川西南农村山洪韧性与生态调节服务的协调关系

郭 旸[1,2], 徐 云[1]

(1.中国科学院、水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610213; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: [目的]将农村山洪韧性与生态系统调节服务置于统一框架下,探索二者耦合协调关系的时空演变规律,为山区农村可持续发展与防灾减灾决策提供支撑。[方法]以山洪高发且生态地位关键的川西南为研究区,采用"压力-状态-响应"(PSR)模型构建农村山洪韧性评估体系,并运用修正通用土壤流失方程(RUSLE)和水量平衡方程测算土壤保持及水源涵养服务量,利用耦合协调度模型定量解析两系统协调关系。[结果]①2013—2023年农村山洪韧性水平由0.343提升至0.471,空间上呈现稳定的"北高南低"格局。②生态调节服务与水热格局相匹配,同时受气候波动影响,呈非线性变化,具有明显的地域分异。③耦合协调关系表现出显著的功能分异与空间极化特征。农村山洪韧性与土壤保持的协调性更优;但与水源涵养的协调性呈现剧烈两极分化,北部多处于"优质协调",而南部凉山腹地长期处于"中度失调"乃至"严重失调"状态。水源涵养功能的提升受到更为严格的自然本底约束,易形成短板效应。[结论]未来的农村山洪韧性提升策略应避免"一刀切",需对北部协调区侧重提质增效,对南部失调区侧重补短板与适洪恢复,特别是推广耐旱植被与坡改梯相结合的模式,以实现人-水-土系统的协调发展。

关键词: 山洪韧性; 生态调节服务; 耦合协调; 川西南; 山区农村

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0332-10 **中图分类号:** X22, X43, X171.1

文献参数: 郭旸, 徐云.川西南农村山洪韧性与生态调节服务的协调关系[J].水土保持通报,2026,46(3):332-341. Guo Yang, Xu Yun. Coordination relationship between flash flood resilience and ecosystem regulation services in rural areas of southwestern Sichuan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(3):332-341.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.025 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.025**

Coordination relationship between flash flood resilience and ecosystem regulation services in rural areas of southwestern Sichuan Province

Guo Yang[1,2], Xu Yun[1]

(1.*Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan* 610213, *China*; 2.*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: [Objective] By integrating rural flash flood resilience and ecosystem regulation services into a unified framework, the spatiotemporal evolution patterns of their coupling and coordination relationship were investigated in order to provide support for the sustainable development and decision-making for disaster prevention and mitigation in mountainous rural areas. [Methods] Focusing on southwestern Sichuan Province, a region characterized by high flash flood incidence and strategic ecological importance, the pressure-state-response (PSR) model was used to construct a rural flash flood resilience assessment system. The revised universal soil loss equation (RUSLE) and the water balance equation were used to quantify soil conservation and water yield services, respectively. The coupling coordination degree model was utilized to quantitatively evaluate the coordination relationship between the two systems. [Results] ① From 2013 to 2023, rural flash flood resilience

收稿日期: 2025-09-26 **修回日期:** 2025-12-29 **采用日期:** 2026-01-02

资助项目: 国家自然科学基金项目"横断山区高频高强自然灾害扰动的农村居民生计恢复力响应与靶向调校研究"(42171209),"川西少数民族农户减贫阻滞机制与脱贫行为研究"(41671152)

第一作者: 郭旸(1988—),女(达斡尔族),内蒙古自治区呼伦贝尔市人,硕士研究生,研究方向为山区可持续发展与灾害韧性。Email:guoyang@imde.ac.cn。

通信作者: 徐云(1969—),女(回族),江苏省无锡市人,博士,副研究员,研究方向为农户生计与山区可持续发展。Email:xuyun@imde.ac.cn。

level rose from 0.343 to 0.471, showing a stable spatial pattern of 'high in the north and low in the south'. ② Ecosystem regulation services matched the hydrothermal patterns, but were influenced by climate fluctuations, exhibiting non-linear changes with distinct regional differentiation. ③ The coupling coordination relationship demonstrated pronounced functional differentiation and spatial polarization. Rural flash flood resilience showed better coordination with soil conservation. However, its coordination with water conservation exhibited sharp polarization, with most northern areas in a state of 'high-quality coordination', whereas the hinterland of Liangshan in the south remained in a state of 'moderate dysfunction' or even 'severe dysfunction' for a long time. The enhancement of water conservation was constrained by more stringent natural background conditions, frequently resulting in a bottleneck effect. [Conclusion] Future strategies for enhancing rural flash flood resilience should avoid a 'one-size-fits-all' approach. For the northern coordinated areas, efforts should focus on improving efficiency and quality. For the southern dysfunctional areas, emphasis should be placed on addressing weaknesses and promoting flood-adaptive restoration. Specifically, combining drought-tolerant vegetation with slope-to-terrace conversion should be promoted to achieve the coordinated development of the human-water-soil system.

Keywords: flash flood resilience; ecosystem regulation services; coupling coordination; southwestern Sichuan Province; mountainous rural areas

气候变化背景下,高原及山区极端降水频发,山洪灾害复杂性持续加剧[1]。20 世纪 50 年代以来,中国山洪导致的死亡及失踪人数达 19.4 万人,占洪涝灾害总数的 68.4%[2]。提升山洪韧性已成为应对气候变化不确定性,降低洪灾风险的有效途径之一[3]。然而,当前研究多集中于城市或社区,现有评估框架难以兼容农村山洪"自然-社会"耦合的致灾特点[4]。农村地区因防洪设施匮乏,灾后恢复周期长,是山洪影响的重灾区[5],亟需构建适配农村特点的山洪韧性评估体系。为此,本文结合既有研究[3-4]将农村山洪韧性定义为农村的自然-社会-经济复合系统在面对山洪冲击时,通过缓冲压力,维持结构和功能的稳定状态,并采取响应,适应未来变化的能力。社会系统中人们可通过经济保障、应急管理、预报预警、生计转型等途径塑造洪水韧性,自然系统中多从单一视角探讨生态系统调节服务,而农村山洪治理涉及"人-水-土"要素的深度互动[6]。生态系统服务功能在山洪调节方面蕴含巨大潜力。土壤保持通过调控洪水中的泥沙含量影响河道行洪能力,水源涵养服务通过调节雨水蓄滞能力改变山洪强度与频率,二者与社会经济系统协同作用,既能降低洪水风险,又能保障农田生产力,稳定居民收入,提升农村地区韧性。然而在实践中,社会发展与生态建设之间往往存在时空错位与协调不足等难题[7]。

