

DOI: 10.5846/stxb201805241139

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): - .

Lin Z Y, Xiao Y, Shi X W, Rao E M, Zhang P, Wang L Y. Assessment of the ecological importance patterns in southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): - .

西南地区生态重要性格局研究

林子雁^{1,2}, 肖 燚^{1,*}, 史雪威^{1,2}, 饶恩明³, 张 平^{1,4}, 王莉雁^{1,2}

1 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049

3 四川师范大学 地理与资源科学学院, 成都 610101

4 西安工程大学 环境与化学工程学院, 西安 710048

摘要:生态保护重要性是表征区域生态系统结构和功能重要性程度的综合指标。在明确西南地区自然环境特征和关键生态问题的基础上, 综合分析生态敏感性和生态服务功能重要性, 构建西南生态重要性评估指标体系, 并运用 GIS 技术识别具有重要保护意义的地区, 为优化生态保护策略、划定生态红线和主体功能区划提供技术支持。研究表明: 西南地区生态保护极重要区为 75.7 万 km², 主要分布于雅鲁藏布江流域、横断山区、川西高原等地区。该区占西南地区总面积的 32.5%, 提供了 59.4% 的土壤保持总量和 54.5% 的水源涵养总量, 保护了 69.7% 的重要物种。研究建议, 划定极重要区为生态红线进行强制性严格保护, 以保障和维护生态安全, 促进西南地区可持续发展。

关键词:生态重要性评估; 生态系统服务; 生态敏感性; 西南地区

Assessment of the ecological importance patterns in southwest China

LIN Ziyang^{1,2}, XIAO Yi^{1,*}, SHI Xuewei^{1,2}, RAO Enming³, ZHANG Ping^{1,4}, WANG Liyan^{1,2}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 The Faculty Geography Resources Sciences, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China

4 School of Environmental and Chemical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China

Abstract: The importance of ecological conservation is a comprehensive index representing the importance of ecosystem structure and ecosystem services. Based on the analysis of natural environmental characteristics and the key ecological problems in southwest China, this study constructed an index system of ecological conservation importance by a comprehensive consideration of ecological sensitivity and ecosystem service, as well as the application of a GIS platform. In addition, the article also discussed spatial distribution features and their significance. The results showed that the area of extreme importance is 757,200 km². It is mainly distributed in the Yarlung Tsangpo river basin, Hengduan Mountainous, and Western Sichuan Plateau. The area accounts for 32.5% of the southwest area, providing 59.4% of the soil conservation, 54.5% of the water retention, and 69.7% of the attentive protected species. The results suggest that the extremely important areas act as an ecological protection redline and should be strictly protected to maintain ecological security and promote sustainable development in southwest China.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0502102)

收稿日期: 2018-05-24; 修订日期: 2018-11-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaoyi@cees.ac.cn

Key Words: ecological conservation importance; ecosystem services; ecological sensitivity; southwest China

伴随着工业化和城镇化的快速发展,人类对自然资源的不合理利用和开发导致了区域关键生态过程紊乱和生态完整性破坏,区域和全球性的生态危机日益显现,自然生态系统服务功能正在迅速衰退^[1]。因此,协调人与自然的关系、加强生态保护十分重要和迫切。而生态保护重要性是表征区域生态系统结构和功能重要性程度的综合指标,通过生态重要性评估研究能够明确生态保护重要性格局,从而推进生态保护建设、自然资源有序开发和产业合理布局,促使经济与生态保护的协调、健康发展。目前,国内单独研究生态保护重要性的文献较少,大多局限于生态敏感性或生态服务功能重要性一部分的评价而少有再进一步综合研究;国外则多采用保护地体系,虽可借鉴但仍与国内研究存在差异^[2-4]。随着《全国主体功能区规划》^[5]和《生态保护红线划定指南》^[6]的相继颁布,越来越多的科研人员和政府机构以生态保护重要性评价为基础开展相关研究与实践^[7-10],但由于评价指标体系不够完善,研究区也通常为某一省市或流域等局部地区,故出现了一些区划在空间设计上交叉重叠、布局不够合理和生态保护效率低等问题,而在大尺度区域上又仍缺乏生态保护重要性的有效考量^[11]。因此,生态保护重要性评估的深入探讨具有特殊意义。

西南研究区位于我国西南腹地,是我国重要的对外发展门户,也是“一带一路”战略中具有重要和独特区位优势的地区。近年来,西南地区经济发展迅速、对外开放加快,四川、重庆和贵州的经济增速已远远超过全国平均水平。但同时,西南地区面临着植被破坏、泥石流等地质灾害、土地退化、石漠化、耕地污染等等生态问题,如任其恶化势必威胁到该地区乃至国家的发展与稳定。因此,对西南地区进行生态保护重要性评估研究意义重大。

本文在地理信息系统(GIS, Geographic Information System)技术支撑下,综合西南地区水土流失、石漠化和地质灾害等典型生态问题进行生态敏感性评价,并综合土壤保持、水源涵养、洪水调蓄和生物多样性等典型生态系统服务功能类型进行生态系统服务功能重要性评价,综合此二者评估西南各地区生态保护重要性等级并揭示其空间格局,为西南地区开展有针对性的生态保护、实现可持续发展提供理论基础。

