

基于 AHP-PCA 熵权模型的大渡河流域中上游地区 生态环境脆弱性评价

姚 昆¹, 周 兵², 李小菊¹, 何 磊³, 李玉霞⁴

(1.西昌学院 资源与环境学院, 四川 西昌 615000; 2.国家气候中心 气候服务室, 北京 100081;
3.成都信息工程大学 软件工程学院, 成都 610103; 4.电子科技大学 自动化工程学院, 成都 610054)

摘 要:大渡河流域中上游地区是长江上游重要的生态屏障和功能区,及时掌握其生态环境脆弱性真实状况,有助于实现区域生态环境的保护。研究从地形、气候、植被等方面选择 9 个指标,同时将 GIS 技术与 AHP-PCA 熵组合权重模型相结合,完成了大渡河中上游地区 2000—2015 年不同时期的生态环境脆弱性评价与分析。结果表明:(1) 研究区生态环境脆弱性呈现出明显的垂直梯度变化,由南向北脆弱度逐渐降低。(2) 将脆弱性指数分 5 个等级,各等级间面积比例差异明显,表现为轻度>潜在>中度>重度,轻度及以下脆弱区面积比例达到全区的 80%以上,其整体处于中等脆弱水平。(3) 研究时期内该地区各时段的生态环境脆弱性综合指数分别为 2.552 1, 2.541 0, 2.517 0, 2.494 9,其整体呈现明显好转的发展趋势。(4) 流域中上游地区生态环境的好转,主要得益于国家系列生态环境保护与重建工程的实施,同时水电资源的大量开发也对其脆弱性的加剧产生一定影响。(5) 研究针对该地区生态环境恢复重建,结合区域实际将其分为 3 个治理区并分别提出相应建议。

关键词:生态环境脆弱性; 时空分异特征; GIS; 大渡河流域

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)05-0265-07

Evaluation of Ecological Environment Vulnerability in the Upper-Middle Reaches of Dadu River Basin Based on AHP-PCA Entropy Weight Model

YAO Kun¹, ZHOU Bing², LI Xiaojun¹, HE Lei³, LI Yuxia⁴

(1.College of Resources and Environment, Xichang University, Xichang, Sichuan 615000,

China; 2.National Climate Center, Climate Service Office, Haidian District, Beijing 100081, China;

3.School of Software Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610103, China;

4.School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The middle-upper reaches of the Dadu River Basin are important ecological barriers and functional areas in the upper reaches of the Yangtze River, and it is helpful to realize the protection of regional ecological environment to grasp the real situation of its ecological environment vulnerability in time. We select nine indexes from topography, climate, vegetation and so on, and combine GIS technology and AHP-PCA entropy combination weight model to complete the evaluation and analysis of ecological environment vulnerability in the study area in different period 2000—2015. The following results are obtained. (1) The vulnerability of ecological environment in watershed area shows obvious vertical gradient change, and the vulnerability of south to north gradually decreases. (2) In the study, the vulnerability index can be divided into five grades, the difference of the area between the different grades are obvious, the degree of mild and the potential to moderate, and the area of light and following vulnerable areas reach up to more than 80% of the whole region, which is at the level of the medium vulnerability. (2) During the study period, the comprehensive indexes of ecological environment vulnerability in different periods were 2.552 1, 2.541 0, 2.517 0 and 2.494 9, respectively, and the overall development trend of the region showed the obvious improvement. (4) The

收稿日期:2018-10-26

修回日期:2018-12-20

资助项目:全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2015CB953904);四川省科技厅重点研发项(No.2018SZ0286);广东省自然科学基金资助项目(NO.2018A030313898);成信大人才引进项目(No.KYTZ201809);四川省大学生创新创业训练计划项目(201810628034)

第一作者:姚昆(1991—),男,四川西昌人,硕士,助教,主要研究方向为生态遥感。E-mail:jiangshan996@126.com

通信作者:周兵(1964—),男,江苏常熟人,研究员,博士,主要研究方向为气候变化监测,亚洲季风降水。E-mail:bingz@cma.gov.cn

improvement of ecological environment in the middle and upper reaches of the basin was mainly due to the implementation of the national series of ecological environmental protection and reconstruction projects, and the extensive development of hydropower resources also had a certain impact on the intensification of its vulnerability. (5) Finally, the study aims at the restoration and reconstruction of ecological environment in this area, the area can be divided into 3 harnessing regions in terms of the situation of the area, and corresponding suggestions on each harnessing region are put forward.