川西南地区地处青藏高原向四川盆地的过渡地带,地形起伏剧烈,既是长江上游重要的生态屏障与水源涵养区,也是山洪、泥石流等自然灾害的高发区。申梦姝等[8]研究证实,长江上游在全流域水源涵养服务中占据核心供给地位。在该区域生态功能维系与山洪风险防控高度交织的现实背景下,厘清二者的耦合协调关系具有重要的科学价值与现实紧迫性。已有研究[9]表明,长江经济带各类生态系统服务间存在复杂的权衡与协同关系。Li Yue 等[10]对中国南方典型喀斯特区域的研究发现,生态系统服务具有显著的空间分异特征,且主要受坡度等自然地理因子与人类活动的交互驱动。杜陈龄等[11]针对川西南安宁河流域的研究显示,尽管经过长期治理,该区域在特定地貌下的水力侵蚀模数依然较高,土壤保持压力依然突出。鉴于此,本研究以川西南为研究区,运用"压力-状态-响应"(PSR)模型构建农村山洪韧性评价体系,并核算生态系统调节服务量。在此基础上,采用耦合协调度模型,定量解析 2013—2023 年农村山洪韧性与生态系统调节服务耦合协调关系的时空演变特征及互动规律,以期为山区农村可持续发展与区域防灾减灾决策提供科学依据与实践支撑。

1　研究区概况、材料与方法

1.1　研究区概况

川西南地处青藏高原、云贵高原与四川盆地三大地貌单元的交会带(地理坐标为 26°03′—30°56′N,100°03′—104°30′E),行政区划包括乐山市、眉山市、雅安市、凉山彝族自治州(简称"凉山州")和攀枝花市 5 个市(州)。本研究以县级尺度为基准,鉴于攀枝花市各县区相关数据缺失,且该市属干热河谷气候,山洪灾害发生频次低,同时辖区面积较小(7 400 km^2),因此将其排除在外,最终确定研究范围

为上述其余4个市(州)。研究区总面积9.53×10⁴ km²,区域内地势落差约5 600 m,高山峡谷交错分布,形成与断陷盆地、宽缓河谷并存的高异质性下垫面。气候受地形影响显著,眉山市、乐山市属亚热带湿润气候,夏季暴雨集中。雅安市及乐山市局部年降水量超2 000 mm,凉山州则呈"一山四季"的立体气候。这种气候与地形的组合,易诱发山洪灾害。自2000年以来,川西南发生死亡10人以上的重大、特大山洪、泥石流灾害事件14起,时间均集中在每年的5—9月,主要分布在城镇化率相对较低的雅安市和凉山州。2024年7月20日雅安市汉源县马烈乡突发的雨源性山洪,致19人死亡,22人失联,农村房屋、道路及耕地受损严重。川西南农村每年都会遭受不同程度的暴雨洪涝,常伴随人员伤亡和财产损失,这也是中国大部分山区和世界上其他山区国家共同面临的主要自然灾害问题。

本研究涉及的社会经济数据来源于四川省、乐山市、眉山市、雅安市、凉山州统计年鉴和《国民经济和社会发展统计公报》,其他数据来源详见表1。数据年份为2013,2015,2017,2019,2021和2023年。

表1 研究数据来源

Table 1 Data sources

数据类型	数据集名称	数据来源	空间分辨率
高 程	GDEMV2 30 m分辨率数字高程数据	https://www.gscloud.cn/	30 m
土地利用	The 30 m annual land cover datasets and its dynamics in China from 1985 to 2024	https://zenodo.org/records/15853565	30 m
土壤属性	Harmonized World Soil Database v2.0	https://www.fao.org/soils-portal/en/	1 km
植被指数	中国1 km分辨率逐月NDVI数据集(2001—2024年)	https://www.geodata.cn/main/	1 km
年降水量	1901—2024年中国1 km分辨率逐月降水量数据集	https://www.geodata.cn/main/	1 km
年蒸散发量	1901—2024年中国1 km分辨率逐月潜在蒸散发数据集	https://www.geodata.cn/main/	1 km
日降水量	中国逐日格点降水数据集(1960—2024年)	https://data.tpdc.ac.cn/home	0.1°

1.2 研究方法

1.2.1 农村山洪韧性评价

农村山洪韧性本质是农村自然-社会-经济复合系统在山洪灾害扰动下,抵御灾害冲击、保障民生稳定、实现快速恢复的综合能力。"压力-状态-响应"(PSR)模型遵循外部压力-系统状态-适应响应的逻辑框架,可有效弥补城市洪水韧性评估中重社会轻自然、重工程措施弱化基础保障要素的农村适配性不足的问题。相较于其他综合评价体系,其核心差异体现在风险识别的针对性更强。本文在前人研究成果及数据可得性的基础上,整合山洪灾害的压力特点与农村社会经济结构,构建农村山洪韧性评价指标体系(表2)。

山洪灾害是山区小流域在短历时强降雨下快速汇流形成的突发性灾害,与城市内涝(降水量超过排水能力致低速积水)、河流洪水(大范围长时间淹没)存在差异显著。山洪以高速水流为特征,降水与地形是形成山洪的核心致灾因子。川西南山洪灾害集中于每年的5—9月,暴雨是引发灾难性山洪事件的主要诱因。地形地貌作为山区孕灾的天然本底条件,直接影响山洪运动过程与能量汇集特征。Cutter等[12]指出城市灾害韧性主要受经济因素影响,农村则以社会因素为重要驱动,故状态层的核心为地区经济、农村民生及社会结构[13]。响应层的指标设计充分贴合农村地区以基层组织为主导的防灾治理模式,农村地区的洪灾恢复进程也与农业生产效率存在关联。采用综合指标评价法,CRITIC权重法利用指标间的冲突性和对比强度来确定指标的客观权重,得出2013—2023年川西南各市(州)6期农村山洪韧性以及"压力-状态-响应"各维度得分,具体评价指标、指标描述与说明及权重详见表2。运用方差膨胀因子(VIF)检验指标间的共线性,以减少指标间的重叠,根据已有研究[14],将VIF值=10设定为是否出现共线性问题的阈值。经检验,农村山洪韧性所有指标的VIF值均小于7.13,说明指标间不存在明显共线性,指标选取合理。主要计算步骤为:

