

河南省沿黄干流地区社会—生态—生产 景观恢复力演化特征及情景模拟

耿艺伟¹, 陈伟强^{1,2}, 张金鑫¹, 王珂¹, 张锋¹, 马月红¹

(1.河南农业大学 资源与环境学院, 河南 郑州 450002; 2.河南省土地整治与生态重建工程技术研究中心, 河南 郑州 450002)

摘要: [目的] 定量研究河南省沿黄干流地区 2000—2018 年社会—生态—生产景观恢复力的演化特征, 指导沿黄地市社会生活、生态资源环境与农业生产活动的协调发展。[方法] 通过构建 SEPLR (social-ecological-production landscape resilience, 社会—生态—生产景观恢复力) 评估框架, 运用有序加权平均法设置情景偏好, 绘制不同政策引导下恢复力预测图。[结果] ①从总体特征看, 2000—2018 年河南省沿黄干流地区 SEPLR 值为 0.47~0.52 之间, 呈上升趋势, 城市间空间差异逐渐增大, 指数相似地区集中分布。②演化特征上, 社会系统恢复力和生态系统恢复力缓慢增强, 分别在 0.14~0.65, 0.08~0.30 波动, 生产系统恢复力变化微弱, 在 0.12~0.31 波动; 空间上, SEPLR 及各子系统整体呈“中部强两边弱”的分布态势, 层级结构具有集聚性。[结论] 河南省沿黄地市在“维持现状型”“生态优先型”“开发优先型”“农业优先型”4 种政策情景下, “生态优先型”恢复力最高, 未来黄河流域高质量发展应考虑“生态优先型”政策引导。

关键词: 恢复力; 沿黄干流地区; 情景模拟

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)05-0181-10

中图分类号: F301.2

文献参数: 耿艺伟, 陈伟强, 张金鑫, 等. 河南省沿黄干流地区社会—生态—生产景观恢复力演化特征及情景模拟[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5):181-190. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.20210915.001; Geng Yiwei, Chen Weiqiang, Zhang Jinxin, et al. Evolution characteristics and scenario simulation of social-ecological-production landscape resilience in areas along mainstream of Yellow River in He'nan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5):181-190.

Evolution Characteristics and Scenario Simulation of Social-Ecological- Production Landscape Resilience in Areas Along Mainstream of Yellow River in He'nan Province

Geng Yiwei¹, Chen Weiqiang^{1,2}, Zhang Jinxin¹, Wang Ke¹, Zhang Feng¹, Ma Yuehong¹

(1. College of Resources and Environment, He'nan Agricultural University, Zhengzhou, He'nan 450002, China;

2. He'nan Engineering Research Center of Land Consolidation and Ecological Restoration, Zhengzhou, He'nan 450002, China)

Abstract: [Objective] The evolution characteristics of social-ecological-production landscape resilience in areas along the mainstream of the Yellow River in He'nan Province from 2000 to 2018 was quantitatively determined in order to guide the coordinated development of social life, ecological resources, the environment, and agricultural production activities in this region. [Methods] We constructed the social-ecological-production landscape resilience (SEPLR) assessment framework to quantitatively study the evolution characteristics of the social-ecological-production landscape resilience in He'nan Province along the mainstream of the Yellow River from 2000 to 2018. An ordered weighted average method was used to set up scenario preferences and to draw a map of resilience prediction under the guidance of various policies. [Results] ① Based on the overall characteristics, the SEPLR value of the areas along the mainstream of the Yellow River in He'nan Province from 2000 to 2018 varied from 0.47 to 0.52, presenting an upward trend. The spatial differences between cities kept expanding gradually. ② From the perspective of evolution characteristics, social system resilience

收稿日期: 2021-04-01

修回日期: 2021-05-26

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“生态系统服务供需耦合关系研究”(41901259)

第一作者: 耿艺伟(1998—), 女(汉族), 河南省商丘市人, 硕士研究生, 研究方向为土地资源管理。Email: GYWstudygyw@163.com。

通讯作者: 陈伟强(1975—), 男(汉族), 河南省安阳市人, 博士, 教授, 主要从事资源信息方面的研究。Email: chwqgis@163.com。

and ecosystem resilience increased slowly, fluctuating between 0.14~0.65 and 0.08~0.30, respectively, and the production system resilience slightly fluctuated between 0.12~0.31. In terms of space, SEPLR and its subsystems overall presented a distribution pattern of “being strong in the center and weak on both sides”, and the hierarchical structure was concentrated. [Conclusion] For cities along the Yellow River in He’nan Province, the resilience of “ecology first” was the highest of the four policy scenarios of “maintaining the status quo” “ecology first” “development first” and “agriculture first”. In the future, the high-quality development of the Yellow River basin should be guided by the “ecology-first” policy.

Keywords: resilience; mainstream of the Yellow River; scenario simulation

恢复力原指物体受到压迫后恢复到原来状态的能力,2001年 Holling C.S.将恢复力定义为系统经受干扰并可维持其功能和控制的能力^[1]。SEPLR 是指系统用来保持基本的功能、结构、特性和反馈,在变化时吸收干扰和重组的能力^[2],区域内 SEPLR 越高,抵抗干扰的能力越高,区域越趋于稳定。恢复力思维通过研究生态系统发展和社会动力学之间的复杂关系,很好诠释了社会生态生产交互复杂的系统动力学关系^[3]。从区域景观格局尺度定量探究社会—生态—生产景观恢复力有助于揭示人类活动变化对生态环境及其景观服务的影响机制,是探讨区域社会—生态—生产协调发展的重要抓手^[4]。目前,学术界针对“SEPLR”的探讨主要集中在 SEPLR 的理论内涵^[5-6]、格局演化特征^[7-8]、识别划分与影响机理等^[9-11]方面,而对 SEPLR 演化特征的研究主要集中在评价结构和时空分异。评价结构研究注重从不同研究面构建 SEPLR 评价体系^[12-13],侧重关注系统自身构成要素;时空分异大都从不同时期的土地利用变化描述 SEPLR 的时空演变^[14-15],又忽视了系统要素自身;并且缺乏富有地域特色的 SEPLR 应用的针对性模式和综合性评价体系的研究。本研究从系统构成要素及景观变化二者有机结合角度出发,尤其是针对河南省沿黄干流地区这种生态脆弱、人口众多和粮食主产区这种特殊地域构建评价体系,研究结果更具科学综合性,可为 SEPLR 评价体系的构建提供依据。

黄河流域在中国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位,也是中国人口、资源、环境矛盾最集中的区域之一^[16]。河南省地处国家发展战略枢纽,在国家粮食安全,农业生产占据重要位置,同时人口最多,人是一切社会经济运动出发点^[17]。河南省沿黄干流地区高质量发展路径在于实现社会生态生产系统的协同高效可持续发展^[18]。在几十年的发展过程中,社会生态生产系统各要素更迭加快,众多系统子单位带来社会生态生产系统之间相互作用与反馈极其复杂^[19]。因此,在现实与政策的双重驱动下,亟需研究系统的演化特征及其变化原因,以顺应

