基于 SRP 模型的甘肃省白龙江流域生态环境脆弱性评价

齐姗姗[1]，巩 杰[1]，钱彩云[1]，谢余初[2]，张 影[1]

(1. 兰州大学 资源环境学院 西部环境教育部重点实验室，甘肃 兰州 730000)

(2. 广西师范学院 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室，广西 南宁 530001)

摘 要：[目的] 综合评估甘肃省白龙江流域生态环境脆弱性，为生态环境的恢复重建和可持续性管理提供理论参考。[方法] 基于生态敏感性—生态恢复力—生态压力度模型、层次分析法和 GIS/RS 软件等，通过计算生态环境脆弱性指数，将研究区生态环境脆弱性程度划分为微度脆弱、轻度脆弱、中度脆弱、重度脆弱和极度脆弱 5 个不同等级。[结果] 甘肃省白龙江流域中度和重度脆弱区域占研究区总面积比例较大，分别占研究区总面积的 28.94%和 22.76%。其中，重度与极度脆弱区集中分布在植被覆盖度较低，城镇化较快，工农业发展迅速且人类活动强度较强的流域中部。[结论] 研究区总体生态环境压力非常严峻，亟需研究其驱动机制及演变规律，以期为后续的生态恢复重建做准备。

关键词：SRP 模型；生态环境脆弱性；白龙江流域；GIS；AHP 方法

文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2017)01-0224-05 **中图分类号**：X171.1

文献参数：齐姗姗，巩杰，钱彩云，等. 基于 SRP 模型的甘肃省白龙江流域生态环境脆弱性评价[J]. 水土保持通报，2017，37(1)：224-228. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20160918.001；Qi Shanshan，Gong Jie，Qian Caiyun，et al. Assessment of eco-environmental vulnerability of Bailongjiang watershed in Southern Gansu Province based on SRP model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2017，37(1)：224-228. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20160918.001

Assessment of Eco-environmental Vulnerability of Bailongjiang Watershed in Southern Gansu Province Based on SRP Model

QI Shanshan[1], GONG Jie[1], QIAN Caiyun[1], XIE Yuchu[2], ZHANG Ying[1]

(1. *Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu* 730000, *China*; 2. *Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education, Guangxi Teachers Education University, Nanning, Guangxi* 530001, *China*)

Abstract: [Objective] The objective of the study is to provide theoretical support for ecological restoration and sustainable management in the future by comprehensive assessment of eco-environmental vulnerability in Bailongjiang watershed in Southern Gansu Province. [Methods] Based on ecological sensitivity-resilience-pressure model and characteristics of eco-environmental systems in Bailongjiang watershed in Southern Gansu, we used analytic hierarchy process (AHP) method to assess eco-environmental vulnerability with GIS/RS technology. According to the eco-environmental vulnerability index, the study area was classified into five levels: slight vulnerability(<0.38), light vulnerability(0.38~0.44), moderate vulnerability(0.44~0.50), high vulnerability(0.50~0.57) and extreme vulnerability(>0.57). [Results] The moderately and highly vulnerable area accounted for 28.93% and 22.76% of the total area. Moreover, the highly and extremely vulnerable area was primarily distributed in the middle reaches of Bailongjiang watershed, which

收稿日期：2016-05-06 **修回日期**：2016-06-11

资助项目：国家自然科学基金项目"甘肃白龙江流域景观格局与生态系统服务功能时空变化研究"(4127199)

第一作者：齐姗姗(1991—)，女(汉族)，河南省周口市人，硕士研究生，研究方向为景观生态学、土地变化科学与生态评价。E-mail：qishsh14@lzu.edu.cn。

通讯作者：巩杰(1975—)，男(汉族)，甘肃省庆阳市人，博士，硕士生导师，主要从事景观生态学、土地变化科学、环境遥感与生态评价、生态系统服务等方面的研究。E-mail：jgong@lzu.edu.cn。

was characterized with low vegetation coverage, rapid urbanization and industry and agricultural development and frequent human activities. [Conclusion] The watershed is facing huge eco-environmental pressures. It is urgent to study the driving mechanism and evolution rules in order to provide support for ecological restoration and reconstruction in near future.

