

山地乡村人居环境系统韧性的空间分异机制与优化策略*——以西藏昌都为例

Spatial Differentiation Mechanisms and Optimization Strategies of Mountainous Rural Human Settlements System Resilience: A Case Study of Changdu, Tibet

田 健 睦长清 曾穗平 曾 坚 TIAN Jian, SUI Changqing, ZENG Suiping, ZENG Jian

摘 要 山地乡村人居环境具有人地矛盾突出、资源配置分散、生态环境脆弱等特征,是全面实现乡村振兴战略的重难点地区。以西藏昌都为例,基于人居环境系统与韧性理论,建立“自然—产业—社会—居住—支撑”的山地乡村人居环境系统韧性测度体系,借助耦合协调模型、障碍度诊断模型和地理加权回归模型(MGWR),解析系统韧性及其耦合协调度的空间分异机制,并提出不同要素驱动下各类村庄的系统韧性优化策略。结果表明:(1)昌都乡村人居环境系统普遍呈现低韧性水平,韧性高值区与高耦合协调区均集中于城区周边与河谷地带,总体呈现“点群式”分布特征;(2)居住条件与产业发展是山地乡村人居环境系统韧性及其耦合协调度空间分异的主要驱动因子;(3)针对“失调衰退型、转型提升型、协调发展型”村庄特征提出单系统驱动提升与多系统协调优化策略,为山地乡村振兴战略实施提供参考。

Abstract Mountainous rural human settlements are characterized by prominent human-land contradiction, scattered resource allocation and fragile ecological environment, and is a major difficulty in the comprehensive realization of rural revitalization strategy. Taking Changdu, Tibet as an example, based on the theory of human settlements system and resilience, this paper establishes the resilience measurement system of "nature-industry-society-residence-support" for mountainous rural human settlements system, analyzes the spatial variation mechanism of system resilience and its coupling coordination degree by means of coupled coordination model, obstacle diagnostic model and Multiscale Geographic Weighted Regression (MGWR), and proposes strategies for optimizing the system resilience of various types of villages driven by different factors. The results show that: (1) rural human settlements system in Changdu generally shows low resilience levels, with high resilience and high coupling coordination areas concentrated around urban areas and river valleys, and generally presents "point cluster" distribution characteristics. (2) Residential conditions and industrial development are the main driving forces of the spatial variation of resilience and coupling coordination of mountainous rural human settlements system. (3) For villages with characteristics of "dysfunctional and declining, transformation and upgrading, and coordinated development", this paper proposes a single-system driven upgrading and multi-system coordinated optimization strategy to provide a reference for the implementation of rural revitalization strategy in mountainous areas.

关键词 山地;乡村;人居环境系统;韧性;耦合协调度

Key words mountain; rural; human settlements system; resilience; coupled coordination

文章编号 1673-8985 (2023) 02-0029-09 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20230205

作者简介

田 健

天津大学建筑学院 副研究员,博士
天津城建大学建筑学院 硕士生导师

睦长清

天津城建大学建筑学院
硕士研究生

曾穗平(通信作者)

天津城建大学建筑学院
副院长,副教授,博士,176116126@qq.com

曾 坚

天津大学建筑学院
教授,博士生导师

0 引言

党的二十大报告指出,全面建设社会主义现代化国家最艰巨、最繁重的任务仍然在农村。山地乡村人居环境具有功能结构复杂、空间景观多样和地形变化大等特征,面临着地质灾害频发、生态环境退化、基础设施落后、地域文化消失和用地集约度低等外部环境冲击和内部结

*基金项目:天津市哲学社会科学规划项目“双循环格局下的天津乡村产业风险识别及韧性提升策略研究”(编号TJGL21-013)资助。

构变化的双重干扰^{[177, [2], [3]646, [4]}。山地乡村自发无序的建设活动易诱发地质灾害^[6],城市建设不断压缩和破坏乡村“三生”空间等,对人居环境系统的稳定性与适应性造成巨大冲击^{[3]645}。提升山地乡村人居环境的系统韧性,是山地乡村实现可持续发展的有效路径。

目前国内外关于乡村韧性的研究由单一均衡韧性向多重演进韧性转变,更加关注乡村地域的系统交互与要素流动^[6]。在研究方法方面,层次分析法^{[3]649}、熵权法^{[7]113}、主成分分析法^[8]等定量与定性分析相结合;在研究视角方面,主要有生计韧性^[9]、经济产业韧性^[10]、社会生态韧性^{[11]12}等;研究内容方面,主要涉及韧性测度评估^[12]、时空演变^[13]、影响因素^{[11]13}和提升策略^[14]等,乡村韧性逐渐形成维度多元化、尺度体系化、视角动态化的综合分析框架。近年来,推动人居环境的高质量发展成为学界关注的重点^[15],王成等^{[3]647}阐述了乡村人居环境系统韧性理论,并构建乡村人居环境系统韧性测度指标体系,彭鹏等^[16]基于PSR模型研究乡村人居环境脆弱性及其影响因素。既有研究成果为山地乡村人居环境可持续性发展奠定理论基础,但当前研究重单维度系统评估,轻多系统协调优化,同时现有韧性评价指标多适用于东部平原乡村,对于西部地区地势复杂的山地乡村针对性不强。

因此,研究基于韧性视角发展山地乡村人居环境系统理论,融合山地乡村地形环境特征,从“自然—产业—社会—居住—支撑”子

系统建立山地乡村人居环境系统韧性测度指标体系,并以横断山区昌都市域1 133个村庄为研究对象,通过耦合协调模型和地理加权回归模型分析系统韧性的耦合协调度及空间异质性,探析山地乡村人居环境系统驱动力要素,从多系统耦合协调的韧性提升角度优化山地乡村人居环境可持续发展水平。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究思路

山地乡村人居环境因其自然本底的脆弱性、交通条件的不便性、社会经济基础的薄弱性,存在较高的发展风险,同时具有“建设与生态管控冲突、空间资源配置效率低、地形对产业限制大”等系统发展失衡特征(见图1)。随着乡村人居环境建设进入“生产、生活、生态”全方位融合发展的“升华”阶段^[18],科学识别山地乡村人居环境“脆弱—失衡”问题,明确山地乡村人居环境韧性水平和系统协调的关键影响因素与驱动机制,有利于提升山地乡村人居环境可持续发展水平,从而推动乡村振兴战略全面实施。

人居环境科学起源于希腊学者道萨迪亚斯提出的人类聚居学,着重探讨人与环境之间的相互关系,继而吴良镛^{[17]20}率先将其引入中国并系统化,将人居环境系统划分为自然、生态、社会、居住和支持等5个子系统^{[17]40, [18]}。结合李伯华^[19]、李裕瑞^[20]、王成^{[3]646}等国内学者关于乡村人居环境及其系统韧性的阐述,根据

山地系统环境特征,山地乡村人居环境系统包含自然、产业、社会、居住与支撑等5大子系统,其系统韧性可理解为通过调整内部结构与调用系统内外资源,抵御地形特殊性潜在灾害干扰与城乡互动下内外环境因素扰动,促进山地乡村人居环境系统由原有的低层次均衡状态向新的高层次均衡状态转变,最终实现可持续发展的能力(见图2)。