黄河流域高质量发展的现实需要,进而指导河南省沿黄地市社会生活,生态资源环境与农业生产活动的协调发展。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

河南省位于中国中部,其沿黄干流地区包括三门峡、洛阳、济源、焦作、郑州、新乡、开封和濮阳 8 个地市(图 1)。属于中国高土高原向华北平原的过渡地区,地势西高东低,依次由中山、低山、丘陵、平原过渡,气候依次由暖温带—亚热带、湿润—半湿润季风气候过渡。土壤类型众多,主要有潮土、棕壤、褐土、黄褐土、砂姜黑土。面积达 57 217.09 km²,占河南省的 21.6%,占黄河流域的 5%,河南省沿黄干流地区是河南省经济最具活力的地区,其经济总量达到全省的 53.1%。

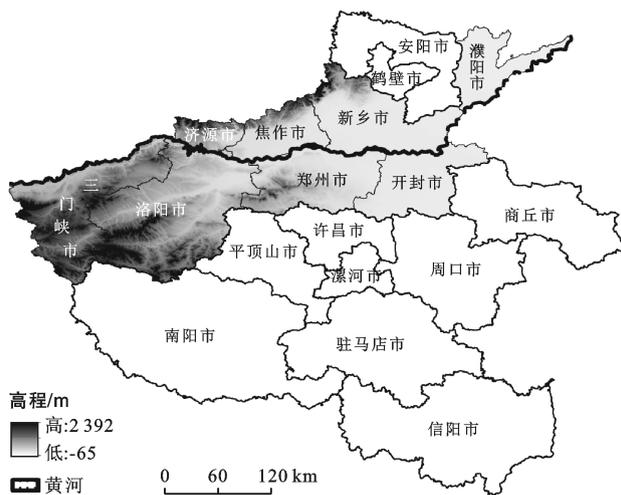


图 1 河南省研究区位图

1.2 数据来源

(1) 本研究通过使用 Landsat-TM/ETM 遥感影像(2000,2005,2010 年),Landsat 8 遥感影像(2015 年和 2018 年),运用 Erdas Imagine 9.1 软件进行图像增强、图像纠正和图像镶嵌等预处理后,依据 LUCC 分类标准,将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地 6 大类得到人类

活动强度、景观多样性指数、土地利用程度、生物丰度等数据分析资料。结合实地数据及 Google Earth 获取 500 个样本进行精度验证,分类结果精度均在 90% 以上, kappa 系数高于 0.85,精度满足大尺度的研究需要。坡度和高程所需的 DEM 数据来自“中国科学院地理空间数据云”。

(2) 社会系统恢复力、生态系统恢复力和生产系统恢复力内的指标层所需的其他统计资料来源于 2000—2018 年《河南统计年鉴》和河南省各地市统计年鉴。

2 研究方法

2.1 社会—生态—生产景观恢复力评价

2.1.1 指标体系构建 社会—生态—生产景观系统是人与自然紧密联系的复杂系统,决定其系统恢复力的关键在于系统处理、应对变化的能力^[20]。联合国大学可持续发展高级研究所(United Nations University Institute for the Advanced Study of Sustainability, UNU-IAS)等多个研究团队以提高区域对经济、环境压力等冲击的反应能力,从而提高其社会生态系统的适应能力,实现与社会自然和谐相处为导向,共同研究开发的社会生态生产景观恢复力评估框架^[21],其评估模型的使用方式相对灵活,在实际应用

中,研究者可根据区域自身的观察、认识和经验对指标进行灵活使用,进而更好地反映每个特定景观及其相关区域的情况^[2]。本研究在构建 SEPLR 评价指标体系时,选用适宜研究区的社会和生态系统恢复力所需的部分指标,考虑到区域特性要素的不同,河南省沿黄干流地区作为全国粮食主产区,理论上其 SEPLR 的测度由社会、生态、生产 3 方面要素组成,测度核心要素依次是社会和谐、生态自然性与人类影响、农业生产稳定^[22]。在河南省沿黄干流地区,农业生产活动作为塑造地表景观的主要活动通过土地利用变化来体现,土地利用变化受社会—生态—生产系统反馈的影响^[23],不同稳态下土地利用格局也会不同^[24]。因此,在河南省沿黄干流地区 SEPLR 影响因素主要来自于社会、生态、生产 3 个维度,其中社会维度大体包括民生、经济、医疗、产业等要素之间的协同平衡。主要反映区域人口自身与所处环境间的交流,体现区域社会各领域的完善程度;生态维度包括景观多样性、土地开发程度、系统活力等,主要反映在外界干预时,生态系统自身保持其结构和功能的能力;生产维度包括地形、劳动力数、粮食产量等,反映其农业生产持续发展的能力。当区域内 3 个维度系统抵抗干扰的能力越强,SEPLR 就越强。因此,关于 SEPLR 评价应综合考虑社会、生态、生产 3 个子系统对干扰的应对(表 1)。

表 1 社会—生态—生产景观恢复力评价指标体系

准则层	要素	指标层	性质	权重
社会恢复力 (0.371)	民生改善能力(0.245)	失业率	反映地区失业对系统造成的冲击(-)	0.152
		人类活动强度	反映人类活动强度对恢复力的压力(-)	0.161
	创新能力(0.234)	R & D 经费投入增长率	反映地区应对全球创新热潮的能力(+)	0.133
		经济能力(0.213)	财政收入	反映政府在风险干扰下的调整和适应能力(+)
	医疗保障(0.204)	固定资产投资额	反映社会再生资本推动力(+)	0.131
		万人拥有医疗床位数	衡量系统应对医疗风险的能力(+)	0.124
生态恢复力 (0.350)	产业发展(0.104)	产业结构多样化指数	反映产业结构是否平衡及应对风险的能力(+)	0.157
		景观格局(0.339)	景观多样性指数	反映景观结构多样性对恢复力的影响(+)
	生态压力(0.327)	土地利用程度	反映土地开发程度对恢复力造成的压力(-)	0.145
		化肥使用强度	反映化肥使用强度对恢复力的影响(-)	0.130
	农药使用强度	反映农药使用强度对恢复力的影响(-)	0.124	
		抗逆水平(0.334)	生物丰度	反映生态系统活力对恢复力的影响(+)
	城市人均绿地面积		衡量地市绿化建设程度(+)	0.163
	节能环保支出增长率	反映环境保护措施对系统恢复力的影响(+)	0.156	
生产恢复力 (0.279)	地形条件(0.236)	坡度	反映坡度对生产系统的影响程度(-)	0.167
		高程	反映高程对生产系统的影响程度(-)	0.129
	人力资源(0.329)	乡村劳动力资源数	反映农业劳动力的供给能力(+)	0.165
		土地效能(0.435)	农业产值	反映该地区农业生产系统潜力(+)
	粮食产量		反映地区应对外部风险的承受能力(+)	0.171
	耕地面积占比	衡量系统生产能力的本底状况(+)	0.187	