Keywords: SRP model; eco-environmental vulnerability; Bailongjiang watershed; GIS; AHP

脆弱性概念先后经历了国际生物学计划(IBP)、生物圈计划(MAB)以及国际地圈与生物圈计划(IGBP)等大型国际计划的完善,并经历了内容扩展和学科综合化的过程[1],已经朝着具针对性和综合性的自然和人类社会系统的多元化方向发展[2-3]。学术界普遍认为:生态环境脆弱性是生态系统或景观类型在特定时空尺度上受到内外部扰动所具有的敏感反应和自我恢复状态或能力,是系统内部的自然属性[4]。

近期随着人地耦合关系研究的深入,国内外研究在环境脆弱性评价方法[4-5]和分析框架[6]等方面逐渐由理论方法的探讨转入实证研究阶段,对生态脆弱性的纵向剖析也不断深入,形成了一系列脆弱性机制的系统分析机制,并朝着系统化和科学化的方向发展[7]。目前环境脆弱性评价方法较倾向于采用数学方法对区域生态环境脆弱性进行定量评价,如模糊综合分析法[8]、人工神经网络法[9]、主成分分析法[10]、层次分析法[4,11]和综合评价法[12]等,同时结合"3S"技术更加有利于客观评价区域生态环境脆弱性。由于区域自然条件因子和人为条件因子的差异性,不同区域生态脆弱性的影响因素会有所不同,因此研究方法或模型的选择也会视具体实际情况而定。生态敏感性—生态恢复力—生态压力度模型(sensitivity-resilience-pressure,SRP)涵盖了生态脆弱性的构成要素,能较全面地体现生态脆弱性的综合方面,已在环渤海地区[13]、沂蒙山[14]和辽宁朝阳县[15]等区域得到广泛应用。

白龙江流域地处青藏高原与黄土高原的交错过渡带上,流域内地貌复杂、水土流失严重、人类活动频繁,深刻地影响着流域生态环境的驱动机制及其演变规律。本文拟以 SRP 模型评价体系、AHP 评价方法和 RS/GIS 技术等,对甘肃白龙江流域脆弱度进行定量评估与分析,旨在了解区域脆弱性现状,为流域生态系统综合调控提供建议。

1　研究区概况

甘肃白龙江流域(32°36′—34°24′N,103°30′—106°0′E)地处青藏高原东北边缘,属于青藏高原向黄土高原过渡的斜坡加剧变形带,海拔高度约在 568～4 866 m。流域流经甘肃省迭部、舟曲、宕昌、武都、文县 5 个行政单元,河网分布较密,且表现出西北—东南向分布格局。由于地形高差悬殊,气候垂直带分异明显,流域内冬春干燥,夏秋多雨,年均气温 6～14.9 ℃,年降水量约 400～850 mm。区域内起伏较大、地表支离破碎、山大沟深、地势险峻,故是滑坡、泥石流、地震等地质灾害发生最频繁的地区,严重危害区域生态环境和社会经济的可持续发展,因此科学研究白龙江流域内生态环境脆弱性非常迫切。

2　评价体系构建

2.1　数据来源

2.1.1　SRP 模型　本文针对白龙江流域生态环境现状,选择 SRP 模型中生态敏感性、生态恢复性和生态压力度 3 个构成要素。其中,生态敏感性反映区域生态环境抵抗各种内外干扰的能力,包括地形因子、地表因子、气象因子;地形因子包括高程、坡度、坡向和地形起伏度,地表因子包括土壤侵蚀强度、景观结构指数和潜在蒸散发,气象因子包括年均降水、相对湿度和气温;生态恢复力指生态环境在内外扰动下的自我调节与自我恢复能力,包括植被因子,可用植被净初级生产力和植被覆盖度来表示。生态压力度是指生态系统受到的外界干扰及其产生的生理效应,包括人口活动压力和经济活动压力,分别用人口密度和人均 GDP 来表示(表 1)。

2.1.2　指标标准化　由于研究区数据来源存在差异,导致原始数据量纲不同,故需要对原始数据进行标准化处理(min-max,极差标准化方法)。数据标准化处理过程中,生态脆弱性与评价指标之间有 2 种方向关系,即正向关系与逆向关系。正向关系就是评价指标值增大时,生态脆弱度增大;逆向关系就是评价指标值增大时,生态脆弱度减小。计算公式如下:

$$\text{正向关系指标:}\ X_i' = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

$$\text{逆向关系指标:}\ X_i' = 1 - \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

式中:X_i' ——第 i 个指标的标准化值;X_i ——第 i 个指标的原始数据;$X_{\max}$ ——第 i 个指标的最大值;$X_{\min}$ ——第 i 个指标的最小值。

