

DOI: 10.20103/j.stxb.202304280898

王银, 叶文丽, 吴孔森, 杨新军. 稳定性视角下黄土高原生态系统与生计系统的冲突与耦合——以陕西省佳县为例. 生态学报, 2024, 44(5): 1868-1880.
Wang Y, Ye W L, Wu K S, Yang X J. Conflict and coupling between ecosystem and livelihood system on the Loess Plateau from the perspective of stability: a case of Jia County, Shaanxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5): 1868-1880.

稳定性视角下黄土高原生态系统与生计系统的冲突与耦合

——以陕西省佳县为例

王 银¹, 叶文丽¹, 吴孔森², 杨新军^{1,*}

¹ 西北大学城市与环境学院, 西安 710127

² 河南师范大学旅游学院, 新乡 453000

摘要: 黄土高原地区是我国生态脆弱和深度贫困的高度耦合区, 长期面临生态治理和生计保障的双重压力, 如何协调乡村生态系统与农户生计系统之间的平衡成为区域人地系统稳定和可持续发展的关键。基于稳定性概念内涵, 以黄土高原佳县为例, 采用地理空间数据和问卷调查数据, 定量评价生态系统和生计系统现状, 利用耦合协调度和相对发展度模型, 梳理两个系统之间的相互作用关系并划分冲突与耦合类型区, 在此基础上分析冲突关系的成因并提出分类治理建议, 以期为区域人地矛盾缓解和可持续治理提供参考。结果表明: (1) 佳县生态系统稳定性整体较高, 但空间分异特征明显。县域生态稳定性格局呈“北部低值成片, 南部低值分散”的特征, 以道路交通用地和建设用地为表征的人为因素对生态稳定性的影响显著; (2) 佳县生计系统稳定性整体处于中等级, 农户生计方式已趋于多元, 但生计资本仍较为匮乏。多样化的生计在一定程度上能够弥补生计资本的欠缺, 而地理区位和自然条件对生计系统稳定性的维持作用仍不容忽视; (3) 佳县生态系统与生计系统的相互关系以冲突为主, 中度冲突、轻度冲突、濒临冲突和勉强平衡四种类型同时存在, 勉强平衡区属于生态系统和生计系统稳定性双低的假性平衡, 人地矛盾较为尖锐的冲突型区域内村庄多为生计滞后型, 人地冲突的主要成因在于生态治理对生计空间的剥夺。建议通过结合决策者自上而下的管理和行为者自下而上的提升措施来逐步化解县域人地矛盾, 实现生态-生计系统内部协调稳定。

关键词: 稳定性; 生态系统; 生计系统; 耦合协调度; 黄土高原

Conflict and coupling between ecosystem and livelihood system on the Loess Plateau from the perspective of stability: a case of Jia County, Shaanxi Province

WANG Yin¹, YE Wenli¹, WU Kongsen², YANG Xinjun^{1,*}

¹ College of Urban and Environment Science, Northwest University, Xi'an 710127, China

² College of Tourism, Henan Normal University, Xinxiang 453000, China

Abstract: The Loess Plateau is a highly coupled area of ecological fragility and deep poverty in China. Faced with the dual pressure of protecting the ecological environment and ensuring the livelihood of the poor for a long time, the contradiction between human and land is prominent on the Loess Plateau. How to coordinate the balance between rural ecosystem system and farmers' livelihood system has become the key to the stability and sustainable development of regional human-land system. Based on the concept of stability, this paper took Jia County on the Loess Plateau as an example to quantitatively evaluate the stage of ecosystem system and livelihood system by using geospatial data and questionnaire survey data. The interaction between the two systems was sorted out and the conflict and coupling types were divided by coupling coordination

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771574)

收稿日期: 2023-04-28; **网络出版日期:** 2023-09-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangxj@nwu.edu.cn

degree model and relative development degree model. On this basis, the causes of the conflict relationship were analyzed and the classification management suggestions were put forward, in order to provide reference for the alleviation of regional human-land contradictions and sustainable governance. The main conclusions are as follows: (1) The overall stability of ecosystem in Jia County was in high grade, but there was obviously geographic variation. The ecological stability pattern in the county showed the characteristics of “patches of low values in the north and scattered low values in the south”. The human factors represented by road traffic land and construction land had significant influence on ecological stability; (2) The overall stability of livelihood system was in medium grade. Farmers' livelihood modes had tended to be diversified, but their livelihood capitals were generally lacking. Diversified livelihoods could partially compensate for a dearth of livelihood capitals, but rural geographic location and natural conditions could not be ignored in maintaining the livelihood stability; (3) The relationship between ecological system and livelihood system was mainly conflict, including moderate conflict, mild conflict, near conflict, and reluctant balance. The reluctant balanced area belonged to the false balance with low stability of both livelihood system and ecological system. Most villages in the conflict areas with sharp contradiction between human and land were lagging in livelihood, and the primary cause of human-land conflicts was the deprivation of livelihood space by ecological governance. It is suggested that by combining measures of the top to down management of decision makers and the bottom to top promotion of actors, the contradiction between human and land in counties can be gradually resolved, and the internal coordination and stability of the ecology-livelihood system can be realized.

Key Words: stability; ecosystem; livelihood system; coupling harmonious degree; the Loess Plateau

进入“人类世”新纪元后,人类活动与自然环境的互动空前加强。随着工业化、城镇化和信息化进程的加快,全球气候变化、大气污染、水资源短缺、土壤退化等生态环境问题日益凸显,人地矛盾不断加剧,如何协调生态系统与人类系统的关系成为全球变化和可持续发展研究的焦点^[1]。实现人与自然和谐共生不仅是联合国 2030 年可持续发展的重要目标,更是建设社会主义现代化的必然要求。我国生态脆弱区和深度贫困区存在高度耦合,生态治理的重点区,往往也是扶贫开发的攻坚区,长期面临保护生态环境与保障贫困生计的双重压力。尽管近 20 年来我国在此类地区实施了一系列包括“三北”防护林建设、退耕还林(草)等生态治理工程和移民搬迁、精准扶贫等生计保障措施,生态环境恶化和区域人口贫困问题得到一定缓解,但治理成效的可持续性仍存在区域差异,生态治理与生计保障之间的矛盾依然尖锐。在新时代人地互动方式愈发复杂的背景下,如何协调生态与生计之间的平衡成为区域人地系统稳定和可持续发展的关键^[2]。鉴于此,有必要针对人地矛盾突出的重点地区,深入探究其生态系统与生计系统的复杂关系,为区域人地矛盾缓解和可持续综合治理提供依据。