本文按照问题解析、理论建构、实证测度、分类提升的逻辑展开山地乡村人居环境系统韧性研究。首先从现实困境出发,理清山地乡村韧性提升目标,基于自然与居住系统韧性提升缓解建设与生态管控冲突;借助居住与支撑系统韧性提升改善空间资源配置效率低的问题;通过自然与产业系统韧性提升解决地形对产业的限制。其次以乡村人居环境和韧性理论为基础建构山地乡村人居环境系统韧性理论,以村域为单元,从“自然—产业—社会—居住—支撑”子系统综合测度山地乡村人居环境系统韧性水平。最后基于系统韧性的耦合协调性与空间分异机制,分类针对性地提升系统应对内外扰动的能力(见图3)。

1.2 研究区概况

昌都位于青藏高原东南部大横断山区,总面积10.98万km²,素有“四省通衢,藏东门户”之称。地貌类型以山地为主,平均海拔3 500 m以上,南北向的山川河流形成“三山

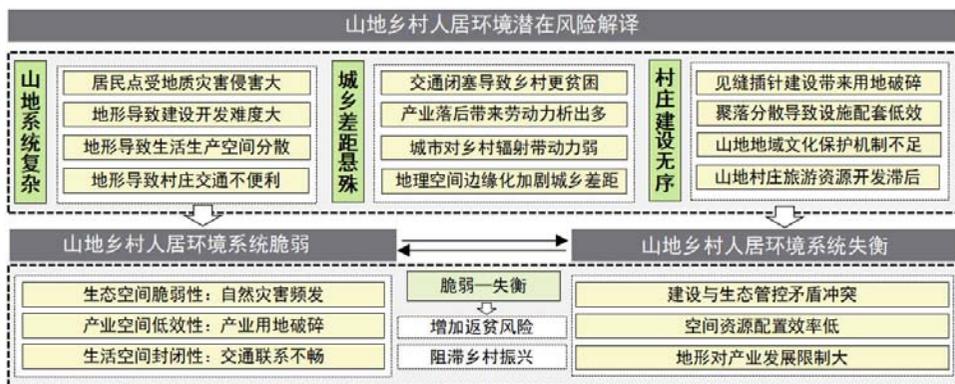


图1 山地乡村人居环境系统“脆弱—失衡”表征
Fig.1 "Fragile-Imbalanced" mountainous rural human settlements system

资料来源:笔者自绘。

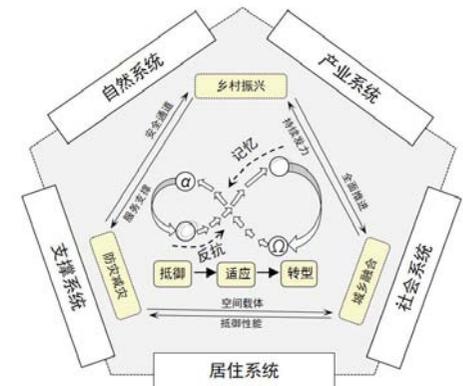


图2 山地乡村人居环境系统韧性构成
Fig.2 Theoretical constructs of mountainous rural human settlements systems

资料来源:笔者自绘。

并行、三江并流”的岭谷地貌。昌都乡村地区面临地质环境复杂且灾害高发、土地开发利用难度大、居民收入较低、配套设施落后等现实困境,亟待通过精准识别人居环境韧性格局及其驱动机制,有针对性地提出分类优化策略,促进山地乡村振兴战略深度实施。

1.3 数据来源

数据主要包括矢量数据与社会经济数据。现状土地矢量数据来源于西藏昌都市第三次国土调查数据,DEM高程数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>),社会经济数据来源于昌都市各区县的统计年鉴和实地调查资料收集,同时通过查阅最新总体规划与专项规划进行补充,其中各村贫困人数来源于昌都市“十三五”旅游产业精准扶贫规划(2018—2020年),各村人口、居民收入、乡村教育、医疗水平、文化遗址、福利设施等数据来源于实地调查。

1.4 研究方法

1.4.1 山地乡村人居环境系统韧性体系构建

(1) 评价指标体系构建

基于山地乡村人居环境系统韧性构成,遵循科学性、代表性、数据可获得性的原则,研究从自然、产业、社会、居住和支撑5个子系统构建山地乡村人居环境系统韧性测度指标体系(见表1)。为了全面反映山地乡村人居环境系统韧性特征,选择地形位指数^[21]、居民点地质灾害风险指数、森林草地覆盖率、冰川及常年积雪覆盖率、耕地坡度指数、贫困人口基数、建设用地坡度指数等指标凸显山地乡村人居环境特殊性。

(2) 指标权重计算

为了消除量纲,使所有变量值都有可比的参考点,利用最小值—最大值归一化方法将昌都市村庄数据标准化处理^{[7]113}, $\text{Max}(x_j)$ 、 $\text{Min}(x_j)$ 分别代表各指标的最大值和最小值,计算方式为:

$$d_{ij} = \frac{\text{Max}(x_j) - x_{ij}}{\text{Max}(x_j) - \text{Min}(x_j)}, (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$$

(正向指标) (1)

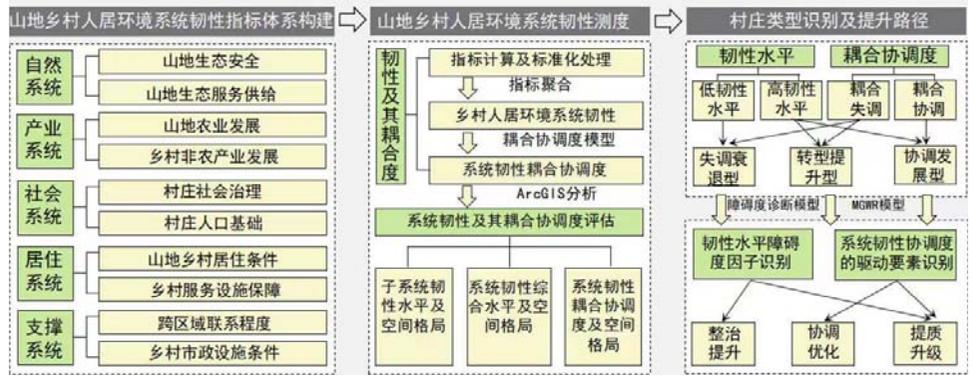


图3 山地乡村人居环境系统韧性研究技术路线

Fig.3 Technical route to assess the resilience of mountainous rural human settlements system and their coupling coordination

资料来源:笔者自绘。

$$d_{ij} = \frac{x_{ij} - \text{Min}(x_j)}{\text{Max}(x_j) - \text{Min}(x_j)}, (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$$

(负向指标) (2)

式中: d_{ij} 表示*i*村第*j*项指标的标准化数值; x_{ij} 表示*i*村第*j*项指标的原值; $\text{Max}(x_j)$ 、 $\text{Min}(x_j)$ 分别为昌都市村庄第*j*项指标的最大值和最小值。

考虑各指标对山地乡村人居环境系统韧性的影响不同,采用熵权法确定指标权重,客观地反映指标对于山地乡村人居环境系统韧性的重要程度,公式为:

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

$$p_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sum_{i=1}^m d_{ij}} \quad (4)$$