2.2　评价指标权重确定

层次分析利用 yaahp 10.3 软件(www.jeffzhang.cn/)完成,由兰州理工大学张建华博士开发,是一种

定性与定量结合的决策方法。步骤如下：① 分析要素层中各指标层间的关系，采用 1—9 标度法对各指标层的重要性进行两两比较，构建指标层判断矩阵。② 在每个指标层中，采用相似步骤确定各要素内部组成指标间的相对权重，即指标权重。③ 将判断矩阵结果输入 Yaahp10.3 软件进行一致性检验，经检验，判断矩阵一致性为 0.051 6，一致性比率＜0.10，则认为判断矩阵具有满意的一致性，表明模型指标权重的计算结果合理。④ 通过要素权重和指标权重相乘，得到 14 个单项指标的最终权重(表 1)。

表 1 白龙江流域生态环境脆弱性评价指标 AHP 权重

分目标层	准则层	指标层	数据来源	正/负向关系	最终权重
生态敏感性(0.593 6)	地形因子(0.332 5)	高程(0.296 6)	国际科学服务平台	负向	0.058 6
		坡度(0.419 5)	数字高程模型坡度提取	正向	0.082 8
		坡向(0.074 2)	数字高程模型坡向提取	正向	0.014 6
		地形起伏度(0.209 7)	数字高程模型高程计算	正向	0.041 4
	地表因子(0.139 6)	土壤侵蚀强度(0.633 7)	利用 RUSLE 模型计算	正向	0.052 5
		景观结构指数(0.174 4)	利用 Fragstats 计算	正向	0.014 5
		潜在蒸散发(0.191 9)		正向	0.015 9
	气象因子(0.527 8)	年均降水(0.673 8)	甘肃省气象局	负向	0.211 1
		年均相对湿度(0.225 5)		负向	0.070 7
		年均气温(0.100 7)		负向	0.031 5
生态恢复力(0.249 3)	植被因子(1.000)	植被净初级生产(0.200 0)	基于 CASA 模型计算	负向	0.049 9
		植被覆盖度(0.800 0)	基于像元二分模型计算	负向	0.199 4
生态压力(0.157 1)	社会因子(1.000)	人口密度(0.875 0)	甘肃省统计年鉴	正向	0.137 4
		人均 GDP(0.125 0)		正向	0.019 7

2.3 白龙江流域生态环境脆弱性评价

利用 SRP 模型和 AHP 得出各指标权重系数，计算生态环境脆弱性指数(eco-environmental vulnerability index，EEVI)，对区域生态环境脆弱性进行评价。计算公式如下：

$$EEVI = \sum_{i=1}^{n} W_i \times X_i$$

式中：n ——评价指标的个数；W_i ——第 i 个评价指标的权重系数；X_i ——第 i 个评价指标的标准化后的数值；EEVI ——生态环境脆弱性指数。一般地，EEVI 的数值范围为[0,1]，数值愈接近 1，说明研究区域的生态脆弱程度越高，反之，说明研究区的生态脆弱程度越低。

3 结果与分析

3.1 总体分布特征

研究区生态环境脆弱性的计算通过 ArcGIS 10.2 中 spatial analyst 模块下的 raster calculator 命令，计算每个栅格的生态脆弱度指数，再利用再分类工具(reclassify)，选择自然断裂点(natural breaks)分类方法将生态脆弱性程度划分为微度脆弱、轻度脆弱、中度脆弱、重度脆弱和极度脆弱(图 1)。

从白龙江流域各生态脆弱性程度的面积及其所占研究区总面积比例的统计可以看出，研究区生态脆弱程度空间差异明显(图 1)，流域整体的生态脆弱性稍高，以轻度、中度和重度脆弱度为主，分别占总面积的 25.92%，28.94%和 22.76%(表 2)；微度和极重脆弱区相对较小，分别占 13.15%和 9.24%。

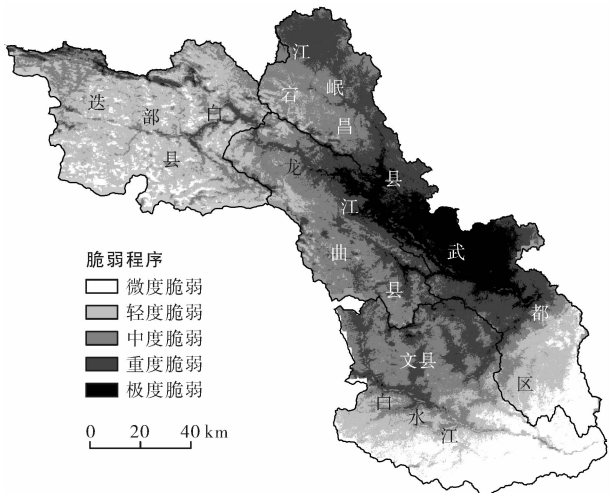


图 1 白龙江流域生态环境脆弱性分布

表 2 白龙江流域各生态环境脆弱等级的面积及比例

生态环境脆弱性程度	生态环境脆弱性指数(EEVI)	面积/km²	面积比例/%
微度脆弱	＜0.38	2 425.00	13.15
轻度脆弱	0.38～0.44	4 778.33	25.92
中度脆弱	0.44～0.50	5 335.08	28.94
重度脆弱	0.50～0.57	4 196.46	22.76
极度脆弱	＞0.57	1 702.80	9.24