(1) 社会系统恢复力。社会系统恢复力(SR)定义为人类社会承受外部(如环境变化、社会变革、经济或政治的剧变)对基础设施的打击或干扰的能力及从中恢复的能力^[25]。区域社会高质量发展必须在民生改善、创新、经济、医疗保障和产业发展等要素之间协同平衡。具体来看,民生改善能力是构建稳定社会的根本,是社会建设的主要内容,民生改善能力越强,SR 越强。当人口压力和失业人口所导致人获取资源的能力越低,不利于社会建设,同时给社会保障造成一定压力,基于此,选用人类活动强度和失业率来表征,人类活动强度和失业率越高,对系统所能承载的压力越大,民生改善能力越弱。人类活动强度^[26]选定人口密度、道路和建设用地面积作为人类活动强度的决定因子,采用层次分析法对各因素权重进行赋值:人口密度 0.4,道路 0.3,建设用地面积 0.3。创新能力作为社会发展的核心竞争力,创新能力越强,SR 应对风险挑战的能力越高,选用 R & D 经费投入增长率表征,其值越大,创新能力越强。经济能力是社会发展过程中应对风险的基础,能够表征政府及当地经济应对风险时维持自身稳定性,值越高,社会系统恢复力越强。具体选用财政收入和固定资产投资额表征。医疗保障是衡量区域社会稳定的重要组成部分,医疗保障越完善,民生福祉越高,社会越稳定即 SR 越高,选用万人拥有医疗床位数表征。产业发展可以衡量社会内部经济活动的多样性,产业发展越多元化,SR 应对能力越强,具体选用产业结构多样化指数^[27]表征,公式如下:

$$D = \sum_i^m p_i \ln p_i \quad (1)$$

式中: D 表示产业结构多样性指数; p_i 为各产业从业人口占比; m 为产业数。

(2) 生态系统恢复力。生态系统恢复力(ER)生态恢复力是区域可持续发展的基础,有助于维持理想生态系统状态^[28],高质量发展必须在保证系统景观结构多样的前提下明晰其生态压力和抗逆能力,保障其生态基底水平。景观格局选用景观多样性指数表征,可以反映景观结构的丰富程度,其值越高,恢复力越强。生态压力主要源于化肥、农药施用所产生的污染和土地开发的不均衡,具体选用土地利用程度、化肥使用强度和农药使用强度表征,其值越强,生态压力越高,恢复力越弱。而抗逆水平可衡量生态系统在应对干扰的能力,通过生物丰度、人均绿地面积、节能环保支出增长率表征。生物丰度^[29]作为一个普遍公式间接反映区域内生物种类的丰贫程度,值越高,ER 越强,公式如下:

$$F = (0.11 \times \text{Area}_a + 0.35 \times \text{Area}_f + 0.21 \times \text{Area}_g + 0.28 \times \text{Area}_w + 0.04 \times \text{Area}_r + 0.01 \times \text{Area}_u) / \text{Area} \quad (2)$$

式中: F 为生物丰度指数; Area 为该地市面积; $\text{Area}_a, \text{Area}_f, \text{Area}_g, \text{Area}_w, \text{Area}_r, \text{Area}_u$ 分别为该地市耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地面积。人均绿地面积值越大,城市绿化程度越高,生态系统稳定性越高,恢复力越强。土地利用程度^[29]计算公式为:

$$I = 100 \times \sum_{j=1}^k A_j \times C_j \quad (3)$$

式中: j 为土地利用类型分等级数,本研究中 $k=4$; A_j 为第 j 等级土地利用程度分级指数; C_j 为该地市第 j 等级土地面积与地市总面积的比值。其中, A_j 取值是根据刘纪远提出的土地利用程度综合分析方法,将土地利用类型整合为未利用地级、林草水用地级、农业用地级和城镇聚落用地级 4 级,其指数分别为 1, 2, 3, 4。

(3) 生产系统恢复力。对于黄河流域这种传统农业区,尤其是河南省,更要保障其生产系统恢复力(PR)。选用地形条件、人力供给和土地效能来表征。地形是胁迫农业生产的重要因素,坡度越大,耕地生产潜力越小,PR 提升空间越小。基于研究区坡度分布特征,设定 2° 以下为无风险、生产潜力大, 25° 以上为最大风险、生产潜力最小,对 $2^\circ \sim 25^\circ$ 区间进行归一化处理;高程越高,农业生产可能性越小,成本越高。人力资源而人力供给是生产系统的基本保障。维持生产的人力资源越多,PR 越稳定,具体选用乡村劳动力资源数表征。土地效能是维持农业生产可持续发展的基础要素。具体选用农业产值、粮食产量和耕地面积占比表征,其值越高,土地效能越强,生态系统恢复力越高。

2.1.2 指标数据标准化 因各数据指标量纲不同,不存在可比性,故采用最小最大值法对各指标进行标准化处理。

正项指标处理公式为:

$$X = \frac{(X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (4)$$

负向指标处理公式为:

$$X = \frac{(X_{\max} - X_i)}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (5)$$

式中: X 为标准化处理后的值; X_i 为指标原始值; X_{\min} 为指标最小值; X_{\max} 为指标最大值。

2.1.3 指标权重的确定 熵权法是基于指标统计性质来确定指标重要程度的客观赋权法,能够克服一些主观赋权法所带来的结果不稳定现象。通过构建判

断矩阵 $T = (x_{ij})_{mn}$, 采用熵权法来确定指标权重。计算公式为:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (6)$$

$$W_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (-e_j)} \quad (7)$$

$$k = \frac{1}{\ln(n)} \quad (8)$$

$$p_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^m X_{ij}} \quad (9)$$

式中: p_{ij} 为第 i 个评价对象下第 j 个指标值的比重; e_j 为第 j 个指标的熵值; k 为常数; n 是总指标数; W_j 为信息熵; X_{ij} 为第 i 个评价对象第 j 个指标的分值。

2.2 有序加权平均法 (Ordered Weighted Averaging, OWA)

多情景模拟 SEPLR 可为未来黄河流域高质量发展提供科学预测, 有利于测度 SEPLR 的变化因素, 同时可为区域人地系统可持续发展提供依据。OWA 方法是美国学者 Yager 提出控制因子权重合并的方法, 通过将各项指标数据按照其属性值大小重新排序, 依据各指标位序赋予不同的次序权重并加权聚合^[30]。熵权法确定权重, 模糊量化求解模型。公式为:

$$V_j = \left(\sum_{k=1}^i W_k \right)^a - \left(\sum_{k=1}^{j-1} W_k \right)^a, \quad a \in (0, \infty) \\ (j=1, 2, 3, \dots, n) \quad (10)$$