1 研究区概况

西南研究区位于我国西南腹地,21.2°—36.4°N, 83.9°—112.1°E,包括青藏高原东南部、四川盆地和云贵高原大部。行政区划包括四川、云南、贵州、广西、重庆五省以及青海和西藏的部分县市,总面积 233.0 万 km²,辖 70 个行政市、地区和自治州,604 个行政县。西南研究区气候类型丰富,包括亚热带季风气候、高原山地气候、热带季风气候等。西南研究区地形地貌也十分独特,包含了四川盆地及周边山地、云贵高原中高山山地丘陵区、青藏高原高山山地区等等。

西南地区是我国生物种类和生态系统最为丰富的地区之一,至少拥有 2 万多种高等植物分布其中,约有 2 千余种脊椎动物生活在此,中国约 50% 的树种和北半球主要生态系统均可以在这里找到^[12]。本区是世界野生生物关键地区之一,也是许多物种的分化中心和珍稀濒危物种的分布中心。同时,西南地区生态系统多样,其中森林、灌丛、草地、湿地分别占西南研究区面积的 27.4%, 11.9%, 35.7%, 3.4% (图 1)。西南地区对我国乃至世界的生物多样性及物种种质资源的保护具有不可替代的屏障作用,具有重要的研究价值。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究使用的数据主要包括 DEM 数据、生态系统类型数据、土壤数据、地质岩性数据、地质灾害类型数据、气象数据等。其中,DEM 数据为 SRTM 地形数据,空间分辨率为 90 m,数据来自中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.cniscas.cn/zcfw/sjfw/gjksxsjx/>);生态系统类型数据解译自 90 m 分辨率的 TM 遥感影像,数据来自中国科学院遥感所;西南地区及周边气象站点观测数据来自中国气象局

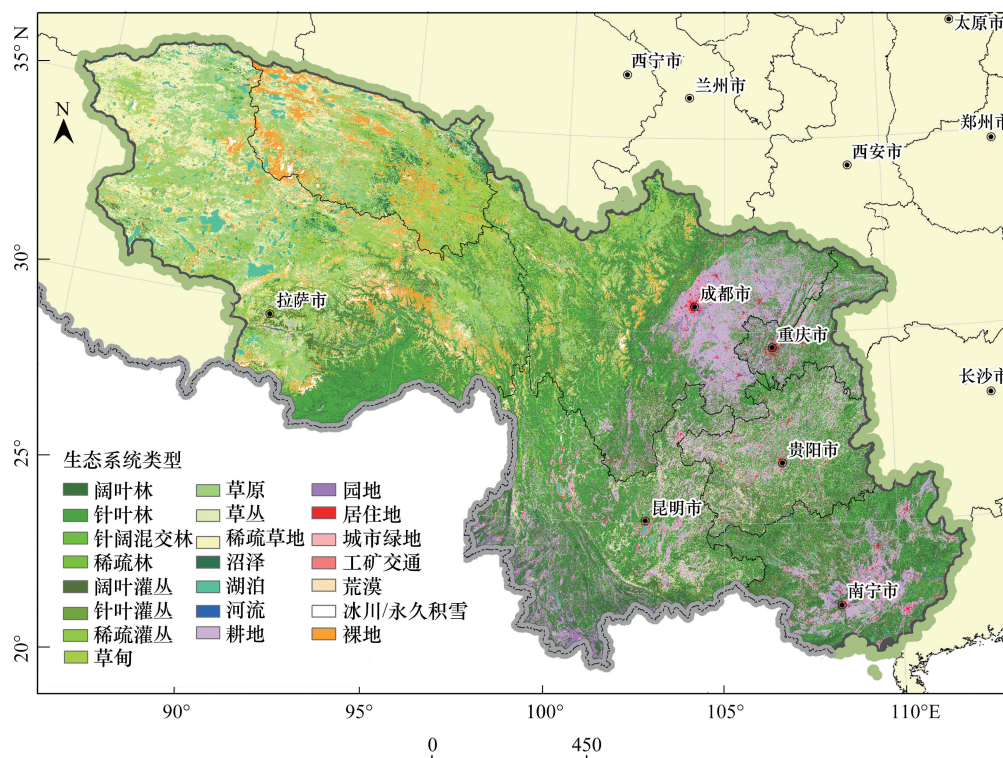


图 1 西南研究区生态系统类型图

Fig.1 Ecosystem-types in southwest China

(<http://www.cma.gov.cn/>), 包括气温(分辨率 0.05°)、降水量(分辨率 0.05°)等数据; 土壤数据来源于第二次全国土壤调查的土壤数据(比例尺百万分之一)。

2.2 研究方法

生态保护重要性评估由生态敏感性评价和生态服务功能重要性评价两部分组成, 是二者综合叠加分析的结果。本研究在了解西南地区生态环境现状的基础上, 针对其主要生态问题和典型生态服务功能构建评价指标体系, 进而在 GIS 平台上进行生态保护重要性评估, 确定西南地区生态保护重要性格局。技术路线如图所示(图 2)。