步骤1:指标数据标准化。

$$y_{ij}=\frac{x_{ij}-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}}\quad(\text{正向指标})\qquad(1)$$

$$y_{ij}=\frac{x_{\max}-x_{ij}}{x_{\max}-x_{\min}}\quad(\text{负向指标})\qquad(2)$$

式中:x_{ij}为第i个县第j项指标值;x_{max},x_{min}分别为第j项指标的最大值与最小值;y_{ij}为极差标准化后的值。

步骤2:计算指标的变异性。

$$\bar{y}_j=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_{ij}\qquad(3)$$

$$S_j=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_{ij}-\bar{y}_j)^2}{n-1}}\qquad(4)$$

式中:n为样本总数;$\bar{y}_j$为第j个指标标准化数据的均值;S_j为第j项指标的标准差,表示指标的对比强度,S_j越大说明指标的波动越大,权重就越高。

步骤3:计算指标的相关系数矩阵。

$$r_{jk}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_{ij}-\bar{y}_j)(y_{ik}-\bar{y}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_{ij}-\bar{y}_j)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_{ik}-\bar{y}_k)^2}}\qquad(5)$$

式中:r_{jk}为指标j和指标k之间的Pearson相关系数。

$$C_j=S_j\sum_{k=1}^{m}(1-r_{jk})\qquad(6)$$

$$w_j=\frac{C_j}{\sum_{k=1}^{m}C_k}\qquad(7)$$

式中:m是指标总数;C_j为第j个指标的信息量,值越大表示该指标在评价体系中作用越大,指标j权重就越高;w_j为第j个指标的权重。最后根据加权求和法,计算各县农村山洪韧性指数。

表2　农村山洪韧性评价指标及权重

Table 2　Evaluation indicators and weights of rural flash flood resilience

维度层	准则层	具体指标	指标描述与说明	方向	权重/%	参考文献
压力	降雨	P_1大雨日数/d	年降雨量≥25 mm且<50 mm日数	−	3.93	[15-17]
		P_2暴雨日数/d	年降雨量≥50 mm日数	−	8.92	
		P_3雨季降雨量/mm	5—9月累积降雨量	−	6.13	
	地形	P_4海拔高度/m	平均海拔	−	6.51	
		P_5起伏度/km	海拔落差	−	7.82	
状态	地区经济	S_1人均地区生产总值/万元	反映区域经济发展水平与综合实力	+	3.62	[17-18]
		S_2人均消费品零售额/万元	反映市场消费活跃度	+	4.49	
		S_3人均一般公共预算收入/万元	反映政府财政汲取、提供公共产品服务能力	+	3.73	
		S_4人均一般公共预算支出/万元	反映政府经济建设、社会发展的投入	+	4.74	
	农村民生	S_5农村居民生活消费支出/万元	反映农村居民生活成本	+	3.47	
		S_6人均农林牧渔产值/万元	反映农业生产效率和集约化程度	+	2.75	
	社会结构	S_7第三产业占GDP比重/%	反映现代化发展水平	+	5.28	
		S_8乡城居民收入比/%	农村居民与城镇居民人均可支配收入比,反映乡城差距	+	3.74	
		S_9常住人口城镇化率/%	反映城镇化发展水平	+	4.15	
响应	预警响应能力	R_1移动电话接入率/(户/人)	反映获取信息能力	+	2.48	[19-20]
		R_2基层应急能力/个	每万人村委会个数	+	6.60	
		R_3路网密度/(km·km^{-2})	公路通车里程与辖区面积之比	+	2.19	
		R_4高速公路比例/%	高速公路占通车公路里程比重	+	5.02	
	恢复能力	R_5千人医疗卫生床位/张	反映医疗资源的配置规模	+	3.36	
		R_6农村居民人均耕地面积/hm^2	反映农村居民生计恢复的基础	+	6.01	
		R_7农村居民人均农业机械动力/kW	反映灾后复产的生产效率	+	5.04	

1.2.2　生态调节服务测度

生态系统主要通过土壤保持与水源涵养两大功能实现洪水调节。土壤保持采用修正的水土流失方程(RUSLE)核算[21],原理为气候、地形、植被、土壤特性等多因子驱动下潜在与实际土壤侵蚀量之差,水土保持因子参考相近区域研究赋值[22]。土壤保持功能可调节河流泥沙含量,降低山洪破坏力,延长水利工程寿命。计算公式如下:

$$Q=R\cdot K\cdot LS\times(1-C\cdot P)\qquad(8)$$

式中:Q为土壤保持量;R为降雨侵蚀力;K为土壤可蚀性因子;LS为坡度坡长因子;C为植被覆盖因子;P为水土保持措施因子,其赋值[11,23]详见表3。

水源涵养是指生态系统通过对降水进行截留、渗透、储存和缓释作用调节径流，改变水文循环，以调蓄洪水，削减洪峰[11]。本文使用水量平衡方程计算涵养量，计算公式如下：

$$W = P - \mathrm{ET} - R \tag{9}$$

$$Y = P - \mathrm{ET} \tag{10}$$

$$R = \min(X \cdot P, Y) \tag{11}$$

式中：W为水源涵养量；Y为产水量；R为地表径流量；P为年降水量；ET为年蒸散发量；X为地表径流系数，参考前人[8]研究进行赋值（表3）。

表3 不同土地利用类型的地表径流系数与水土保持措施因子

Table 3 Surface runoff coefficients and soil and water conservation factors for different land use types

土地利用类型	地表径流系数X/%	水土保持措施因子P
农田	25.00	0.15
森林	9.99	1.00
灌木	7.95	1.00
草地	6.84	0.80
水域	0	0
冰雪	0	0
裸地	75.00	0.40
不透水面	58.33	0
湿地	0	0