式中: V_j 为次序权重; a 为决策风险系数, 其取值范围在 $0, \infty$ 之间, W_k 代表指标重要性程度, 公式为:

$$W_j = \frac{n - r_j + 1}{\sum_{j=1}^n (n - r_j + 1)} \quad (k=1, 2, 3, \dots, n) \quad (11)$$

式中: n 为指标总数; r_j 为根据指标数值大小对指标重要性的取值, 最大值取 1, 次大取 2, 最小取 n 。

运用模糊量化方法对 7 种不同决策风险系数下的次序权重进行计算。

其中, 决策风险系数 $0 < \alpha < 1$, 则越重要的属性位序权重越大, 评价者对指标的属性持乐观态度。若 $\alpha > 1$, 则越重要的属性位序权重越小, 评价者对指标的属性持悲观态度。 $\alpha = 1$ 即决策者态度无偏好, 决策权重相等, 即为区域 SEPLR 的现状。本文中, “乐观”表明评价者认为指标能够影响区域 SEPLR, 而“悲观”表明评价者不认为系统指标能够影响区域 SEPLR。考虑社会—生态系统脆弱性影响因子复杂, 各因子间相互作用关系具有不确定性, 而满足多数指标因子运算的决策风险区间(即 $0.1 < \alpha < 2$)其情景模拟现实性更强。因此, 基于正常决策风险系数范

围与决策者理性思维将 $\alpha = 1$ 时定义为维持现状; 其表示现有灾害风险、区域敏感度以及适应能力下正常赋权叠加运算结果。同时对决策风险系数 $\alpha = [0.1, 2]$ 区间进行进一步细化模拟, 考虑决策者主观理性波动范围小, 综合以往研究成果选取了决策风险系数 $\alpha = 0.12, \alpha = 0.8$ 与 $\alpha = 2$ 作为现状决策风险系数下可信波动区间节点进行情景设置。

3 结果与分析

3.1 社会—生态—生产景观恢复力测度总体特征

对 2000—2018 年河南省沿黄干流地区社会—生态—生产景观恢复力指数进行描述性统计分析, 结果见表 2。①河南省沿黄干流地区 SEPLR 指数相对不高, 平均值总体呈上升态势; ②标准差介于 0.19~0.22 之间, 表明沿黄干流地区的离散程度较小, 且各地市之间存在差异性; ③变异系数呈明显增长趋势, 表明 18 a 间 SEPLR 指数的空间差异性呈扩大趋势; ④偏态系数均为正值, 但其值未一直增加, 表明河南省沿黄干流地区 SEPLR 指数高等级数量呈波动状态; ⑤峰态指数在 2000—2018 年持续增加趋势明显, 表明 SEPLR 指数相似地区集中分布。

表 2 河南省沿黄干流地区 SEPLR 指数描述性统计量

统计量	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2018 年
平均值	0.478 0	0.513 0	0.513 2	0.513 5	0.520 1
标准差	0.218 5	0.194 3	0.200 9	0.212 2	0.186 2
变异系数	0.074 8	0.068 7	0.106 3	0.175 0	0.217 0
偏态指数	0.152 4	0.017 4	0.046 1	0.153 0	0.155 1
峰态指数	1.757 9	1.884 2	2.116 7	2.382 8	2.253 9

3.2 社会—生态—生产景观恢复力及子系统演化特征

通过社会—生态—生产系统景观恢复力评价, 得到研究区 2000—2018 年演变情况, 因评价单元仅为河南省沿黄干流地区的 8 个地市, 所以利用自然断点法分级法将其划分为 3 级: III 级为高等级恢复力 ($C \geq 0.5$), II 级为一般恢复力 ($0.3 \leq C < 0.5$) 和 I 级为低等级恢复力 ($C < 0.3$), 结果见图 2。

3.2.1 社会系统恢复力演化特征 如图 2 所示, 2000—2018 年, 河南省沿黄干流地区社会系统恢复力 (SR) 值在 0.14~0.65 间波动且区域整体逐渐增强。从区域内部来看, 郑州的 SR 指数始终保持最高。空间分布由“中间强四周弱”变为“东强西弱”, 层级结构上, III 级区域地区保持不变, II 级区域逐渐扩大, I 级区域稳定不变。区域内部演化上, 郑州的 SR 指数虽为最高, 但自 2005 年开始下降。只有新乡 SR 指数比 2000 年增加 38.9%。郑州市社会系统恢复力明显

高于其他地市,其在中原城市群中占据核心位置,并位于“两横三纵”的发展格局,市场潜力释放较大;但受城市化影响,大量农田被占用,农业产值下降,其次为建设环境友好型城市,政府对污染重工业企业开展

整治,使得产业结构应对风险能力下降造成郑州市 SR 指数不断下降,但郑州市对周围沿黄干流地区仍然具有辐射作用。新乡市由于与郑州接壤,具备交通和经济辐射优势,使得 SR 指数不断上升。

