与预测:基于2009—2018中国30个省市数据实证研究[J].科学学研究,2021,39(9):1706-1719. Xie Xuemei, Liu XiaoJie. Niche-fitness evaluation and prediction of regional innovation ecosystem: An empirical study based on the data of Chinese 30 provinces from 2009 to 2018 [J]. Studies in Science of Science, 2021,39(9):1706-1719.
- [23] 刘钊,张君宇.区域创新生态系统生态适宜度评价研究综述[J].社会科学动态,2018(10):46-49. Liu Fan, Zhang Junyu. Summary on the ecological applicability evaluation of regional innovation of ecological system [J]. Dynamics of Social Sciences, 2018(10):46-49.
- [24] 吴艳霞,罗恒,梁志康.长江经济带生态安全测度研究[J].生态学报,2020,40(19):6761-6775. Wu Yanxia, Luo Heng, Liang Zhikang. Ecological security measurement of the Yangtze River economic belt [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(19):6761-6775.
- [25] 张红丽,滕慧奇.林业生态安全预警测度与技术干预分析[J].科技管理研究,2017,37(19):246-252. Zhang Hongli, Teng Huiqi. Analysis on forewarning measure and technical intervention of forestry ecological security [J]. Science and Technology Management Research, 2017,37(19):246-252.
- [26] 陈美婷,匡耀求,黄宁生.基于RBF模型的广东省土地生态安全时空演变预警研究[J].水土保持研究,2015,22(3):217-224. Chen Meiting, Kuang Yaoqiu, Huang Ningsheng. Early-warning of spatiotemporal evolvement of land ecological security in Guangdong Province based on RBF [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015,22(3):217-224.
- [27] 吕光辉.中国西部干旱区生态安全评价、预警与调控研究:以新疆为例[D].新疆乌鲁木齐:新疆大学,2005. Lv Guanghui. Evaluation on ecological security, warning and controlling research in arid land of Western China: A case study of Xinjiang [D]. Urumqi, Xinjiang: Xinjiang University, 2005.
- [28] 吴艳霞,邓楠.基于RBF神经网络模型的资源型城市生态安全预警:以榆林市为例[J].生态经济,2019(5):111-118. Wu Yanxia, Deng Nan. Ecological security warning for resource-based cities based on RBF neural network model: Taking Yulin City as an example [J]. Ecological Economy, 2019(5):111-118.
- [29] 李晓娣,张小燕.区域创新生态系统对区域创新绩效的影响机制研究[J].预测,2018,37(5):22-28,55. Li Xiaodi, Zhang Xiaoyan. Research of the influence mechanism of regional innovation ecosystem on regional innovation performance [J]. Forecasting, 2018,37(5):22-28,55.
- [30] 王景华.深度融入共建“一带一路”打造内陆改革开放高地[J].新西部,2020(13):11-12. Wang Jinghua. Deep integration into the “Belt and Road” to build inland reform and opening up highland [J]. New West, 2020,(13):11-12.