DOI: 10.5846/stxb202003220642

刘延国,李景吉,逯亚峰,邹强,王勇,周吾珍,罗正宇,李怡飞.西南山区生态保护红线划定方法优化—基于生态地质环境脆弱性评估.生态学报, 2021,41(14):5825-5836.

Liu Y G, Li J J, Lu Y F, Zou Q, Wang Y, Zhou W Z, Luo Z Y, Li Y F.Optimization method of ecological redline delineation in Southwest China from the view of eco-geo environment vulnerability assessment. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14):5825-5836.

西南山区生态保护红线划定方法优化

一基于生态地质环境脆弱性评估

刘延国^{1,*},李景吉²,逯亚峰³,邹 强³,王 勇⁴,周吾珍⁴,罗正宇²,李怡飞²

1 西南科技大学国家遥感中心绵阳科技城分部,绵阳 621010

2 成都理工大学生态环境学院,成都 610059

3 中国科学院成都山地灾害与环境研究所,成都 610045

4 四川省国土科学技术研究院(四川省卫星应用技术中心),成都 610072

摘要:生态系统服务功能重要性评估及生态环境敏感性评估是划定生态保护红线的基本方法。以生态系统敏感性及服务功能 为核心的红线划定指标体系,未能准确反映山地复杂地质环境对生态环境的影响,使得生态红线划定缺乏地质—地理过程的支 撑。以地质环境与地理环境互馈为基础,构建西南山区生态地质环境脆弱性评估指标体系,以我国典型山区四川省为研究区, 通过将脆弱性格局与基本方法划定的生态保护红线叠置分析,提出了基于"生态地质环境共同体"理念的山区生态保护红线划 定优化方法。结果表明:生态保护红线与脆弱性评估格局基本一致,面积有差异;生态保护红线划定方法充分刻画生态系统保 护格局,脆弱性格局更好反映国土空间开发保护状况,山区地质与地理过程是塑造生态红线分布格局的关键影响因素,基于生 态地质环境脆弱性评估视角的2种优化方案,集中、全面反映生态系统优先保护及国土空间开发保护格局,但应合理预留人类 聚居空间及生产空间。

关键词:生态保护红线;生态地质环境;脆弱性;优化方法;四川省

Optimization method of ecological redline delineation in Southwest China from the view of eco-geo environment vulnerability assessment

LIU Yanguo^{1,*}, LI Jingji², LU Yafeng³, ZOU Qiang³, WANG Yong⁴, ZHOU Wuzhen⁴, LUO Zhengyu², LI Yifei²

1 Mianyang Science and Technology City Division, the National Remote Sensing Center of China, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

2 Institute of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

3 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610045, China

4 Institute of Land Science and Technology of Sichuan (Satellite Application Technology Center of Sichuan), Chengdu 610072, China

Abstract: Assessment of ecosystem service and ecological sensitivity are the basic methods to zone the ecological redline. However, for mountainous areas with complex geological conditions, the indicator system with ecological environment and service as the core is difficult to reflect the impact of a special geological environment, which makes the ecological redline pattern lack support of the geological and geographical process. Based on the mutual feedback of geological environment and geographical environment, this study constructed the vulnerability assessment index system of the eco-geo environment in the southwest mountainous area, Sichuan Province. The ecological redline optimization method was analyzed by superposition with the assessing the frailty, based on the concept of "eco-geo environment community". The results showed that the

收稿日期:2020-03-22; 网络出版日期:2021-05-13

基金项目:国家自然科学基金重大项目(41790432);国家自然基金青年基金项目(41701114)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liuyg@ swust.edu.cn

ecological redline and vulnerability assessment pattern was generally consistent. The vulnerable area of eco-geo environment was 189700 km², accounting for 39.1% of the research area. The total area of the ecological redline was 148000 km², accounting for 30.45% of the research area. Geological and geographical processes in mountainous areas were key factors to shape the distribution pattern of ecological redline. Two redline optimization methods based on the vulnerability assessment of the eco-geo environment, covered an area of 197600 km² and 241700 km² respectively, which was consistent with the ecological security pattern of four key ecological functional areas in the main functional divisions of Sichuan Province. The two schemes reflect the priority protection of the ecosystem and the development and protection pattern of land space, but it should reserve the living space and production space reasonably.

Key Words: ecological redline; eco-geo environment; vulnerability; optimization method; Sichuan Province

