

引用格式: 李顺可, 杨新军, 石若晗, 王菲, 陈佳. 秦巴山区社会-生态系统恢复力权衡-协同关系及驱动力——以陕南地区为例[J]. 山地学报, 2023, 41(4): 571-583.

LI Shunke, YANG Xinjun, SHI Ruohan, WANG Fei, CHEN Jia. Trade-offs and synergies of social-ecological system resilience and driving forces in the Qinba Mountains: A case study of southern Shaanxi, China [J]. Mountain Research, 2023, 41(4): 571-583.

# 秦巴山区社会-生态系统恢复力 权衡-协同关系及驱动力 ——以陕南地区为例

李顺可, 杨新军, 石若晗, 王菲, 陈佳\*

(西北大学 城市与环境学院, 西安 710127)

**摘要:** 秦巴山区是中国重要的生态功能区, 面临生态环境保护与社会经济发展的双重压力。探究秦巴山区社会-生态系统相互作用关系对推动区域高质量发展具有重要的现实意义。目前已有研究受限于系统复杂性, 仅聚焦于社会-生态系统恢复力的整体性评价, 缺乏对各子系统之间的权衡与协同关系的讨论。本文以陕南地区为例, 从社会、经济、生态子系统, 脆弱性与应对能力两个维度建立恢复力指标体系, 使用 TOPSIS 模型对陕南地区 2005—2020 年社会-生态系统恢复力进行测度, 通过相关性分析衡量社会-生态系统恢复力各子系统间权衡与协同关系, 并识别其主要驱动力。结果表明: (1) 2005—2020 年陕南地区社会、经济、生态系统和社会-生态系统恢复力均有不同程度的提升。(2) 生态系统脆弱性分别与生态系统应对能力、社会系统脆弱性之间存在权衡关系, 其他子系统之间主要表现为波动变化的协同关系。(3) 与权衡关系相关的主要障碍因子为农村居民生活水平、地形破碎程度和垃圾处理能力; 与协同关系相关的主要贡献因子为第一、二产业发展水平、地方财政实力、农村居民生活水平、垃圾处理能力以及教育发展水平。本研究从权衡与协同关系的问题视角出发解析社会-生态系统恢复力, 可以为秦巴山区高质量发展提供优化对策与建议。

**关键词:** 社会-生态系统; 恢复力; 权衡与协同

**中图分类号:** K901

**文献标志码:** A

全球气候变化和高强度的人类活动危害人类生存环境, 可持续成为未来发展的核心主题。社会-生态系统是人类社会与自然环境相互作用形成的耦合系统, 其理论及分析框架为科学实现可持续提供了有效途径<sup>[1]</sup>。恢复力作为社会-生态系统研究的核心概念<sup>[2-3]</sup>, 在 2001 年被引入社会-生态系统领域,

为理解不确定扰动下的可持续发展提供了新的视角<sup>[4]</sup>, 逐步成为解析社会-生态系统可持续发展的重要理论之一, 也为中国化的区域可持续发展目标实现提供了新思维。

近 20 年, 恢复力概念及理论的发展经历了三个阶段, 即工程恢复力、生态恢复力和社会-生态系统

**收稿日期** (Received date): 2022-08-30; **改回日期** (Accepted date): 2023-06-08

**基金项目** (Foundation item): 教育部人文社会科学研究青年基金 (19YJCZH006); 国家自然科学基金 (41901168)。[Youth Foundation of Humanities and Social Sciences of Ministry of Education of China (19YJCZH006); National Natural Science Foundation of China (41901168)]

**作者简介** (Biography): 李顺可 (1998-), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 主要研究方向: 社会-生态系统恢复力与区域可持续发展。[LI Shunke (1998-), male, born in Baoji, Shaanxi province, M. Sc. candidate, research on socio-ecological system resilience and regional sustainable development] E-mail: lisk1022@163.com

\* **通讯作者** (Corresponding author): 陈佳 (1989-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 乡村社会-生态系统演化与区域可持续发展。[CHEN Jia (1989-), male, Ph. D., associate professor, research on rural socio-ecological system evolution and regional sustainable development] E-mail: chenjia2018@nwu.edu.cn

恢复力<sup>[5-6]</sup>。社会-生态系统恢复力聚焦于系统的演化过程,被定义为复杂系统面对外界扰动时维持功能和控制的能力<sup>[7]</sup>。国内外关于社会-生态系统恢复力的实证研究,涉及个体、社区、区域等多个尺度,采用函数模型法和综合评价法等定量化方法<sup>[8]</sup>,对不同类型案例地如旅游地、贫困地区、半干旱地区、干旱地区的社会-生态系统恢复力进行测度,并引入影响因素分析、空间分析等方法<sup>[9-10]</sup>。然而,这类研究多关注外部扰动下复杂系统恢复力的演化过程,尤其是聚焦于恢复力的整体评价<sup>[11]</sup>,鲜有讨论各子系统之间的相互作用关系,并且在针对山区社会-生态系统恢复力的研究中依然存在测度尺度较粗、子系统作用关系以及演化特征不明等问题,直接影响对山区高质量发展问题的准确把握<sup>[12]</sup>。社会-生态系统恢复力建设的关键在于子系统的协同提升,因此探究社会-生态系统恢复力的权衡与协同关系既避免了对于子系统相互作用的忽视,又为社会-生态系统恢复力的实证研究提供了新思路。从恢复力权衡与协同视角揭示影响系统发展的主要驱动因素,对推进区域生态保护与社会经济可持续发展具有一定现实意义。

秦巴山区是中国重要的生态功能区,面临生态保护和发展的双重压力,社会-生态系统同时受到内部权衡与外部扰动的胁迫,区域人地矛盾突

出<sup>[13]</sup>。在中国生态文明建设和高质量发展的战略要求下,必须重新审视秦巴山区社会-生态系统恢复力的权衡与协同关系,提出区域高质量发展的优化对策。因此,当前亟需解决以下科学问题:社会-生态系统恢复力时空特征及子系统权衡与协同关系是如何演化的?主要驱动力是什么?

本文以陕南地区为例,对 2005—2020 年社会-生态系统恢复力演化进行测度<sup>[14]</sup>。运用 Pearson 相关性分析探究子系统间的权衡与协同关系及其变化趋势,并使用障碍度模型和贡献度模型识别系统恢复力权衡与协同的主要驱动力,以期为秦巴山区未来高质量发展路径优化提供理论参考。

## 1 研究区概况

陕南地区位于陕西省南部的秦巴山区(图 1),汉江自西向东穿流而过,由商洛市、汉中市、安康市组成,共 28 个区县,面积约为 69 929 km<sup>2</sup>。截至 2021 年,陕南地区总人口为 774.61 万人,占陕西省人口的 19.6%。陕南三市境内地貌结构复杂,气候温暖湿润,气温多在 14℃~15℃,年降水量达到 700~900 mm。该地区受自然环境的严重制约,社会经济发展缓慢<sup>[15]</sup>。此外,陕南地区还是中国南水北调中线水源涵养地和长江上游重要生态功能保护区,生态功能意义重大。