区域人地系统具有非线性和多稳态特征,其中生态系统和生计系统是两个既密切联系又相互制约的开放子系统^[3-4],二者具有各自的功能、结构和发展规律,但又随时因另一方的变化而变化^[5]。生态系统与生计系统之间的相互作用关系是受经济、社会、文化和自然等多方面因素影响的复杂机制,包括世界环境与发展委员会(WCED)、政府间气候变化专门委员会(IPCC)和恢复力联盟等组织机构都在致力于探索这些复杂变化。各国学者整合了地理学、生态学、经济学和社会科学等学科知识对生态系统和人类系统的复杂关系及互动机理展开研究^[6],未来地球计划、湿地生计生态项目(ECOLIVE)和国际地圈生物圈计划(IGBP)等应运而生,形成了包括人地关系地域系统^[7]、人地耦合系统动力学^[8]、社会-生态系统恢复力^[9]、人-地耦合环^[10]等研究思路和框架。近年来,相关理论成果逐渐应用于实证研究,如特殊地理区域生态治理政策对生计系统的影响^[11-12]以及生计系统变化或生计方式转变所产生的生态环境效应等^[13-14],大多是就一个子系统变化对另一个子系统的影响展开,对两个子系统之间的冲突与耦合关系及这种关系变化对整个个人地系统的影响有待进一步深入。由于区域人地系统的特点是兼具自然和人为因素的,因此,借用工程学中的“稳定性”概念来描述当系统内部参数改变或遭遇不可预期的外部扰动时,维持继续运行的能力^[15]。自 Holling 将稳定性概念引入生

态系统研究后^[16],稳定性已成为评价系统应对外界扰动能力的重要方法。生态稳定性指生态系统应对外界干扰的抵抗力能力和受到干扰后恢复到稳定状态的能力^[17]。生计稳定性指生计系统不易受到外部扰动影响发生奔溃的特性^[18]。在社会经济快速转型、人地系统不断重构、人地矛盾日趋严峻的背景下,基于稳定性概念内涵,将生态系统和生计系统视作区域人地系统中的两个关键子系统,分析二者间的相互作用和复杂联系,能够为理解新时代人地耦合机制和可持续发展问题提供新的视角。

黄土高原支离破碎、千沟万壑的独特地貌,使其成为世界上水土流失最为严重的区域之一,现有 40% 以上的农业生产在坡耕地上进行,致使生态恶化进一步加剧,生态环境治理意味着对生计空间的挤压,生态系统与生计系统之间的矛盾尤为尖锐。以黄土高原中部水土流失最为严重的丘陵沟壑区县域为例,结合地理空间数据和实地调研数据,从稳定性视角定量评价生态系统和生计系统现状,利用耦合协调度和相对发展度模型,梳理两个子系统之间的冲突与耦合关系,在此基础上划分冲突等级区并提出分类治理建议,以期为区域人地关系平衡和可持续发展政策制定提供依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

佳县地处黄土高原中部丘陵沟壑区,是黄土高原土壤侵蚀最剧烈的地区之一。全县辖 12 个镇和 1 个街道,行政区面积 2029.82 km²。北接毛乌素沙漠南缘,东临黄河中游西岸,坡地沟谷面积广大,梁峁起伏,地形破碎,黄土面积占总面积的 86.7%,平均每平方公里沟壑数量达 23 条,县内相对差 670 m。地势西北高,东南低,形成北部风沙区、东部土石山区和西部丘陵沟壑区 3 个差异明显的地貌区(图 1)。佳县属半干旱大陆季风气候,年内降水分配不均,年均降水量 403.8 mm,自然灾害以干旱、冰雹最为频繁。全县户籍人口 26.7 万,其中农业人口占比为 88.8%^[19]。佳县作为我国北方地区典型的旱作谷物种植区,农业生产对自然条件的依赖程度高,且位于我国水土保持重点生态功能区和吕梁山集中连片特困区,生态环境脆弱,贫困人口集中,长期面临生态治理和生计保障的双重压力,人地矛盾突出。

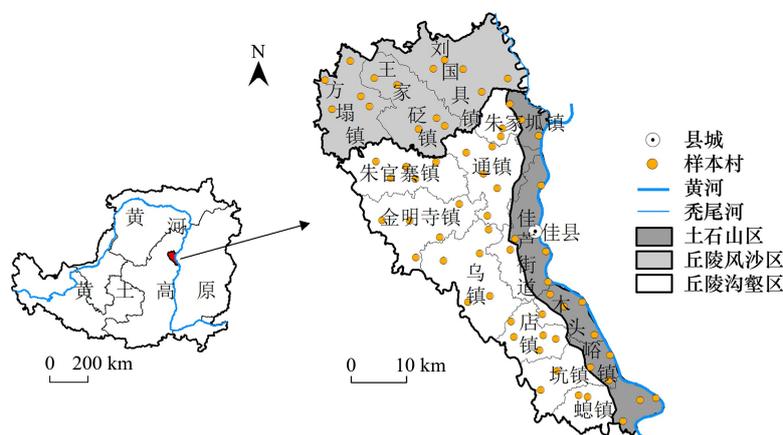


图 1 研究区区位图

Fig.1 Location of the study area

1.2 数据来源

本文所涉数据主要包括两部分:(1)地理空间数据:行政界线及村镇斑块等空间矢量数据来自佳县自然资源局提供的土地调查数据库。数字高程模型(DEM)数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 30 m。坡度数据利用 ArcGIS 10.3 软件中的坡度分析工具从 DEM 数据中提取而来。归一化植被指数(NDVI)和土壤侵蚀数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>)。土地利用数据来自基于 Landsat 的中国 2020 年 30 m 土地覆盖数据集(<http://doi.org/10.5281/zenodo.4417810>)^[20],参照

《土地利用现状分类标准》(GB/T21010—2015)将用地类型合并为水域和林地、灌木和草地、耕地、未利用地、建设用地五类。从土地利用数据库中提取道路、水系和建设用地并转化为 30 m×30 m 的栅格数据,利用地理信息系统(GIS)空间邻域分析方法得到各栅格到上述 3 种用地的距离。(2)问卷调查数据:课题组分别于 2018 年 7 月和 2020 年 10 月赴佳县开展农户生计专题预调研和正式调研,针对 13 个镇(街道)采用分层抽样方法,依据各镇(街道)的农村常住人口数量确定拟抽取的样本村数量,最终抽取 65 个样本行政村,每村随机抽取 5—7 户常住户进行半结构式访谈,时间控制在 45—60 min 之间,共获得 455 份问卷,其中有效问卷 451 分,有效率 99.1%。问卷调查内容包括农户家庭基本情况、人口结构、生计资本、生计来源和主观感知等。

2 研究方法

2.1 生态系统稳定性评价方法

自然和人为因素的综合作用给黄土高原生态系统稳定带来了巨大挑战,结合研究区生态环境特点,参考既有相关研究^[21—26],从自然和人为两方面选取 DEM 等 8 个指标来评价佳县生态系统稳定性(表 1)。佳县北部与毛乌素沙漠南缘相接,随着高程的升高,气候越发寒冷干燥,在黄土广布的旱作沙地,植物蒸腾作用更加剧烈,生态系统越容易受到干旱灾害的冲击,稳定性越低;黄土丘陵沟壑区梁峁起伏、沟壑纵横,地形坡度越大,水流对地表的冲刷越强,越容易诱发水土流失、水土侵蚀等自然灾害,生态稳定性越低;植被在生态系统中的重要作用不言而喻,NDVI 越高,越有助于保持水土和涵养水源,延缓荒漠化程度,生态稳定性越高;土地利用类型是人为因素作用下形成的区域生态格局,参照相关研究先例^[21—22],将林地和水域视作高生态稳定区,将灌木和草地视作较高生态稳定区,将耕地视作中生态稳定区,将未利用地(裸地)和建设用地分别视作较低和低生态稳定区;土壤侵蚀程度反映土壤受到水蚀和风蚀作用破坏的程度,佳县区内地形复杂,丘陵风沙区土质疏松,风力侵蚀剧烈,丘陵沟壑区地表破碎,水土流失严重,土石山区石沟深邃,流水侵蚀严重,因此将土壤侵蚀程度纳入生态稳定性评价指标;黄土高原半干旱区降水量不足且年内分配不均,水资源严重短缺,水系具有调节区域气候、改善生态环境的作用,与水系的距离越近,生态稳定性越高;脆弱生态区频繁的人类活动往往伴随着对生态环境的破坏和对自然资源的攫取,与道路用地和建设用地的距离越近,生态环境受人为干扰的因素越多,越容易造成生态环境破坏,生态稳定性越低。