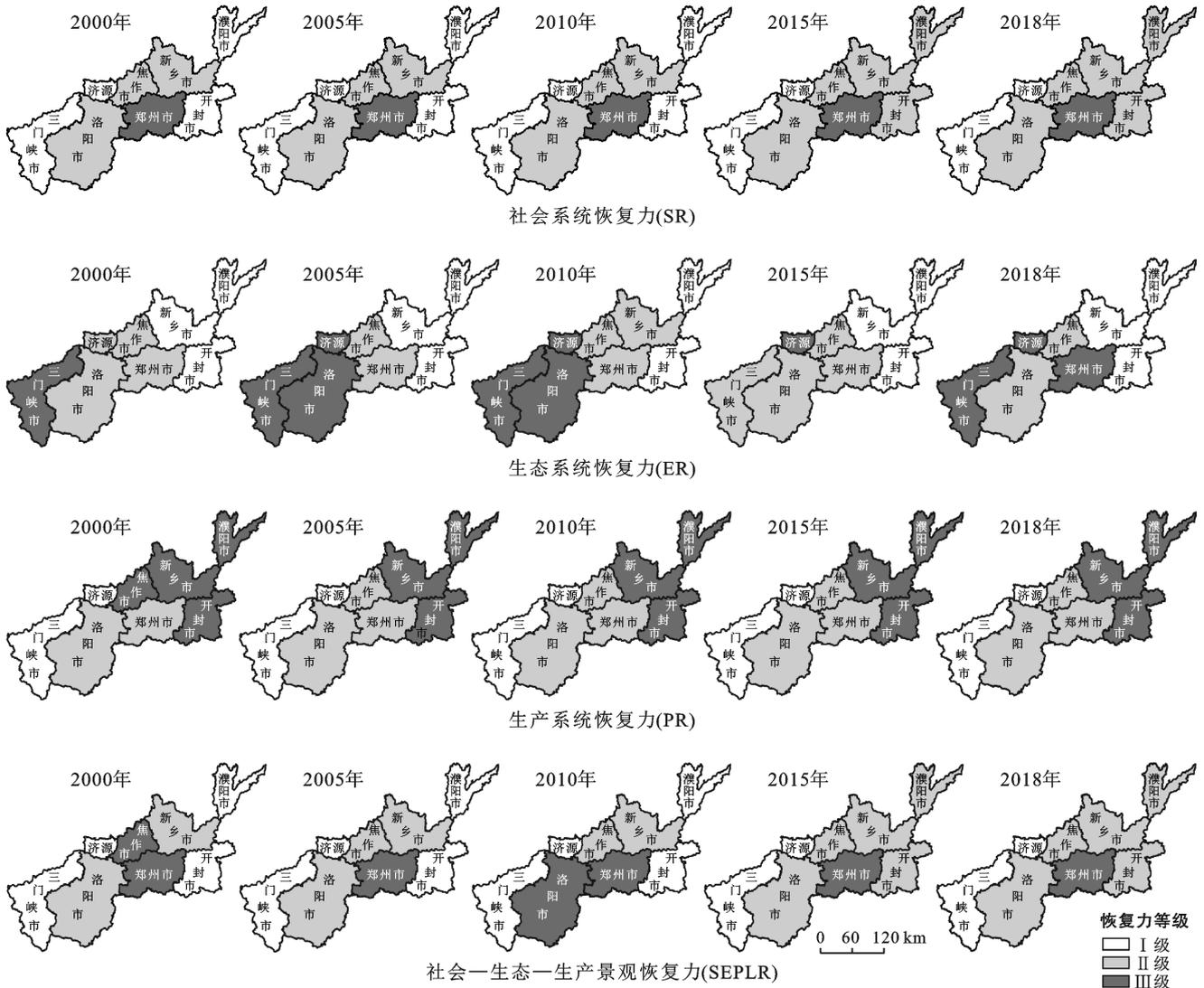


图 2 2000—2018 年河南省沿黄干流地区 SEPLR 及各子系统恢复力

3.2.2 生态系统恢复力演化特征 2000—2018 年, ER 指数在 0.08 至 0.30 之间波动,区域整体在 2000—2010 年成上升趋势,自 2015—2018 年有轻微回落。主要由于河南省沿黄干流地区经济的快速发展,占用较多生态系统资源使得生态系统恢复力(ER)减弱。从区域内部来看,2000—2015 年各地市 ER 指数呈上升趋势。但 2015—2018 年,新乡、濮阳 ER 指数开始下降。ER 空间呈“西强东弱”的分布。其层级结构特征是:Ⅲ级区域与Ⅱ级区域相互转化,Ⅰ级区域稳定不变。区域内部演化上,三门峡、洛阳市等西部地市一直高于濮阳、开封等东部地市。是由于西部地区资源丰富,植被覆盖较高,景观格局不断优化;东部濮阳、新乡等该地区传统工业资源较多,生态

质量提升较慢,一定程度上限制 ER 的提升。总的来说,河南省沿黄干流地区 ER 整体增强,但近些年开始小幅减弱。生态系统恢复力虽最具活力,但受损后也需要消纳污染物的自净和修复,尤其黄河流域周边地市,生态系统脆弱,河南省应系统提升沿黄地市生态系统恢复力。

3.2.3 生产系统恢复力演化特征 2000—2018 年 PR 指数在 0.02~0.31 之间波动。阶段性变化不明显,但仍保持了一定的弹性。区域内部,各地市 PR 指数变化不明显,空间上,生态系统恢复力(PR)呈“东强西弱”的分布趋势和阶梯状的特征。区域内部演化上,PR 仍保持自身恢复力能力,这主要是由于河南省沿黄干流地区生产系统恢复力的内部潜能基本

维持不变,外力也未进行干扰系统。生产系统恢复力其空间分布与地形,土壤、水资源在一定程度具有一致性,河南省沿黄干流地区西部主要为太行山山脉,受地形影响,不适宜进行农作物种植;同时,近些年耕地锐减、农村人口大量向城市转移等都是造成生产系统恢复力提升不可持续的原因,作为掌握全国粮食安全的河南省来说,需进一步探究其原因,提升生产系统恢复力。

3.2.4 社会—生态—生产景观恢复力演化特征

SEPLR 是对 ER,SR,PR 的集成表达,2000—2018 年河南省沿黄干流地区 SEPLR 指数在 0.40~0.47 间逐渐增强。区域内部,主要同 SR 指数一致。空间呈“团状”分布,层级结构表现为以郑州市为中心向四周衰减的特征,与中原城市群的紧密联系圈大致吻合。SEPLR 指数不断上升,但变化率逐阶段递减,变化过程与 SR 指数具有协同性,主要是由于 ER 指数在 2015 年开始下降、SR 指数变化率减弱,PR 指数相对维持不变,三者集成造成 SEPLR 变化速率变慢,总体而言,SEPLR 受社会系统恢复力影响较大。综合子系统恢复力之间的关系,SEPLR 自身具有一定的调节和应对能力。针对黄河流域这种生态脆弱区,河南

省建设生产强度的不断提升,使资源生态条件更脆弱,但系统恢复力仍保持上升状态,表征 SEPLR 系统自身具有强大的应对能力。

3.3 多情景模拟

运用有序加权平均法通过不同决策偏好系数的设置对区域 SEPLR 进行多情景模拟,其中,黄河流域高质量发展,一要保证生态系统的稳定性,二要产业共兴,开放提升中心城市经济发展水平,三保留黄河流域传统的农业属性,尤其在河南段内更要保障粮食生产。在充分调查市域经济社会发展情况后,并参考其他相关研究及河南省沿黄干流地区的基本条件,设置 4 种政策情景模拟河南省沿黄干流地区 SEPLR。将 $\alpha=1$ 时河南省沿黄干流地区生态、生产、社会系统维持常态,定义为维持现状型情景; $\alpha=0.12$ 时河南省重视生产技术发展、农业结构调整,优先发展农业,定义为农业优先型情景; $\alpha=0.8$ 表示重视环境保护治理与投入,降低对能源依赖的情景,定义为生态优先型情景; $\alpha=2$ 表示注重经济发展而减少对生态环境、自然灾害等问题考虑的情景,定义为开发优先型情景。河南省沿黄干流地区社会—生态—生产系统恢复力评价指标次序权重如表 3 所示。