2.2.1 生态敏感性评价

生态敏感性是指生态系统对区域中各种自然和人类活动的敏感程度, 反映的是区域生态系统在遇到干扰时, 发生生态环境问题的难易程度和可能性大小^[13]。其实质是对现状自然环境背景下潜在的生态问题进行明确的辨识, 并将其落实到具体的区域空间。生态敏感性评价已经成为确定重点生态建设与保育区域的重要手段^[14]。目前对省域尺度生态敏感性^[15-17]及酸雨区^[18-19]、库区和流域^[20-23]、山地^[24]等特殊生态环境敏感区已有相应研究, 杨志峰等^[25]进行了城市生态敏感性研究, 欧阳志云等^[26]则探讨了中国生态环境敏感性的区域分析规律。

本研究根据西南地区的生态特征和面临的生态问题, 选取水土流失敏感性、石漠化敏感性、滑坡敏感性、泥石流敏感性和冻融侵蚀敏感性这 5 个指标评价西南地区的生态敏感性。水土流失敏感性以通用水土流失方程(USLE, universal soil loss equation)为基础, 综合考虑降雨侵蚀力、土壤质地、地形起伏度等因素评价西南地区水土流失对人类活动的敏感程度。石漠化敏感性根据评价区域是否为喀斯特地貌、植被覆盖、岩性等因素进行分级。地质灾害滑坡和泥石流根据其形成的环境条件和主要诱发因素, 选择离断层线距离、地震烈度、坡度、降雨等因素进行敏感性分析。冻融侵蚀敏感性评价则根据其发生条件, 选择温度、降雨、地形、植被等因子进行分级(表 1)。在 ArcGIS 中叠加分析上述 5 项单因子敏感性结果, 得到西南研究区生态敏感性等级。

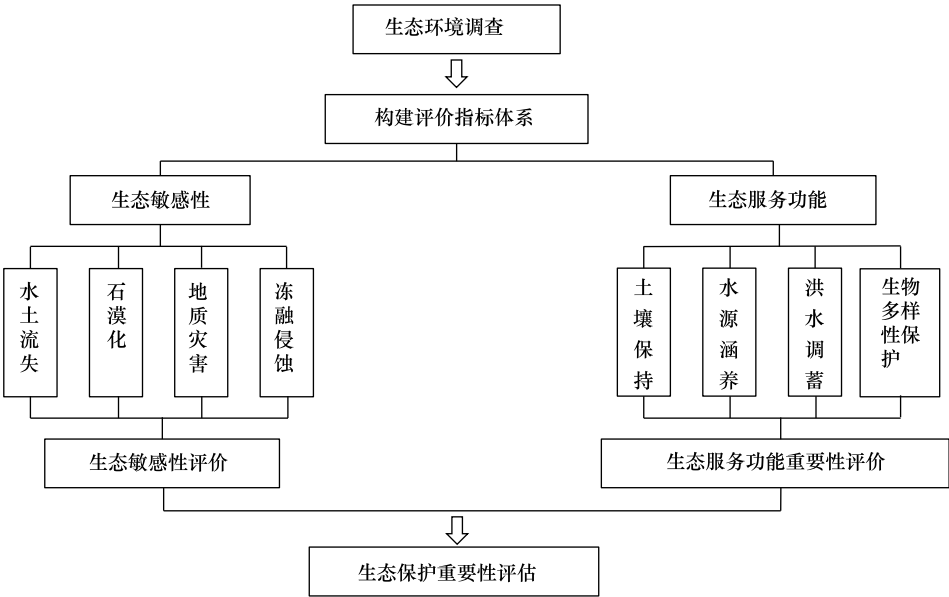


图 2 生态保护重要性评估技术路线

Fig.2 Roadmap of ecological conservation importance evaluation

计算公式为：

$$S_i = \text{Max}(C_{1i}, C_{2i} \cdots C_{ni})$$

式中, S_i 为*i*空间单元上的生态敏感性等级, $C_{1i}—C_{ni}$ 为*i*空间单元上一单因素生态敏感性等级。

表 1 生态敏感性评价指标体系

评价因素 Evaluation Index	方法 Method	参数 Parameter
水土流失 Water and Soil Loss	通用水土流失方程	降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、地形因子、植被覆盖因子。
石漠化 Rocky Desertification	指标分级,赋值加权求和 $E_{石} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i$	x_i :第 <i>i</i> 个石漠化影响因子,包括岩性、土地覆盖类型、坡度、植被覆盖; a_i : x_i 的权重。
滑坡 Landslide	构建指标量化体系,指标赋值加权求和 $E_{滑} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i$	x_i :第 <i>i</i> 个滑坡易发影响因子,包括:地层岩性、断层线距离、地震烈度、坡度、地形起伏度、年均降雨、植被覆盖; a_i : x_i 的权重
泥石流 Debris Flow	构建指标量化体系,指标赋值加权求和 $E_{泥} = \sum_{i=1}^n a_i x_i$	x_i :第 <i>i</i> 个泥石流易发影响因子,包括断层线距离、地震烈度、坡度、坡向、日最大降水量、小流域面积、植被覆盖; a_i : x_i 的权重。
冻融侵蚀 Freeze-thawing Erosion	指标分级赋值加权求和 $E_{冻} = \sum_{i=1}^n a_i x_i$	x_i :第 <i>i</i> 个冻融侵蚀易发影响因子,包括气温年较差、年均降水量、坡度、坡向、植被盖度; a_i : x_i 的权重