1.2.3 农村山洪韧性与生态调节服务的耦合协调度

耦合协调度模型的基本原理是通过耦合度和协调度两个核心指标，量化分析系统相互作用强度与协同水平，耦合协调度越高则协同性越强，本文运用此模型来评估农村山洪韧性与土壤保持、水源涵养的协调发展关系。

（1）计算耦合度。表示指两个系统之间的相互作用影响，可以反映系统之间的相互依赖制约程度。计算公式为

$$C = \frac{(U_1 + U_2)}{\left(\frac{U_1 + U_2}{2}\right)^2} \tag{12}$$

式中：U_1，U_2分别为农村山洪韧性与生态调节功能；C为系统耦合度，其分布区间为[0,1]。

（2）计算协调度。协调指数指耦合相互作用关系中良性耦合程度的大小，它可体现出协调状况的好坏。计算公式为

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 \tag{13}$$

式中：T为综合协调指数；α，β为权重，本文采用等权分配赋予权重，设定农村山洪韧性与生态系统调节服务同等重要[24]，即$\alpha = \beta = 0.5$。

（3）计算耦合协调度。耦合协调度是综合考虑耦合度和协调指数的一个指标，计算公式为

$$D = \sqrt{C \cdot T} \tag{14}$$

式中：D为系统的耦合协调度，耦合协调度的取值范围为[0,1]，值越接近1，耦合协调程度越高，山洪韧性与生态调节系统协调度越高，反之亦然。

参考既有研究[24]，以0.2，0.4，0.5，0.6，0.8作为等级分割点，将耦合协调度分为极度失调、中度失调、轻度失调、初级协调、中级协调、高度协调6类。

2 结果与分析

2.1 农村山洪韧性评价

2013—2023年川西南42个县农村山洪韧性整体呈波动上升趋势（表4）。各县韧性均值从0.343提升至0.471，2023年达到最高，川西南农村山洪韧性在过去10 a显著提升。最小值持续稳定增长，说明基础韧性已形成。最大值在2019年短暂回落后2023年达到最高，反映后期韧性加速提升。标准差扩大，县域间韧性差距有所增加，与以往证实的该区域社会经济发展不平衡的结论保持一致[25]。从时间序列来看，韧性高低排序较为稳定，从高到低依次为眉山市、乐山市、雅安市、凉山州。各市韧性增长并非线性，眉山市、乐山市和雅安市在2019年都出现了明显的回落，其原因主要在于压力维度的变化。凉山州2021年略有下降，但总体增长较为平稳（图1）。

表4 川西南农村2013—2023年山洪韧性变化趋势

Table 4 Variation trend of rural flash flood resilience in southwestern Sichuan Province from 2013 to 2023

年份	最大值	最小值	均值	标准差
2013	0.466	0.236	0.343	0.058
2015	0.567	0.260	0.388	0.078
2017	0.603	0.278	0.407	0.086
2019	0.536	0.280	0.395	0.058
2021	0.572	0.297	0.425	0.078
2023	0.640	0.344	0.471	0.086

从“压力-状态-响应”3个维度来看，压力作为农村山洪韧性的负向评价指标，韧性得分越高说明降水和地形压力越小；反之，压力维度得分越低，地区的降水和地形压力越大，意味着山洪的风险越大。压力维度得分年际变化较大（图2），且在2019年出现大幅变化，说明压力因素是导致韧性波动的主要原因。2013—2023年状态和响应维度得分增长趋势最为明显，是提升农村山洪韧性的主要驱动力。凉山州与雅安市在压力维度得分持续处于较低水平，表

明两地受山洪影响显著的降水与地形压力最为突出,该评估结果与四川省防洪重点区域及山洪灾害隐患点密集分布区域的实际情况一致。凉山州位于横断山区,山高谷深,地形因素导致其在山洪韧性方面具有先天劣势。雅安地区在2019年8月遭遇大范围强降雨,受灾严重,导致当年总韧性不升反降。状态维度稳步增长,眉山市、乐山市显著高于凉山州,地处成都平原经济区及其延伸带,良好的经济发展为防洪提供了物质基础,形成了“经济发展—防灾投入—韧性提升”的良性循环。社会结构是区域差异形成的重要因素,2013—2020年是精准扶贫关键期,凉山州作为脱贫攻坚重点区域,农业依赖度高,因此状态得分相对较低,但增速较快。响应维度自2019年起增长明显,随着四川“交通强省”战略的推进,川西南地区交通通达性显著提升。同时,农村基础应急能力建设直接增强了山洪灾害的响应能力。

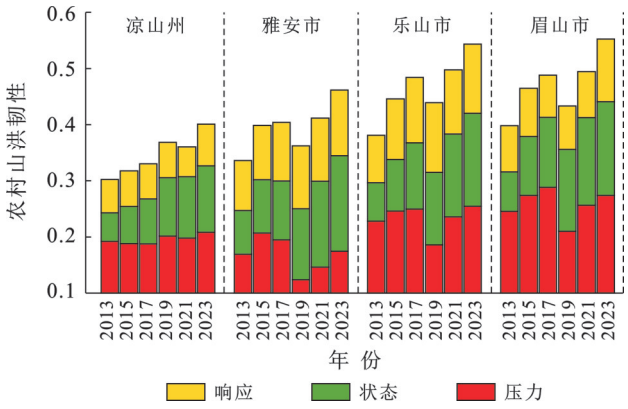


图1　川西南农村山洪韧性评价结果

Fig.1　Evaluation results of rural flash flood resilience in southwestern Sichuan Province

2.2　川西南生态系统服务量及空间格局

2013—2023年川西南水源涵养和土壤保持量均呈波动上升趋势(表5),并在2019年达到阶段最低值。年均水源涵养深度由2013年的31 mm增至2023年的76 mm,生态系统蓄水能力显著提升。土壤保持量均值稳步提高,从235 t/(hm^2·a)增加到264 t/(hm^2·a),表明植被覆盖率提升对土壤保持具有重要的促进作用。