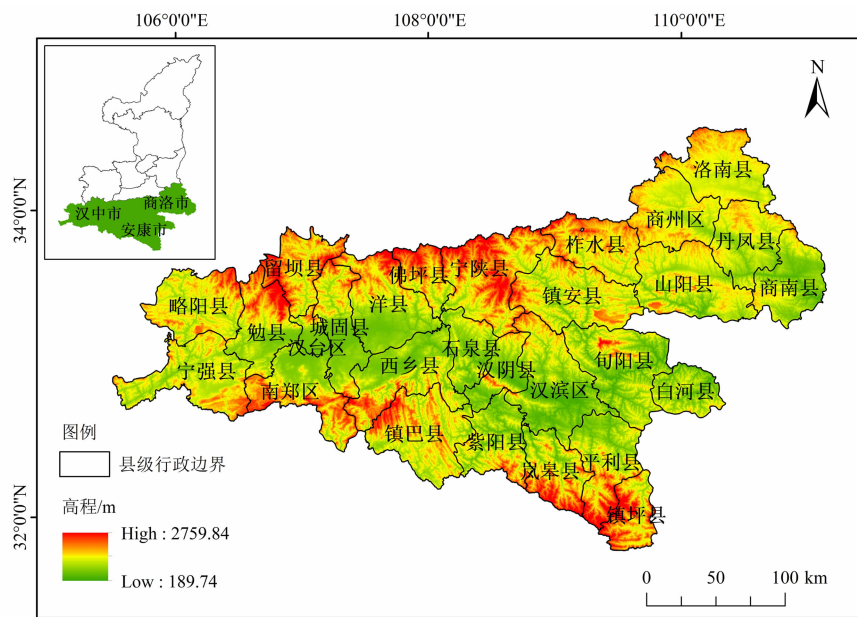


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the research area

## 2 数据来源与研究框架

### 2.1 数据来源

本文数据主要包括社会统计数据 and 自然环境数据:(1)社会统计数据主要来源于 2005、2010、2015、2020 年《中国县域统计年鉴》;商洛市、汉中市、安康市统计年鉴和商州区、洛南县、丹凤县、商南县等陕南地区 28 个区县的《国民经济和社会发展统计公报》以及《政府工作报告》等官方公布资料。土地利用数据来源于中国科学院资源环境数据中心 (<https://www.resdc.cn>), 分辨率为 1km; NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 数据来源于国家生态科学数据中心 (<http://www.nesdc.org.cn>), 分辨率为 30m。DEM (Digital Elevation Model) 数据来源于地理空间数据云平台 (<https://www.gscloud.cn>), 分辨率为 30m。PM<sub>2.5</sub> 质量浓度数据来源于加拿大达尔豪斯大学大气成分分析组 ([http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/?page\\_id=140](http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/?page_id=140)); 行政边界矢量数据以 2020 年为基准, 在获取数据后使用 ArcGIS10.2 软件按照陕南各区县行政边界进行划分提取, 最后对数据进行标准化处理。

### 2.2 研究框架

在已有研究中<sup>[9]</sup>, 学者们多从社会、经济、生态、治理四个方面考虑社会-生态系统恢复力, 而系统治理水平往往表现在其他三个方面, 故本文将社会-生态系统恢复力划分为社会、经济、生态三个维度(图 2)。社会-生态系统是人、地相互作用的复杂巨系统, 在面对干扰时恢复力主要表现在两个层面,

一是受到干扰攻击时系统本质属性的变化, 表现为脆弱性; 二是系统解决、处理干扰的能力, 表现为应对能力<sup>[16]</sup>。社会-生态系统恢复力中不同维度脆弱性与应对能力的相互作用关系直接影响到系统恢复力的强弱, 并且该过程具有复杂性和多样性的特点。复杂性体现在各子系统之间的权衡、协同和兼容等多种表现形式<sup>[17]</sup>, 多样性体现在其作用关系会随系统发展状态的变化而变化。权衡关系表现为子系统此强彼弱的失衡状态, 造成系统不平衡发展而导致恶性循环, 制约系统恢复力的提升; 协同关系表现为子系统同强同弱的平衡状态, 促进系统良性循环, 使其能够达到更高的恢复力水平。在当前的恢复力实证研究中鲜有学者讨论子系统之间相互作用的方式, 只是通过耦合度来评价区域发展的协调性, 对于系统内部发展的认识存在一定的局限性。本文通过建立不同时间段的窗口, 分析权衡与协同关系, 可以更清楚地把握子系统间的作用强度、作用方式以及作用变化趋势。

## 3 研究方法

### 3.1 社会-生态系统恢复力指标体系的构建

本文将恢复力划分为社会、经济、生态三个维度和脆弱性、应对能力两方面, 基于秦巴山区实际情况和相关研究<sup>[12,18]</sup>, 遴选 18 项指标(表 1)对陕南地区社会-生态系统恢复力进行测度。秦巴山区是中国十四个连片特困地区之一, 人口分布不均、人均收入低、医疗教育水平落后, 受复杂地形的影响导致路网系统不完善, 造成区县间社会发展水平差异较大。因此, 社会系统脆弱性选择人口密度表征社会人口特征, 城乡居民人均可支配收入表征社会居民的基本生活水平; 通过医疗水平、教育水平和道路建设水平表征社会系统应对和解决民生问题的能力。陕南三市经济发展滞后, 农业、工业发展均受到一定限制。因此, 经济系统脆弱性选择地区生产总值、粮食产量和规模以上工业产值反映综合经济、第一产业和第二产业发展水平。地方财政一般预算支出可以表征政府经济实力, 城乡居民储蓄存款余额、年末金融机构各项贷款余额可以表征居民和金融机构储备的、可直接支配的资金, 政府经济实力越强, 居民和金融机构可支配金额越高则应对突发事件的能力越强, 故选其表征经济系统应对能力。近年来, 随着城

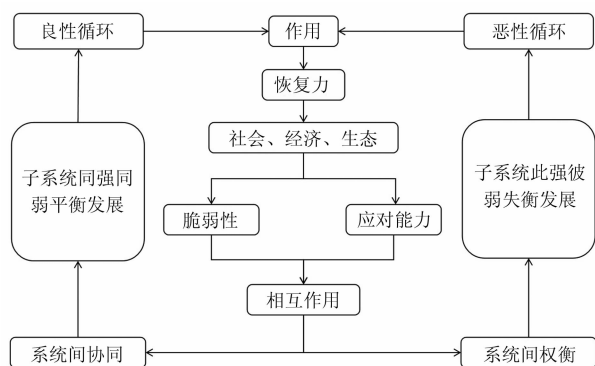


图2 社会-生态系统恢复力权衡-协同研究框架

Fig. 2 Research framework of the trade-offs and synergies of social-ecological system resilience

表 1 陕南地区社会-生态系统恢复力评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of social-ecological system resilience in southern Shaanxi

维度层	要素类型	指标层	指标解释与方向	单位	权重
社会子系统	脆弱性	人口密度( $X_1$ )	衡量系统人口压力( - )	人/km <sup>2</sup>	0.007
		城镇居民人均可支配收入( $X_2$ )	衡量城镇生活水平( + )	元	0.054
		农村居民人均可支配收入( $X_3$ )	衡量乡村生活水平( + )	元	0.063
	应对能力	每人千人拥有医疗机构床位数( $X_4$ )	衡量医疗水平( + )	张	0.051
		普通中学生在校人数( $X_5$ )	衡量教育水平( + )	个	0.061
		公路密度( $X_6$ )	衡量交通发展水平( + )	km/km <sup>2</sup>	0.036
经济子系统	脆弱性	地区生产总值( $X_7$ )	衡量经济实力( + )	万元	0.093
		粮食产量( $X_8$ )	衡量第一产业发展水平( + )	kg	0.046
		规模以上工业总产值( $X_9$ )	衡量第二产业发展水平( + )	万元	0.123
	应对能力	地方财政一般预算支出( $X_{10}$ )	衡量财政支出状况( + )	万元	0.079
		城乡居民储蓄存款余额( $X_{11}$ )	衡量居民财政状况( + )	万元	0.125
		年末金融机构各项贷款余额( $X_{12}$ )	衡量金融状况( + )	万元	0.155
生态子系统	脆弱性	NDVI( $X_{13}$ )	衡量植被覆盖情况( + )	-	0.011
		地形破碎度( $X_{14}$ )	衡量地形破碎程度( - )	-	0.033
		PM <sub>2.5</sub> ( $X_{15}$ )	衡量空气质量( - )	μm/m <sup>3</sup>	0.013
	应对能力	污水处理率( $X_{16}$ )	衡量区域污水处理能力( + )	%	0.014
		生活垃圾无害化处理( $X_{17}$ )	衡量区域垃圾处理能力( + )	%	0.027
		土地利用强度( $X_{18}$ )	衡量土地适应能力( + )	-	0.011