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (5)$$

式中: e_j 表示第*j*个指标的熵值大小; p_{ij} 表示第*j*个指标下第*i*项指标的比重或贡献度; w_j 表示第*j*个指标的权重值。

(3) 山地乡村人居环境系统韧性测度

根据山地乡村人居环境系统韧性理论建构,山地乡村人居环境系统韧性由5大子系统韧性构成,且与其成正相关。基于权重和数据标准化值,采用加权求和方法分维度计算山地乡村人居环境系统韧性水平 $MRHSI_i$ 。

$$MRHSI_i = \alpha \sum_{j=1}^n R_{ij} w_j \quad (6)$$

式中: R_{ij} 表示*i*村第*j*项指标的原值,山地乡村人居环境系统各子系统重要程度相同,因此采用等值权重 α 。

1.4.2 耦合协调度模型构建

应用耦合协调度模型^[23]测度山地乡村人居环境系统中“自然—产业—社会—居住—支撑”协调发展水平,衡量5大子系统通过各自的耦合元素产生互动的程度,其包含耦合度和耦合协调度两个度量指标,基于公式(6)计算耦合度*C*值和耦合协调度*D*公式分别为:

$$C = \left[\frac{NAT_i \times IND_i \times SOC_i \times RES_i \times SUP_i}{NAT_i + IND_i + SOC_i + RES_i + SUP_i} \right]^{\frac{1}{5}} \quad (7)$$

$$D = (C \times T)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中: NAT_i 、 IND_i 、 SOC_i 、 RES_i 、 SUP_i 分别表示第*i*研究单元山地乡村人居环境系统中自然、产业、社会、居住和支撑5个系统韧性指数; $T = \beta_1 A_1 + \beta_2 A_2 + \beta_3 A_3 + \dots$, 其中 β_1 、 β_2 、 β_3 等代表权重;当 $0 < D < 0.5$ 时,为系统失调阶段,当 $0.5 \leq D < 1$ 时,为系统协调阶段。

1.4.3 障碍度诊断模型

为有针对性地划分山地乡村人居环境系统韧性提升整治模式,引入障碍度诊断模型^[24],探寻乡村人居环境系统弱势功能的主要障碍因子,具体公式如下:

$$V_{ij} = \frac{F_{ij} \times O_{ij}}{\sum_{i=1}^m (F_{ij} \times O_{ij})} \times 100\% \quad (9)$$

式中: O_{ij} 为山地乡村人居环境系统韧性

表1 山地乡村人居环境系统韧性指标体系

Tab.1 Mountainous rural human settlements system resilience index system

目标层	指标层	计算方式与指标解释	指标性质	权重/%
		$T = \log\left[\left(\frac{E}{\bar{E}} + 1\right) \times \left(\frac{S}{\bar{S}} + 1\right)\right]$		
	A1地形位指数	式中: T 为地形位指数; E 及 \bar{E} 分别为空间任一栅格的高程值和平均高程值; S 及 \bar{S} 分别为空间任一栅格的坡度值和平均坡度值	负	0.108
自然系统韧性	A2居民点地质灾害安全指数	村域范围内村庄居民点距离地质灾害点平均距离	正	1.117
	A3林草地覆盖率	林地与草地面积/村域面积	正	0.231
	A4湿地面积占比	湿地面积/村域面积	正	4.209
	A5生物丰富度指数	生物丰富度指数=0.35×林地面积占比+0.21×草地面积占比+0.28×水域湿地面积占比+0.11×耕地面积占比+0.04×建设用地面积占比+0.01×未利用地面积占比 ^[22]	正	0.247
	A6冰川及常年积雪覆盖率	冰川及常年积雪面积/村域面积	负	9.061
	A7水资源储备量	水域用地面积/村域面积	正	2.091
	B1人均农业用地面积	园地与耕地面积/村庄总人口	正	1.684
	B2耕地坡度指数	村域范围内耕地平均坡度值	负	0.482
产业系统韧性	B3非农产业用地比重	$Q = (E+F)/T \times 100\%$ 式中: E 为村庄内第二产业用地面积, 主要为村庄工矿仓储用地; F 为村庄内第三产业用地面积, 主要为村庄商服用地; T 为村庄建设用地总面积	正	5.299
	B4矿业能源用地占比	矿业能源用地面积/村域面积	正	9.175
	B5文化旅游产业指数	村域内历史文化遗址个数	正	7.404
社会系统韧性	C1人均村民年收入	村庄年收入/村庄人口	正	0.372
	C2贫困人口基数	村宅贫困人口/村庄人口	负	1.253
	C3人口密度	村庄人口/村庄面积	正	1.424
居住系统韧性	D1人均建设用地	建设用地/村庄人口	正	1.231
	D2建设用地坡度指数	建设用地平均坡度值	正	0.153
	D3人均公共服务设施用地	公共服务设施用地/村庄人口	正	2.724
	D4人均公共绿地	绿地与开敞空间面积/村庄面积	正	10.667
	D5乡村教育设施指数	村庄学校数量	正	3.459
	D6福利设施指数	养老院、文化站、福利院数量	正	11.847
	D7医疗设施指数	村庄医疗站数量	正	11.183
	D8商业用地指数	商业设施用地面积/建设用地	正	6.523
	E1距国省县道距离	离跨市县区域性道路距离	负	0.651
支撑系统韧性	E2镇区便利性	村庄居民点与镇区的距离	正	0.191
	E3城区便利性	村庄居民点与城区的距离	正	0.976
	E4户均公用设施用地	公用设施用地/乡村总人口	正	6.238

注: 地形位指数主要包括高程和坡度, 可以综合反映地形条件。地形位指数越大, 居民点建设适宜性度越小。

资料来源: 笔者自制。

指标的偏离度 (即 1 与单项指标的标准值之差); F_{ij} 表示研究中评价指标的贡献程度, 本文直接采用各项指标权重表示; V_{ij} 为评价指标的障碍度指数。

1.4.4 多尺度地理加权回归模型

采用多尺度地理加权回归 (MGWR) 模型探测影响山地乡村人居环境系统韧性协调水平的驱动力的异质性, 与传统的地理加权回归 (GWR) 模型不同在于其驱动因子系数 β

均基于数据差异化的带宽得到, 优化于经典 GWR 的固定带宽^[25], 但依旧采用经典 GWR 的二次核函数和 AICc 准则, 计算公式为:

$$y_i = \beta_0(\mu_i, v_i) + \sum_{j=1}^k \beta_{bwj}(\mu_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (10)$$

式中: bw_j 代表第 j 个变量回归系数的弹性带宽; (μ_i, v_i) 为乡村 i 的中心坐标; $\beta_0(\mu_i, v_i)$ 、 ε_i 分别表示模型的截距项和误差项。

2 结果与分析

2.1 山地乡村人居环境系统韧性水平的分布特征

根据昌都乡村人居环境系统韧性评价结果, 采用自然断点法将韧性指数分为低—较低—较高—高 4 个等级 (见图 4)。昌都乡村人居环境系统普遍呈现低韧性水平, 其韧性高值区集中分布在城镇周边的河谷平缓地带, 总体呈现出“点群式”分布特征。一方面, 受地形地貌影响较大, 居民点靠河流水系布局且分布在地势平缓地带, 在地势和水资源上具有便利条件; 另一方面, 位于城区周边的乡村接收城市辐射带动作用明显, 基础服务设施完善, 韧性水平相对较高。