表 1 生态稳定性评价指标与等级划分

Table 1 Evaluation index and grade division of ecological stability

评价指标 Evaluation index	5级(高) Level 5 (High)	4级(较高) Level 4 (higher)	3级(中) Level 3 (moderate)	2级(较低) Level 2 (lower)	1级(低) Level 1 (Low)	分类参考 Classification reference
高程 Elevation/m	<800	800—950	950—1100	1100—1250	>1250	[23—24]
坡度 Gradient/(°)	<5	5—10	10—20	20—30	>30	[25]
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	>0.40	0.35—0.40	0.35—0.35	0.25—0.30	<0.25	[23,25—26]
土地利用类型 Land-use type	林地、水域	灌木、草地	耕地	未利用地	建设用地	[21,24—25]
土壤侵蚀程度 Soil erosion degree	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强度侵蚀	剧烈侵蚀	[22,25—26]
与水系的距离/m Distance from water	<500	500—1000	1000—1500	1500—2000	>2000	[21,26]
与道路的距离/m Distance from roads	>4000	3000—4000	2000—3000	1000—2000	<1000	[22—23,26]
与建设用地的距离/m Distance from construction land	>2500	2000—2500	1500—2000	1000—1500	<1000	[21,25—26]

2.2 生计系统稳定性评价方法

稳定性被扩展到生计研究后,成为描述生计系统在受到外部扰动时能够维持原有功能结构或返回初始平衡状态能力的重要方法^[27]。生计稳定性常用生计多样性表征^[28,29],而多样化的生计仅代表农户拥有多种收入来源的可能,并不代表每种生计方式都具有可持续性,为弥补不足,本文参考相关文献^[28-30],结合佳县农业生产和农户生计状况,构建了以可持续性生计框架为基础,兼具多样性和依赖性内涵的生计稳定性评价指标体系(表2)。多样化生计不仅是重要的生计策略,更是实现生计系统稳定的有效方法^[31],收入多样性通过农户获得生计来源的渠道数量和均衡程度来表征生计方式的多样程度,借鉴生态学香农多样性方法测算^[32],即香农指数越高,表明农户收入来源越丰富、各收入占比越均衡、抵御生计风险的能力越强,生计系统越具稳定性。收入依赖性反映农户生计对某种收入的依赖程度^[33],当某种收入占比远高于其他收入时,表明其收入结构存在风险隐患,即收入依赖性越高,生计系统越不稳定。缓冲能力指农户生计系统受到外部干扰时,自身能够利用资源禀赋抵御并保持原有状态的能力,常用生计资本的存量和质量来表征。生计资本可分为自然资本、物质资本、金融资本、人力资本和社会资本,即农户拥有的生计资本越丰富,应对风险扰动时的抵御能力越强,生计系统越稳定。

表2 生计稳定性评价指标体系

Table 2 Evaluation indicator system of livelihood stability

目标层 Target layer	维度层 Dimension layer	指标层 Index layer	指标性质 Nature of indicators	指标权重 Weight of indicators
生计多样性 Livelihood diversity	收入多样性	Shannon 多样性指数 ^①	+	0.09
	收入依赖性	收入依赖性指数 ^②	-	0.09
缓冲能力 Buffer ability	自然资本	人均耕地面积,耕地面积与家庭人口总数的比值	+	0.18
	物质资本	房屋类型×0.5+人均住房面积×0.5 房屋类型:危房=1;土窑=2;石砖窑=3;砖混平房=4;楼房=5	+	0.18
	金融资本	家庭年人均纯收入	+	0.16
	人力资本	家庭劳动力人数与人口总数的比值	+	0.16
	社会资本	主观感知邻里之间的信任程度,由低到高分 为1—5	+	0.14

① $K_{inc} = - \sum_{i=1}^S Q_i \ln Q_i$, 式中 S 为收入来源的种类数, Q_i 为某种生计方式收入占总收入的比例; ② $D_{inc} = - \sum_{n=1}^S \frac{X_n(X_n - 1)}{X(X - 1)}$, 式中, X_n 为农户在 n 种收入来源下的家庭纯收入, X 为农户家庭总收入。

2.3 数据标准化处理与指标权重确定方法

为使不同量纲和单位的指标数据具备可比性,须对原始数据进行标准化处理,采用极差标准化方法将数值转化至0—1之间^[34]。

正负向指标极差标准化计算公式分别为:

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min\{X_j\}}{\max\{X_j\} - \min\{X_j\}} \quad (1)$$

$$X'_{ij} = \frac{\max\{X_j\} - X_{ij}}{\max\{X_j\} - \min\{X_j\}} \quad (2)$$

式中, X_{ij} 为第 i 个抽样村在第 j 项指标下的原始数据, $\min\{X_j\}$ 和 $\max\{X_j\}$ 分别表示第 j 项指标原始数据中的最小值和最大值, X'_{ij} 为标准化处理后的数值。

常见的指标赋权方法可分为主观和客观两类。其中,主观赋权法对于主观经验和认识依赖程度较大,而客观赋权法的赋权过程易受异常值干扰,容易导致个别权重偏离正常区间。鉴于此,本文选择能够同时克服

上述问题的熵值法来确定指标权重^[35]。该方法能够充分考虑指标本身的数值信息,在多属性决策问题中规避嵌入准则之间的内在冲突,使评价结果更加准确。具体计算过程如下:

首先,计算第 i 个抽样村在第 j 项指标下的值占该指标的比重 P_{ij} 。其中, n 表示抽样村总数。

$$P_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad (3)$$

其次,计算第 j 项指标的信息熵 e_j 和差异系数 δ_j 。

$$e_j = - (1/\ln n) \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (4)$$

$$\delta_j = 1 - e_j \quad (5)$$

最后,计算第 j 项指标的权重 w_j 。其中, m 表示指标数量。

$$w_j = \delta_j / \sum_{j=1}^m \delta_j \quad (6)$$

2.4 耦合协调度模型和相对发展度模型

耦合协调度模型是量化要素或系统间相互作用关系的重要模型,相对发展度模型能够刻画两个要素或系统的相对发展状况。综合上述两种模型,分析佳县生态系统与生计系统的耦合冲突关系,计算公式为:

$$C = 2 \sqrt{\frac{ESI \times LSI}{(ESI + LSI)^2}} \quad (7)$$

$$D = \sqrt{C \times (\alpha ESI + \beta LSI)} \quad \alpha + \beta = 1 \quad (8)$$

$$U = \frac{ESI}{LSI} \quad (9)$$

式中, C 表示生态系统与生计系统的耦合度, ESI 表示生态稳定性, LSI 表示生计稳定性, D 表示二者的耦合协调度, α, β 为待定系数,基于人地耦合理论和可持续发展理论,将二者置于同等重要地位,故赋值 $\alpha = \beta = 0.5$ 。 U 表示二者的相对发展度,当 $U > 1.2$ 时,说明生态系统稳定性优于生计系统;当 $0.8 \leq U \leq 1.2$ 时,说明二者稳定性水平接近;当 $U < 0.8$ 时,说明生态系统稳定性滞后于生计系统。依据上述两种模型,结合相关研究成果^[36-37],对生态系统与生计系统的耦合与冲突类型进行划分(表3)。