生态保护红线是指"在生态空间范围内具有特殊重要生态功能、必须强制性严格保护的区域,是保障和 维护国家生态安全的底线和生命线、通常包括具有重要水源涵养、生物多样性维护、水土保持、防风固沙、海岸 生态稳定等功能的生态功能重要区域,以及水土流失、土地沙化、石漠化、盐渍化等生态环境敏感脆弱区 域"[1]。生态保护红线的划定是我国探索构建生态安全格局的有效途径,为维护生态安全格局、保障生态服 务功能、支撑经济社会可持续发展,促进人口资源环境相均衡、经济社会生态效益相统一〔2-8〕。 生态红线划分 方法与技术经历了从概念内涵与外沿的借鉴辨析到空间结构的类型划分实践,从单一指标体系到多系统综合 指标体系的逐渐发展和完善的过程^[2-12]。早期的研究以大区域、大尺度的研究为主,邹长新等通过对国内有 红线内涵的公开政策进行归类,建立了国家尺度生态保护红线划分体系^[12]。马世发^[13]燕守广^[14]等基于省 域尺度进行了生态保护红线的划定实践。地理信息技术与生态服务评估方法的发展,构建以生态服务为核心 的指标体系逐渐成为了生态红线划定重要依据。孔令桥等探讨了以流域水文路径分析为主的流域尺度生态 保护红线划定方法[15],刘超等梳理了海岛生态保护红线概念、划定内容,提出了海岛生态保护红线划定的技 术路线[16],马琪等提出了干旱半干旱区以水资源约束为核心的榆林市域尺度的生态保护红线的划定方 法[17],迟妍妍[18]、刘会军[19]等探讨了城市群生态空间识别方法及生态保护红线的划定,以流域、市域、海岛、 城市群生态空间识别及生态保护红线的划定方法为不同尺度流域管控、保护规划和空间规划提供了重要科学 依据。侯鹏等以生态系统类型构成和服务功能为内容主线,提出了生态保护成效评估框架和指标方法,拓展 了定量评估生态保护红线对保障区域生态安全贡献度的思路^[20],徐梦佳等通过构建生态资产及其价值评估 指标体系,探讨了东营市域尺度生态保护红线区生态资产价值评估,为生态保护红线区生态补偿等相关配套 措施的开展提供了科学依据^[21]。综上,众多学者从不同尺度、基于不同对象立足生态本底及生态系统服务等 视角,对生态保护红线划定开展了系统性的理论探索与有效实践。

生态环境是地理环境与地质环境共同作用下的外在表征,生态环境脆弱、地质条件复杂、灾害频发的西南 山区,地质过程对陆地表生土壤、植被生态系统及气候都具有重要的影响和塑造作用。我国西南山区位于青 藏高原东南缘、全国主体生态功能区和自然保护区密集分布,区内地质构造活动剧烈、地质环境脆弱、地质灾 害频发,区域生态地质环境互馈联系显著^[22-25]。近年来接连发生了汶川地震、芦山地震、九寨沟地震,震后地 质环境稳定性变差,滑坡、崩塌、泥石流、堰塞湖等次生灾害隐患增多并以灾害链的形态产生,对陆地表生生态 系统格局影响显著,山区特殊地质环境条件对区域生态环境破坏风险显著高于平原地区^[26-32]。立足于生态 本底(表1),未考虑地质环境(地质本底、地质灾害)对区域生态系统格局的塑造作用,生态环境是地理环境 与地质环境共同作用下的外在表征,只考虑生态本底,将会影响生态保护红线划定区位,从而影响区域国土空 间开发保护格局及社会经济发展布局。脆弱性评估是衡量一个区域本底特征及发展程度的重要判据^[33-37], 从生态地质环境共同体的角度予以认知^[22,26],通过构建基于生态环境与地质环境脆弱性的综合评价指标体 系,刻画区域生态地质环境脆弱性格局,综合反映区域生态保护和国土空间开发格局状况,是生态保护红线划 分与优化研究中的重要参考。

四川省作为我国典型西南山区,地质灾害频发,特殊的地质环境对陆地表层生态服务过程产生着深刻的影

响^[25,30-32]。本文以四川省为例,通过构建生态地质脆弱性评估体系,深入揭示山区域脆弱性格局,提出生态保护 红线划定的优化指标和方法(表1),以期为西南山区生态国土空间开发与生态安全格局的科学构建提供参考。

Table 1 Ecological reduine and pattern of eco-geo environment					
方法 Method	目标 Target	评估内容 Assessment content	指标集 Element layer	指标 Alternative layer	
生态保护红线	作为建立国土空间开发 保护制度的重要手段,科 学构建生态安全格局的	生态系统服务功能重 要性	水源涵养、水土保持、防 风固沙、生物多样性维护	高程、温度、降水、土壤、植 被覆盖等要素及其衍生 指标	
Ecological redline	重要基础,并从根本上解 决生态环境问题的重要 途径	生态环境敏感性	水土流失、土地沙化、石 漠化、盐渍化	高程、温度、降水、土壤、植 被覆盖等要素及其衍生 指标	
生态 地 质 环 境 脆 弱 性 格局	为科学构建生态安全格 局、保障生态服务功能,	生态环境脆弱性	气象、土壤、植被	温度、降水、土壤、植被覆 盖、生物多样性等	
Pattern of eco-geo environment	国土空间开发保护格局提供参考	地质环境脆弱性	地质构造、岩体结构、地 形地貌、地质灾害	断裂带、地震烈度、工程岩 组、高程、坡度、起伏度、灾 害核密度	