昌都乡村人居环境各子系统韧性指数排序为: 自然系统 (0.097) > 社会系统 (0.012) > 支撑系统 (0.009) > 产业系统 (0.0084) > 居住系统 (0.0078) (见表 2)。自然和社会系统韧性水平高于其他子系统, 低值区空间分布分散化。在自然系统方面, 高值区呈块状分布在昌都北部、东部平缓地带及西部高原地区, 低值区与地质灾害点分布具有空间一致性。这是由于距离地质灾害点近的村庄居民点遭受灾害风险高; 同时自然系统韧性与山川相间的地形特征相关, 韧性水平高值区位于山间河谷及高原的自然环境资源均好地区, 其中宁静山与金沙江沿线缓坡地带、八宿县东北部怒江河谷地带的乡村自然系统韧性水平较高。在社会系统方面, 韧性水平与村庄贫困人口相关性较高, 尽管 2019 年底已历史性消除了绝对贫困, 但相对贫困依旧存在。

产业与居住系统韧性水平整体较低且空间差异大, 韧性高值区呈现零星状或块状分布。在产业方面, 卡若区城区周边乡村具备工矿及文化产业资源, 八宿县、芒康县等乡村地区耕地适宜性良好, 因而产业韧性水平较高。在居住方面, 韧性水平与村民生活配套设施完善程度相关, 过于分散的聚居形式导致难以建立具有明显集聚效应的商业服务网络、医疗卫生、教育文化等设施。支撑系统韧性呈现“中心高、外围低”的分布特征, 卡若区近邻乡村

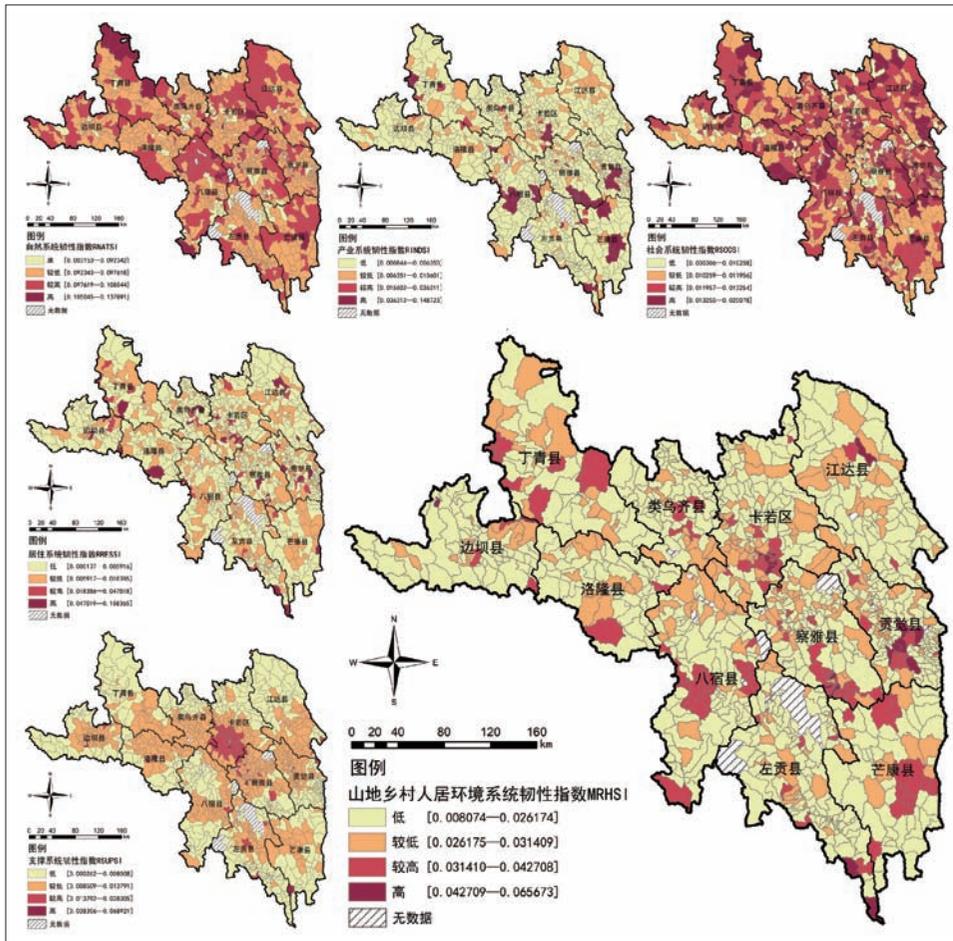


图4 昌都乡村环境系统韧性水平的空间格局
Fig.4 Spatial pattern of resilience level of rural human settlements system in Changdu

资料来源:笔者自绘。

表2 昌都乡村人居环境系统韧性水平统计
Tab.2 Statistics on the resilience level of the rural human settlements system in Changdu

指数类型	均值	最大值(MAX)	最小值(MIN)	标准差
人居环境系统韧性指数	0.026866	0.065673	0.008074	0.004948
自然系统韧性指数	0.096604	0.137891	0.003153	0.004528
产业系统韧性指数	0.008437	0.148723	0.000844	0.013395
社会系统韧性指数	0.012038	0.025078	0.000306	0.001518
居住系统韧性指数	0.007814	0.158365	0.000137	0.015558
支撑系统韧性指数	0.009437	0.068921	0.000262	0.004089

资料来源:笔者自制。

支撑系统韧性指数呈现高值集聚态势,其他区域高值区主要沿国省道分布。

2.2 山地乡村人居环境系统韧性的耦合协调度分布特征

乡村人居环境“自然—产业—社会—居住—支撑”系统间协调是实现人居环境全方位可持续发展的重要手段。通过熵值法和耦合

协调度模型,计算昌都乡村人居环境系统韧性耦合协调水平(见图5)。昌都共1 064个乡村的人居环境系统处于失调状态,其中左贡县扎玉镇巴瓦村等8个村庄处于最严重的失调状态。该类村庄在产业、生活和支撑3个子系统均处于低水平韧性。耦合协调度空间分布特征与韧性格局存在一致性,耦合协调度较高的乡村大部分位于地势平缓地带与城区周边,呈现

散点式分布特征。

综合分析山地乡村人居环境系统韧性的耦合协调水平,可将村庄划分为失调衰退型(低韧性失调)、转型提升型(高韧性失调)与协调发展型(高韧性协调)3种类型(见表3)。当前昌都失调衰退型村庄占88.35%,而处于协调发展状态的村庄仅占6.09%,主要分布在各县城区周边,提升乡村人居环境的系统韧性与协调性成为昌都乡村振兴的重点任务。

2.3 山地乡村人居环境系统韧性及其协调度的影响机制

借助障碍度诊断模型与MGWR模型解析山地乡村人居环境“自然—产业—社会—居住—支撑”子系统脆弱性与不协调的空间分异驱动机制,为系统韧性优化提供决策依据。

2.3.1 山地乡村人居环境系统韧性水平的影响因子分析

计算昌都乡村人居环境系统韧性障碍度,将障碍度排名第一的系统作为主要障碍度系统(见表4)。影响乡村人居环境系统韧性水平的主要是居住与产业系统,两者村庄数量占98.9%。