表3 耦合与冲突类型划分标准

Table 3 Classification criteria of coupling and conflict types

耦合协调度 Coupling coordination degree	关系类型 Relationship type	$U > 1.2$	$0.8 \leq U \leq 1.2$	$U < 0.8$
(0,0.1]	极度冲突	生计稳定性滞后	二者稳定性接近	生态稳定性滞后
(0.1,0.2]	严重冲突	生计稳定性滞后	二者稳定性接近	生态稳定性滞后
(0.2,0.3]	中度冲突	生计稳定性滞后	二者稳定性接近	生态稳定性滞后
(0.3,0.4]	轻度冲突	生计稳定性滞后	二者稳定性接近	生态稳定性滞后
(0.4,0.5]	濒临冲突	生计稳定性滞后	二者稳定性接近	生态稳定性滞后
(0.5,0.6]	勉强平衡	生计稳定性滞后	二者稳定性接近	生态稳定性滞后
(0.6,0.7]	初步平衡	生计稳定性滞后	二者稳定性接近	生态稳定性滞后
(0.7,0.8]	中级平衡	生计稳定性滞后	二者稳定性接近	生态稳定性滞后
(0.8,0.9]	良好平衡	生计稳定性滞后	二者稳定性接近	生态稳定性滞后
(0.9,1]	优质平衡	生计稳定性滞后	二者稳定性接近	生态稳定性滞后

U :生态系统与生计系统的耦合协调度

3 研究结果

3.1 生态系统稳定性评价结果

3.1.1 各评价指标稳定性

按照佳县生态稳定性评价指标与等级划分标准(表1),将各指标在栅格单元上的计算结果按照自然间断

点法分为低、较低、中、较高和高 5 级,得到各指标稳定性等级空间格局(图 2)。DEM 高程稳定性等级由东南向西北逐渐降低,与佳县西北高东南低的地势特征相吻合。坡度稳定性整体处于中等级,与沟壑区和山区相比,风沙区地形相对平缓,稳定性等级较高。得益于近 20 年来的退耕还林(草)生态治理,NDVI 植被覆盖度稳定性等级整体较高,但北部风沙区土壤荒漠化程度高,植被覆盖度仍相对较低。土地利用类型稳定性整体处于中等级,县域土地利用以耕地、灌木和草地为主,呈交错分布格局。受风力侵蚀和流水侵蚀作用影响,土壤侵蚀程度稳定性等级整体较低。与水系的距离稳定性和县域内河流水系的分布格局密切相关,风沙区和丘陵沟壑区西北部河网密度相对较小,低稳定区域较大。受交通路网布局影响,与道路的距离稳定性在县域西北和东北边缘处较高。受工业布局 and 人口集聚的影响,与建设用地的距离稳定性在北部工业基地和县城中心人口密集区处于低值。总体来看,在自然和人为因素的综合作用下,各评价指标稳定性在北部丘陵风沙区均未表现出明显优势,需重点关注并进一步细化其空间分区。