表 1 生态保护红线与生态地质环境脆弱性格局

1 研究区概况

四川省位于中国大陆地势三大阶梯中的第一级青藏高原和第二级长江中下游平原的过渡地带,界于 97°21′—108°12′E,26°03′—34°19′N之间,面积48.60万km²,地势西高东低,地形复杂多样,西部为高原、山 地,东部为丘陵、平原盆地,最大高差达7000余m(图1)。四川省是我国地震和地质灾害高发区,分布着龙门



http://www.ecologica.cn

山地震带、金沙江地震带、鲜水河地震带、安宁河-则木河地震带、松潘-较场地震带、理塘地震带等;区内地质构造强烈、地质环境脆弱,生态系统受区域地质活动破坏强烈^[26-32],尤其在汶川地震、九寨沟地震后,次生灾害隐患增多,崩塌、滑坡、泥石流等灾害接近三万余处,对人类生产活动、区域经济发展和生态环境保护造成了极大威胁。

本研究以四川省生态红线划定为例,充分结合西南山区特殊地质环境背景,提出山区生态地质环境脆弱 性评价指标体系,以期优化现阶段红线划定方法,充分体现西南山区本底特征,为国土空间开发保护格局提供 支撑。

2 研究方法与数据来源

2.1 指标体系构建

恰当、合理且具有代表性的脆弱性指标体系是客观反映脆弱性水平的关键,基于生态地质环境概念内涵 及脆弱性研究进展^[33-37],针对高海拔山区环境、地层岩性及灾害隐患等区域特征,构建基于生态环境及地质 环境脆弱性两方面 12 个指标的评价体系(表 2)。其中,地质环境主要包括地质构造因素、岩体结构因素、地 形地貌因素、地质灾害因素,生态环境主要包括气象因素、土壤资源因素、植被质量因素。

		system of eeo geo entries	intente vanierasinej	
目标 Target layer	指标集 Element layer	指标集分解 Criterion layer	指标 Alternative layer	数据源格式 Data source format
生态地质环境脆弱性评估	地质本底	地质构造因素	断裂带密度	矢量-断裂带
Vulnerability assessment of			地震烈度	矢量
eco geological environment		岩体结构因素	工程地质岩组	矢量
		地形地貌因素	高程	栅格
			坡度	栅格
			地形起伏度	栅格
		地质灾害因素	灾害点密度	文本-栅格
	生态本底	气象因素	年均降水	文本-栅格
			年均气温	文本-栅格
		土地(壤)因素	土壤可蚀性	矢量
		植被(环境)因素	生物多样性	矢量
			植被覆盖度	栅格

表 2 生态地质环境脆弱性评估指标体系 Table 2 Assessment index system of eco-geo environment vulnerability

2.2 数据源与预处理

本研究数据来源主要有:1)基础地理数据:地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)DEM 数字高程数据,中国地质调查局1:20万地质图(中国地质调查局1:20万数字地质图空间数据库),南京土壤所1:100万中国土壤数据库,中国地震烈度区划图(GB18306—2015);2)地质灾害隐患点数据库及 Google earth 灾害点遥感解译;3)气象数据:四川省气象数据库(1960—2016);4)归一化植被指数 NDVI: MODIS/MYD13Q1 分辨率 250m,时间分辨率为16 d,选取时间为2016 年 8 月。为消除异常值的影响,采用最大合成法(maximum value composites)合成月 NDVI 数据,计算植被覆盖度;5)土地变更调查数据库:四川省第二次全国土地调查—2017 年变更调查数据库,作为主要的解译标志库,获取生态系统本底数据。

所有数据均转换为空间分辨率 90m 栅格数据,统一投影到 2000 国家大地坐标系(CGCS2000)。其中,矢 量面数据借助 Arc Toolbox-Conversion tool-Feature to Raster 实现矢量转换栅格,主要为地震动加速度、工程地 质岩组、土壤类型、土地利用类型等,矢量线状数据借助 Spatial analysis tool-Density-Line Density 功能求取线密 度,主要有断裂带密度、沟壑密度;矢量点状数据借助 Spatial analysis tool-Density-Kernel Density 求取点密度, 主要有灾害点密度。年均降水、年均气温均采用反距离加权插值法(IDW)实现其空间化。所有指标量化分 级后均借助 Overlay-Fuzzy Membership 进行归一化处理(表 3,图 2), 脆弱性评价基于归一化指标借助 ArcGIS 叠置分析功能实现。

生态地质环境脆弱性评估基于"多系统"评价指标体系,从各子系统的脆弱性出发,分析各子系统的相互 作用及发展状况,综合分析地区脆弱性格局。

Table 3 Quantification and classification of eco-geo environment vulnerability index							
目标	指标集	指标	量化与分级		权重		
Target layer	Element layer	Alternative layer	Quantification and classification	ht			
生态地质环境脆弱性	地质本底脆弱性	断裂带密度/km/km ²)	Line Density,自然断点法 5 级	0.23	0.17		
Vulnerability of eco		地震烈度	Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ,5级	0.22			
geological environment		工程地质岩组	松散堆积体、软质岩组、软硬互层、硬质岩 组,4级	0.28			
		高程/m	DEM,自然断点法分5级	0.40			
		坡度/°	<6,6—15,15—20,20—25,25—35,35—45, >45,7 级	0.25			
		地形起伏度/m	起伏度 RFi,自然断点法 5 级	0.06			
		灾害核密度/个/km ²	Kernel Density,自然断点法5级	0.11			
	生态本底脆弱性	年均降水/mm	IDW 插值,自然断点法5级	0.15	0.20		
		年均气温/℃	IDW 插值,自然断点法5级	0.18			
		土壤可蚀性	黄壤、水稻土、黄棕壤、暗棕壤、棕壤、褐土、 紫色土、石灰岩土、粗骨土、沼泽土、泥炭土、 草甸土、黑毡土、寒钙土至永久冰雪带,赋 值法	0.29			
		生物多样性	阔叶林、针阔混交林、针叶林、灌丛灌木林、 栽培植被、草甸、草原、高山稀疏植被,赋值 法分7级	0.28			
		植被覆盖度/%	NDVI,覆盖度计算 VFC,自然断点法 5 级	0.13			