进一步明确乡村人居环境系统韧性的主要障碍因子,为山地乡村人居环境优化精准施策提供依据。如图6所示,昌都市乡村人居环境系统韧性排前5的障碍度因子分别为:市政基础设施、人口密度、矿业能源、文化旅游产业、福利设施。表明推进农村生活垃圾和污水治理依旧是重点任务,而村庄人口流失制约人居环境发展在山地乡村更为显著。此外推动二三产业发展与完善福利设施成为山地乡村人居环境优化提升的主要需求。

2.3.2 山地乡村人居环境系统韧性协调度的驱动要素探析

在进行MGWR建模分析影响因素之前,对昌都乡村人居环境系统韧性的耦合协调度进行空间自相关分析,判断是否具有空间集聚性。检验得到乡村人居环境系统韧性的耦合协调度Moran's I及其显著性(见

表5),结果显示Moran's I为0.2724,显著为正,检验结果显著,表明昌都乡村系统韧性的耦合协调度在村域尺度上存在明显的集聚特征。

如表6结果显示, MGWR相比经典GWR模型的拟合效果更优。MGWR模型检验的残差平方和、AICc的值更小,拟合优度R²值更

大,多尺度带宽选择适配具有一定弹性,较为科学。MGWR带宽大小反映出驱动因素对因变量时空作用尺度的差异性,带宽越小空间异质性越明显。

运用ArcGIS对各影响因子的回归系数进行空间表达,结合各因子T值显著性检验进一步明确在局部地理空间上的作用分异。结果

表明(见图7),昌都乡村人居环境系统韧性的耦合协调水平主要受到“社会—产业—居住—支撑”4个子系统共同驱动,其村庄数量占样本的65.31%。

同时,4个系统韧性协调的驱动要素呈现空间异质性(见表7)。①社会系统对乡村系统韧性协调水平的驱动力系数均值为0.126,最显著效应的地区是卡若区南部和察雅县南部乡村,两地村民收入条件较好,可稳定乡村经济发展和巩固脱贫攻坚成果。②产业系统对乡村系统韧性协调水平的驱动力系数均值为0.937,是系统韧性耦合协调度空间分异的主要驱动因子,最显著效应的地区是边坝县与江达县北部乡村。该地区乡村农业用地资源较好,具备发展大规模农业的优势。③居住系统对乡村人居环境系统韧性协调水平的驱动力系数均值为0.828,最显著效应的地区主要位于怒江沿线周边和芒康县东北部乡村。该地区建设用地坡度低,村庄建设开发成本低,有利于推动宜居型乡村人居环境。④支撑系统对乡村人居环境系统韧性协调水平的驱动力系数均值为0.243,最显著效应的地区是昌都西北部和东部乡村,两地区区省道路网密度较高,便于乡村对外交流及城乡间资源流动,对协调推进乡村人居环境建设起到显著作用。

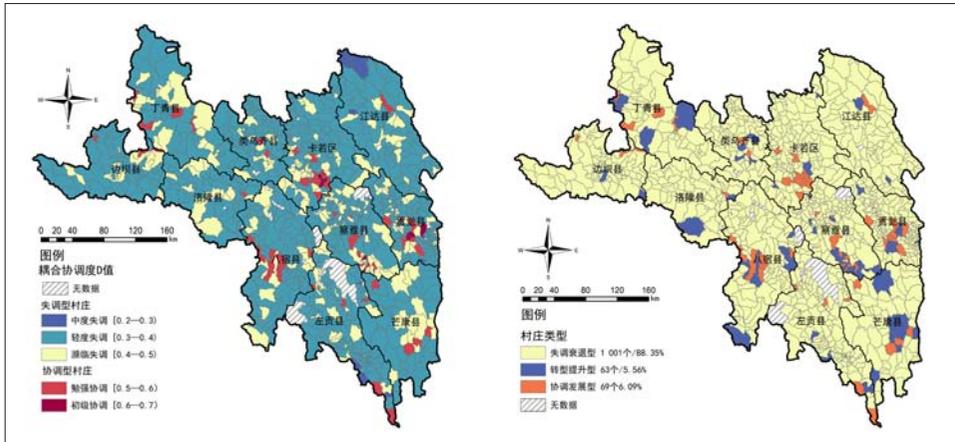


图5 昌都乡村人居环境系统韧性的耦合协调度及其村庄分类
Fig.5 Coupling coordination degree of resilience of rural human settlements system in Changdu and its village classification

资料来源:笔者自绘。

表3 基于山地乡村人居环境系统韧性及其耦合协调性的村庄类型一览表

Tab.3 List of village types based on the resilience of mountainous rural human settlements system and their coupling and coordination

村庄类型	韧性水平	耦合协调度	乡村数量/个	数量占比/%
失调衰退型	低韧性[0.0080,0.0314]	失调型(0.2—0.5)	1 001	88.35
转型提升型	高韧性[0.0314,0.0656]	失调型(0.5—0.7)	63	5.56
协调发展型	高韧性[0.0314,0.0656]	协调型(0.5—0.7)	69	6.09

资料来源:笔者自制。

表4 昌都乡村人居环境系统韧性的障碍度统计

Tab.4 Obstacle degree statistics of the resilience of rural human settlements system in Changdu

障碍系统类型	均值	最大值(MAX)	最小值(MIN)	村庄数量/个	村庄占比/%
自然系统	0.1122	0.2237	0.0518	0	0.00
产业系统	0.2492	0.3079	0.1207	162	14.30
社会系统	0.1563	0.2392	0.0533	1	0.09
居住系统	0.2542	0.3206	0.1980	960	84.73
支撑系统	0.2281	0.2758	0.0466	10	0.88

资料来源:笔者自制。

表5 昌都乡村人居环境系统韧性的耦合协调度莫兰指数及其检验结果

Tab.5 Coupling coordination degree Moran's index of the resilience of rural human settlements system in Changdu and its test results

名称	Moran's I	预期指数	Z得分	P值
参数值	0.2724	-0.0009	14.5859	0.001

资料来源:笔者自制。

表6 GWR模型与MGWR模型的主要参数对比

Tab.6 Comparison of the main parameters of the GWR model and the MGWR model

项目	GWR模型	MGWR模型
residual sum of squares	165.862	56.636
AICc	1052.392	284.816
R ²	0.854	0.950

资料来源:笔者自制。

3 山地乡村人居环境系统韧性及其协调性优化策略

基于系统韧性水平及其耦合协调度分

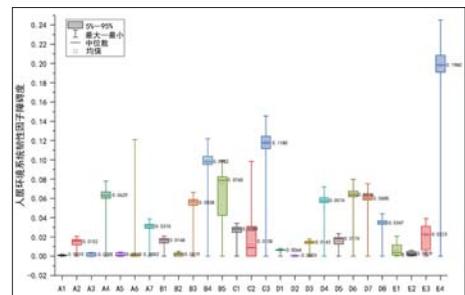


图6 昌都乡村人居环境系统韧性的障碍因子分析
Fig.6 Obstacle factor analysis of the resilience of rural human settlements system in Changdu