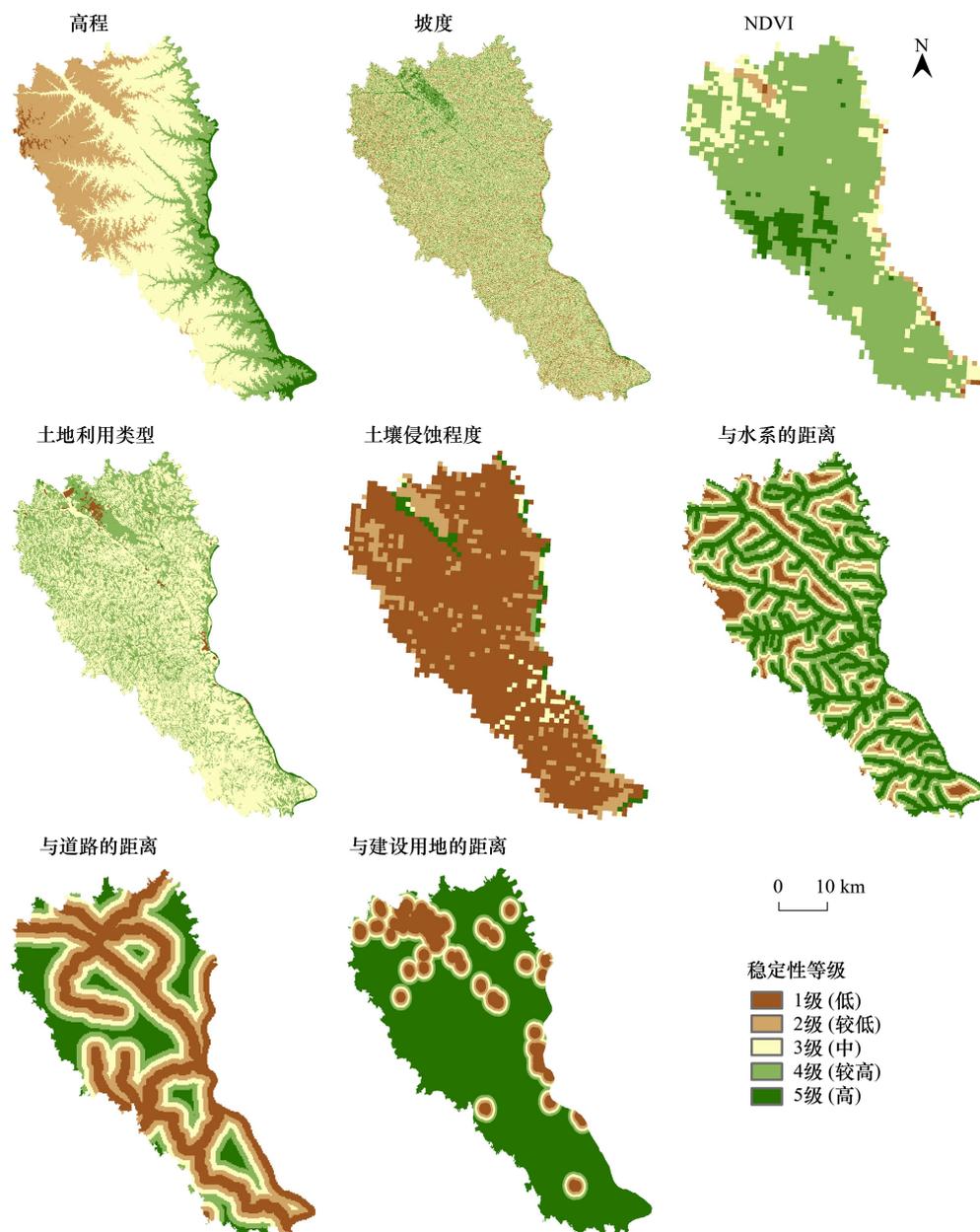


图 2 各指标稳定性等级空间格局

Fig.2 Spatial distribution of stability level of each index

3.1.2 生态稳定性空间格局

为进一步细化佳县生态系统稳定性空间格局,利用地图代数工具将各评价指标稳定性等级按照等权重方法进行计算,得到区域内每个栅格单元上的生态稳定性指数。随后按照自然间断点分级方法将生态稳定性指数分为低、较低、中、较高和高 5 级,得到其空间分区(图 3),并分别计算各等级区域面积(表 4)。结果显示,佳县整体生态稳定性较高,高和较高生态稳定区总面积为 1341.10 km²,占县域面积的 66.07%,以土石山区和丘陵沟壑区为主。中生态稳定区广泛且分散,在各地形区均有分布,面积为 334.11 km²,占县域面积的 16.46%。低和较低生态稳定区占县域面积的 17.47%,主要分布在丘陵风沙区。从空间格局来看,北部丘陵风沙区生态稳定性最低,包括方塌、王家砭和刘国具 3 个镇域,该区域与毛乌素沙漠南缘相接,地势相对较高,以黄土丘陵和干旱沙地为主要地貌,受风力侵蚀作用剧烈,植被覆盖度较低,此外该区域聚集了大批盐化工基地和能源化工基地,工业建设用地不断扩张,自然和人为因素综合作用造成该区域生态环境脆弱,稳定性明显

低于其他区域。东部土石山区生态稳定性差异较大,县城中心所在区域由于人口密度大,道路交通和建设用地占比高,生态环境受人为因素扰动频繁,稳定性较低。朱家峁镇和木头峪镇东部毗邻黄河且山高崖陡,土壤受流水侵蚀作用明显,伴随县域沿黄旅游产业的发展,旅游资源开发对生态环境造成的破坏使得低生态稳定区沿黄河呈点状分布。西部丘陵沟壑区除乌镇和坑镇中心人口聚集区外,整体生态稳定性较高,主要由于沟壑纵横的地形不利于农业开垦,区域定位以水土保持生态功能为主,土地利用类型多为林地和草地,植被覆盖度高。综合来看,佳县生态稳定性整体较高,但空间分异特征明显。县域生态稳定性格局呈“北部低值成片,南部低值分散”的特征,以道路交通和建设用地为表征的人为因素对生态稳定性的影响显著。这种不平衡的生态稳定性格局为县域要素流动和农户生计活动带来了阻力,不利于区域生态安全和经济社会可持续发展。

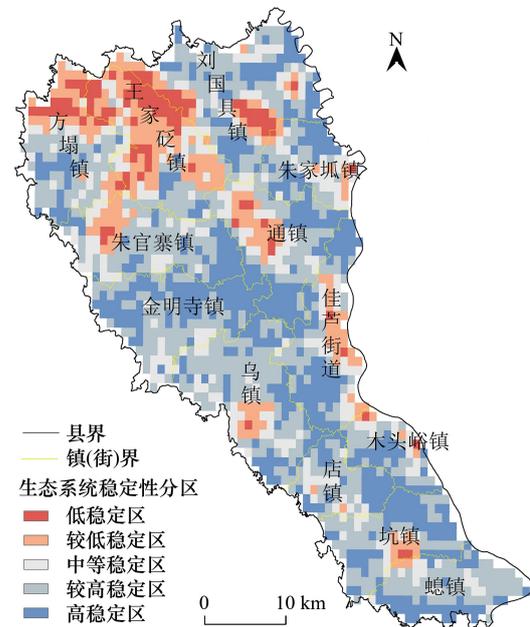


图 3 佳县生态稳定性等级分区

Fig.3 Ecological stability grade division in Jia County

表 4 佳县生态系统稳定性分区统计

Table 4 Regional statistics of ecosystem stability in Jia County

生态稳定性等级分区 Classification of ecological stability	高稳定区 High stability region	较高稳定区 Higher stability region	中等稳定区 Medium stability region	较低稳定区 Lower stability region	低稳定区 Low stability region
面积 Area/km ²	607.12	733.98	334.11	247.23	107.38
占比 Proportion/%	29.91	36.16	16.46	12.18	5.29

3.2 生计系统稳定性评价结果

将生计稳定性指数及其分维度计算结果按照自然间断点法分为高、中、低 3 级,得到生计稳定性及其各维度等级空间格局(图 4)。佳县整体生计稳定性指数为 0.565,处于中等级,但从内部维度来看,缓冲能力明显低于生计多样性,表明农户生计方式已趋于多元,但生计资本仍较为匮乏。从空间格局来看,北部丘陵风沙区农户生计稳定性较低,为 0.549(表 5),结合各维度来看,造成该区域生计稳定性较低的原因主要是缓冲能力(生计资本)不足,由于该区域地处毛乌素沙漠南缘,地形以黄沙梁峁宽谷为主,土壤保水保肥能力差,虽然在人均耕地面积方面具有一定优势,但广种薄收、耕地产出效率低,导致农户生计资本无法得到稳定积累。西部

丘陵沟壑区农户生计稳定性为 0.573,处于中间地位,该区域农户受破碎地形影响,人均耕地面小且多为坡耕地,虽然与北部农户同样面临生计资本不足的问题,但由于人多地少的现实原因,家庭剩余劳动力为谋求生计向非农就业转移的比例高,生计多样性明显高于北部农户,多元化生计有效弥补了缓冲能力的缺失,生计稳定性仍高于平均水平。东部土石山区农户生计稳定性最高,为 0.574,东部黄河水源能够满足沿岸农户的灌溉需求,且河岸滩涂具备种植红枣经济林的地理优势,相较于水资源匮乏的其他区域而言,东部农户农业生产条件相对优越,生计资本也最为丰富。此外,县城中心沿黄河分布,在快速城镇化的带动作用,农户具备良好的非农就业信息渠道和市场环境,生计多样化水平优于其他区域,因此生计稳定性最高。县域生计稳定性空间格局呈“东部高西部低,中间高南北低”的特征,可见,多样化的生计方式在一定程度上能够弥补生计资本的不足,但地理区位和自然条件对农户生计系统稳定性的维持仍起到不可忽视的作用。