Keywords: environment vulnerability; characteristics of spatial-temporal differentiation; GIS; Dadu River Basin

近年来,随着社会经济发展的加快,人类活动的愈加明显,人口—资源—环境间的矛盾日益突出。因此,及时减少类活动对生态环境的干扰,缓解其所面临的压力,实现人与自然的和谐相处,已成为当今地理学、生态学、乃至社会科学领域研究的热点之一^[1]。生态环境脆弱性作为生态系统内部更换演替、自然和人为因素共同作用的结果,是描述地区生态环境变化状况的客观指标之一^[2-4]。对地区生态环境脆弱性进行综合评价与变化状况分析,有助于为区域生态环境的保护与恢复性治理提供科学的参考依据。

针对区域生态环境脆弱性的相关研究,国内外专家学者们已在评价模型构建、方法选取、成因分析与综合治理等方面取得诸多成果。目前已经形成了 SRP^[5-7]、PSR^[8-9] 和 PSE^[10] 等评价模型,层次分析^[11-15]、景观格局^[16] 和主成分分析^[17-20] 等多种评价方法。近年来,大渡河流域中上游地区受自然环境改变与人类不合理活动的影响,流域先天就脆弱的生态环境受到了更大的冲击。因此,对其生态环境的真实情况进行评价与分析,及时缓解其所承受的压力已显得十分必要。然而,截至目前,对该流域地区生态环境脆弱状况进行综合分析的研究却相对较少。

以往大多研究在进行评价指标权重确定时,方法相对单一,均具有一定的局限性。同时,已有研究表明将各指标权重结构分解为反映不同指标属性对脆弱性影响程度的主观权重和表征不同指标信息量对其影响程度的客观权重,分别采用层次分析(AHP)和主成分(PCA)进行求解,并引入最小相对信息熵模型完成其组合权重计算的方法具有较高的准确性,易被大量运用于环境评价相关领域且取得诸多成果^[21-23]。

鉴于以上原因,研究在参考已有成果^[2,24-26] 的基础上结合区域实际状况,分别从地形地貌、气候、植被、社会经济等6个方面出发,选取高程、坡度、土地利用等9个指标,完成该区域脆弱性评价指标体系的构建。将GIS技术与AHP-PCA熵组合权重模型相结合,完成其2000—2015年的生态环境脆弱性评价与分析,以期为区域生态环境保护与恢复性建设措施的提出提供科学的参考依据。

1 数据来源

本文以基础数据自身是否带有空间坐标信息为依据将其划分为空间与属性数据两大类,空间数据有:(1) 2000年、2005年、2010年、2015年1:10万四川省土地利用遥感解译矢量成果,其中2000年来源于“黑河计划数据管理中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)”,其他来源于“中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)”;(2) 不同年份NDVI均选取6—8月MODIS13Q1产品进行最大化合成,像元尺寸为250×250m,重访周期16d,来源于NASA;(3) 四川省1:100万土壤类型矢量数据,来源于中国土壤数据库;(4) 90×90m网格数字高程模型(DEM)源于“中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)”。(5) 2000年四川省1:10万土壤侵蚀强度等级遥感解译矢量数据,来源于地球系统科学数据共享服务平台。属性数据包括:(1) 不同年份研究区及周边站点观测的水热数据,来源于“中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)”;(2) 不同时期的社会经济数据来源于《四川省统计年鉴》。

2 基础数据处理

2.1 属性数据的可视化

为提高研究成果的准确性,本文对属性数据进行空间可视化处理。人口和GDP数据以县级行政单元为界限,以ArcGIS 10.4为工具采用反距离权重(IDW)插值法完成。气温和降水以国际通用气象插值软件ANUSPLIN 4.37为工具,其采用薄板光滑样条函数法进行数据处理,将DEM作为协变量参与数据空间插值使结果更符合实际^[27]。