注: +、- 分别表示该指标与系统呈正向、负向影响作用。

市的不断扩张已严重威胁到了陕南地区的生态环境,因此生态系统脆弱性选择 NDVI、地形破碎度、PM<sub>2.5</sub>,用于表征生态环境质量。考虑山区生态保护和自然环境限制等因素,生态系统应对能力指标选取污水处理率、生活垃圾无害化处理率和土地利用强度,表征环境治理水平和地形适应能力。

### 3.2 指标标准化与权重确定方法

由于所选取指标单位存在差异,本文使用极差标准化的方法对指标进行无量纲处理。熵权法是一种客观的权重计算方法,能反映指标信息的效用价值并克服指标间的信息重叠<sup>[19]</sup>,被广泛用于地理学研究中,因此本文使用熵权法计算社会-生态系统恢复力各指标权重。

### 3.3 恢复力测度方法

逼近理想解的排序方法(TOPSIS)是多目标决策分析中一种常用的方法,主要是通过加权欧式距离来计算评价对象与最优和最劣解之间的相对距离,最后采用贴进度来描述评价对象状态<sup>[20]</sup>。本文

选取 TOPSIS 模型进行系统恢复力测度,使用 Arc GIS10.2 按照等间距法将各区县恢复力计算结果划分为 5 个等级,并与矢量格式的研究单元进行空间衔接<sup>[21]</sup>,绘制成恢复力空间分布图。计算步骤如下:

(1)通过极差标准化对原始数据进行归一化处理,并通过熵权法确定各指标权重,建立加权评价矩阵。

(2)确定正、负理想解  $X^+$  和  $X^-$ :

$$\begin{cases} X^+ = \{ \max x_{ij} \mid j = 1, 2, 3, \dots, n \} \\ X^- = \{ \min x_{ij} \mid j = 1, 2, 3, \dots, n \} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $x_{ij}$ 为第  $i$  个县的第  $j$  项指标。

(3)通过加权欧式距离来测算评价对象与最优解、最劣解之间的距离:

$$\begin{cases} d_i^+ = \sqrt{(\sum_{j=1}^n w_j (x_{ij} - X_j^+)^2)} \\ d_i^- = \sqrt{(\sum_{j=1}^n w_j (x_{ij} - X_j^-)^2)} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $d_i^+$  为与最优解之间的距离;  $d_i^-$  为与最劣解之间的距离;  $w_j$  为指标权重。

(4) 计算评价对象与最优解之间的相对贴近度:

$$V_i = \frac{d_i^-}{(d_i^+ + d_i^-)} \quad (3)$$

式中,  $V_i$  为相对贴近度, 值域在 0 到 1 之间, 越靠近 1 表明恢复力值越高, 反之恢复力值越低。

### 3.4 变异系数法

变异系数法又称标准差率, 是数据标准差和均值的比值, 通过变异系数可以表达社会-生态系统恢复力的离散程度<sup>[22]</sup>, 公式如下:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (4)$$

式中,  $CV$  为变异系数;  $\sigma$  为恢复力标准差;  $\mu$  为恢复力均值, 数值越大表明区县间恢复力差异越显著、区域发展平衡程度越差。

### 3.5 恢复力权衡与协同分析

权衡与协同分析广泛应用于生态系统领域, 协同是指子系统间同增同减的平衡状态, 权衡是指子系统间此强彼弱的失衡状态。验证子系统间权衡与协同关系的方法主要有相关分析、聚类分析、PPF 曲线等多种方法。参考先前对权衡与协同关系的研究成果后<sup>[23]</sup>, 本文选取 Pearson 相关性分析衡量社会-生态系统恢复力各子系统权衡与协同关系。

### 3.6 恢复力权衡与协同驱动力识别

#### 3.6.1 障碍度模型

障碍度模型常用来识别制约系统发展的主要障碍因子, 通过指标对目标的影响程度、指标偏离度和障碍度识别障碍因素, 指标对目标的影响程度由各目标的权重表示, 指标偏离度由各指标与各指标最优值之差表示<sup>[24]</sup>, 通过障碍度的大小排序确定主要驱动力。本文以相互权衡的两子系统组合为研究对

象, 使用障碍度模型识别限制恢复力增长的障碍因子即为恢复力权衡关系的主要驱动力。计算公式为:

$$Y_{ij} = 1 - P_{ij} \quad (5)$$

式中,  $Y_{ij}$  为单项指标的偏离度;  $P_{ij}$  为指标标准化值。

$$Z_j = \frac{Y_{ij}G_j}{\sum_{j=1}^n Y_{ij}G_j} \times 100\% \quad (6)$$

式中,  $Z_j$  为障碍度;  $G_j$  为第  $j$  项指标对目标的影响作用程度, 由指标权重表示。

#### 3.6.2 贡献度模型

贡献度模型常用于识别推动系统发展的主要贡献因子, 使用贡献度模型识别恢复力协同关系的主要驱动力, 通过指标对目标的影响程度、隶属度和贡献度识别贡献因子<sup>[25]</sup>。本文以相互协同的两系统为研究对象, 使用贡献度模型识别促进恢复力增长的贡献因子即为协同作用的主要驱动力。计算公式为:

$$I_j = \frac{P_{ij}G_j}{\sum_{j=1}^n P_{ij}G_j} \times 100\% \quad (7)$$

式中,  $I_j$  为第  $j$  项指标对目标的贡献度。

## 4 结果与分析

### 4.1 社会-生态系统恢复力测度结果

#### 4.1.1 社会系统恢复力

近 15 年秦巴山区社会系统恢复力稳步提升, 呈现逐步加快的增长态势, 区县间恢复力分异程度不断扩大(表 2)。在空间上, 恢复力较高的区县主要分布在城镇化水平高的地区(图 3), 北部的山区恢复力普遍较低。

2005—2010 年陕南地区社会系统恢复力总体水平偏低且增幅较小, 其中汉台区、汉滨区恢复力最

表 2 2005—2020 年陕南地区社会-生态系统恢复力变异系数

Tab. 2 Coefficient of variation of social-ecological system resilience in southern Shaanxi from 2005 to 2020

系统	2005 年			2010 年			2015 年			2020 年		
	均值	标准差	变异系数/%	均值	标准差	变异系数/%	均值	标准差	变异系数/%	均值	标准差	变异系数/%
社会系统	0.211	0.092	16.806	0.255	0.096	24.303	0.353	0.086	37.667	0.461	0.077	43.864
经济系统	0.035	0.030	85.851	0.069	0.060	86.575	0.152	0.113	74.398	0.250	0.216	86.701
生态系统	0.492	0.086	17.436	0.553	0.102	18.521	0.627	0.108	17.198	0.642	0.092	14.355
社会-生态系统	0.057	0.031	54.700	0.086	0.057	66.174	0.167	0.107	63.780	0.266	0.202	76.077