表 3 生态地质环境脆弱性指标量化与分级

自然断点法是一种根据数值统计分布规律分级和分类的统计方法,使类与类之间的不同最大化。统计数列都存在一些自然转折点、特征 点,用这些点可以把研究的对象分成性质相似的群组,断点本身就是分级的良好界限。地形起伏度:*RF_i* = *H*_{max}-*H*_{min},*H*_{max},*H*_{min}分别为 3×3 窗口 内的最大和最小高程值。生物多样性性:该研究主要指植被类型多样性。土壤可蚀性:该研究主要指土壤对环境的敏感性及易侵蚀流失程度。 植被覆盖度:VFC=(NDVI-NDVIsoil)/(NDVIveg-NDVIsoil),NDVIsoil 为裸土或无植被覆盖区域像元的 NDVI 值,NDVIveg 则代表完全被植被所 覆盖 NDVI 值,即纯植被像元的 NDVI 值,取 NDVI 值的累积概率 5%和 95%作为 NDVI 值作为 NDVIsoil 和 NDVIveg。地质本底及生态本底分别为 指标归一化加权叠置计算,借助 Arc Toolbox-spatial analyst tools-Raster Calculator 工具加权叠加

2.3 评价方法

为消除多因子不同量纲的影响,首先将预处理的具有统一坐标系及像元大小的评价指标数据进行标准 化^[38],指标分为成本型 yⁿ_{ij},(越小越好型)和效益型 yⁿ_{ij},(越大越好型),断裂带密度、地震烈度、坡度、灾害点 密度、土壤可蚀性等作为成本型指标,工程地质岩组按松散堆积体、软质岩组、软硬互层岩组以及硬质岩组分 级赋值后,作为成本性指标;年降水量、年均气温、植被覆盖度、生物多样性作为效益型指标。

$$y_{ij}^{p} = (X_{ij} - \min x_{j}) / (\max x_{j} - \min x_{j})$$
(1)

$$y_{ii}^{n} = (\max x_{i} - X_{ii}) / (\max x_{i} - \min x_{i})$$
(2)

式中:minx;和 maxx; 表示第 j个指标下各评价样本的最小值和最大值。

通过 Raster Calculator 计算脆弱性指数 V,公式如下:

$$V = \sum_{j=1}^{n} w_j \times R_j \tag{3}$$

式中,V指综合脆弱性指数值,W指要素权重,R指要素栅格数据,j评价指标。指标权重由突变级数法确定, 脆弱性分级按照距标准差倍数划分^[38]。生态地质环境脆弱性评估分区(表4)为生态本底脆弱性与地质本底 脆弱性归一化加权计算,指标权重见表3。



3 结果与分析

3.1 生态地质环境脆弱分区

基于生态本底脆弱性指数及地质本底脆弱性指数,计算生态地质环境脆弱性评估指数,并根据距标准差 倍数对计算结果进行5级分级,微度脆弱区、轻度脆弱区、中度脆弱区、高度脆弱区和极高脆弱区(图3,表5)。 其中,生态环境极高脆弱区、地质本底极高脆弱区、生态地质环境极高脆弱区面积分别为11.60万km²、8.60万km²、10.48万km²,分别占国土面积比例为23.90%、17.71%及21.61%,极高脆弱区的评价面积有差异,但分布区域基本一致,主要分布在四川西北部高山高原区,川南山地及丘陵区,整体格局特征以水系、山系为骨架集中成片分布。

Table 4 Division of eco-geo environment vulnerability					
脆弱性分区	距标准差倍数	生态地质环境特征			
Vulnerability grade	Multiple of standard deviation	Characterization			
微度脆弱区 Slightly vulnerability	<-1.50	生态系统处于健康、稳定、平衡状态,适合人类进行合理的资源开 发和利用活动,地质条件稳定			
轻度脆弱区 Mid vulnerability	-1.50— -0.50	生态系统抗干扰和自我恢复能力强,无明显生态问题,但存在一 定潜在可能性,地质条件稳定			
中度脆弱区 Moderate vulnerability	-0.50 - 0.50	生态系统敏感程度较低,在干扰下容易发生生态问题,生态系统 具有较好的自我恢复能力,远离断层线			
高度脆弱区 Severe vulnerability	0.50 - 1.50	生态系统抗干扰能力较弱,自我恢复能力较小,潜在生态问题可 能性较大,潜在地质灾害高危险区			
极高脆弱区 Extreme vulnerability	>1.50	生态系统敏感性高,外界影响下不易恢复,自我恢复能力微小,潜 在的地质灾害高危险区			