2.2.2 生态服务功能重要性评价

生态系统服务是指生态系统所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件和效用^[27],是连接生态系

统与社会经济系统的桥梁^[28]。生态系统服务重要性评价根据典型生态系统服务能力和价值评估,评价生态系统服务的综合特征及其空间分布特征^[29],其目的是明确区域各类生态系统的生态服务功能及其对区域可持续发展的作用与重要性,并依据其重要性分级,明确其空间分布^[30]。Daily 和 Costanza 等提出了描述、测度和评价生态服务的纲要,为生态服务功能及其评价奠定了理论和方法基础^[27,31-32],国内学者也纷纷在此基础上开展研究,如牛叔文等基于生态系统服务价值的核算来评价甘肃省县域单元的生态保护重要性^[33];杨美玲等从生态系统的类型、面积及生态服务功能,对宁夏限制开发生态区生态保护重要性进行评价^[34]。

本研究选取对西南地区生态安全方面起主要作用的典型生态系统服务类型,土壤保持、水源涵养、洪水调蓄和生物多样性保护 4 个指标评价西南地区的生态服务功能重要性。土壤保持服务评价以潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值作为土壤保持量。水源涵养服务则采用水量平衡方程评估西南地区生态系统的水源涵养能力。洪水调蓄服务功能重要性主要通过不同生态系统类型的洪水调蓄能力差异性进行考量,以可调蓄水量、防洪库容和洪水期沼泽滞水量评价调蓄功能。生物多样性保护评价则筛选重要保护物种作为指示种,根据物种生境的分布格局,通过系统保护规划模型,评估西南地区生物多样性保护格局(表 2)。在 ArcGIS 中叠加分析上述 4 项单因子服务功能重要性结果,得到西南研究区生态系统服务功能重要性等级。计算公式为:

$$ES_i = \text{Max}(D_{1i}, D_{2i}, \dots, D_{ni})$$

式中, ES_i 为 i 空间单元上的生态服务功能重要性等级, $D_{1i} - D_{ni}$ 为 i 空间单元上一单因素服务功能重要性等级。

表 2 生态服务功能重要性评价指标体系

Table 2 Index system for assessing the importance of ecosystem service

评价因素 Evaluation Index	方法 Method	参数 Parameter
土壤保持 Soil Retention	潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值	降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、地形因子、植被覆盖因子
水源涵养 Water Retention		TQ 为总水源涵养量; P 为降雨量; P_h 为产流降雨; α 为地表径流系数; ET 为蒸散发; A 为生态系统的面积。
洪水调蓄 Flood Mitigation	湖泊: 可调蓄水量 $C_r = a A^b$; 水库: 防洪库容 $C_r = \alpha C_t$; 沼泽: 洪水期沼泽滞水量	生态系统类型、各类湿地面积等 A 为湖面面积; a, b 为常数, 按照湖区分类; C_t 为总库容;
生物多样性保护 Biodiversity Conservation	确定西南地区重要保护物种, 评估其生境分布, 基于系统保护规划理论确定西南生物多样性保护优先格局	重要保护物种名录、栖息地分布

2.2.3 生态保护重要性评价

生态保护重要性是表征区域生态系统结构和功能重要性程度的综合指标, 涵盖生态敏感性和生态服务功能两部分^[35]。通过生态保护重要性评价, 识别重要生态功能空间, 有针对性地进行保护, 成为协调开发与保护关系的重要手段^[36]。目前, 对流域^[35]、山区^[37]等区域已有研究; 徐卫华等^[13]针对汶川地震重灾区的生态特性构建评价体系评估其生态重要性并探讨保护对策; 徐建等^[38]和刘昕等^[39]对土地利用系统中的未利用土地和生态用地进行了生态保护重要性的探讨; 李平星等^[40]则在生态重要性整合分析的基础上研究其与建设用地的空间叠置关系。

本研究在 ArcGIS 系统中叠加分析生态敏感性和生态服务功能重要性来评价西南地区生态保护重要性, 最后评价结果分为极重要、重要、中等重要和一般地区 4 个等级。计算公式为:

$$P_i = \text{Max}(S_i, ES_i)$$

式中, P_i 为 i 空间单元上的生态重要性等级。

3 结果与分析

西南地区水土流失敏感区主要集中在四川盆地东北部,在横断山区、云贵高原等地也均有广泛分布;石漠化敏感区则呈明显的集中分布,主要分布于云贵高原东北部和广西盆地;滑坡和泥石流这两项地质灾害敏感区主要分布于岷山、邛崃山、横断山区以及怒江、澜沧江流域;冻融侵蚀敏感区则集中在念青唐古拉山脉、唐古拉山脉及青海高原(图3)。