微度脆弱性区域主要分布在整个流域南部区域,在迭部县零星分布;轻度脆弱性区域主要分布在微度脆弱性区域外围,在迭部县大面积分布;中度脆弱性区域面积最大,主要分布在研究区中部轻度脆弱性区域外围;重度和极度脆弱性区域主要分布在研究区东南部大部区域以及白水江和白龙江及其支流两岸。

3.2　区域空间差异

在 ArcGIS 10.2 支持下,对生态脆弱性等级分布图以县(区)为单位,统计了各县(区)的生态脆弱性指数(表 3)。

表 3　白龙江流域各县(区)脆弱性等级占面积百分比

县 域	脆弱性阈值	脆弱性程度占县域面积百分比/%				
		微度脆弱	轻度脆弱	中度脆弱	重度脆弱	极度脆弱
武都区	0.267 68～0.737 04	14.70	20.38	8.52	22.87	33.52
宕昌县	0.350 89～0.690 46	0.02	5.64	37.01	45.27	12.04
舟曲县	0.345 82～0.684 81	0.02	9.27	50.50	32.24	7.34
文 县	0.245 66～0.625 38	31.28	19.45	28.80	19.96	0.49
迭部县	0.298 86～0.650 43	9.25	60.77	23.47	6.16	0.33

生态环境高度脆弱区域主要有武都区、宕昌县和舟曲县,其主要原因是城市化、工农业发展、自然地质灾害诱发的植被退化和水土侵蚀等造成的,如武都区的城镇化率由 2004 年的 16.41%增至 2010 年的 23.80%;宕昌县西北部地势低平,人口密集,耕地丰富,农业生产活动影响较为显著;舟曲县地形起伏大,土壤侵蚀强度较高,地质灾害频发,其中以 2010 年的舟曲特大泥石流导致的人身、财产损失最严重。上述 3 个县区生态系统抗干扰能力较差,生态环境较为脆弱,亟待开展相关的生态环境保护和恢复建设等活动。

文县和迭部县生态脆弱性相对较低,以轻度和中度脆弱为主。文县年际间人口数量和城镇化率变化不大,且大为陡峭的山地,不适宜人类大规模的开发,加上白水江国家自然保护区的生态建设活动,该县区受到人为不合理干扰较少;迭部县地处甘肃段白龙江流域源头,海拔较高,人口分布较少,植被覆盖度较好,生态环境抗干扰能力和自我恢复能力较强。国家实施的“退耕还林还草”和天然林保护等生态建设政策在一定程度上也改善了当地的生态环境。

4　结论与讨论

4.1　结 论

(1) 总体来看,白龙江流域生态环境脆弱性空间异质性规律明显,生态环境质量整体较为脆弱,生态环境脆弱程度以中度、重度和极度脆弱为主,占研究区总面积的 77.62%。

(2) 微度、轻度和中度脆弱性区域主要分布在研究区西北部和中部区域;重度和极度脆弱性区域集中分布在工农业发展较快、人口分布相对集中的流域中部,故需在尊重自然背景的前提下,合理和规范资源开发利用和人类活动行为,构建面向和谐人地关系的新型社会—生态复合系统。

(3) 研究区内自然、社会经济条件的差异使得生态脆弱性程度空间异质性较大。下一步以期通过建立完善评价指标体系,开展区域生态环境动态变化特征及未来变化趋势,以为流域生态环境保护和可持续发展服务。

4.2　讨 论

由白龙江流域脆弱性空间分布等级图与白龙江流域高程图叠加可知:白龙江流域生态脆弱性分布除南部以外呈现出从东南到西北逐渐降低的过渡趋势,即随着海拔高度的升高生态系统脆弱性总体呈减弱趋势,这与罗治敏[16]和吴磊[17]和杨斌等[18]研究结果相似,与王经民等[19]和雷波等[20]研究结果相反,可能原因是高程和地形起伏等地形地貌因子影响水热因子分布差异,进而影响土壤植被的类型与分布,并最终反映出自然因素差异影响区域生态环境脆弱性差异;也与研究区积极实施“退耕还林还草工程”、“长江中上游防护林体系建设工程”、“天然林保护工程”等生态建设措施有密切关系。本文研究结果也可知研究区环境脆弱性分布状况还与水系分布关系密切相关,越靠近白龙江水系主河道的区域脆弱性较高,且主要河流两岸的生态环境脆弱性明显高于距离河岸较远的地区,此研究结果与杨斌等[18]的研究结果相似,主要是因为河谷地区是该区域适宜人类居住和生产生活的重要场所,人类活动大面积的开展,对生态环境的压力加大,造成了研究区河谷地区脆弱性加强。