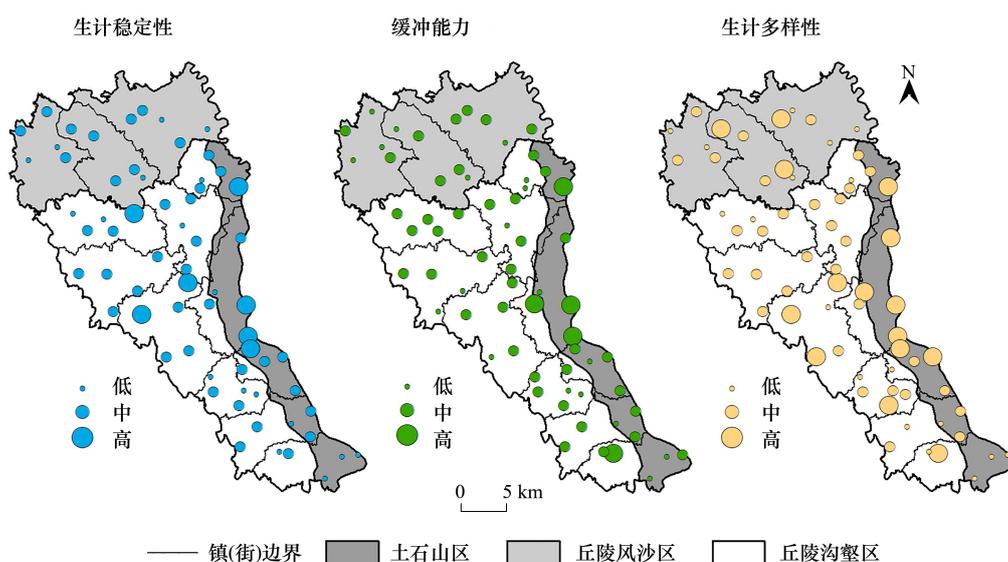


图 4 生计稳定性及各维度空间格局

Fig.4 Dimensional pattern of livelihood stability

表 5 佳县生计系统稳定性分区统计

Table 5 Livelihood stability of each topographic areas classified into dimensions

地形分区 Morphologic region	生计稳定性 Livelihood stability	缓冲能力 Buffer ability	生计多样性 Livelihood diversity
丘陵风沙区 Hilly sandstorm area	0.549	0.436	0.659
丘陵沟壑区 Hilly and gully region	0.573	0.445	0.696
土石山区 Soil-rock mountainous area	0.574	0.451	0.710
县域整体 County whole	0.565	0.444	0.688

3.3 生态系统与生计系统的耦合与冲突分析

生态系统和生计系统稳定性在县域地理空间上具有明显的分异特征,因此在探究二者耦合关系时,应注重其空间格局分析。将 65 个样本村的生态稳定性和生计稳定性指数带入耦合协调度模型,得到各样本村生态与生计的耦合协调度 D 值,利用克里金插值方法,对县域整体进行空间插值,并按照耦合与冲突类型划分标准(表 3),将县域划分为中度冲突、轻度冲突、濒临冲突和勉强平衡 4 种类型区(图 5)。其中濒临冲突区面积最大,为 929.05 km²,占县域面积的 45.77%,在各地形区均有分布。其次是轻度冲突区,占县域面积的 30.26%,主要分布在县域南部和西部沟壑区与风沙区的相接地带。勉强平衡区集中分布在北部县域边缘,面积占比较小,为 14.95%。中度冲突区是生态系统与生计系统冲突最为强烈的区域,但面积占比也最小,为 9.

02%,集中分布于县域南部边缘。总体来看,佳县生态系统与生计系统的相互关系以冲突为主,勉强平衡区面积较小,且属于生计系统和生态系统稳定性双低的假性平衡,这种强烈的冲突关系严重影响区域人地系统稳定,亟待有效治理。

为实现人地冲突的分区治理,需深入探究各类型区冲突关系形成的原因,因此进一步借助相对发展度模型细化各类型区内生态系统与生计系统的相对发展关系。按前文所述分类方法(表 3),将 65 个样本村相对发展度模型计算结果划分为生计滞后型、水平接近型和生态滞后型三类。其中(表 6),生计滞后型村庄数量最多,占抽样村总数的 46.15%,水平接近型和生态滞后型村庄数量较少,占比分别为 27.69%和 26.15%。人地矛盾较为尖锐的冲突区中,生计滞后型村庄占比达 52.63%。可见,大部分区域人地冲突形成的主要原因在于农户生计系统稳定性不足。自 2000 年佳县成为全国生态治理试点县以来,退耕还林(草)工程、天然林资源保护工程、“三北”防护林工程、绿色通道工程、“三个百树工程”等生态治理措施逐步落实,截止 2020 年,林草地面积达 890.20 km²,占土地总面积的 43.86%,生态修复成效显著。但因生态治理需要,耕地面积和畜牧空间锐减,农户生计空间被严重剥夺,生计方式被迫快速转型,农村青壮年劳动力普遍外流,空心化老龄化问题严峻,造成农户生计系统脆弱且不稳定。

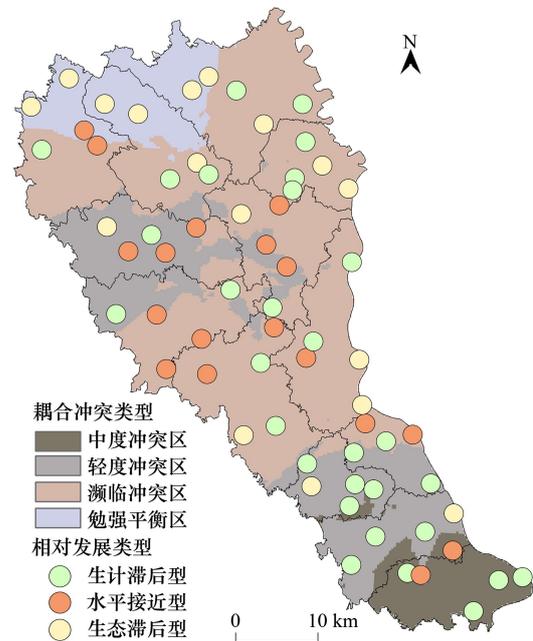


图 5 生态系统与生计系统作用关系类型分区

Fig.5 The spatial coupling between livelihood robustness and location degree

表 6 抽样村相对发展类型统计

Table 6 Statistics of relative development types of sample villages

耦合冲突类型 Coupling conflict types	生计滞后型村庄 Villages with lagging livelihood	水平接近型村庄 Villages with similar ecological level and livelihood level	生态滞后型村庄 Villages with lagging ecology
中度冲突区 Moderate conflict zone	4	2	0
轻度冲突区 Light conflict zone	12	5	3
濒临冲突区 Near conflict zone	14	9	8
勉强平衡区 Barely balanced zone	0	2	6
抽样村总数(占比) Total number of sampled villages (proportion)	30(46.15%)	18(27.69%)	17(26.15%)

4 结论与讨论

4.1 结论

在乡村人地系统中,绝大部分农业生产活动依靠农民对自然资源的改造和利用来完成,生态环境退化和农户生计贫困是区域人地矛盾突出的重要表现,更是影响区域可持续发展的关键所在,如何科学处理这种现象背后复杂的人地关系是实现可持续发展的前提。基于稳定性概念内涵,定量评价生态系统和生计系统现状,梳理两个系统之间的相互关系,在此基础上划分重点冲突区域并识别冲突成因,以期为区域人地矛盾缓解提供治理依据。主要结论如下:(1)佳县生态系统稳定性整体较高,但空间分异特征明显。县域生态稳定性空间格局呈“北部低值成片,南部低值分散”的特征,以道路建设和建设用地为表征的人为因素对生态稳定性