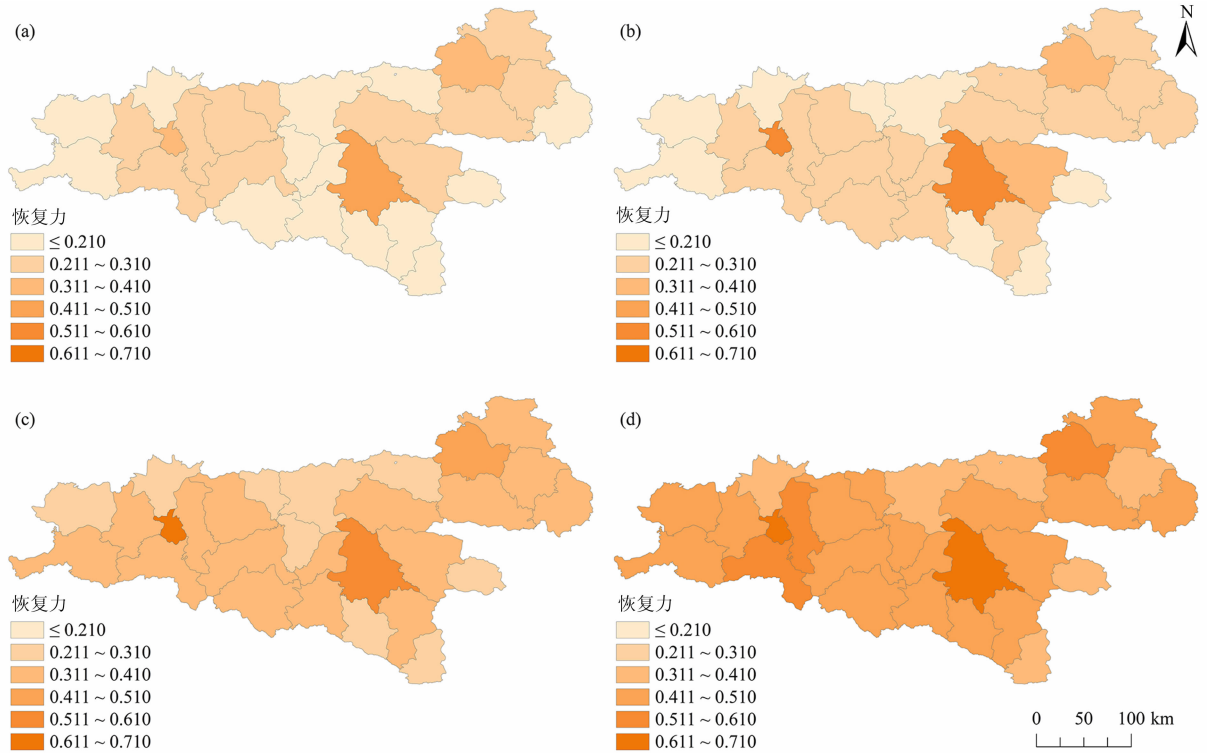


图3 陕南地区社会系统恢复力:(a)2005年;(b)2010年;(c)2015年;(d)2020年

Fig.3 Social system resilience in southern Shaanxi:(a)2005; (b)2010; (c)2015; (d)2020

高,南部、北部和西部的山区恢复力普遍小于中部平原地区。2015年社会系统恢复力全面提升,尤其是西乡县、留坝县和商南县等地恢复力显著增强,增幅均在0.130以上。2020年社会系统恢复力增幅达到最高,恢复力较高的区县多集中于西部地区,而北部的宁陕县、佛坪县、留坝县等地恢复力较低。陕南地区社会系统恢复力的提升得益于国家政策的扶持,加大了财政投资,教育、医疗、交通等基础设施都有明显改善。

#### 4.1.2 经济系统恢复力

近15年秦巴山区经济系统恢复力水平较低,呈现逐步加快的增长态势,区县间恢复力分异程度不断波动(表2),发展不平衡现象明显,平原地区经济系统恢复力普遍较高,南北两侧山地区县的经济系统恢复力较低(图4)。

受秦巴山区自然环境限制,2005—2010年陕南地区经济系统恢复力总体水平偏低且增幅较小,西部恢复力略高于其他地区,区县间差异明显。2015年经济系统恢复力快速提升,初步形成以汉台区、汉滨区为核心的空间格局,区县间差异有所减小。2020年经济系统恢复力增幅达到最大,以汉滨区、

汉台区为核心的空间结构进一步凸显,佛坪县、留坝县、宁陕县恢复力依然较低。陕南地区经济系统发展受到复杂地形与生态环境的严重制约,呈现经济总量小、区域差异大的特点。汉台区、汉滨区、商州区、南郑区等有自然环境、交通条件和城镇建设优势的区县经济得到了迅速提升。

#### 4.1.3 生态系统恢复力

近15年秦巴山区生态系统恢复力总体水平较高,呈现先快后慢的增长态势,区县间恢复力分异程度先增大后减小(表2)。总体来看,东部生态系统恢复力较高,且经济系统恢复力水平高的地区生态系统恢复力普遍偏低(图5)。

2005年陕南地区生态系统恢复力较高的区县主要位于商州区、山阳县等地,东部和西部恢复力高于中部。2010年生态系统恢复力快速提升,80%以上区县恢复力有所增长,其中东部增幅较大,形成东高西低的空间格局。2015年生态系统恢复力增幅达到最大,分异程度开始减小。2020年生态系统恢复力均已达到较高水平,仍然保持东高西低的空间格局。2000年左右,秦巴山区开展了大规模的退耕还林工程,极大地提升了区域的生态环境质量,减少



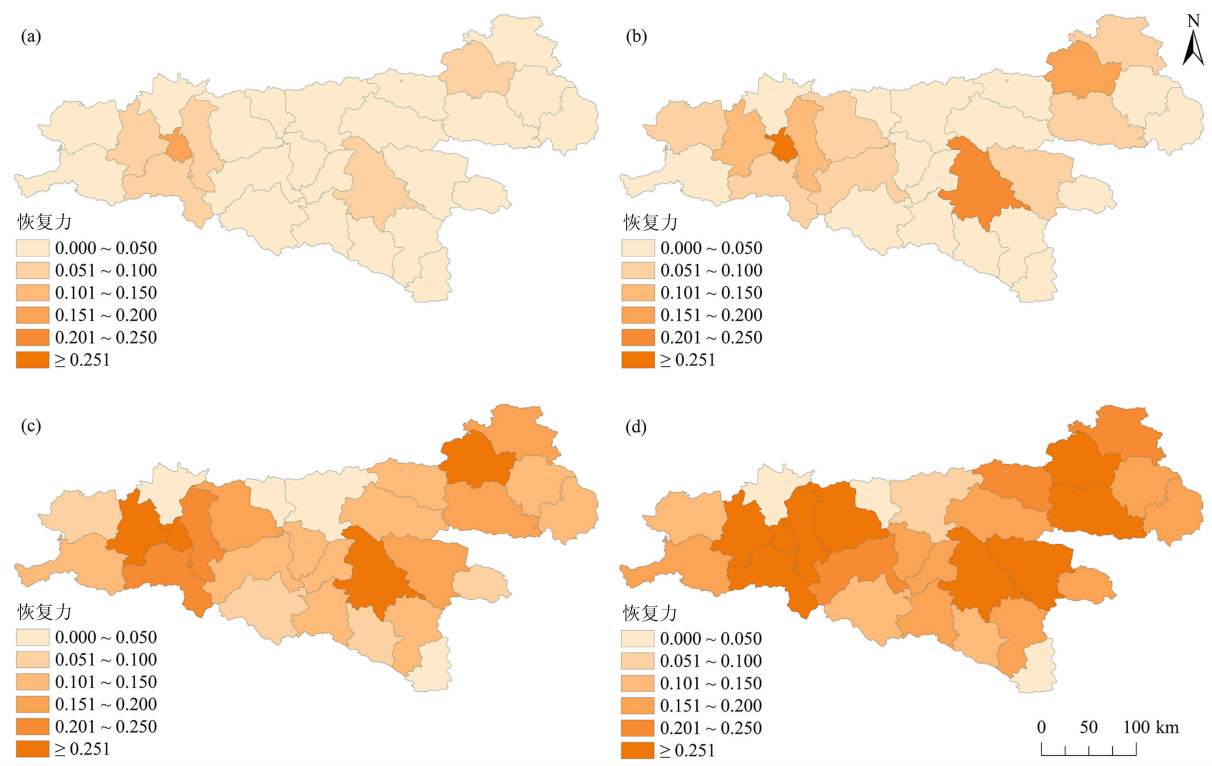


图4 陕南地区经济系统恢复力:(a)2005年;(b)2010年;(c)2015年;(d)2020年  
Fig.4 Economic system resilience in southern Shaanxi:(a)2005; (b)2010; (c)2015; (d)2020