资料来源:笔者自绘。

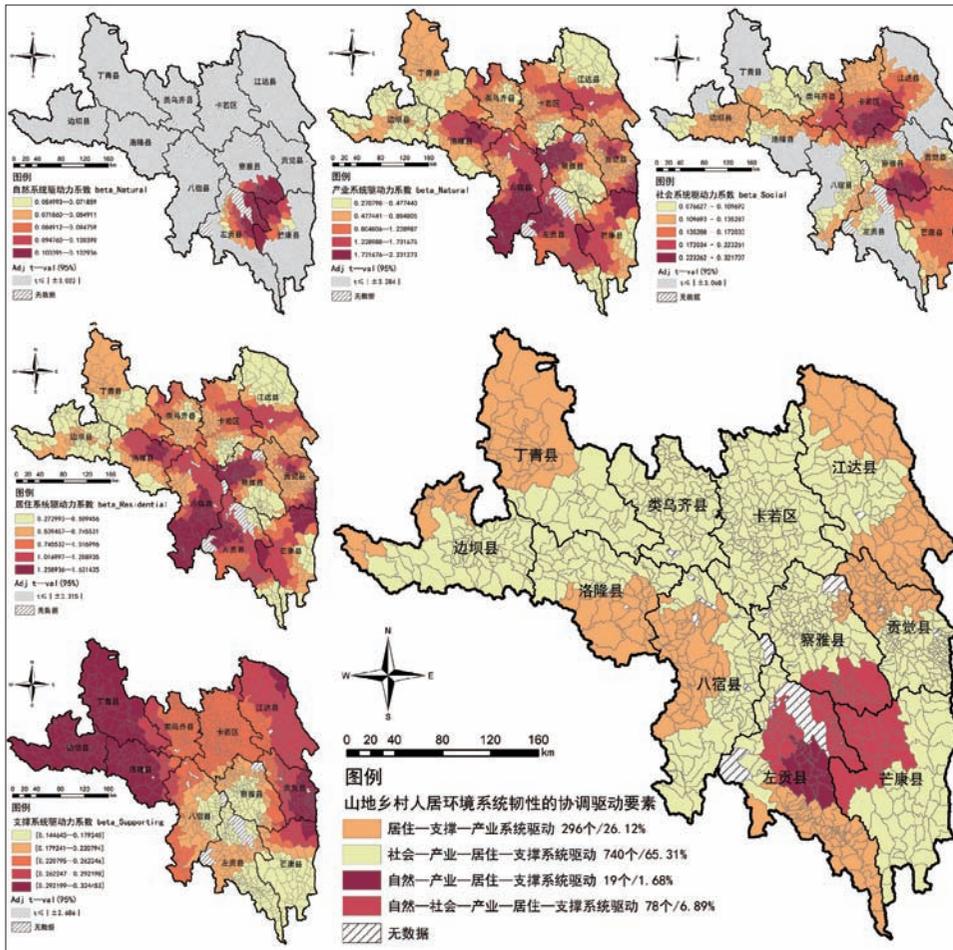


图7 昌都乡村人居环境系统韧性耦合协调度的驱动要素空间异质
Fig.7 Spatial differentiation of driving factors for resilient and coordinated rural human settlements systems in Changdu

资料来源:笔者自绘。

表7 基于MGWR的昌都乡村人居环境系统韧性协调度的驱动力系数
Tab.7 MGWR-based statistics of driving force coefficients for resilient coordination of rural human settlements system in Changdu

参数变量	平均值	标准偏差	最小值	中位数	最大值
自然系统	0.021	0.056	-0.172	0.025	0.115
产业系统	0.937	0.496	0.271	0.850	2.231
社会系统	0.126	0.048	0.049	0.113	0.322
居住系统	0.828	0.340	0.273	0.751	1.631
支撑系统	0.243	0.053	0.145	0.249	0.324

资料来源:笔者自制。

析,将昌都乡村分为失调衰退型、协调发展型和转型提升型3种类型,针对乡村人居环境系统韧性及其协调度的驱动力异质特征,按照“重点突破、中心带动、协调调控”原则,研究从“单系统—多层次—全方位”视角提出9种山地乡村人居环境系统“提韧性—促协调”优化策略(见图8-图9),为山地乡村系统韧性

格局重构提供决策参考。

3.1 失调衰退型村庄: 找准主要障碍因子, 整治提升补足短板

将韧性及其耦合协调水平低的村庄划分为失调衰退型村庄,其人居环境主要面临生活设施落后、产业发展低效问题。借助障碍度

诊断模型分析的主要障碍系统类型,将昌都乡村人居环境按照居住系统、产业系统、支撑系统等3种障碍主导类型分别提出优化策略: ①针对居住系统作为主导障碍因素的村庄,提倡“分支机构+流动共享”资源配置模式,搭建与“就近城镇化”相适应的公共服务资源配置模式,以重点镇为支点构建设施分支机构,各村形成流动设施服务站,强化各类资源的上下联动,以用地指标下沉引领公共服务下沉。②针对产业系统作为主导障碍因素的村庄,提出“以农牧为根本,因地制宜推动第二三产业发展”的产业发展策略,构建以畜牧业为主体、种植业为保障、林业为特色的一产结构,并完善旅游服务体系。③针对支撑系统作为主导障碍因素的村庄,将存在地质灾害安全隐患且交通不便的聚落,向交通便利的城镇周边、中心村等区域迁移,其他聚落加强乡村环卫体系和村镇公路网络建设,大力推行低成本、可循环的技术在乡村污染治理与人居环境改善方面的应用。

3.2 转型提升型村庄: 优化系统驱动机制, 要素融合协调发展

将高韧性且耦合协调水平低的村庄划分为转型提升型村庄,基于MGWR模型驱动力空间异质性分析,提出“产业—居住—支撑”“社会—产业—居住—支撑”“自然—产业—社会—居住—支撑”3种系统韧性协调优化策略。①“居住—支撑—产业”系统韧性协调优化策略主要针对公共服务设施用地不足、道路交通不便、产业结构单一的问题,提出综合提升、原址改善和灵活配置等设施配置优化策略,依据现有道路体系完善“镇—村”道路网,依托农牧资源与文化资源推动二三产业发展,实现“就近式+渐进式”产住融合人居环境建设模式^[26]。②“社会—产业—居住—支撑”系统协调优化策略主要针对村民经济收入低、建设用地受地形限制问题,通过对建设用地分散且不足的居民点实施迁并策略,促进高效配置空间资源,提升基础设施与公共服务水平,吸引资本入驻与

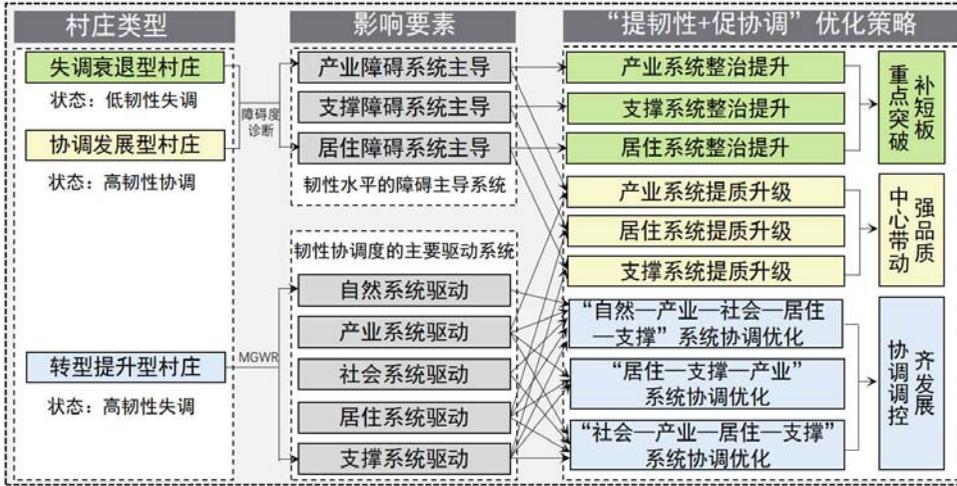


图8 山地乡村人居环境系统韧性分类提升策略
Fig.8 Classification improvement strategy of mountainous rural human settlements system resilience