的影响显著。这种不平衡的生态稳定性格局为县域要素流动和农户生计活动带来了阻力,不利于区域生态安全和社会可持续发展。(2)佳县整体生计系统稳定性处于中等级,县域空间格局呈“东部高西部低,中间高南北低”的特征。农户生计方式已趋于多元,但生计资本仍较为匮乏,缓冲能力对生计系统的支撑作用不足。多样化的生计在一定程度上能够弥补缓冲能力的欠缺,但地理区位和自然条件对农户生计系统稳定性的维持仍起到不可忽视的作用。(3)佳县生态系统与生计系统的相互关系以冲突为主,中度冲突、轻度冲突、濒临冲突和勉强平衡四种类型同时存在,勉强平衡区面积较小,且属于生计和生态系统稳定性双低的假性平衡,这种强烈的冲突关系严重影响区域人地系统稳定。人地矛盾较为尖锐的冲突区内村庄多为生计滞后型,人地冲突的主要成因在于生态治理对生计空间的剥夺。

4.2 讨论与启示

当前黄土高原正处于生态治理体系完善与乡村振兴制度形成的关键阶段,如何有效缓解区域人地矛盾,实现人与自然和谐共生的可持续发展目标是一个极具现实性的施政问题。本文以黄土高原重点生态功能区县域为例,聚焦人地系统内部的复杂作用关系,从地理学视角划分生态-生计子系统耦合冲突区域,突破了既往研究中以行政单元为基础分区的局限性,将稳定性评价结果和子系统耦合协调等级落到县域空间内的每一个栅格上,为小尺度人地系统治理提供了具备实用性和可操作性的政策依据。研究发现区域生态系统受自然和人为因素的共同作用,以道路交通和建设用地为表征的人为因素对生态稳定格局产生了重要影响,这与既有的相关研究结论一致^[38-39],也进一步细化了人类活动对生态系统的扰动形式。但在具体指标遴选过程中,局限于数据可得性的问题未能将建设用地这一土地利用类型继续细分,否则将能够提出更加富有针对性的生态治理建议。同时,研究结果在县域范围内验证了农户生计稳定性不仅受家庭内部生计资本和生计方式的影响,还与其所处的生态环境密切相关。农户作为乡村人地系统中最基本的行为主体,其生计活动不可避免地受到外部环境的影响,这也是导致人地关系研究复杂化的重要原因。尽管本文在生计稳定性评价时已结合研究区农户实际情况和相关研究成果,并通过指标权重的调整和有效性检验,尽可能地保证研究结果的准确性,但依然不可否认的是评价指标选取并不能做到完全充分。此外,研究区生态-生计子系统的相互作用关系以冲突为主,且46.15%的抽样村表现为生计稳定性滞后,表明破解区域人地矛盾的关键仍在于农户脱贫稳定性巩固和持续“造血能力”提升。当然,人地系统的耦合与冲突关系具有尺度效应,局地尺度研究虽然比较具有可操作性,但不同尺度人地系统在要素构成、功能结构和作用方式上存在巨大差异,未来应建立普适性跨尺度人地关系耦合模型及动态演化模拟工具,为区域人地关系提供可操作的耦合与解耦方法。总体而言,从稳定性内涵出发把握局地人地系统的耦合关系,不失为可持续发展研究的一种新视角,为理解新时代人地耦合机制和后续政策方向的把握提供了一定的借鉴意义。

基于文章研究结论,建议通过结合决策者自上而下的管理和行为者自下而上的提升措施来逐步化解县域人地矛盾,实现生态-生计系统内部协调稳定(图6)。(1)决策者自上而下的引导与管理。根据县域生态系统稳定性格局,进一步细化生态治理区域。佳县北部风沙丘陵区生态系统稳定性呈低值连片分布,是自然和人为因素综合作用的结果,应在继续推进防风固沙和水土流失防治工程的同时,提高政府对自然灾害的应急响应能力。同时优化北部工业用地布局,加强工业污染防治,丰富生态治理措施,建立人地关系动态协调机制。针对冲突区域分布广泛,生计稳定性相对滞后的现象,对生态功能区实行分区分类精准治理,明确生态空间和生计空间的界线,避免生态治理对生计空间的挤压,引发生态区人口贫困问题。对生态与生计系统稳定性双低的假性平衡区域,应双管齐下,在生态治理的同时切实保障农户生计权益,实现生态与生计在高水平上的真正平衡。(2)农户自下而上的个体提升。农村居民应依据所在地理位置和自然条件,顺应村庄特色优势,结合农业人口创业贷款支持,在提高农业生产效率的同时实现家庭剩余劳动力非农化转移,发挥多样化生计策略对潜在生计风险的规避作用,提升家庭生计系统稳定性。针对缓冲能力普遍不足的问题,农户应积极参与产业合作社,加强沟通交流频率,发挥群体内部互助作用,实现农产品收益最大化。同时,密切关注市场信息及政策导向,积极参与技术培训活动,提升现代农业生产知识储备和自身防灾减灾意识。主动缩小与乡

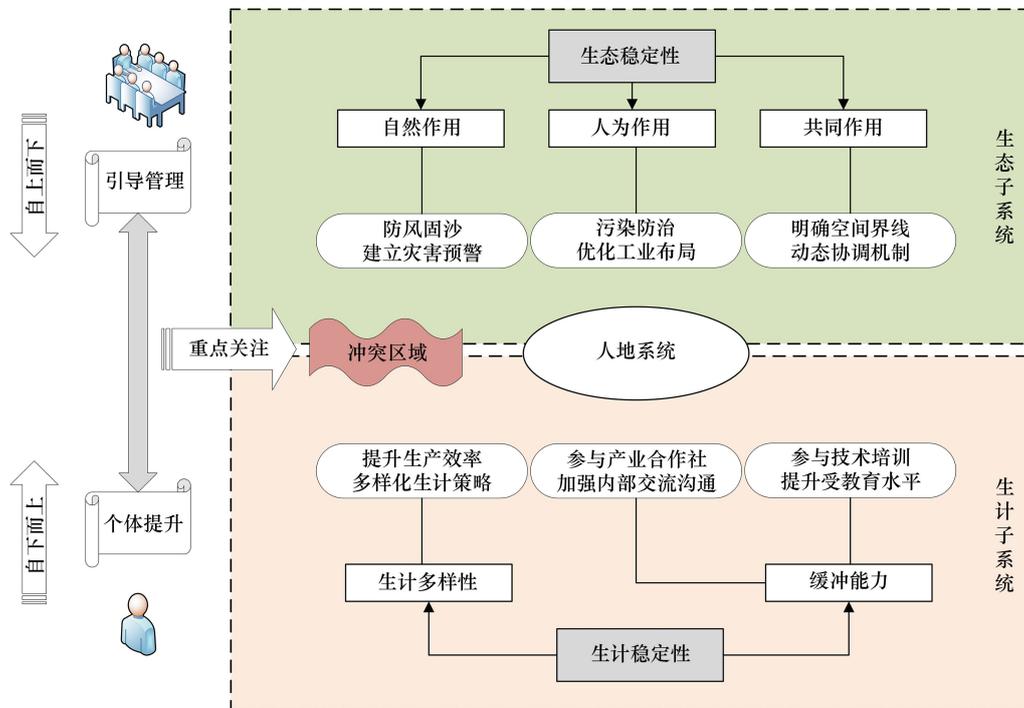


图6 县域生态-生计系统稳定性提升对策

Fig.6 Measures to strengthen the stability of county eco-livelihood system

村能人在知识技能、认知水平、生活习惯等方面的差异,培养现代子女教育理念,阻隔贫困的代际传递,突破文化致贫困局,实现生计水平稳定提升。

参考文献 (References):