表 4 生态地质环境脆弱性分级

四川省生态保护红线(按指南划定)总面积 14.80 万 km²,占国土面积的 30.45%,主要分布于川西高山高 原、川西南山地和盆周山地。涵盖大巴山、金沙江下游干热河谷、川东南山地以及盆中丘陵区,若尔盖湿地、雅 砻江源、大渡河源以及大雪山、岷山、邛崃山等,与脆弱性格局基本一致,面积有差异。

3.2 生态保护红线分布与脆弱性格局关系

生态系统服务功能划分为一般重要、重要和极重要3个等级,生态敏感性划分为一般敏感、敏感和极敏感 3个等级,将极重要和极敏感纳入生态保护红线,通过脆弱性评估分级结果与现行方法划定的生态保护红线 进行叠置分析(图4,表5)。将极高脆弱区和高度脆弱区作为国土空间开发保护中的优先区域,生态地质环 境脆弱区占比为18.97万km²,占比39.10%。红线内的高度脆弱区面积9.60万km²,仍有近9.40万km²的高 度脆弱区未纳入红线,未纳入区域均分布在川西北高海拔山地区域,与地震烈度、断裂带、灾害分布及生态系 统脆弱区域基本一致。

表 5 脆弱性分级统计								
Table 5 Vulnerability classification and area statistics								
脆弱性分级 Vulnerability classification	生态本底环境脆弱性 地质本底环境脆弱性 Vulnerability of Vulnerability of geological environment		5境脆弱性 pility of nvironment	生态地质环境脆弱性 Vulnerability of eco-geo environment		红线内的生态 地质脆弱性分区 Classification of eco-geological vulnerability within the redline		
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
微度脆弱区 Slightly vulnerability	66496.53	13.70	95665.47	19.69	75437.55	15.55	3091.84	4.10
轻度脆弱区 Mid vulnerability	119667.30	24.65	66205.24	13.63	119595.61	24.65	14218.31	11.89
中度脆弱区 Moderate vulnerability	110975.40	22.86	97124.35	19.99	100396.78	20.69	33080.88	32.95
高度脆弱区 Severe vulnerability	72232.73	14.88	140760.00	28.98	84887.59	17.50	40796.30	48.06
极高脆弱区 Extreme vulnerability	115996.70	23.90	86035.84	17.71	104832.78	21.61	55212.66	52.67

3.3 基于脆弱性评估法的生态保护红线划定

充分考虑山区地质本底特征,采用脆弱性评估法,将按指南方法划定的生态红线与区域生态地质环境脆



Fig.3 Patterns of vulnerability and ecological redline

弱性评估划定进行叠置分析(图5),提出四川省红线划定的两种调整方案。

1)叠加生态地质环境脆弱性评估极高脆弱区,面积为19.76万km²,占国土面积的比例40.66%,新增红线 4.96万km²,该方案划定的分布格局与区域脆弱性研究结果趋势一致^[41-44],该方案划定范围与四川省主体功 能区划中以若尔盖草原湿地、川滇森林及生物多样性、秦巴生物多样性、大小凉山水土保持和生物多样性生态 功能区等四类重点生态功能区为主体的生态安全格局相一致,集中反映生态系统优先保护格局及国土空间开 发保护格局。

2) 叠加生态地质环境脆弱性评估高度脆弱区和极高脆弱区,面积为 24.17 万 km²,占国土面积的比例 49.73%,新增红线 9.37 万 km²,格局与西南地区生态重要性及生态安全格局^[39-40]及脆弱性区划格局研究^[45-46] 趋势一致,基本涵盖四川省重点生态功能区,全面反映生态系统优先保护格局及国土空间开发保护格局,与四 川省主体功能区划相一致。

4 结论与讨论

4.1 结论

生态保护红线是国家和区域生态安全的底线,对于维护生态安全格局、保障生态服务功能、支撑经济社会





图 4 脆弱性评估结果与生态保护红线叠加 Fig.4 Superposition of vulnerability assessment results and ecological redline

100 km

中度脆弱区

重度脆弱区

极高脆弱区

微度脆弱区

轻度脆弱区

1)以四川省为例,通过构建生态地质环境脆弱性评估指标体系,通过脆弱性评估,划分微度脆弱区、轻度 脆弱区、中度脆弱区、高度脆弱区及极高脆弱区,分别占国土面积的15.55%、24.65%、20.69%、17.50%、 21.61%,高度脆弱区与极高脆弱区分布格局与生态保护红线分布格局一致;参照中重要性与敏感性评估三级 划分方法,以高度脆弱区及极高脆弱区作为国土空间开发保护格局,脆弱区面积为18.97万km²,占国土面积 的39.10%,比基本方法划定的14.80万km²红线多4.17万km²。生态地质环境脆弱区的划定将地质本底为表 征的地球内动力特征与地表过程进行综合,充分反映西南山地特殊区域地质不稳定性及地质灾害对地表的塑 造作用。2)基于生态地质环境脆弱性评估提出生态保护红线的优化方案,方法为红线划定与脆弱性评估叠 置分析。①叠加生态地质环境脆弱性评估极高脆弱区,面积为19.76万km²,占国土面积的比例40.66%,新增 红线4.96万km²,集中反映生态系统优先保护格局及国土空间开发保护格局。②叠加生态地质环境脆弱性评 估高度脆弱区,面积为24.17万km²,占国土面积的比例49.73%,新增红线9.37万km²,全面反映生态系统优 先保护格局及国土空间开发保护格局。方案与学者对区域生态重要性及生态安全格局的划分趋势基本一 致^[41-46],与四川省主体功能区划中以若尔盖草原湿地、川滇森林及生物多样性、秦巴生物多样性、大小凉山水