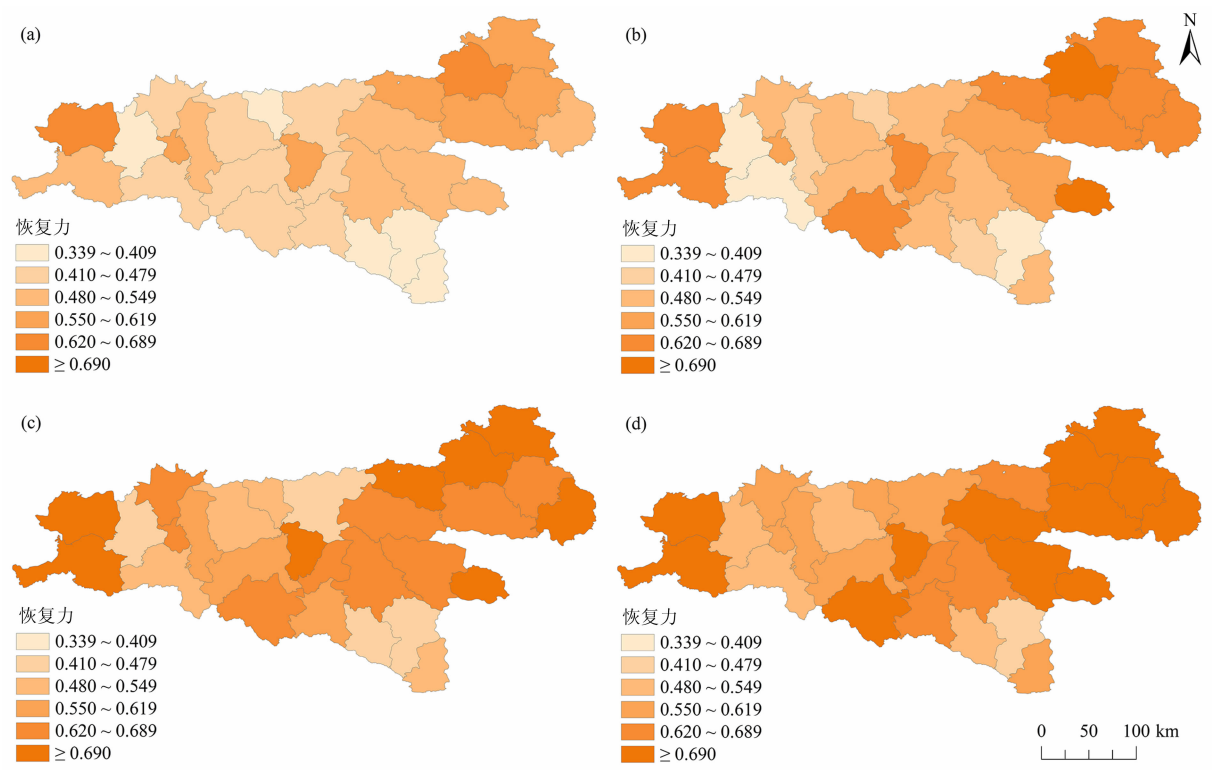


图5 陕南地区生态系统恢复力:(a)2005年;(b)2010年;(c)2015年;(d)2020年  
Fig.5 Ecological system resilience in southern Shaanxi:(a)2005; (b)2010; (c)2015; (d)2020

了自然灾害发生频率。与此同时,地方政府高度重视秦山区的生态环境保护工作,促使陕南地区生态系统恢复力显著提升。

#### 4.1.4 社会-生态系统恢复力

近 15 年秦巴山区社会-生态系统恢复力稳步提升,呈现出逐步加快的增长态势,区县间恢复力分异程度波动增加(表 2)。在空间分布上,平原地区社会-生态系统恢复力普遍较高,西部恢复力水平高于东部和中部(图 6)。

2005—2010 年陕南地区社会-生态系统恢复力总体水平较低且增幅较小。2015 年社会-生态系统恢复力增幅有所提升,西部增幅最大,尤其是汉台区增幅达到了 0.240。2020 年汉台区、汉滨区社会-生态系统恢复力水平已远高于其他区县,集聚特点愈发明显,宁陕县、镇坪县、留坝县、佛坪县等地恢复力依然较低。2010 年后,陕南地区发展被列入国家战略层面,并提出了“循环发展”的主线,各市核心区社会-生态系统恢复力快速提升,而南北两侧山地区县受到自然环境、基础设施等多方面因素的制约,发展依然缓慢。

#### 4.2 社会-生态系统恢复力权衡与协同分析

基于 Pearson 数理统计结果表明(图 7),从权衡

关系来看,2005 年生态系统脆弱性与生态系统应对能力之间存在显著的权衡关系,2010—2020 年间显著性有所降低,主要是由于陕南各区县污染状况与环境治理能力存在一定差异,治理能力较强的区县往往人口偏多、工业发达,同时排污、排废量也相对较高,导致环境污染问题加剧,2005 年后随着退耕还林等生态工程的实施以及环境治理能力提升,权衡作用有所减弱。2010—2020 年社会系统脆弱性与生态系统脆弱性之间呈现不断增强的权衡关系,主要是由于 2010 年以后交通设施便利程度迅速提升,导致陕南地区人口向汉台区、汉滨区等核心地区流动,促进了当地社会经济发展的同时人口与土地的不断扩张也加剧了环境污染问题。

从协同关系来看,2005—2020 年社会系统应对能力、经济系统脆弱性和经济系统应对能力三者之间存在显著的协同关系,随时间推移协同关系处于较高水平波动变化,表明陕南地区在发展过程中同时注重教育、医疗、基础设施等社会服务功能与经济水平的共同提升。2005—2020 年社会系统脆弱性与社会系统应对能力、经济系统脆弱性、经济系统应对能力之间存在先增强后减弱的协同关系。社会基