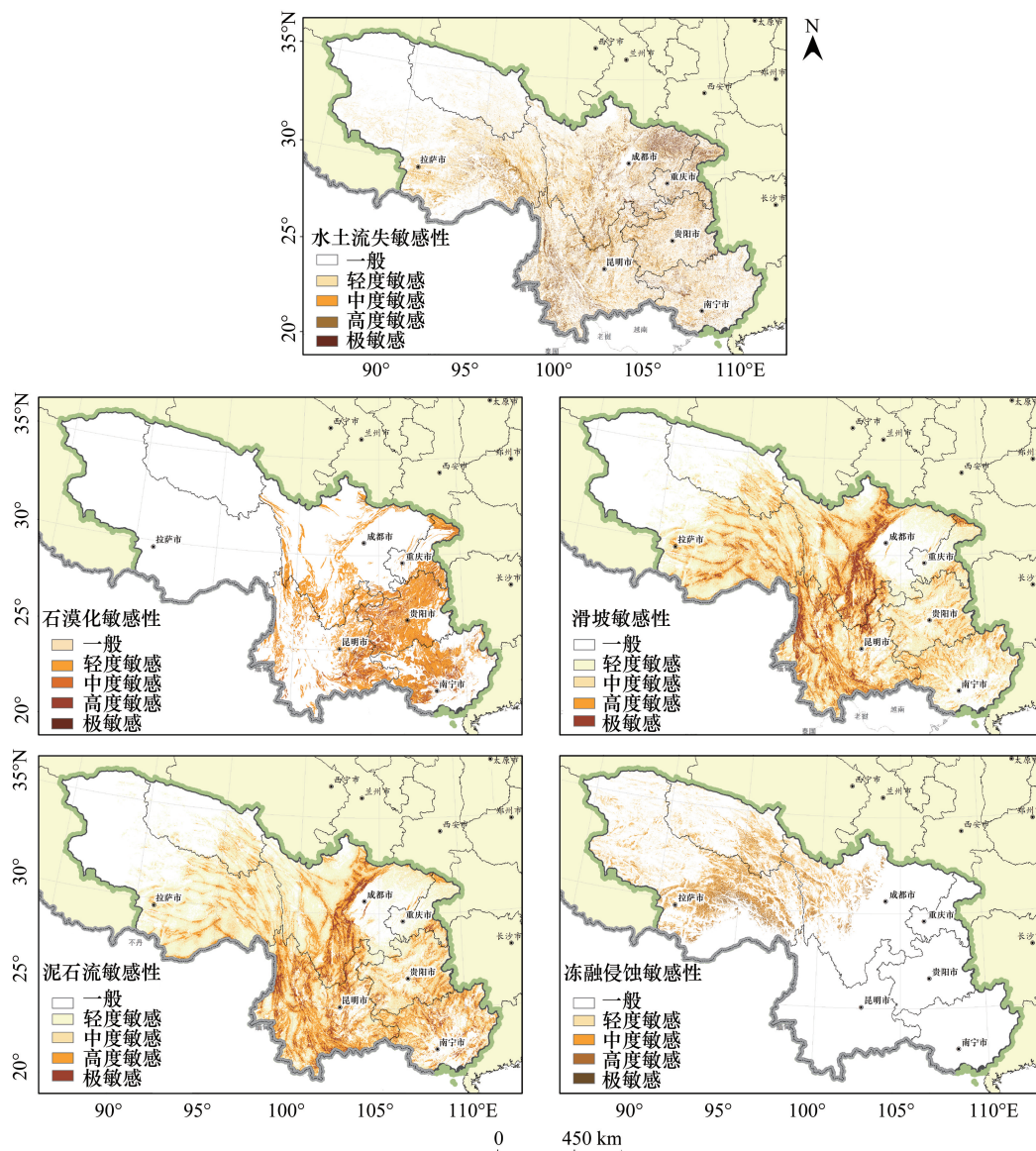


图3 西南研究区单因子生态敏感性

Fig.3 Single factor ecological sensitivity in southwest China

西南地区土壤保持重要区主要分布于岷山、邛崃山区,嘉陵江流域,怒江、澜沧江流域以及广西盆地等地区;水源涵养重要区主要分布于雅砻江流域、藏北高原、雅鲁藏布江流域、松潘高原及广西盆地;洪水调蓄重要地区则集中于青藏高原湖区;生物多样性保护重要区主要分布于雅鲁藏布江流域、横断山区、怒江和澜沧江流域、岷山和邛崃山区(图4)。