2019年川西南地区水源涵养量与土壤保持量均降至近10 a最低值。据《2019年四川省气候公报》,该年全省平均降水量较常年明显偏少,川西南部分地区春季发生严重的阶段性干旱,直接导致区域水源涵养量与土壤保持量大幅下降。尽管2019年降雨总量偏少,但雅安市等地仍遭受了“8·22”特大暴雨极端天气事件。由于农村山洪韧性评价的压力维度纳入了极端降水的影响权重,极端天气的出现使当年韧性得分偏低。综上所述,2019年呈现“总量偏少,极端降水频发”的气候特征,这一特征使得区域水源涵养、土壤保持与山洪韧性压力维度的评价结果看似矛盾,实则本质上反映了气候要素中总量特征与极端特征的差异化影响机制。川西南地区土壤保持量分布呈斑块状(图2),地形依赖性强。高值区集中在中北部和西北部山区,对应四川盆地盆周山区坡度较大且植被覆盖较好的区域。低值区分布在南部及东北部平原区,东北部地势平坦,土壤潜在流失量小,因此土壤保持量也较低。南部低值区则与凉山干热河谷气候、植被覆盖度偏低有关。水源涵养空间分布与降水格局相匹配,呈现出显著梯度,高值区集中在眉山市、乐山市及雅安市东部,与四川盆地西缘的华西雨屏带降雨高值区高度重合,充沛的降雨加上良好的植被覆盖,使得水源涵养量高。南部凉山地区大面积水源涵养量接近0,主要由于当地气候相对偏干,蒸发量常大于降水量,导致生态系统的水源涵养功能远低于北部。

表5　川西南2013—2023年生态系统服务量

Table 5　Ecosystem service amount in southwestern Sichuan Province from 2013 to 2023

年份	水源涵养量		土壤保持量	
	平均深度/mm	总量/10^9 m^3	均值/(t·hm^{-2}·a^{-1})	总量/10^7 t
2013	31	1.75	235	2.15
2015	75	5.05	252	2.33
2017	88	5.88	261	2.59
2019	25	1.22	195	1.84
2021	61	3.15	217	2.04
2023	76	4.14	264	2.56

2.3　农村山洪韧性与生态调节服务的耦合协调时空演变

2013—2023年川西南42个县(区)农村山洪韧性与土壤保持服务的耦合协调整体呈现出较为显著的“北高南低”空间分异特征与波动演进态势,且空间集聚效应随时间推移逐渐增强(图3)。结果显示,眉山市、乐山市及雅安市东部等平原与低山丘陵交错区,凭借较完善的水利基础设施网络与较高的植被覆盖率,其耦合协调度普遍稳定在0.6~0.8,多处于“初级协调”至“中级协调”阶段。这一结果与张雄一等[26]在长江上游流域的研究结论相吻合,即在水热条件较好的区域,生态恢复工程提升了土壤保持功能,但也可能在特定条件下引发水源涵养服务的权衡下降。然而,凉山州腹地的布拖、金阳、昭觉等县,系统的耦合协调度长期在0.3~0.5的低位,主要处于“轻

度失调”或“濒临失调”状态。这种空间格局的形成，很大程度上源于区域内复杂的山地垂直地带性差异：高海拔地区植被对土壤保持的贡献虽较为突出，但受限于经济发展水平与地形破碎化的制约，工程治理措施与社会经济条件相对滞后，导致系统整体协调度不高。从时间维度看，随着“长治工程”及高标准农田建设的推进，部分低值区呈现出向“勉强协调”过渡的趋势，但整体格局的稳态尚未被打破，高-高集聚区依然集中在北部经济相对发达且水土保持措施相对完善的区域。相比之下，农村山洪韧性与水源涵养的耦合协调关系表现出更为剧烈的空间极化现象与不均衡性。结果表明，该系统的耦合协调度极值差距显著，呈现出“两头大，中间小”的结构。以雅安全市及乐山市市中区为代表的区域，得益于充沛的降水资源与优良的森林生态系统，其水源涵养功能与山洪韧性呈现“优质协调”状态，部分年份耦合协调度突破0.9。相反，在凉山州南部的干热河谷地带及部分高寒山区，耦合协调度偏低，2023年甚至低至0.2左右，陷入“中度失调”乃至“严重失调”的困境。这一现象验证了Feng Xiaoming等[27]提出的“植被-产水权衡”假设，即在半干旱或降水季节性分布不均的区域，高强度的植被恢复可能因植物蒸腾耗水的增加而导致地表径流减少，从而在特定时段削弱水源涵养服务供给。