本研究揭示了甘肃白龙江流域的生态环境脆弱性空间分异,研究结果具有的一定实践和应用价值。但由于部分指标数据来源于县区统计数据,评价结果

不可避免地受到行政区域界限的影响，下一步研究要尽量通过加大数据收集力度和更为先进的技术对数据及指标体系进行完善；由于影响生态脆弱性的因素极其复杂，本研究选取的生态脆弱性评价指标可能具有片面性，并不能系统全面的反映研究区生态环境状况，建议未来研究更关注多因素生态环境脆弱性及其时空变化研究。

[参 考 文 献]

[1] Kelly P M, Adger W N. Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation[J]. Journal of Climate Change, 2000,47(4):325-352.

[2] Dow K. Exploring differences in our common future: The meaning of vulnerability to global environmental change[J]. Geoforum, 1992,23(3):417-436.

[3] 李鹤，张平宇. 全球变化背景下脆弱性研究进展与应用展望[J]. 地理科学进展，2011，30(7)：920-929.

[4] 韦晶，郭亚敏，孙林，等. 三江源地区生态环境脆弱性评价[J]. 生态学杂志，2015，34(7)：1968-1975.

[5] Salvati L, Zitti M. Assessing the impact of ecological and economic factors on land degradation vulnerability through muitiway analysis[J]. Ecological Indicators, 2009,9(2):357-363.

[6] Williams S E, Shoo L P, Isaac J L, et al. Towards an integrated framework for assessing the vulnerability of species to climate change[J]. PloS Biology, 2008, 6(12):2621-2626.

[7] 叶正伟. 基于生态脆弱性的淮河流域水土保持策略研究[J]. 水土保持通报，2007，27(3)：141-145.

[8] 方樟，肖长来，梁秀娟，等. 松嫩平原地下水脆弱性模糊综合评价[J]. 吉林大学学报：地球科学版，2007，37(3)：546-550.

[9] 孙国军. BP人工神经网络在生态环境脆弱性评价方面的应用：以乌拉特前旗为例[J]. 西北师范大学学报：自然科学版，2012，48(5)：105-108.

[10] Wang Siyuan, Liu Jingshi, Yang Cunjian. Eco-environmental vulnerability evaluation in the Yellow River basin[J]. Pedosphere, 2008,18(2):171-182

[11] Huang Pihui, Tsai J S, Lin W T. Using multiple-criteria decision-making techniques for eco-environmental vulnerability assessment: A case study on the Chi-Jia-Wan Stream watershed, Taiwan[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010,168(1):141-158.

[12] 樊哲文，刘木生，沈文清，等. 江西省生态脆弱性现状GIS模型评价[J]. 地球信息科学学报，2009，11(2)：202-208.

[13] 卢亚灵，颜磊，许学工. 环渤海地区生态脆弱性评价及其空间自相关分析[J]. 资源科学，2010，32(2)：303-308.

[14] 刘正佳，于兴修，李蕾，等. 基于SRP概念模型的沂蒙山区生态环境脆弱性评价[J]. 应用生态学报，2011，22(8)：2084-2090.

[15] 李永化，范强，王雪，等. 基于SRP模型的自然灾害多发区生态脆弱性时空分异研究：以辽宁省朝阳县为例[J]. 地理科学，2015，35(11)：1452-1459.

[16] 罗治敏. 基于遥感信息的流域生态健康评价[D]. 北京：中国科学院研究生院(遥感应用研究所)，2006.

[17] 吴磊. 陕西秦岭山地生态脆弱性评价[D]. 西安：西北大学，2011.

[18] 杨斌，詹金凤，李茂娇. 岷江上游流域环境脆弱性评价[J]. 国土资源遥感，2014，26(4)：138-144.

[19] 王经民，汪有科. 黄土高原生态环境脆弱性计算方法探讨[J]，水土保持通报，1996，16(3)：32-36.

[20] 雷波，焦峰，王志杰，等. 延河流域生态环境脆弱性评价及其特征分析[J]. 西北林学院学报，2013，28(3)：161-167.