表 3 社会—生态—生产系统恢复力评价指标次序权重

项目	SEPLR 指标次序权重						
	$\alpha=0.000\ 1$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.5$	$\alpha=1$	$\alpha=2$	$\alpha=10$	$\alpha=1\ 000$
人类活动强度	1.000 0	0.790 5	0.308 6	0.095 2	0.009 1	0.000 0	0.000 0
产业结构多样化指数	0.000 0	0.054 6	0.122 3	0.090 5	0.025 4	0.000 0	0.000 0
城市人均绿地面积	0.000 0	0.032 7	0.090 0	0.085 7	0.039 2	0.000 0	0.000 0
失业率	0.000 0	0.023 2	0.072 6	0.081 0	0.050 5	0.000 0	0.000 0
节能环保支出增长率	0.000 0	0.017 8	0.061 0	0.076 2	0.059 5	0.000 2	0.000 0
财政收入	0.000 0	0.014 3	0.052 5	0.071 4	0.066 3	0.000 8	0.000 0
耕地面积占比	0.000 0	0.011 8	0.045 7	0.066 7	0.071 1	0.002 4	0.000 0
土地利用程度	0.000 0	0.009 8	0.040 1	0.061 9	0.074 0	0.006 2	0.000 0
农业产值	0.000 0	0.008 3	0.035 3	0.057 1	0.075 1	0.013 4	0.000 0
景观多样性指数	0.000 0	0.007 1	0.031 0	0.052 4	0.074 6	0.025 0	0.000 0
R&D 经费投入增长率	0.000 0	0.006 1	0.027 3	0.047 6	0.072 6	0.041 7	0.000 0
生物丰度	0.000 0	0.005 2	0.023 9	0.042 9	0.069 2	0.062 8	0.000 0
固定资产投资额	0.000 0	0.004 4	0.031 9	0.038 1	0.064 6	0.086 6	0.000 0
粮食产量	0.000 0	0.003 7	0.070 4	0.033 3	0.058 9	0.109 6	0.000 0
坡度	0.000 0	0.003 1	0.014 9	0.028 6	0.052 2	0.127 9	0.000 0
乡村劳动力资源数	0.000 0	0.002 5	0.012 3	0.023 8	0.044 8	0.137 3	0.000 0
万人拥有医疗床位数	0.000 0	0.002 0	0.009 7	0.076 2	0.036 6	0.134 4	0.000 0
化肥使用强度	0.000 0	0.011 4	0.007 2	0.014 3	0.028 0	0.117 6	0.000 0
农药使用强度	0.000 0	0.014 3	0.004 8	0.104 8	0.018 9	0.087 4	1.000 0

注: α 为决策风险系数。

通过自然断点法将河南省沿黄干流地区 4 种政策情景下社会—生态—生产系统恢复力从高到低划分为Ⅲ级、Ⅱ级和Ⅰ级 3 级,结果如图 3 所示。①情景一(维持现状型):研究区各地市 SEPLR 空间表征

为:以郑州市为中心,成“圈层结构”递减。模拟结果与 2018 年 SEPLR 空间分布基本趋同,表明 $\alpha=1$ 是一种特殊情景,也验证了情景指标选取的科学性;②情景二(生态优先型):研究区各地市 SEPLR 空间

表征为“中间强四周弱”,但基本都属于Ⅲ级和Ⅱ级,SEPLR 指数最高。当 $\alpha=0.8$ 时,生态系统内的指标因子权重较大,研究区恢复力较强,仅济源恢复力极差,对此,需加强两市的生态修复工作,改善区域生态恢复力情况;③情景三(开发优先型):研究区各地市 SEPLR 空间表征为:由东到西,依次递减。中东部属于Ⅲ级和Ⅱ级恢复力,而三门峡、济源和焦作的恢复力较低。当 $\alpha=2$ 时,经济系统内因子的权重较大,表明西部这 3 个地市社会系统恢复力态势较差。对此,该区域应加强国土空间开发、提升开发质量,但是也

要注重绿色发展;④情景四(生产优先型):研究区 SEPLR 空间表征为:明显成东强西弱的态势。此情景下,生产系统内因子的权重较高。西部区域农业生产潜能过低。表明研究区西部区域农业生产潜能过低。对此,需改善农业生产结构,因地制宜,提升该区域生产系统恢复力。当“开发优先型”、“生产优先型”政策主导时,河南省沿黄干流地区 SEPLR 表征为西部均低于中东部,从权衡协调发展角度,4 种政策情景下,未来黄河流域高质量发展可考虑“生态优先型”政策引导。