空间集聚图进一步揭示，水源涵养的协调高值区更加收敛，这反映出该区域在水源涵养功能的先天不足，系统内部要素难以形成合力，系统脆弱性在此维度上表现得尤为突出。

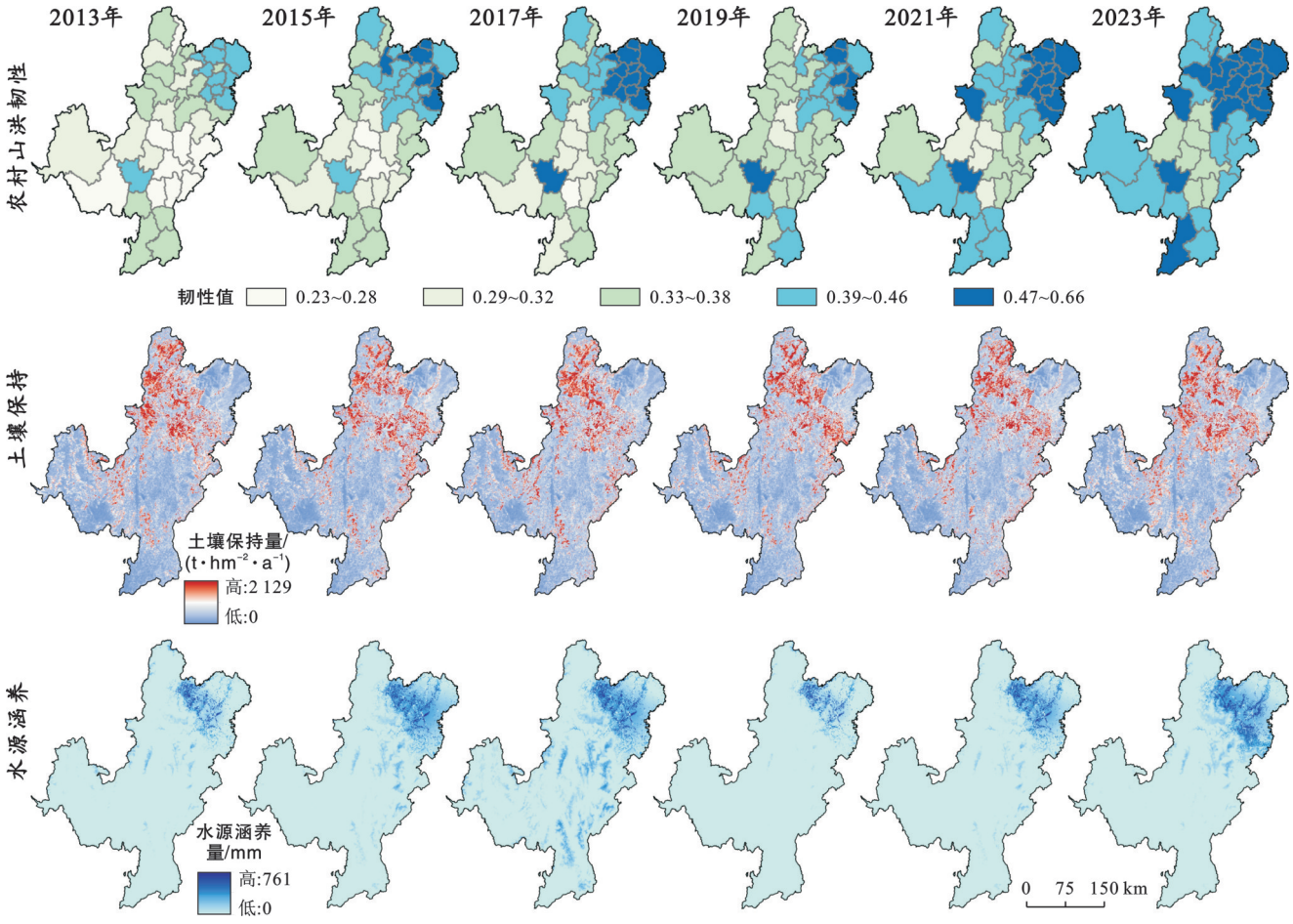


图2 川西南农村山洪韧性及生态系统服务时空分布

Fig.2 Spatiotemporal distribution of rural flash flood resilience and ecosystem services in southwestern Sichuan Province

综合对比两组耦合协调结果可知，川西南农村山洪韧性与土壤保持的协同效应，在空间覆盖的广度与稳定性方面整体优于水源涵养，水源涵养在高值区表现出更强的上限潜力。这种差异的根本原因在于生态调节服务的物理机制与人类干预的响应模式不同。土壤保持主要依赖地表植被覆盖与梯田等工程措施，与提升山洪韧性的防灾建设具有较强的同向协同效应。然而，水源涵养涉及更复杂的降水-截留-入渗过程，关于西南喀斯特地区及长江上游生态屏障的研究也指出，生态系统服务之间往往存在

此消彼长的非线性关系[10]。北部县(区)较高的经济韧性使其能够维持复杂的生态水利工程,从而在水源涵养调节上实现人工与自然的耦合;而南部欠发达地区则仍受制于自然地理的短板效应,且近年来极端气候事件频发进一步加剧了降水的不确定性。因此,未来的韧性提升策略应避免“一刀切”,针对不同服务功能的响应机制实施社会与自然相协调的解决方案。