资料来源：笔者自绘。

人才回归，增加乡村居民的收入渠道。③“自然—产业—社会—居住—支撑”系统协调优化策略针对建设与生态管控冲突、产业发展受地形限制等问题，通过乡村生态保护修复、农用地和建设用地的整合，严格落实耕地和生态保护目标，研判地质灾害和设施基础条件划定建设用地，促进山地乡村人居环境系统融合发展。

3.3 协调发展型村庄：巩固优势基础条件，提质升级中心带动

将高韧性且耦合协调水平高的村庄划分为协调发展型村庄，结合主要障碍度因子与系统韧性协调驱动要素，提出产业系统、居住系统、支撑系统3种提质升级策略，通过中心村庄建设带动周边发展，破解各村间人居环境系统发展不平衡不充分的瓶颈，加快推进山地乡村全面深度振兴。①针对产业系统是韧性水平主导因素的村庄，提出产业系统提质升级策略，以其为中心实施“高原农牧+绿色工业+康巴文化”产业融合圈规划布局，培育高原特色农牧产业新动能，联合清洁能源和绿色工业新产业，打造康巴特色文化旅游品牌产业，以产业深度融合带动乡村人居环境品质提升和缓解周边乡村产业脆弱问题。②针对居住系统是韧性水平主导因素的村庄，提出居住系

统提质升级策略，以其为中心实施“区域配套设施联动+建设用地布局集聚”生活圈规划布局，综合评判该类村庄周边村庄居民点的建设条件，实现跨村镇的配套设施高效联动，将该类村庄周边受地形及灾害影响大的居民点向其靠拢，缓解山地乡村空间资源配置低效问题，通过“配套设施落点到位，建设用地布局适宜”促使山地乡村空间宜居发展。③针对支撑系统是韧性水平主导因素的村庄，提出支撑系统提质升级策略，以其为中心实施“公共交通衔接互通+市政设施按需布局”设施支撑圈规划布局。一方面支持该类村庄与城镇联系的“村—镇—县”公共交通设施布局，提升村庄交通便利度；另一方面结合人口和经济条件逐级配置市政基础设施，带动山地乡村人居环境向更高质量发展。

4 结语

笔者针对山地乡村人居环境系统“脆弱—失衡”的典型问题，从韧性治理角度发展山地乡村人居环境系统理论，构建山地乡村人居环境系统韧性及其耦合协调水平评价方法，以横断山区昌都为例展开研究，发现影响山地乡村人居环境系统韧性及其耦合协调水平要素呈现显著差异性，高低水平因地形地貌差异呈现“大分散，小集聚”特征。基于韧性水

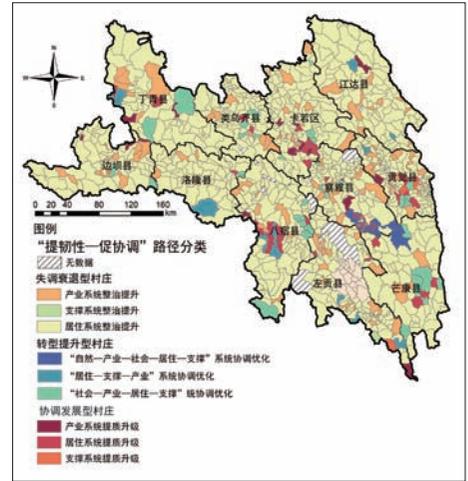


图9 基于分类施策的昌都乡村系统韧性格局重构
Fig.9 Reconstructing the resilience pattern of Changdu rural system based on categorical approach

资料来源：笔者自绘。

平及其耦合协调度分析，将乡村分为失调衰退型、转型提升型和协调发展型3种类型，根据不同类型乡村人居环境系统韧性提升的障碍因素与协调驱动要素提出优化建议，以期重构昌都乡村人居环境韧性格局，为持续纾解山地乡村脆弱性问题提供可推广的评估与优化方法，推动山地乡村振兴战略深度实施。本文的山地乡村人居环境韧性评价指标类型受到数据和样本的限制，未来指标体系的构建可结合新样本、新数据进一步补充和完善。此外，乡村人居环境系统作为开放且动态的复杂巨系统，需对其演化趋势进行长时序追踪，未来可采取动态视角跟进乡村人居环境系统韧性的评价与优化研究。

参考文献 References

[1] 王凯平,冯悦,张云路. 改革开放后乡村人居环境发展历程、逻辑与展望[J]. 城市规划, 2022, 46 (1): 77-86.
WANG Kaiping, FENG Yue, ZHANG Yunlu. Development process, logic, and prospect of rural