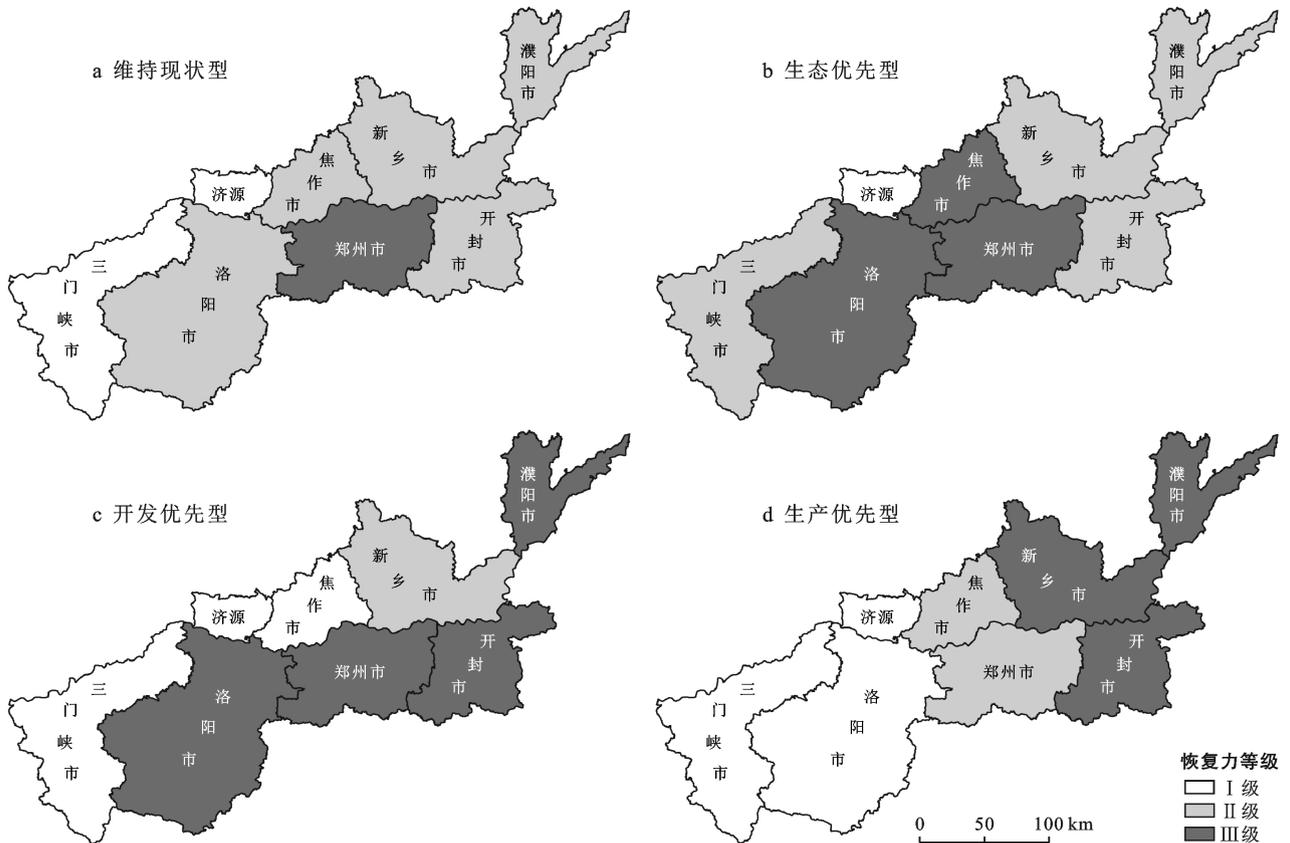


图 3 不同政策情景下河南省沿黄干流地区社会—生态—生产景观恢复力

基于以上模拟分析,不同决策风险系数,其政策制定的恢复力模拟结果不同,OWA 是基于多情景识别指标阈值变化不确定区间,基于情景政策对 SEPLR 空间分布进行论证预测,得到不同影响因素的重要性关系。在具体实践中,情景分析并非方案的单一优选,而是以 4 种情景结果阈值作为浮动区间的参考,对 SEPLR 发展战略进行调整。针对目前河南省沿黄干流地区 SEPLR 演化与情景预测结果,当前河南省沿黄干流地区:①西部地市应适度提升生产所需的基底条件(土壤质量、增加劳动力)以及制定相应政策维持生态系统恢复力。②中部地市对周围地市经济辐射带动作用极大,可考虑跨地市融合发展。但在发展经济的同时注意提高生态系统应对干

扰的能力。③东部地区生产系统恢复力较强,应当加强融合新农业生产技术继续提高生产,其次,可利用现有农业资源发展绿色农业经济,同时加强生态系统和社会系统恢复力。

4 讨论与结论

4.1 讨论

恢复力作为一种诠释人与环境相互作用机制的创新途径,其多学科融合和可持续发展目标的研究范式为恢复力研究提供了更加灵活的研究视角和更多多样性的应对手段。本研究通过探究河南省沿黄干流地区恢复力演化特征与质量,从新的视角看待流域可持续发展问题。河南省应以“黄河流域生态保护与高质量发

展”为契机,科学识别沿黄干流地区 SEPLR,遵循区域恢复力差异化规律,合理制定各地市高质量发展路径规划,以促进经济稳定发展、区域生态保护和保证国家粮食安全,最终达到区域间协调高效可持续发展。

当前,中国正处于快速城镇化和社会经济转型期,河南省沿黄干流地区在向高质量发展稳步迈进,面对内外部环境的不确定风险的复杂变化,增强其恢复力就显得愈发重要:①从研究区各地市本身的异质性来看,郑州市、洛阳市、新乡市作为河南省沿黄干流地区的核心城市,中心性和层级地位较高,核心城市组间的要素流动效率与相互联系水平使得它们之间 SEPLR 的增长极辐射带动能力较强。而对于其他边缘城市来说,SEPLR 中子系统表现突出,但整体较弱。受制区位、地形、自身结构壁垒,限制 SEPLR 提升。针对此症结,未来应适当淡化边缘城市层级结构,在发展自身优势和特色条件前提下与核心城市之间建立密切联系。②从要素流动层面讲,河南省沿黄干流地区隶属于同一省级行政单元,具有较强整体性,但无论在 SR,ER,PR 还是 SEPLR 的联系中都存在局部或整体联系强度低的现象。恢复力作为空间未来组织发展的重要指向,是社会经济稳定性与恢复力的结构保障,河南省沿黄干流地区高质量发展路径应参考遵循 SEPLR 差异化规律,在保证顶层设计同时,实现从统一的“多城一策”到“一城一策”。

4.2 结论

本文通过构建 SEPLR 评估框架,定量研究河南省沿黄干流地区 2000—2018 年 SEPLR 的演化特征,并运用有序加权平均法设置情景偏好,绘制不同政策引导下的 SEPLR 图,以实现区域协调可持续发展。

(1) ①河南省沿黄干流地区 SEPLR 平均值表明研究区恢复力不断强韧。②标准差表明沿黄干流地区离散程度较小。③变异系数表明 SEPLR 空间差异性不断扩大。④偏态系数高等级区域数量呈波动状态。⑤峰态指数表明 SEPLR 相似地区集中分布。

(2) ①SR 指数在 0.14~0.65 间波动且区域整体逐渐增强,空间分布由“中间强四周弱”变为“东强西弱”。②ER 指数在 0.08 至 0.30 之间波动,区域整体在 2000—2010 年成上升趋势,自 2015—2018 年有轻微回落,空间呈“西强东弱”的分布。③PR 指数在 0.02~0.31 之间波动。阶段性变化不明显,但仍保持了一定的弹性,空间上,PR 呈“东强西弱”的阶梯状特征。④SEPLR 是对 ER,SR,PR 的集成表达,SEPLR 指数在 0.40~0.47 间逐渐增强。空间呈“团状”分布,层级结构表现为以郑州市为中心向四周衰减的特征,与中原城市群的紧密联系圈大致吻合。

(3) 运用 OWA 方法设置情景,绘制“维持现状型”“生态优先型”“开发优先型”“生产优先型”4 种情景下的 SEPLR 模拟图。4 种政策空间格局分布各有差异,“生态优先型”情景下,预测的恢复力最高,未来黄河流域高质量发展应考虑“生态优先型”政策引导。

[参 考 文 献]