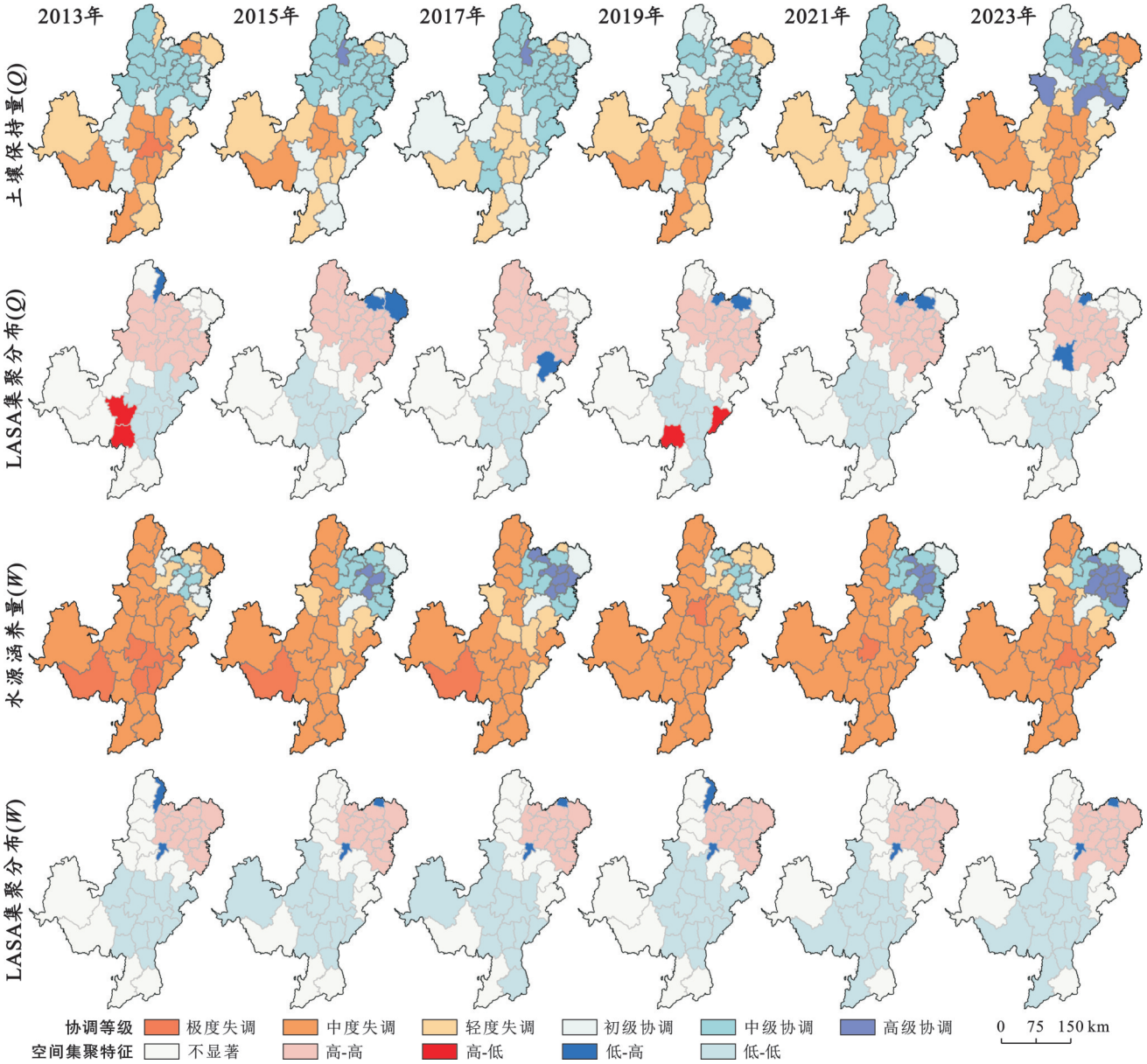


图 3　川西南单位面积生态系统服务量及耦合协调等级

Fig.3　Ecosystem service amount per unit area and coupling coordination grade in southwestern Sichuan Province

3　讨　论

川西南农村山洪韧性与生态系统服务的耦合协调关系,本质上是自然地理本底与社会经济交互作用的结果。在眉山市、乐山市及雅安市东部,平缓的地形降低了致灾压力,雄厚的经济基础保障了防洪设施与民生恢复,加之优越的水热条件支撑了高水平的生态服务,使得社会系统与生态系统形成“高投入-高产出-高协调”的良性循环。部分地区高山峡谷地形放大了山洪压力,而相对滞后的经济水平限制了社会防洪系统的完善,导致社会韧性长期处于低位;叠加干热河谷气候对水源涵养的限制,使得该区域陷入“高压力-低韧性-低服务”的低水平耦合现状。这表明,单纯依靠生态修复或单一的工程措施难以打破南部的失调困境,需寻求自然与社会的综合方案。

在凉山州等降水季节性差异大的区域,植被恢复虽然显著提升了土壤保持能力,与农村山洪韧性

形成一定协同，但高耗水植被的蒸腾作用可能在枯水期加剧土壤水分亏缺，导致径流调节能力下降，从而与依赖水源涵养的山洪削峰需求产生错位。故在川西南生态脆弱区提升山洪韧性时，不能盲目追求高植被覆盖率，而应重视“水-土-植被”的平衡。

基于耦合协调度的空间分异，建议采取分区施策：北部协调区，包括眉山市、乐山市、雅安市东部，应侧重于提质增效。利用良好的生态本底，推动生态水利工程建设，重点关注极端气候年的应急响应能力建设，防止因极端事件冲击导致协调度回落。南部失调区，主要位于凉山州多数县域，应侧重补短板与适洪恢复。社会层面，需持续加大财政转移支付，重点提升基层通讯、道路及医疗等基础韧性要素；生态层面，应摒弃高耗水树种，推广耐旱灌草与坡改梯相结合的模式，在不加剧水资源负担的前提下提升固土能力，实现从“严重失调”向“勉强协调”的逐步过渡。

研究的创新价值主要体现在摒弃以往仅从社会或生态单一维度开展防洪研究的局限，转而从系统视角切入，突破单一维度研究范式。首次揭示农村山洪韧性与生态系统调节服务耦合协调的时空动态规律，有效填补了川西南地区该领域研究的空白。与现有研究多以流域、省市等大尺度区域为分析单元不同，本文将研究尺度进一步细化至县域层面，能够更精准刻地画小尺度区域内山洪韧性与生态调节服务的相互作用特征，为基层的政策制定提供更具针对性的参考。需客观指出，本研究虽力求科学严谨，但仍存在一定局限：①数据精度对研究结果的支撑有待提高，尤其在山区，降水等气象数据本身存在精度误差，可能对生态服务量的核算结果产生影响；②受限于数据可得性，农村山洪韧性评价体系的全面性受到一定制约；③对核心作用机制与关键实现路径的探索仍需深化。

4 结 论

（1）农村山洪韧性整体提升，但空间分布非均衡性显著。研究期内，川西南农村山洪韧性均值由0.343波动上升至0.471，说明在脱贫攻坚与乡村振兴战略的推进下，农村地区应对山洪灾害的监测预警能力和应急响应能力显著增强。空间上呈现稳定的“北高南低”格局，眉山市、乐山市等经济发展水平较高区域的山洪韧性水平持续优于凉山州，反映出降水、地形压力与社会经济支撑能力的地域差异，是影响农村山洪韧性空间分异的关键因素。

（2）生态调节服务与水热格局高度匹配，具有明显的地域分异。土壤保持与水源涵养服务并未呈现单一的线性增长，受气候波动影响显著。空间分布上，雅安市华西雨屏带及盆周山区因降水充沛、植被良好，成为生态调节服务的核心高值区；而凉山州受干热河谷气候与破碎地形制约，水源涵养功能存在先天短板，土壤保持功能亦呈现破碎化特征。

（3）耦合协调关系表现出功能分异与空间极化特征。川西南农村山洪韧性与土壤保持的耦合协调水平整体优于水源涵养：前者空间覆盖度更广，大部分区域达到勉强协调及以上等级；后者则表现出剧烈的两极分化——北部多为优质协调，而南部凉山州腹地长期陷入中度失调甚至严重失调状态。这种空间格局表明，在川西南地区，通过植被恢复实现土壤保持与山洪韧性提升的协调较易达成，而水源涵养功能的提升则受到更为严苛的自然本底条件约束。

参考文献（References）

[1] Qian Cheng, Ye Yangbo, Bevacqua E, et al. Human influences on spatially compounding flooding and heatwave events in China and future increasing risks [J]. Weather and Climate Extremes, 2023,42:100616.