- human settlements after reform and opening-up[J]. *City Planning Review*, 2022, 46(1): 77-86.
- [2] 洪惠坤, 谢德体, 郭莉滨, 等. 多功能视角下的山区乡村空间功能分异特征及类型划分[J]. *生态学报*, 2017, 37 (7) : 2415-2427.
- HONG Huikun, XIE Deti, GUO Libin, et al. Differentiation of spatial function in a mountainous rural area from a multi-functional perspective[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7): 2415-2427.
- [3] 王成, 代蕊莲, 陈静, 等. 乡村人居环境系统韧性的演变规律及其提升路径——以国家城乡融合发展试验区重庆西部片区为例[J]. *自然资源学报*, 2022, 37 (3) : 645-661.
- WANG Cheng, DAI Ruilian, CHEN Jing, et al. Research on the evolution law and promotion pathway of rural human settlements system resilience: a case study of Western Chongqing, a national pilot area for urban-rural integration[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(3): 645-661.
- [4] JIANG W, DENG Y, TANG Z, et al. Adaptive capacity of mountainous rural communities under restructuring to geological disasters: the case of Yunnan Province[J]. *Journal of Rural Studies*, 2016, 47: 622-629.
- [5] 邹芳, 刘晨曦, 陈茜露. 精准防灾导向下乡村地质灾害易发性评价及防灾策略研究——以花垣县为例[J]. *安全与环境学报*, 2021, 21 (4) : 1703-1711.
- ZOU Fang, LIU Chenxi, CHEN Xilu. Improving disaster prevention accuracy of rural geological disaster susceptibility evaluation and disaster prevention strategy: a case study of Huayuan County[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(4): 1703-1711.
- [6] 邱明丽, 刘殿锋, 刘耀林. 乡村韧性理论框架与测度体系[J]. *中国土地科学*, 2021, 35 (8) : 107-114.
- QIU Mingli, LIU Dianfeng, LIU Yaolin. Review on theoretical framework and evaluation system of rural resilience[J]. *China Land Science*, 2021, 35(8): 107-114.
- [7] 罗慧, 刘杰, 徐军祀, 等. 基于熵权法的秦岭区域农村社区气候韧性评价研究[J]. *自然灾害学报*, 2022, 31 (2) : 111-118.
- LUO Hui, LIU Jie, XU Junchang, et al. Evaluation on rural community climate resilience in Qinling mountain area based on entropy method[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(2): 111-118.
- [8] 刘润秋, 黄志兵, 曹骞. 基于乡村韧性视角的宅基地退出绩效评估研究——以四川省广汉市三水镇为例[J]. *中国土地科学*, 2019, 33 (2) : 41-48.
- LIU Runqiu, HUANG Zhibing, CAO Qian. Performance evaluation of rural residential land exit from the perspective of rural resilience: a case of Sanshui Town, Guanghan City, Sichuan Province[J]. *China Land Science*, 2019, 33(2): 41-48.
- [9] QUANDT A. Measuring livelihood resilience: the household livelihood resilience approach (HLRA)[J]. *World Development*, 2018, 107: 253-263.
- [10] 田健, 曾穗平. 城市边缘区乡村产业系统风险评估与韧性格局重构——以天津市西郊乡村地区为例[J]. *城市规划*, 2021, 45 (10) : 19-30.
- TIAN Jian, ZENG Suiping. Systematic risk assessment and resilient pattern reconstruction of rural industry in urban fringe areas: a case study on the western suburbs of Tianjin City[J]. *City Planning Review*, 2021, 45(10): 19-30.
- [11] 朱晏君, 李红波, 胡晓亮, 等. 欠发达地区县域乡村社会—生态系统韧性研究——以山西省静乐县为例[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2022, 45 (1) : 11-19.
- ZHU Yanjun, LI Hongbo, HU Xiaoliang, et al. Study on the resilience of rural society-ecosystem at county level in underdeveloped areas: a case of Jingle County, Shanxi Province[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2022, 45(1): 11-19.
- [12] 胡霄, 李红波, 李智, 等. 河北省县域乡村韧性测度及时空演变[J]. *地理与地理信息科学*, 2021, 37 (3) : 89-96.
- HU Xiao, LI Hongbo, LI Zhi, et al. Measurement and spatio-temporal evolution of rural resilience at county level in Hebei Province[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2021, 37(3): 89-96.
- [13] 王彩丽, 闫绪娴. 中国乡村韧性时空分异及障碍因子诊断[J]. *经济问题*, 2022 (10) : 91-97.
- WANG Caili, YAN Xuxian. Spatio-temporal variation of rural resilience in China and diagnosis of its obstacle factors[J]. *On Economic Problems*, 2022(10): 91-97.
- [14] 雷晓康, 汪静. 乡村振兴背景下农村贫困地区韧性治理的实现路径与推进策略[J]. *济南大学学报(社会科学版)*, 2020, 30 (1) : 92-99.
- LEI Xiaokang, WANG Jing. Implementing path and promoting strategy of resilience governance in poverty-stricken areas under the background of rural revitalization[J]. *Journal of University of Jinan (Social Science Edition)*, 2020, 30(1): 92-99.
- [15] 田深圳, 杨兵, 李雪铭, 等. 从分科知识到交叉融合的国内外人居环境综述与展望[J/OL]. *世界地理研究*: 1-19 [2023-03-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1626.p.20220308.1023.004.html>.
- TIAN Shenzhen, YANG Bing, LI Xueming, et al. Review and prospect of human settlements on foreign and Chinese from branch knowledge to cross integration[J/OL]. *World Regional Studies*: 1-19 [2023-03-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1626.p.20220308.1023.004.html>.
- [16] 彭鹏, 顾丹丹, 周国华. 湖南省乡村人居环境脆弱性格局变化及响应指数的影响机制[J]. *经济地理*, 2022, 42 (6) : 168-178.
- PENG Peng, GU Dandan, ZHOU Guohua. Spatio-temporal pattern of rural human settlement vulnerability and influencing mechanism of response index in Hu'nan Province[J]. *Economic Geography*, 2022, 42(6): 168-178.
- [17] 吴良镛. *人居环境科学导论*[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- WU Liangyong. *Introduction to sciences of human settlements*[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [18] DOXIADES C A. *Action for human settlements*[M]. Athens: Athens Center of Ekistics, 1976.
- [19] 李伯华, 曾菊新, 胡娟. 乡村人居环境研究进展与展望[J]. *地理与地理信息科学*, 2008 (5) : 70-74.
- LI Bohua, ZENG Juxin, HU Juan. Progress and prospects on the research of rural human settlement environment[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2008(5): 70-74.
- [20] 李裕瑞, 曹丽哲, 王鹏艳, 等. 论农村人居环境整治与乡村振兴[J]. *自然资源学报*, 2022, 37 (1) : 96-109.
- LI Yurui, CAO Lizhe, WANG Pengyan, et al. Rural living environment improvement and rural revitalization[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(1): 96-109.
- [21] 秦天天, 齐伟, 李云强, 等. 基于生态位的山地农村居民点适宜度评价[J]. *生态学报*, 2012, 32 (16) : 5175-5183.
- QIN Tiantian, QI Wei, LI Yunqiang, et al. Suitability evaluation of rural residential land based on niche theory in mountainous area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 5175-5183.
- [22] 熊鹰, 孙维筠, 魏晓, 等. 南方丘陵山地生态系统服务与农村社区协同发展模式研究——以广东乐昌市8个乡镇为例[J]. *生态学报*, 2020, 40 (18) : 6505-6521.
- XIONG Ying, SUN Weijun, WEI Xiao, et al. Cooperative development model of ecosystem services and rural communities in hilly-mountain of Southern China: a case study of eight villages in Lechang, Guangdong Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6505-6521.
- [23] 杨士弘, 廖重斌. *城市生态环境学(第二版)*[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- YANG Shihong, LIAO Chongbin. *Urban ecology and environment*[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [24] 曲衍波, 张彦军, 朱伟亚, 等. “三生”功能视角下全域土地综合整治格局与模式研究[J]. *现代城市研究*, 2021 (3) : 33-39.
- QU Yanbo, ZHANG Yanjun, ZHU Weiya, et al. Pattern and mode of comprehensive land consolidation from the perspective of production-life-ecological function[J]. *Modern Urban Research*, 2021(3): 33-39.
- [25] 徐维祥, 李露, 周建平, 等. 乡村振兴与新型城镇化耦合协调的动态演进及其驱动机制[J]. *自然资源学报*, 2020, 35 (9) : 2044-2062.
- XU Weixiang, LI Lu, ZHOU Jianping, et al. The dynamic evolution and its driving mechanism of coordination of rural rejuvenation and new urbanization[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(9): 2044-2062.
- [26] 田健, 曾穗平. 城乡资源配置视角下西藏城镇化路径重构与国土空间规划响应[J]. *城市规划学刊*, 2021 (6) : 78-85.
- TIAN Jian, ZENG Suiping. Reconstructing the urbanization path: responses to territorial spatial planning in Tibet from the perspective of urban-rural resource allocation[J]. *Urban Planning Forum*, 2021(6): 78-85.