综合西南地区生态敏感性和生态系统服务功能重要性,确定西南地区生态保护重要性格局。西南生态保

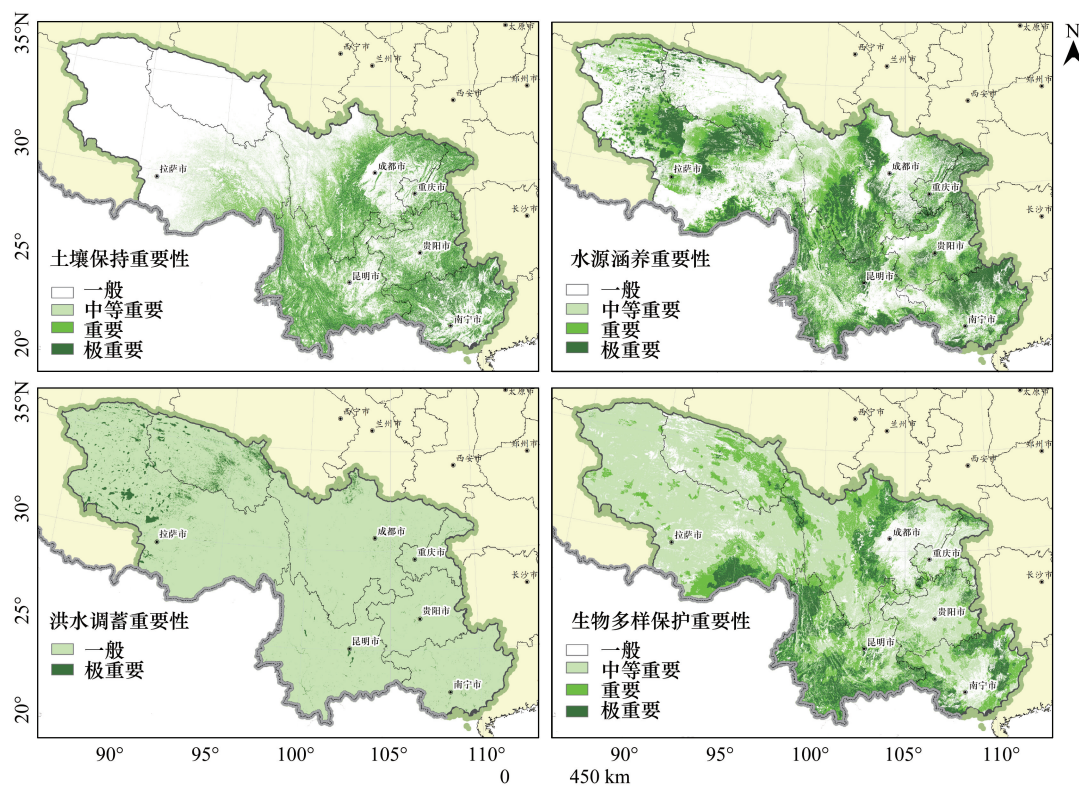


图4 西南研究区生态系统单因子服务功能重要性

Fig.4 Single factor importance of ecosystem service in southwest China

护极重要区面积 75.7 万 km^2 , 占西南地区国土总面积 32.5%, 主要分布于雅鲁藏布江流域、横断山区、川西高原、广西丘陵等地区; 西南生态保护重要区面积 71.3 万 km^2 , 占西南地区国土总面积的 30.6%, 主要分布于青海高原、云贵高原、四川盆地东部和广西盆地等地区。生态保护极重要区以西南地区 32.5% 的总面积, 提供了 59.4% 的土壤保持总量和 54.5% 的水源涵养总量, 保护了 69.7% 的重要物种; 生态保护极重要区和重要区占西南地区总面积 63.1%, 累计提供了 90.6% 的土壤保持总量和 83.2% 的水源涵养总量, 累计保护了 95.1% 的重要物种。(图 5—6, 表 3)。

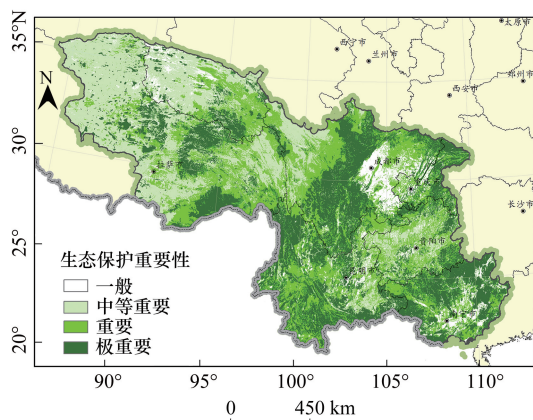


图5 西南研究区生态保护重要性

Fig.5 Ecological conservation importance in southwest China

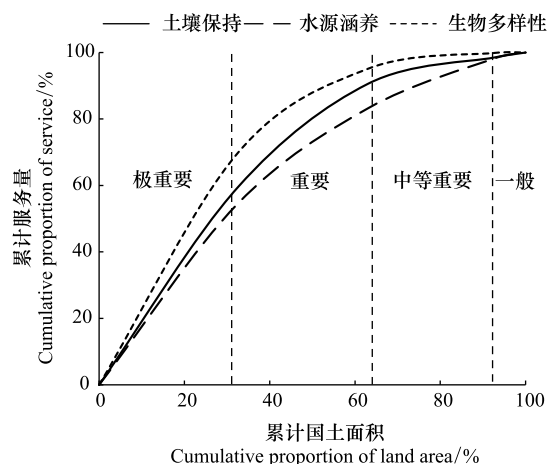


图6 累计服务功能量比例图

Fig.6 Proportion of cumulative ecosystem service

表 3 西南地区生态保护重要性综合特征

Table 3 The characteristic of ecological conservation importance in southwest China

重要程度 Importance Level	国土面积 Land Area		土壤保持 Soil Retention		水源涵养 Water Retention		生物多样性保护 Biodiversity Conservation	
	万 km ²	%	亿 t	%	亿 m ³	%	物种数	%
极重要 Very High	75.7	32.5	461.7	59.4	2779.2	54.5	574	69.7
重要 High	71.3	30.6	242.6	31.2	1465.3	28.7	209	25.4
中等重要 Medium	69.0	29.6	61.4	7.9	764.4	15.0	39	4.7
一般 Normal	17.0	7.3	11.5	1.5	89.3	1.8	1	0.1