[2] 付潇然，王中根，祁书文，等.应急视域下山洪灾害复盘与应对过程分析：以2022年6场典型事件为例[J].水利水电技术，2024,55(11):15-25.
Fu Xiaoran, Wang Zhonggen, Qi Shuwen, et al. A summary and reflection on the six events of flash flood disasters in 2022 from an emergency management perspective [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024,55(11):15-25.

[3] McClymont K, Morrison D, Beevers L, et al. Flood resilience: A systematic review [J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2020,63(7):1151-1176.

[4] 何秉顺，马美红，李青，等.我国山洪灾害防治现状与特点探析[J].中国农村水利水电，2021(5):133-138.
He Bingshun, Ma Meihong, Li Qing, et al. Current situation and characteristics of flash flood prevention in China [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(5):133-138.

[5] Guo Xiaona, Zhu A L, Chen Ruishan, et al. Flood disaster management neglects rural areas [J]. Nature Food, 2025,6(5):413-414.

[6] 方一平，贺新军，黄学渊.“绿水青山就是金山银山”理念在西南山地人山和谐发展中的实证研究[J].中国科学院院刊，2025,40(7):1222-1234.
Fang Yiping, He Xinjun, Huang Xueyuan. Empirical study on “lucid waters and lush mountains are invaluable assets” in harmonious development of human-mountain relationship in southwest mountainous regions, China

[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025,40(7):1222-1234.

[7] 张中浩,聂甜甜,高阳,等.长江经济带生态系统服务与经济社会发展耦合协调关联时空特征研究[J].长江流域资源与环境,2022,31(5):1086-1100.
Zhang Zhonghao, Nie Tiantian, Gao Yang, et al. Study on temporal and spatial characteristics of coupling coordination correlation between ecosystem services and economic-social development in the Yangtze River economic belt [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022,31(5):1086-1100.

[8] 申梦姝,刘悦忆,郑航,等.长江流域水源涵养服务价值及其空间转移评估[J].长江科学院院报,2024,41(4):14-22.
Shen Mengshu, Liu Yueyi, Zheng Hang, et al. Evaluation of water source conservation service value and its spatial transfer in Yangtze River basin [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024,41(4):14-22.

[9] 何刘洁,郑博福,万炜,等.长江经济带生态系统服务权衡与协同及其驱动因素[J].环境科学,2024,45(6):3318-3328.
He Liujie, Zheng Bofu, Wan Wei, et al. Trade-off and synergy of ecosystem services in the Yangtze River economic belt and its driving factors [J]. Environmental Science, 2024,45(6):3318-3328.

[10] Li Yue, Luo Hongfen. Trade-off/synergistic changes in ecosystem services and geographical detection of its driving factors in typical karst areas in southern China [J]. Ecological Indicators, 2023,154:110811.

[11] 杜陈龄,白琳,姚昆.基于USLE模型的安宁河流域土壤侵蚀分析[J].测绘与空间地理信息,2024,47(4):58-61.
Du Chenling, Bai Lin, Yao Kun. Analysis of soil erosion in Anning River basin based on USLE model [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2024,47(4):58-61.

[12] Cutter S L, Ash K D, Emrich C T. Urban - rural differences in disaster resilience [J]. Annals of the American Association of Geographers, 2016,106(6):1236-1252.

[13] Yang L E, Chen Junxu, Geng Jin, et al. Social resilience and its scale effects along the historical Tea-Horse Road [J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(4):045001.

[14] Ajin R S, Costache R, Bărbulescu A, et al. Flood susceptibility assessment using multi-tier feature selection and ensemble boosting machine learning models [J]. Water, 2025,17(14):2041.

[15] Melendez A, Gutierrez Soto M. Flood resilience quantification framework of rural communities: Case study of Harlan County, Kentucky [J]. Natural Hazards Review, 2024,25(4):05024009.

[16] 田健,修天峪,曾穗平.基于生态系统防洪服务供需评估的沿海雨潮组合风险识别与韧性规划:以闽三角地区为例[J].风景园林,2025,32(6):86-95.
Tian Jian, Xiu Tianyu, Zeng Suiping. Coastal storm - surge combination risk identification and resilience planning based on supply and demand assessment of flood regulation ecosystem services: A case study of Fujian Delta [J]. Landscape Architecture, 2025,32(6):86-95.

[17] He Xinjun, Fang Yiping, Wang Baosheng, et al. Assessment of the spatial and temporal dynamics of food system resilience and its response to natural hazards [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024, 112:104781.

[18] Osei-Kyei R, Ampratwum G, Komac U, et al. Critical analysis of the emerging flood disaster resilience assessment indicators [J]. International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment, 2025, 16(3): 417-436.

[19] Poling K S. Relationship building and pre-disaster planning: effective strategies for rural resilience following the 2016 West Virginia floods [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2023.

[20] He Xinjun, Fang Yiping, Wang Baosheng, et al. Towards a verifiable, uncertainty-controlled assessment of the spatiotemporal dynamics of social vulnerability to flash floods [J]. Ecological Indicators, 2024,166:112323.

[21] Kashiwar S R, Kundu M C, Dongarwar U R. Soil erosion estimation of Bhandara region of Maharashtra, India, by integrated use of RUSLE, remote sensing, and GIS [J]. Natural Hazards, 2022,110(2):937-959.

[22] Li Jialei, He Hongbin, Zeng Qinghua, et al. A Chinese soil conservation dataset preventing soil water erosion from 1992 to 2019 [J]. Scientific Data, 2023,10:319.

[23] 姚昆,周兵,何磊,等.川西南山地区2000—2018年土壤侵蚀时空动态变化特征[J].水土保持通报,2021,41(4):224-230.
Yao Kun, Zhou Bing, He Lei, et al.Temporal and spatial dynamic changes of soil erosion in mountain area of southwest Sichuan Province during 2000—2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(4): 224-230.

[24] 嵇娟,陈军飞,丁童慧,等.长三角城市群城市洪涝韧性与生态系统服务的耦合协调关系[J].生态学报,2024,44(7):2772-2785.
Ji Juan, Chen Junfei, Ding Tonghui, et al. Coupling coordination between urban flood resilience and ecosystem services in the Yangtze River delta urban agglomerations [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(7):2772-2785.

(下转第 368 页)