图 5 生态保护红线优化方案 Fig.5 Optimization method of ecological redline delineation

土保持和生物多样性生态功能区等四类重点生态功能区为主体的生态格局相一致。山区地质与地理过程是 塑造生态红线分布格局关键影响因素,特别是高海拔且地质本底环境脆弱区,不仅需要充分考虑地震、泥石流 等灾害对地表格局的塑造作用,同时兼顾其对高海拔区域的人类聚居空间及生产空间的影响,并预留空间。 4.2 讨论

以生态本底及生态系统服务为核心的生态保护红线划定方法,难以体现特殊地质环境的影响,将会影响 生态保护红线划定区位及面积的大小,难以充分体现区域生态安全及国土空间开发格局状况。"地质环境是 生态环境的载体,生态环境是地质环境的屏障"是黄润秋对生态地质环境共同体的早期认知^[22],傅伯杰 等^[47-48]学者对地理-生态过程的研究、"格局影响过程,过程改变格局"的综合论述,和以地貌为基础的综合交 叉研究体系^[49-54],深刻反映了生态地质环境共同体的特征,为山地生态保护红线划定指标体系构建提供理论 基础。本文从生态地质环境脆弱性角度对划定的生态保护红线进行优化。生态环境脆弱性角度,参考文献选 取温度、降水、土壤、植被覆盖、生物多样性等5个指标,评估结果与区域的脆弱性研究结果趋向一致^[55-61],地 质环境脆弱性角度构建断裂带、地震烈度、工程岩组、高程、坡度、起伏度、灾害核密度等7个指标,评估结果与 区域地质、地质灾害易发性等地质环境脆弱性结果基本一致^[62-67];从综合评估结果来看,脆弱性格局与区域 研究结果趋势基本一致^[39-46]。当前划定的四川省生态保护红线主要分布于川西高山高原、川西南山地和盆 周山地,涵盖大雪山、岷山、邛崃山、龙门山等山地生态系统,川东南山地以及盆中丘陵区的重要林地、草地等 生态系统类型,以及若尔盖湿地、雅砻江源、大渡河源等高海拔湿地生态系统。通过脆弱性评估法的生态保护 红线划定结果基本与四川省主体功能区划中划定的重点生态功能区为主体的生态格局相一致。 地形坡度起伏度大、断裂带及潜在地质灾害密度较大、地质条件复杂的西南山区,生态保护红线方案的确定,应考虑地质本底与生态本底的融合。作为地形上的隆起区-西南山区具有特殊的生态安全格局及重要作用^[39-40],和经济上的低谷区的现状,红线的划定也应同时兼顾区域发展空间布局^[17],深入统筹区域发展和环境保护关系,持续优化生态保护红线划定方案并指导红线勘界定标工作,促进生态保护红线落地实施,发挥其对经济社会可持续发展的支撑作用。

参考文献(References):