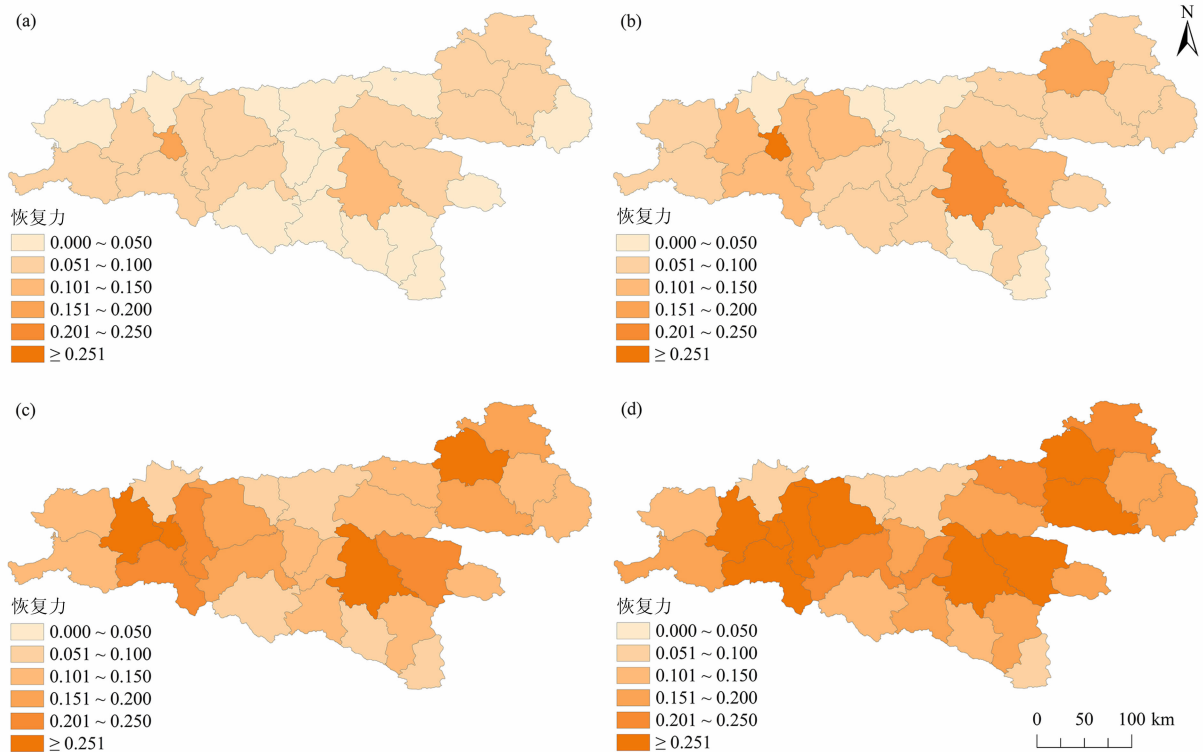
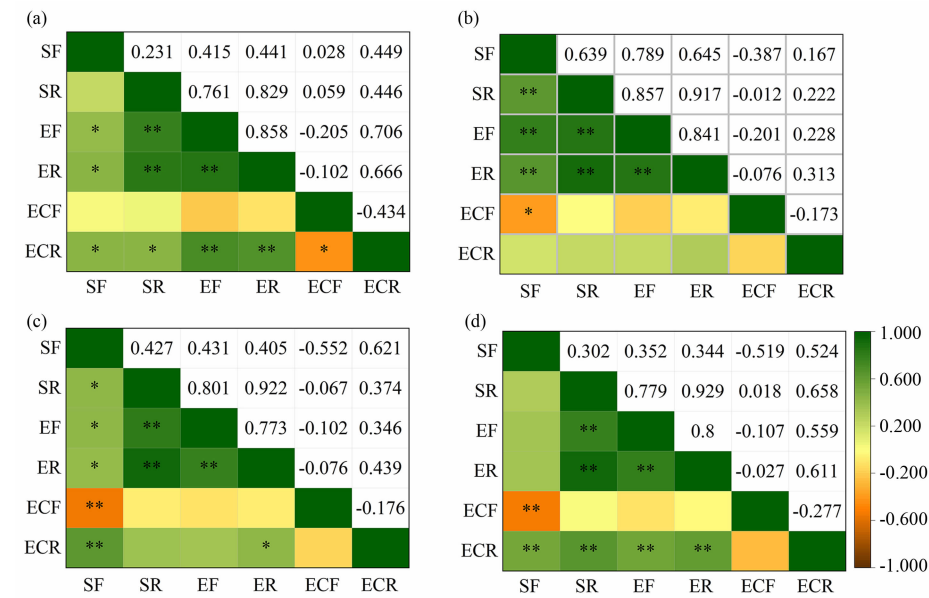


图 6 陕南地区社会-生态系统恢复力:(a)2005 年;(b)2010 年;(c)2015 年;(d)2020 年

Fig. 6 Social-ecological system resilience in southern Shaanxi:(a)2005; (b)2010; (c)2015; (d)2020





SF 为社会系统脆弱性;SR 为社会系统应对能力;EF 为经济系统脆弱性;ER 经济系统应对能力;  
ECF 生态系统脆弱性;ECR 生态系统应对能力, \* 表示  $p \leq 0.05$ ; \* \* 表示  $p \leq 0.01$ 。

图7 2005—2020年陕南地区社会-生态系统恢复力各子系统间相关性:  
(a)2005年;(b)2010年;(c)2015年;(d)2020年

Fig. 7 Correlation among subsystems of the social-ecological system resilience in southern Shaanxi from 2005 to 2020;  
(a)2005; (b)2010; (c)2015; (d)2020

本状况是发展社会服务功能以及经济水平的重要前提,人口收入水平和人口数量在一定程度上决定了社会与经济发

4.3 恢复力权衡与协同驱动力识别

使用障碍度模型和贡献度模型,识别限制恢复力权衡关系的障碍因子和促进恢复力协同关系的贡献因子即为恢复力权衡与协同的主要驱动力,本文以不同的权衡与协同关系为研究对象,选取各权衡与协同关系中不同子系统的首位障碍因子和贡献因子进行权衡与协同驱动力分析。

从权衡关系看(表3),陕南地区社会-生态系统恢复力各子系统权衡关系的主要障碍因子为: $X_3$ 、 $X_{14}$ 、 $X_{17}$ 。农村是对生态环境造成严重影响的地区之一,农村居民人均可支配收入是农村居民生活水平的表征,直接关系到农村家庭经济状况以及农村

社会发展水平,经济落后区县的农村地区往往没有完善的基础设施来处理生产、生活垃圾,并且缺乏环境保护意识,导致环境污染问题的加剧,因此农村人均可支配收入是主要的限制因素。陕南地区地形复杂、地形破碎度高,导致交通以及工程建设等方面的发展受到严重制约,限制了社会经济水平的提升。生活垃圾无害化处理率关系到环境治理能力和污染程度,陕南地区生活垃圾无害化处理率差异较大,在经济发展过程中污染物排放水平显著增加,而部分区县的环境治理能力仍处于有限,导致其成为权衡关系的主要驱动力。

从协同关系来看,陕南地区社会-生态系统恢复力各子系统协同关系的主要贡献因子为: $X_3$ 、 $X_5$ 、

表3 恢复力权衡的主要障碍度因子

Tab. 3 Main obstacle factors of the resilience trade-offs

权衡关系	主要障碍度因子	
	因子1	因子2
生态系统脆弱性-社会系统脆弱性	$X_3$	$X_{14}$
生态系统脆弱性-生态系统应对能力	$X_{17}$	$X_{14}$

$X_8$ 、 $X_9$ 、 $X_{10}$ 、 $X_{17}$ (表 4)。农村居民可支配收入与生活垃圾处理率既是主要贡献因子,又是主要障碍因子,其原因在于研究对象的不同。农村居民收入水平的提升很大程度上促进了乡村地区的社会经济发展,在与社会经济系统的协同关系中是主要贡献因子,但由于各区县农村居民收入水平差异较大,落后的区县往往环境保护能力与意识较差,导致在与生态系统脆弱性的权衡关系中是主要障碍因子。生活垃圾处理能力是生态系统应对能力与社会、经济系统协同关系的主要贡献因子,说明陕南地区在发展过程中注重环境保护能力的提升,但各区县生活垃圾处理水平差异较大,导致在与生态系统脆弱性的权衡关系中是主要障碍因子,因此环境治理能力的提升依然是陕南地区的工作重点。教育水平是协同关系主要的贡献因子,社会经济发展是教育水平提升的物质基础,为教育提供了人力、物力、财力,同时教育的发展也促进了地方经济发展。在经济系统中,第一、第二产业发展水平以及政府财政实力是促进协同关系的关键,表明陕南地区第一产业与第二产业的发展带动了社会各方面的进步,地方政府的财政实力也为社会各个领域的发展起到了支撑作用。

表 4 恢复力协同的主要贡献度因子

Tab. 4 Main contribution factors of the resilience synergies

协同关系	主要贡献度因子	
	因子 1	因子 2
社会系统脆弱性-社会系统应对能力	$X_3$	$X_5$
社会系统脆弱性-经济系统脆弱性	$X_3$	$X_8$
社会系统脆弱性-经济系统应对能力	$X_3$	$X_{10}$
生态系统应对能力-社会系统脆弱性	$X_3$	$X_{17}$
生态系统应对能力-社会应对能力	$X_{17}$	$X_5$
生态系统应对能力-经济系统应对能力	$X_{17}$	$X_{10}$
生态系统应对能力-经济系统脆弱性	$X_9$	$X_{17}$
经济系统应对能力-经济系统脆弱性	$X_9$	$X_{10}$
经济系统应对能力-社会系统应对能力	$X_5$	$X_{10}$
经济系统脆弱性-社会系统应对能力	$X_9$	$X_5$