- [1] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, et al. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems [J]. *Ecology and Society*, 2004,9(2):1-9.
- [2] 马楠,闵庆文,焦雯珺,等.基于 SEPLS 模型的 GIAHS 恢复力评估框架及其在保护成效评估中的应用[J].*中国生态农业学报(中英文)*,2020,28(9):1361-1369.
- [3] Carl F. Resilience: the emergence of a perspective for social-ecological systems analyses [J]. *Global Environmental Change*, 2006,16(3):253-267.
- [4] Bailey I, Buck L E. Managing for resilience: A landscape framework for food and livelihood security and ecosystem services [J]. *Food Security*, 2016, 8 (3): 477-490.
- [5] Jiménez-Medina P, Artal-Tur A, Sánchez-Casado N. Tourism business, place identity, sustainable development, and urban resilience: A focus on the sociocultural dimension [J]. *International Regional Science Review*, 2021,44(1):170-199.
- [6] Cumming G S. Spatial resilience: Integrating landscape ecology, resilience, and sustainability [J]. *Landscape Ecology*, 2011,26(7):899-909.
- [7] 张行,梁小英,刘迪,等.生态脆弱区社会—生态景观恢复力时空演变及情景模拟[J].*地理学报*,2019,74(7):1450-1466.
- [8] 王群,陆林,杨兴柱.千岛湖社会—生态系统恢复力测度与影响机理[J].*地理学报*,2015,70(5):779-795.
- [9] 贾慧,陈海,毛南赵,等.高度敏感生态脆弱区景观可持续性评价[J].*资源科学*,2018,40(6):1277-1286.
- [10] 秦会艳,关赢,黄颖利.黑龙江省国有林区贫困—生态系统恢复力测度与影响机制[J].*生态与农村环境学报*,2018,34(9):821-829.
- [11] 余中元,李波,张新时.社会生态系统及脆弱性驱动机制分析[J].*生态学报*,2014,34(7):1870-1879.
- [12] 刘焱序,王仰麟,彭建,等.基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价[J].*地理学报*,2015,70(7):1052-1067.
- [13] 展亚荣,盖美.滨海旅游地社会—生态系统恢复力测度及协调发展研究[J].*地域研究与开发*,2018,37(5):158-164.
- [14] Rescia A J, Ortega M. Quantitative evaluation of the spatial resilience to the *B. oleae* pest in olive grove socio-ecological landscapes at different scales [J].*Ecological*

- Indicators, 2018, 84: 820-827.
- [15] Liu Meiling, Liu Xiangnan, Wu Ling, et al. Establishing forest resilience indicators in the hilly red soil region of Southern China from vegetation greenness and landscape metrics using dense Landsat time series [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 106985.
- [16] 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.
- [17] 彭翀, 王静. 河南省经济空间带动性发展格局及其城镇化空间策略研究[J]. *经济地理*, 2014, 34(9): 68-73.
- [18] 汪芳, 安黎哲, 党安荣, 等. 黄河流域人地耦合与可持续发展人居环境[J]. *地理研究*, 2020, 39(8): 1707-1724.
- [19] 张佰发, 苗长虹. 黄河流域土地利用时空格局演变及驱动力[J]. *资源科学*, 2020, 42(3): 460-473.
- [20] Beisner B E, Haydon D T, Cuddington K. Alternative stable states in ecology [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1(7): 376-382.
- [21] UNU-IAS, Bioversity International, IGE, et al. Toolkit for the indicators of resilience in socio-ecological production landscapes and seascapes (SEPLS) [EB/OL]. [2020-04-30].
- [22] 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.
- [23] Lambin E F, Meyfroidt P. Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change [J]. *Land Use Policy*, 2010, 27(2): 108-118.
- [24] 王帅, 傅伯杰, 武旭同, 等. 黄土高原社会—生态系统变化及其可持续性[J]. *资源科学*, 2020, 42(1): 96-103.
- [25] 孙晶, 王俊, 杨新军. 社会—生态系统恢复力研究综述[J]. *生态学报*, 2007, 27(12): 5371-5381.
- [26] 宋世雄, 梁小英, 梅亚军, 等. 基于 CBDI 的农户耕地撂荒行为模型构建及模拟研究: 以陕西省米脂县冯阳坳村为例[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(11): 1926-1937.
- [27] 陈佳, 杨新军, 尹莎, 等. 基于 VSD 框架的半干旱地区社会: 生态系统脆弱性演化与模拟[J]. *地理学报*, 2016, 71(7): 1172-1188.
- [28] Thompson I, Mackey B, McNulty S, et al. Forest Resilience, Biodiversity, and Climate Change. A synthesis of the biodiversity/resilience/stability relationship in forest ecosystems [Z]. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal. Technical Series No.43, 2009.
- [29] 乌宁巴特, 刘新平, 马相平. 叶尔羌河流域土地生态脆弱性差异评价[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(3): 849-858.
- [30] Zhang Lihui, Nie Qingyun, Chen Biying, et al. Multi-scale evaluation and multi-scenario simulation analysis of regional energy carrying capacity: Case study, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 734: 139440.

(上接第 180 页)

- [9] 于雷, 朱亚星, 洪永胜, 等. 高光谱技术结合 CARS 算法预测土壤水分含量[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(22): 138-145.
- [10] Gou Yu, Wei Jie, Li Jinlin, et al. Estimating purple-soil moisture content using Vis-NIR spectroscopy [J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(9): 2214-2223.
- [11] 彭杰, 向红英, 王家强, 等. 基于野外实测高光谱数据的干旱区耕作土壤含水量反演研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(2): 241-246.
- [12] 何挺, 王静, 程焯, 等. 土壤水分光谱特征研究[J]. *土壤学报*, 2006, 43(6): 1027-1032.
- [13] 张俊华, 贾科利. 典型龟裂碱土土壤水分光谱特征及预测[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 884-890.
- [14] 李治玲. 生物炭对紫色土和黄壤养分、微生物及酶活性的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [15] 李仲明. 中国紫色土(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 40-79.
- [16] 何毓蓉. 中国紫色土(下册)[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 8-18.
- [17] 陈俊佳, 陈志彪, 陈志强, 等. 不同水土保持措施对闽西紫色土速效养分及可蚀性的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(1): 45-50.
- [18] 沈润平, 丁国香, 魏国栓, 等. 基于人工神经网络的土壤有机质含量高光谱反演[J]. *土壤学报*, 2009, 46(3): 391-397.
- [19] 刘焕军, 王翔, 张小康, 等. 松嫩平原主要土壤类型含水量高光谱预测模型[J]. *土壤通报*, 2018, 49(1): 38-44.
- [20] 赵明松, 谢毅, 陆龙妹, 等. 基于高光谱特征指数的土壤有机质含量建模[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1): 42-54.
- [21] Peng Jian, Shen Hong, He Sanwei, et al. Soil moisture retrieving using hyperspectral data with the application of wavelet analysis [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 69(1): 279-288.
- [22] Stenberg B, Viscarra Rossel R A, Mouazen A M, et al. Visible and near infrared spectroscopy in soil science [M]// *Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2010: 163-215.
- [23] Steinberg A, Chabrilat S, Stevens A, et al. Prediction of common surface soil properties based on vis-NIR airborne and simulated EnMAP imaging spectroscopy data: Prediction accuracy and influence of spatial resolution [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(7): 613.
- [24] 张娜, 张栋良, 李立新, 等. 基于高光谱的区域土壤质地预测模型建立与评价: 以河套灌区解放闸灌域为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(5): 67-72.