- [1] 环境保护部办公厅,发展改革委办公厅.关于印发《生态保护红线划定指南》的通知[2019-03-20].http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/ bgt/201707/t20170728_418679.htm.
- [2] 郑华,欧阳志云. 生态红线的实践与思考. 中国科学院院刊, 2014, 29(4): 457-461, 448-448.
- [3] 邹长新,徐梦佳,林乃峰,徐德琳. 生态保护红线的内涵辨析与统筹推进建议. 环境保护, 2015, 43(24): 54-57.
- [4] 高吉喜. 划定生态保护红线, 推进长江经济带大保护. 环境保护, 2016, 44(15): 21-24.
- [5] 林勇, 樊景凤, 温泉, 刘述锡, 李滨勇. 生态红线划分的理论和技术. 生态学报, 2016, 36(5): 1244-1252.
- [6] 高吉喜, 鞠昌华, 邹长新. 构建严格的生态保护红线管控制度体系. 中国环境管理, 2017, 9(1): 14-17.
- [7] 彭建,赵会娟,刘焱序,吴健生.区域生态安全格局构建研究进展与展望.地理研究,2017,36(3):407-419.
- [8] 侯鹏,杨旻,翟俊,刘晓曼,万华伟,李静,蔡明勇,刘慧明.论自然保护地与国家生态安全格局构建.地理研究,2017,36(3):420-428.
- [9] Jongman R H G, Külvik M, Kristiansen I. European ecological networks and greenways. Landscape and Urban Planning, 2004, 68 (2/3): 305-319.
- [10] Ignatieva M, Stewart G H, Meurk C. Planning and design of ecological networks in urban areas. Landscape and Ecological Engineering, 2011, 7 (1): 17-25.
- [11] Kati V, Hovardas T, Dieterich M, Ibisch P L, Mihok B, Selva N. The challenge of implementing the European network of protected areas Natura 2000. Conservation Biology, 2015, 29(1): 260-270.
- [12] 邹长新, 王丽霞, 刘军会. 论生态保护红线的类型划分与管控. 生物多样性, 2015, 23(6): 716-724.
- [13] 马世发,马梅,蔡玉梅,念沛豪.省级尺度国土空间生态保护红线划定——以湖南省为例.热带地理,2015,35(1):43-50.
- [14] 燕守广,林乃峰,沈渭寿.江苏省生态红线区域划分与保护.生态与农村环境学报,2014,30(3):294-299.
- [15] 孔令桥, 王雅晴, 郑华, 肖燚, 徐卫华, 张路, 肖洋, 欧阳志云. 流域生态空间与生态保护红线规划方法——以长江流域为例. 生态学报, 2019, 39(3): 835-843.
- [16] 刘超,崔旺来,朱正涛,叶芳,俞仙炯.海岛生态保护红线划定技术方法.生态学报,2018,38(23):8564-8573.
- [17] 马琪,刘康,刘文宗,李婷.干旱半干旱区生态保护红线划分研究——以"多规合一"试点榆林市为例.地理研究,2018,37(1): 158-170.
- [18] 迟妍妍, 许开鹏, 王晶晶, 张丽苹. 京津冀地区生态空间识别研究. 生态学报, 2018, 38(23): 8555-8563.
- [19] 刘军会,马苏,高吉喜,邹长新,王晶晶,刘志强,王丽霞.区域尺度生态保护红线划定——以京津冀地区为例.中国环境科学,2018, 38(7):2652-2657.
- [20] 侯鹏, 王桥, 杨旻, 李静, 翟俊, 蔡明勇. 生态保护红线成效评估框架与指标方法. 地理研究, 2018, 37(10): 1927-1937.
- [21] 徐梦佳, 王燕, 邹长新. 生态保护红线区生态资产价值评估. 生态与农村环境学报, 2018, 34(6): 528-534.
- [22] 黄润秋. 生态环境地质的基本特点与技术支撑. 中国地质, 2001, 28(11): 20-24.
- [23] 黄润秋,向喜琼. GIS 技术在生态环境地质评价中的应用. 地质通报, 2002, 21(2): 98-101.
- [24] 陈梦熊. 论生态地质环境系统与综合性生态环境地质调查. 水文地质工程地质, 1999, 26(3): 3-6, 12-12.
- [25] 周爱国,孙自永,马瑞.干旱区地质生态学导论.北京:中国环境科学出版社,2007:3-11.
- [26] 黄润秋,李为乐. "5.12" 汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究. 岩石力学与工程学报, 2009, 27(12): 2585-2592.
- [27] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454.
- [28] 崔鹏. 长江上游及西南诸河泥石流滑坡及其减灾对策. 中国水土保持, 2008, (12): 31-34.
- [29] 崔鹏,苏凤环,邹强,陈宁生,张镱锂.青藏高原山地灾害和气象灾害风险评估与减灾对策.科学通报,2015,60(32):3067-3077.
- [30] Bordoni M, Meisina C, Valentino R, Lu N, Bittelli M, Chersich S. Hydrological factors affecting rainfall-induced shallow landslides: from the field monitoring to a simplified slope stability analysis. Engineering Geology, 2015, 193: 19-37.
- [31] Guo X J, Cui P, Marchi L, Ge Y G. Characteristics of rainfall responsible for debris flows in Wenchuan Earthquake area. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(17): 596.