## 5 结论与讨论

### 5.1 结论

(1)2005—2020 年,陕南地区社会系统、经济系统、生态系统和社会-生态系统恢复力均有不同程度

的提升。在空间分布上,平原区县社会系统、经济系统、社会-生态系统恢复力普遍高于山地区县;生态系统恢复力较高的区县主要分布在陕南地区的东部和中部。

(2)社会系统脆弱性与生态系统脆弱性之间的权衡关系不断增强;生态系统应对能力与生态系统脆弱性之间的权衡关系有所减弱。社会系统应对能力、经济系统脆弱性与经济系统应对能力三者之间存在显著的协同关系;社会系统脆弱性分别与社会系统应对能力、经济系统脆弱性、经济系统应对能力间存在先增强后减弱的协同关系;生态系统应对能力与生态系统脆弱性以外的子系统存在先减弱后增强的协同关系。避免与生态系统之间出现权衡关系是推动高质量发展的关键,陕南地区应不断提升生态环境治理能力,坚持绿色发展道路。

(3)障碍度模型与贡献度模型表明,社会-生态系统恢复力权衡关系的主要障碍因子为农村居民生活水平、地形破碎程度和垃圾处理能力;协同关系来主要贡献因子为第一、第二产业发展水平、地方财政实力、农村居民生活水平、垃圾处理能力以及教育发展状况。

### 5.2 讨论

#### 5.2.1 讨论与建议

秦巴山区作为典型脆弱区,同时受到自然要素和人文要素的制约,提升系统恢复力是推进山区社会-生态系统可持续发展的关键因素之一。从理论视角来看,本文通过社会-生态系统恢复力及子系统权衡与协同关系的研究,深化了系统恢复力的内涵,能够更为综合地全面地把握系统的发展状态。从实证视角来看,本文以陕南地区为例,在探究社会-生态系统恢复力演化的基础上更关注子系统之间的权衡与协同关系,可以为提升山区社会-生态系统恢复力、推进山区高质量发展提供一定理论参考与借鉴。

本研究发现,陕南地区社会-生态系统恢复力普遍较低、分异性较强,在空间分布上,社会系统、经济系统恢复力时空演化特征相似,恢复力较高的区县主要分布在平原地区,同时地形条件是社会-生态系统恢复力权衡关系的主要驱动力。环境问题突出、经济发展滞后是山区面临的现实问题<sup>[13]</sup>,已有研究也表明山区发展相较于平原地区更易受到地形条件的影响从而制约社会、经济以及综合实力的提升<sup>[26]</sup>。因此,总体统筹区域发展模式,强化顶层设

计和系统布局,是推进陕南地区协同发展的关键。本文识别出陕南地区恢复力权衡关系主要存在于生态系统与其他子系统之间,以往人地系统的研究多关注子系统间的耦合关系,在其他典型案例地的研究中生态环境与人类活动之间也普遍存在低耦合的情况<sup>[27-28]</sup>,这主要是由于社会经济的快速发展建立在人类活动增强的基础上,不合理的人类活动必然会加剧生态环境的退化,未来如何实现产业生态化、生态产业化发展模式,是实现我国山区高质量发展的关键<sup>[29]</sup>。

### 5.2.2 研究不足

本研究仍存在一定不确定性。首先,陕南是典型的山区,而指标体系中对于描述山区复杂地形和地质环境的指标较少,在后续研究中应采取更全面的评价体系探究山区社会-生态系统恢复力权衡与协同关系。其次,本研究着重关注系统内部因子的驱动作用,缺乏对于外部因子影响的探究,需要进一步综合考量系统内外因子影响及交互作用,以准确识别制约恢复力提升的关键因素。

### 参考文献 (References)

- [1] 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): 96-106. [WANG Shuai, FU Bojie, WU Xutong, et al. Dynamics and sustainability of social-ecological systems in the Loess Plateau [J]. Resources Science, 2020, **42**(1): 96-106] DOI: 10.18402/resci.2020.01.10
- [2] NAVEH Z. What is holistic landscape ecology? A conceptual introduction [J]. Landscape and Urban Planning, 2000, **50**(1-3): 7-26. DOI: 10.1016/S0169-2046(00)00077-3
- [3] 刘小茜,王仰麟,彭建. 人地耦合系统脆弱性研究进展[J]. 地球科学进展, 2009, **24**(8): 917-927. [LIU Xiaoqian, WANG Yanglin, PENG Jian. Progress in vulnerability analysis of coupled human-environment system [J]. Advances in Earth Science, 2009, **24**(8): 917-927] DOI: 1001-8166(2009)08-0917-11
- [4] HOLLING C S. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems [J]. Ecosystems, 2001, **4**(5): 390-405. DOI: 10.1007/s10021-001-0101-5
- [5] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, **4**(1): 1-23. DOI: 10.2307/2096802
- [6] 王子侨. 恢复力视角下的黄土高原典型乡村社会-生态系统研究——以陕西省长武县为例[D]. 西安: 西北大学, 2018: 16-20. [WANG Ziqiao. Study on the typical rural social-ecological system of Loess Plateau from the perspective of resilience; A case study of Changwu county, Shaanxi province, China [D]. Xi'an: Northwest University, 2018: 16-20]
- [7] 周晓芳. 从恢复力到社会-生态系统: 国外研究对我国地理学的启示[J]. 世界地理研究, 2017, **26**(4): 156-167. [ZHOU Xiaofang. From resilience to social-ecological system: What did the western research tell us about the Chinese geography [J]. World Regional Studies, 2017, **26**(4): 156-167] DOI: 10.3969/j.issn.1004-9479.2017.04.016
- [8] 杨涛. 生态脆弱区乡村社会-生态系统恢复力多尺度研究——以米脂县高渠乡为例[D]. 西安: 西北大学, 2021: 5-8. [YANG Tao. A multi-scale study on resilience of rural society-ecosystem in the fragile region; A case study of Gaoqu township in Mizhi county, Shaanxi province, China [D]. Xi'an: Northwest University, 2021: 5-8]
- [9] 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. [WANG Qun, LU Lin, YANG Xingzhu. Study on measurement and impact mechanism of socio-ecological system resilience in Qiandao Lake [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, **70**(5): 779-795] DOI: 10.11821/dlxb201505009
- [10] 叶文丽,杨新军,吴孔森,等. 黄土高原社会-生态系统恢复力时空变化特征与影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2022, **45**(3): 912-924. [YE Wenli, YANG Xinjun, WU Kongsun, et al. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of social-ecological system resilience in the Loess Plateau [J]. Arid Land Geography, 2022, **45**(3): 912-924] DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2021.386
- [11] 宋爽,王帅,傅伯杰,等. 社会-生态系统适应性治理研究进展与展望[J]. 地理学报, 2019, **74**(11): 2401-2410. [SONG Shuang, WANG Shuai, FU Bojie, et al. Study on adaptive governance of social-ecological system: Progress and prospect [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, **74**(11): 2401-2410] DOI: 10.11821/dlxb201911015
- [12] 温晓金. 恢复力视角下山区社会-生态系统脆弱性及其适应[D]. 西安: 西北大学, 2017: 50-58. [WEN Xiaojin. The social-ecological vulnerability and adaption in mountainous area under the perspective of resilience thinking [D]. Xi'an: Northwest University, 2017: 50-58]
- [13] 敬博. 秦巴山区人地系统演化格局及空间管控研究[D]. 西安: 西北大学, 2022: 1-5. [JING Bo. Research on evolution pattern and spatial management and control of man-land system in Qinba mountainous area [D]. Xi'an: Northwest University, 2022: 1-5]
- [14] 王群,杨万明,朱跃,等. 贫困区旅游地社会-生态系统恢复力时空分异研究——以安徽境内大别山区12个贫困县(市)为例[J]. 地理科学, 2021, **41**(6): 1030-1038. [WANG Qun, YANG Wanming, ZHU Yue, et al. Spatio-temporal differentiation of tourism socio-ecological system resilience in poor area; A case study of 12 poverty-stricken counties in the Dabie Mountain of Anhui province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, **41**(6):