4 结论与讨论

本文以西南地区为研究区,以其自然环境特征和生态问题为基础,构建西南生态重要性评估指标体系,识别具有重要保护意义的地区,并针对不同重要性地区提出生态保护、生态规划建议。研究表明:生态保护极重要区占西南地区总面积的 32.5%,提供了 59.4%的土壤保持总量和 54.5%的水源涵养总量,并保护了 69.7%的重要物种。研究建议生态保护极重要区作为划定生态红线和重点生态功能区的依据,而重要区、中等重要区和一般区域作为主体功能区划的依据。

根据研究结果,西南研究区生态保护重要性高的地区以少量的土地面积提供了更多的土壤保持、水源涵养等服务。因此有针对性地着重保护重要程度高的地区,可以合理调配资源,节约保护成本,提高保护效率。生态保护重要性是划定生态红线和主体功能区划的重要依据。一方面,生态红线确定了城市建设、资源开发、农业拓展的边界,保证生态系统的完整性和连续性,保障生态安全格局。另一方面,主体功能区划指导区域的生态保护与建设,促进资源的有序开发和产业合理布局,推动社会经济与生态保护协调、健康发展。

相较于一般的市镇、流域研究^[7, 41-43],本研究的研究尺度更大,面临的生态问题也更为复杂,在构建评价指标体系时需更仔细地斟酌取舍,以兼顾其地域独特性和全面性。本研究针对西南地区主要生态问题和典型服务功能筛选了 9 项指标进行评估,如占西南大面积的青藏高原多发的冻融侵蚀的敏感性,是该研究区一项具有地域独特性的评价指标。西南的贵州、广西等地区也是全国石漠化高敏感区集中分布的区域,石漠化敏感性指标对西南研究区十分重要。

根据评估研究,生态保护极重要区为生态红线划定的依据,属于强制性严格保护区域,是保障和维护国家生态安全的底线和生命线^[44];同时也是重点生态功能区划的依据。应禁止开发、严格保护,具体措施包括:(1)可建立相应的重点生态功能保护区,并加大财政投入;(2)建立并完善生态补偿机制,以生态保护重要区为依托实现区域之间的横向生态补偿;(3)加强生态保护和恢复,坚持自然恢复为主的原则,适当实施生态保护与恢复工程,提升生态系统质量;(4)调整经济结构以减少当地居民对自然生态系统经济的依赖;(5)加强生态保护宣传教育,同时加强生态管理监管力度。而重要区、中等重要区和一般区域作为其他主体功能区划的依据,各区域应根据其主导生态服务功能和主要生态问题确立适宜的保护方向和恰当的保护措施,加强生态保护和修复,完善管理政策,优化经济结构,保证生态系统良性运行。总之,通过运用生态学原理,优化生态管理和国土开发格局,推进生态文明建设,最终促进人类社会的可持续发展。

生态保护重要性评估研究是一个复杂的综合统筹过程,数据量大,数据质量也有较高要求,涵盖了研究区域自然环境及人文环境状况、生态系统特征与结构功能、资源分布情况等等。生态系统除自身内部结构异质性变化,其外部干扰压力也是影响其生态敏感性和服务功能重要性的因素,西南地区社会经济发展水平差异较大,人类活动强度明显不同,如何合理测度人类活动干扰及其对生态保护重要性的影响具有重要意义,值得进一步研究。另外,如何更准确地确定生态功能的提供者和受益者、测度各生态区之间的服务流及协调其区域间利益相关者关系、优化生态规划方案并提高管理措施执行效率尚需深入研究。

参考文献 (References):