http://www.ecologica.cn

- [32] Fan X M, Scaringi G, Korup O, West A J, van Westen C J, Tanyas H, Hovius N, Hales T C, Jibson R W, Allstadt K E, Zhang L M, Evans S G, Xu C, Li G, Pei X J, Xu Q, Huang R Q. Earthquake-induced chains of geologic hazards: patterns, mechanisms, and impacts. Reviews of Geophysics, 2019, 57(2): 421-503.
- [33] 李鹤, 张平宇, 程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法. 地理科学进展, 2008, 27(2): 18-25.
- [34] 徐广才,康慕谊,贺丽娜,李亚飞,陈雅如. 生态脆弱性及其研究进展. 生态学报, 2009, 29(5): 2578-2588.
- [35] 陈萍, 陈晓玲. 全球环境变化下人-环境耦合系统的脆弱性研究综述. 地理科学进展, 2010, 29(4): 454-462.
- [36] 张学玲, 余文波, 蔡海生, 郭晓敏. 区域生态环境脆弱性评价方法研究综述. 生态学报, 2018, 38(16): 5970-5981.
- [37] 杨飞,马超,方华军. 脆弱性研究进展:从理论研究到综合实践. 生态学报, 2019, 39(2): 441-453.
- [38] 高江波, 侯文娟, 赵东升, 吴绍洪. 基于遥感数据的西藏高原自然生态系统脆弱性评估. 地理科学, 2016, 36(4): 580-587.
- [39] 刘国华.西南生态安全格局形成机制及演变机理.生态学报, 2016, 36(22): 7088-7091.
- [40] 林子雁,肖燚,史雪威,饶恩明,张平,王莉雁.西南地区生态重要性格局研究.生态学报,2018,38(24):8667-8675.
- [41] 何娟, 徐明德. 基于 GIS 技术的生态环境脆弱性模糊综合评价. 四川环境, 2011, 30(1): 56-60.
- [42] 肖欢. 基于 ANN 模型的四川省生态环境脆弱性评价研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [43] 孙洋, 卢毅, 熊先明, 吴敏. 四川省 21 市州城市自然灾害脆弱性评估研究. 自然灾害学报, 2017, 26(4): 116-124.
- [44] 姚昆,余琳,刘光辉,刘汉湖. 基于 SRP 模型的四川省生态环境脆弱性评价. 物探化探计算技术, 2017, 39(2): 291-295.
- [45] 侯文娟,高江波,彭韬,吴绍洪,戴尔阜.结构—功能—生境框架下的西南喀斯特生态系统脆弱性研究进展.地理科学进展,2016,35 (3):320-330.
- [46] 刘希林, 庙成, 田春山. 区域滑坡和泥石流灾害两种危险性评价方法的比较分析. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(1): 71-78.
- [47] 傅伯杰, 赵文武, 陈利顶. 地理-生态过程研究的进展与展望. 地理学报, 2006, 61(11): 1123-1131.
- [48] 傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法:格局与过程耦合. 地理学报, 2014, 69(8): 1052-1059.
- [49] 许炯心,李炳元,杨小平,周力平,师长兴,高抒,郑祥民,熊康宁,朱秉启,汪亚平,周立旻.中国地貌与第四纪研究的近今进展与未 来展望.地理学报,2009,64(11):1375-1393.
- [50] 师长兴,许炯心,蔡强国,景可,李炳元,房金福,齐德利,王随继,闫云霞.地貌过程研究回顾与展望.地理研究,2010,29(9): 1546-1560.
- [51] 杨顺虎, 付碧宏, 时丕龙. 东昆仑活动断裂带秀沟盆地段晚第四纪构造变形与地貌特征研究. 第四纪研究, 2012, 32(5): 921-930.
- [52] 林畅松,夏庆龙,施和生,周心怀.地貌演化、源一汇过程与盆地分析.地学前缘,2015,22(1):9-20.
- [53] 黄建军. 生态环境与地质构造的耦合关系研究. 地球环境学报, 2015, 6(4): 231-237.
- [54] 程维明,周成虎,申元村,刘樯漪.中国近40年来地貌学研究的回顾与展望.地理学报,2017,72(5):755-775.
- [55] 摆万奇, 阎建忠, 张镱锂. 大渡河上游地区土地利用/土地覆被变化与驱动力分析. 地理科学进展, 2004, 23(1): 71-78.
- [56] 阎建忠, 张镱锂, 朱会义, 摆万奇, 郑度. 大渡河上游不同地带居民对环境退化的响应. 地理学报, 2006, 61(2): 146-156.
- [57] 王振华,马海州,周笃珺,沙占江.南水北调雅砻江工程区自然环境评价.长江流域资源与环境,2007,16(5):650-654.
- [58] 韩杰, 沈泽昊, 石松林, 彭培好. 雅砻江和大渡河干旱河谷植被物种多样性比较: 气候、地形与空间的影响. 生物多样性, 2016, 24(4): 421-430.
- [59] 蔡凡隆, 张军, 胡开波. 四川干旱河谷的分布与面积调查. 四川林业科技, 2009, 30(4): 82-85.
- [60] 沈泽昊. 中国西南干旱河谷的植物多样性: 区系和群落结构的空间分异与成因. 生物多样性, 2016, 24(4): 363-366.
- [61] 陈金月, 王石英. 岷江上游生态环境脆弱性评价. 长江流域资源与环境, 2017, 26(3): 471-479.
- [62] 常晓军,魏伦武,王德伟.雅砻江流域地质灾害分布特征及其影响因素分析.灾害学,2009,24(3):83-88.
- [63] 金辉. 西南地区河谷深厚覆盖层基本特征及成因机理研究[D]. 成都:成都理工大学, 2008.
- [64] 许强,张一凡,陈伟.西南山区城镇地质灾害易损性评价方法——以四川省丹巴县城为例.地质通报,2010,29(5):729-738.
- [65] 唐川,马国超.基于地貌单元的小区域地质灾害易发性分区方法研究.地理科学,2015,35(1):91-98.
- [66] 巴仁基,王丽,郑万模,李宗亮,李明辉,刘宇杰,倪化勇,徐如阁.大渡河流域地质灾害特征与分布规律.成都理工大学学报:自然科学版,2011,38(5):529-537.
- [67] 李海龙,张岳桥,乔彦松,朱府升,李建华.青藏高原东缘大渡河中游深切河谷沉积物及其地震地质意义.地质通报,2015,34(1): 104-112.