- [1] Liu H M, Fang C, Fang K. Coupled Human and Natural Cube: a novel framework for analyzing the multiple interactions between humans and nature. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(3): 355-377.
- [2] 赵雪雁. 地理学视角的可持续生计研究: 现状、问题与领域. *地理研究*, 2017, 36(10): 1859-1872.
- [3] 赵昕月, 董世魁, 杨明岳, 董全民, 仁钦端智, 窦声云, 祁星民, 周学丽, 土旦加, 史德军. 基于扰流模型的青藏高原放牧社会—生态系统分析. *自然资源学报*, 2021, 36(8): 2125-2138.
- [4] 蒋维, 王俊, 杨新军, 刘文兆. 黄土高原农村社会—生态系统体制转换初探——以陕西省长武县洪家镇为例. *人文地理*, 2011, 26(1): 56-60.
- [5] 赵景柱. 人口与社会-经济-自然复合生态系统的持续发展——伊春市人口的系统分析与调控对策. *生态学报*, 1992, 12(1): 77-83.
- [6] van Dam A, Kipkemboi J, Zaal F, Okeyo-Owuor J B. The ecology of livelihoods in East African papyrus wetlands (ECOLIVE). *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2011, 10(4): 291-300.
- [7] 吴传钧. 论地理学的研究核心——人地关系地域系统. *经济地理*, 1991, 11(3): 1-6.
- [8] Baerwald T J, Firth P L, Ruth S L. The Dynamics of Coupled Natural and Human Systems Program at the U.S. National Science Foundation: lessons learned in interdisciplinary funding program development and management. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2016, 19: 123-133.
- [9] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 2009, 325(5939): 419-422.
- [10] Fang Z, Chang Y. Energy, human capital and economic growth in Asia Pacific countries—evidence from a panel cointegration and causality analysis. *Energy Economics*, 2016, 56: 177-184.
- [11] 赵雪雁, 母方方, 何小风, 苏慧珍, 介永庆, 兰海霞, 薛冰. 多重压力下重点生态功能区农户生计脆弱性——以甘南黄河水源补给区为例. *生态学报*, 2020, 40(20): 7479-7492.
- [12] 袁梁, 张光强, 霍学喜. 生态补偿、生计资本对居民可持续生计影响研究——以陕西省国家重点生态功能区为例. *经济地理*, 2017, 37

- (10): 188-196.
- [13] 叶文丽, 王银, 吴孔森, 杨新军. 黄土高原农户生计转型及其生态效应——以陕西省佳县为例. *生态学报*, 2023, 43(6): 2323-2335.
- [14] Wang D, Wang X, Hao H G, Lin D Y, Xiao R. Research progress on farmers' livelihood transformation and its ecological effects—a review. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, 13(5): 912-924.
- [15] Anderies J M, Janssen M A, Ostrom E. A framework to analyze the robustness of social-ecological systems from an institutional perspective. *Ecology and Society*, 2004, 9: art18.
- [16] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [17] 柳新伟, 周厚诚, 李萍, 彭少麟. 生态系统稳定性定义剖析. *生态学报*, 2004, 24(11): 2635-2640.
- [18] 吴孔森, 杨新军, 尹莎. 环境变化影响下农户生计选择与可持续性研究——以民勤绿洲社区为例. *经济地理*, 2016, 36(9): 141-149.
- [19] 佳县人民政府. 2021 年佳县人民政府工作报告. (2021-03-02) [2023-05-05]. http://sxjiaxian.gov.cn/info/iList.jsp_cat_id=10036&tm_id=113&info_id=43988.
- [20] Yang J, Huang X. The 30-m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [21] 李青圃, 张正栋, 万露文, 杨传训, 张杰, 叶晨, 陈裕婵. 基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化. *地理学报*, 2019, 74(7): 1420-1437.
- [22] 王梓洋, 石培基, 张学斌, 姚礼堂, 童华丽. 基于栅格尺度的生态安全评价及生态修复——以酒泉市肃州区为例. *自然资源学报*, 2022, 37(10): 2736-2749.
- [23] Wei S M, Pan J H, Liu X. Landscape ecological safety assessment and landscape pattern optimization in arid inland river basin; take Ganzhou District as an example. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2020, 26(3): 782-806.
- [24] 杨天荣, 匡文慧, 刘卫东, 刘爱琳, 潘涛. 基于生态安全格局的关中城市群生态空间结构优化布局. *地理研究*, 2017, 36(3): 441-452.
- [25] 洪步庭, 任平. 基于最小累积阻力模型的农村居民点用地生态适宜性评价——以都江堰市为例. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(6): 1386-1396.
- [26] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 蔡接接. 基于 MCR 模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化. *自然资源学报*, 2019, 34(4): 771-784.
- [27] Holtz G, Brugnach M, Pahl-Wostl C. Specifying "regime"—a framework for defining and describing regimes in transition research. *Technological Forecasting and Social Change*, 2008, 75(5): 623-643.
- [28] 徐爽, 胡业翠. 农户生计资本与生计稳定性耦合协调分析——以广西金桥村移民安置区为例. *经济地理*, 2018, 38(3): 142-148, 164.
- [29] 孙晓一, 徐勇, 汤青. 黄土高原半城镇化农民非农生计稳定性及收入差异分析. *人文地理*, 2016, 31(3): 81-87.
- [30] 刘永茂, 李树苗. 农户生计多样性发展阶段研究——基于脆弱性与适应性维度. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(7): 147-156.
- [31] McNicoll G, Cain M. Institutional effects on rural economic and demographic change. *Population and Development Review*, 1989, 15: 3.
- [32] 黄建辉, 韩兴国. 生物多样性和生态系统稳定性. *生物多样性*, 1995, 3(1): 31-37.
- [33] 王金红, 王静爱, 刘珍, 贾慧聪, 高路, 高立龙, 张峰. 从收入多样性的视角看农户的旱灾恢复力——以内蒙古兴和县为例. *自然灾害学报*, 2008, 17(1): 122-126.
- [34] 刘倩, 杨新军, 石育中, 陈佳, 鲁大铭. 基于 DPSIR 模型的六盘山集中连片特困区生计安全评价. *山地学报*, 2018, 36(2): 323-333.
- [35] 杨缅昆, 方国松. *统计学概论*. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [36] 张旺, 周跃云, 胡光伟. 超大城市“新三化”的时空耦合协调性分析——以中国十大城市为例. *地理科学*, 2013, 33(5): 562-569.
- [37] 王成, 唐宁. 重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化. *地理研究*, 2018, 37(6): 1100-1114.
- [38] 吴文婕, 石培基, 胡巍. 基于土地利用/覆被变化的绿洲城市土地生态风险综合评价——以甘州区为例. *干旱区研究*, 2012, 29(1): 122-128.
- [39] 蒙吉军, 江颂, 拉巴卓玛, 张维佳. 基于景观格局的黑河中游土地利用冲突时空分析. *地理科学*, 2020, 40(9): 1553-1562.