- [1] 李文华, 张彪, 谢高地. 中国生态系统服务研究的回顾与展望. 自然资源学报, 2009, 24(1): 1-10.
- [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] Leverington F, Costa K L, Pavese H, Lisle A, Hockings M. A global analysis of protected area management effectiveness. *Environmental Management*, 2010, 46(5): 685-698.
- [4] 刘冬, 林乃峰, 邹长新, 游广永. 国外生态保护地体系对我国生态保护红线划定与管理的启示. 生物多样性, 2015, 23(6): 708-715.
- [5] 国务院. 全国主体功能区规划. 北京: 人民出版社, 2015.
- [6] 环保部. 生态保护红线划定指南. 环保工作资料选, 2017, (9): 19-23, 14-14.
- [7] 杨姗姗, 邹长新, 沈渭寿, 沈润平, 徐德琳. 基于生态红线划分的生态安全格局构建——以江西省为例. 生态学报, 2016, 35(1): 250-258.
- [8] 李晓翠, 何建华. 生态红线划定的技术方法研究——以鄂州市为例. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(1): 50-55.
- [9] 黄伟, 曾江宁, 陈全震, 杜萍, 汤雁滨, 杨辉. 海洋生态红线区划——以海南省为例. 生态学报, 2016, 36(1): 268-276.
- [10] 曾江宁, 陈全震, 黄伟, 杜萍, 杨辉. 中国海洋生态保护制度的转型发展——从海洋保护区走向海洋生态红线区. 生态学报, 2016, 36(1): 1-10.
- [11] 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.
- [12] 韩冰, 欧阳志云, 徐卫华, 肖静, 蒋明康, 王智, 秦卫华. 我国西南地区物种多样性保护效果. 生态学报, 2008, 28(9): 4589-4593.
- [13] 徐卫华, 欧阳志云, 王学志, 王文杰, 董仁才, 白杨. 汶川地震重灾区生态保护重要性评价与对策. 生态学报, 2008, 28(12): 5820-5825.
- [14] 徐广才, 康慕谊, 赵从举, 赵文武, 秦艳红. 阜康市生态敏感性评价研究. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2007, 43(1): 88-92.
- [15] 刘康, 欧阳志云, 王效科, 徐卫华, 苗鸿. 甘肃省生态环境敏感性评价及其空间分布. 生态学报, 2003, 23(12): 2711-2718.
- [16] 杨月圆, 王金亮, 杨丙丰. 云南省土地生态敏感性评价. 生态学报, 2008, 28(5): 2253-2260.
- [17] 李东梅, 吴晓青, 于德永, 高正文, 吴钢. 云南省生态环境敏感性评价. 生态学报, 2008, 28(11): 5270-5278.
- [18] Hornung M, Bull K R, Cresser M, Ulyett J, Hall J R, Langan S, Loveland P J, Wilson M J. The sensitivity of surface waters of Great Britain to acidification predicted from catchment characteristics. *Environmental Pollution*, 1995, 87(2): 207-214.
- [19] Tao F L, Feng Z W. Terrestrial ecosystem sensitivity to acid deposition in South China. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2000, 118(3/4): 231-244.
- [20] 刘春霞, 李月臣, 杨华, 闵婕, 王才军, 张虹. 三峡库区重庆段生态与环境敏感性综合评价. 地理学报, 2011, 66(5): 631-642.
- [21] 李月臣, 刘春霞, 闵婕, 王才军, 张虹, 汪洋. 三峡库区生态系统服务功能重要性评价. 生态学报, 2013, 33(1): 168-178.
- [22] 李会琴, 侯林春. 库区旅游生态环境敏感性评价研究——以湖北省丹江口市为例. 环境科学与技术, 2012, 35(7): 191-196.
- [23] 魏伟, 石培基, 周俊菊, 雷莉, 魏晓旭, 颜斌斌. 基于区统计方法的石羊河流域土地生态敏感性评价. 水土保持研究, 2015, 22(6): 240-244.
- [24] 韩贵锋, 赵珂, 袁兴中, 孙荣. 基于空间分析的山地生态敏感性评价——以四川省万源市为例. 山地学报, 2008, 26(5): 531-537.
- [25] 杨志峰, 徐俏, 何孟常, 毛显强, 鱼京善. 城市生态敏感性分析. 中国环境科学, 2002, 22(4): 360-364.
- [26] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究. 生态学报, 2000, 20(1): 9-12.
- [27] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington D C: Island Press, 1997.
- [28] Fu B J, Wang S, Su C H, Forsius M. Linking ecosystem processes and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(1): 4-10.
- [29] Alexander A M, List J A, Margolis M, D'Arge R C. A method for valuing global ecosystem services. *Ecological Economics*, 1998, 27(2): 161-170.
- [30] 香宝, 任华丽, 马广文, 李咏红, 袁兴中, 谢强, 苏德苏日古格. 成渝经济区生态系统服务功能重要性评价. 环境科学研究, 2011, 24(7): 722-730.
- [31] Daily G C. Management objectives for the protection of ecosystem services. *Environmental Science & Policy*, 2000, 3(6): 333-339.
- [32] Costanza R, D'Arge R, Groot R D, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Van Den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [33] 牛叔文, 李永华, 马利邦, 孙红杰. 甘肃省主体功能区划中生态系统重要性评价. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(3): 119-124.
- [34] 杨美玲, 米文宝, 李同昇, 朱志玲, 王婷玉. 宁夏限制开发生态区生态系统重要性评价. 地域研究与开发, 2014, 33(3): 133-138.
- [35] 李晖, 杨树华, 姚文璟, 王思琪, 易娜, 刘大邦. 基于 GIS 的怒江流域中段生态保护重要性评价. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 947-953.

- [36] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 关文彬. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. 生态学报, 2004, 24(4): 761-768.
- [37] 葛石冰, 丛明珠, 张峰松. 中国东北山地区生态保护重要性评价——以本溪市为例. 安徽农业科学, 2015, 43(26): 291-294, 318-318.
- [38] 徐健, 周寅康, 金晓斌, 易理强. 基于生态保护对土地利用分类系统未利用地的探讨. 资源科学, 2007, 29(2): 137-141.
- [39] 刘昕, 谷雨, 邓红兵. 江西省生态用地保护重要性评价研究. 中国环境科学, 2010, 30(5): 716-720.
- [40] 李平星. 广西西江经济带生态重要性分区及其与建设用地的空间叠置关系. 生态学杂志, 2012, 31(10): 2651-2656.
- [41] 丁雨霖, 冯长春, 王利伟. 山地区域土地生态红线划定方法与实证研究——以重庆市涪陵区义和镇为例. 地理科学进展, 2016, 35(7): 851-859.
- [42] 邹长新, 燕守广, 方芳. 湖北省生态功能区划研究. 环境科学与管理, 2010, 35(6): 139-143.
- [43] 白杨, 郑华, 欧阳志云, 徐卫华, 江波, 方瑜. 海河流域生态功能区划. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2377-2382.
- [44] 王玉华, 苏金华, 布仁图雅, 陶赛喜雅拉图, 姜慧敏. 内蒙古生态保护红线划定建议. 环境与发展, 2018, 30(3): 1-4.