- 1030–1038] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2021.06.012
- [15] 吕静. 陕南地区生态移民搬迁的成本研究[D]. 西安: 西北大学, 2014: 42–46. [LYU Jing. Research on the cost of ecological resettlement relocation in southern Shaanxi [D]. Xi'an: Northwest University, 2014: 42–46]
- [16] FELIPE-LUCIA M R, COMÍN F A, BENNETT E M. Interactions among ecosystem services across land uses in a floodplain agroecosystem [J]. *Ecology and Society*, 2014, **19**(1): 20. DOI: 10.5751/ES-06249-190120
- [17] WILLEMEN L, HEIN L, VAN MENSVOORT M E F, et al. Space for people, plants, and livestock? Quantifying interactions among multiple landscape functions in a Dutch rural region [J]. *Ecological Indicators*, 2010, **10**(1): 62–73. DOI: 10.1016/j.ecolind.2009.02.015
- [18] 贾垚焱, 胡静, 谢双玉, 等. 贫困山区旅游地社会-生态系统脆弱性及影响机理[J]. *人文地理*, 2021, **36**(1): 155–164. [JIA Yaoyan, HU Jing, XIE Shuangyu, et al. Vulnerability and influence mechanisms of social-ecological system in poor mountainous tourism destinations [J]. *Human Geography*, 2021, **36**(1): 155–164] DOI: 10.13959/j.issn.1003-2398.2021.01.018
- [19] 何艳冰, 黄晓军, 翟令鑫, 等. 西安快速城市化边缘区社会脆弱性评价与影响因素[J]. *地理学报*, 2016, **71**(8): 1315–1328. [HE Yanbing, HUANG Xiaojun, ZHAI Lingxin, et al. Assessment and influencing factors of social vulnerability to rapid urbanization in urban fringe: A case study of Xi'an [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, **71**(8): 1315–1328] DOI: 10.11821/dlxb201608003
- [20] 何艳冰, 陈佳, 黄晓军. 西安城市边缘区失地农民社区恢复力测度与影响因素[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, **29**(3): 126–136. [HE Yanbing, CHEN Jia, HUANG Xiaojun. Measurement and influencing factors of land-lost farmers' community resilience in urban fringe of Xi'an [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, **29**(3): 126–136] DOI: 10.12062/cpre.20180901
- [21] 王成, 何焱洲. 重庆市乡村生产空间系统脆弱性时空分异与差异化调控[J]. *地理学报*, 2020, **75**(8): 1680–1698. [WANG Cheng, HE Yanzhou. Spatio-temporal differentiation and differentiated regulation of the vulnerability of rural production space system in Chongqing [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, **75**(8): 1680–1698] DOI: 10.11821/dlxb202008009
- [22] 杨晴青, 高岩辉, 杨新军, 等. 黄土高原半干旱区微尺度乡村人居环境系统脆弱性测度及时空分异——以陕西省佳县为例[J]. *干旱区地理*, 2020, **43**(5): 1371–1381. [YANG Qingqing, GAO Yanhui, YANG Xinjun, et al. Measurement and spatial-temporal differentiation of vulnerability of microscale rural human settlements in the semi-arid region of the Loess Plateau: A case study of Jiaxian county, Shaanxi province [J]. *Arid Land Geography*, 2020, **43**(5): 1371–1381] DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2020.05.22
- [23] 杨晓楠, 李晶, 秦克玉, 等. 关中-天水经济区生态系统服务的权衡关系[J]. *地理学报*, 2015, **70**(11): 1762–1773. [YANG Xiaonan, LI Jing, QIN Keyu, et al. Trade-offs between ecosystem services in Guanzhong-Tianshui economic region [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, **70**(11): 1762–1773] DOI: 10.11821/dlxb201511006
- [24] 孙才志, 董璐, 郑德凤. 中国农村水贫困风险评价、障碍因子及阻力类型分析[J]. *资源科学*, 2014, **36**(5): 895–905. [SUN Caizhi, DONG Lu, ZHENG Defeng. Rural water poverty risk evaluation, obstacle indicators and resistance paradigms in China [J]. *Resources Science*, 2014, **36**(5): 895–905] DOI: 1007-7588(2014)05-0895-11
- [25] 吴孔森, 杨晴青, 叶文丽, 等. 黄土高原农户生计恢复力及其生计建设路径——以陕北佳县为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, **35**(4): 24–30. [WU Kongsan, YANG Qingqing, YE Wenli, et al. Farmers' livelihood resilience and livelihood construction path in the Loess Plateau [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, **35**(4): 24–30] DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2021.094
- [26] 张甜, 周宝同, 廖和平, 等. 重庆市乡村社会-生态系统恢复力测度与提升路径研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2022, **44**(11): 2–12. [ZHANG Tian, ZHOU Baotong, LIAO Heping, et al. Study on the measurement and improvement path of resilience of rural social ecosystems in Chongqing [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2022, **44**(11): 2–12] DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.11.001
- [27] 伏吉芮. 干旱区人文-自然系统耦合动态演变及调控研究——以吐鲁番市为例[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2016: 89–91. [FU Jili. Study on the dynamic evolution and regulation of human and natural system coupling in arid area: A case study of Turpan city [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2016: 89–91]
- [28] 牛子浩. 喀斯特山区人类活动与生态系统服务耦合协调分析——以贵州省黄平县为例[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2022: 35–39. [NIU Zihao. Coupling coordination analysis of human activity and ecosystem service in karst mountainous areas: A case study of Huangping county in Guizhou province [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2022: 35–39]
- [29] 张玉, 王介勇, 刘彦随. 陕西秦巴山区地域功能转型与高质量发展路径[J]. *自然资源学报*, 2021, **36**(10): 2464–2477. [ZHANG Yu, WANG Jieyong, LIU Yansui. Regional function transformation and high-quality development path in Qinling-Daba Mountains of Shaanxi province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, **36**(10): 2464–2477] DOI: 10.31497/zrzyxb.20211002

## Trade-Offs and Synergies of Socio-Ecological System Resilience and Driving Forces in the Qinba Mountains: A Case Study of Southern Shaanxi, China

LI Shunke, YANG Xinjun, SHI Ruohan, WANG Fei, CHEN Jia \*

(College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China)

**Abstract:** The Qinba Mountains is an important ecological function area in China, currently challenged by both ecological protection and socio-economic development. It is of great practical significance to explore the interaction of social-ecological system in the Qinba Mountains to sustain regional high-quality development.

Limited by the complexity of a socio-ecological system, most scientific efforts were made merely toward an overall evaluation of the resilience of socio-ecological system, but little attention was paid to the trade-offs and synergies between individual subsystems.

This study focused on the three major subsystems: social system, economic system, and ecological system, and established an indicator system from the perspectives of vulnerability and coping capacity. A TOPSIS model was used to measure the resilience of the social-ecological system in Qinba, southern Shaanxi from 2005 to 2020. It determined the trade-offs and synergies among different subsystems in the social-ecological system resilience by relevant analysis and identified main driving forces behind trade-offs and synergies by Obstacle Degree Model and the Contribution Degree Model.

It has the following findings. (1) From 2005 to 2020, the social system, economic system and ecological system, as well as social-ecological system resilience in the southern Shaanxi region had been improved to some extent. (2) The trade-offs correlation existed between social system vulnerability and ecosystem vulnerability, as well as between ecosystem coping capacity and ecosystem vulnerability. The main interaction between the other subsystems is characterized by fluctuating and changing synergies. (3) The main obstacles related to trade-offs were the living standard of rural residents, terrain fragmentation level, and the capacity of garbage disposal. The main contributing factors related to synergies included the development level of the first and second industries, the local financial strength, the living standard of rural residents, the capacity of garbage disposal and the level of education development.

This study analyzed the resilience of the socio-ecological system from the perspective of trade-offs and synergies, and it would provide optimization strategies for a high-quality development of the Qinba Mountains.

**Key words:** socio-ecological system; resilience; trade-offs and synergies

(责任编辑 李嵘)