2.2 空间参考系统与格式的统一

为保证各指标数据在空间位置上具有较好的一致性,研究中所有指标均统一采用Krasovsky_1940_Albers等面积投影。同时,由于栅格数据在分类和运算上具有操作简捷且准确性高的优势,因此所有指标均采用像元尺寸为250m×250m的栅格格式。

2.3 数据分类定级

由于 9 项指标维数存在差异性,不具有直接可比性,为准确表征各指标对生态环境脆弱性的影响程度,需要对其进行分类定级。(1) 针对土地利用类型,研究在参考已有成果的基础上^[2,25-26,28-29],建立该区域土壤侵蚀强度分布状况与土地利用类型间的相互作用关系,将有林地、灌木林和沼泽地分为一级;高覆盖度草地,疏林地和旱地等为二级;河流、湖泊、水库坑塘等为三级;农村居民点、城镇建设用地、其他建设用地为四级;永久性冰川、裸岩石质地为五级。就土壤类型而言,研究在参考前人成果的基础上,结合其可侵蚀性、贫瘠程度和保水性等^[4,20,26],将黑毡土分为一级;褐土为二级;灰褐土、棕壤和暗棕壤等为三级;草毡土、水稻土和紫色土等为四级;岩石、石质土和沼泽土等为五级。(2) 对除土地利用和土壤类型外的其他 7 项指标,研究采用“自然断点”的方法进行数据分类^[24-26,29]亦分为 5 个等级,该方法从数据空间聚类的原理出发,客观程度上实现了数据分类的“物以类聚”。

3 评价模型

研究将 GIS 技术与 AHP-PCA 熵组合权重模型相结合,完成研究区不同时期的生态环境脆弱性现状评价。其基本思路为:分别利用 AHP 和 PCA 计算研究区各指标的主客观权重;利用最小相对信息熵完成两种方法各指标权重的组合;借助多因子加权叠加数学模型完成区域脆弱性评价。

3.1 指标数据的标准化

本文采用极差法对所有指标进行标准化处理。极差标准化数学模型如下:

正相关:

$$V_{ij} = (a_{ij} - a_{i,\min}) / (a_{i,\max} - a_{i,\min})$$

负相关:

$$V_{ij} = 1 - (a_{ij} - a_{i,\min}) / (a_{i,\max} - a_{i,\min})$$

式中: V_{ij} 为指标标准化结果; a_{ij} 为 i 指标在像元 j 真实值; $a_{i,\min}$ 为 i 指标在像元 j 最小值; $a_{i,\max}$ 为 i 指标在 j 最大值。

3.2 指标权重

3.2.1 AHP 权重 层次分析作为一种定性与定量相结合的权重计算方法^[13-15],其操作步骤如下:(1)分析各指标间的关系,对各指标进行两两比较且用 1~9 对其重要性进行标注,构建判断矩阵;(2)计算各指标的权重;(3)对计算结果进行一致性检验,以判断其是否合理。本研究中检验结果为 0.043 0<0.1,结果计算合理。

3.2.2 主成分权重 主成分分析能实现数据信息的重组降维,能在指标信息量损失最小的前提下,将多个变量转换为少数几个相关性极低的主成分因子,完成指标权重的确定^[17,19]。主要包括如下几个步骤:(1) 相关系数矩阵的构建;(2) 特征值、因子贡献率计算和主成分确定;(3) 利用数学模型完成权重的确定。模型如下:

$$H_j = \sum_{k=1}^m \lambda_{jk}^2 \quad (j=1,2,\cdots,9;k=1,2,\cdots,5) \quad (3)$$

$$W_j = H_j / \sum_{j=1}^8 H_j \quad (j=1,2,\cdots,8) \quad (4)$$

式中: H_j 为各指标的公因子方差; W_j 为各指标的权重; j 为指标个数; k 为主成分数量。

研究对各指标进行主成分分析,最终选累计因子贡献率达到 85% 以上的前 5 个变量作为主成分因子,分别为 PC1, ..., PC5(表 1)。

表 1 2000—2015 年大渡河流域地区主成分因子及系数

年份	主成分系数	主成分				
		PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
2000	特征值 λ	0.1521	0.0759	0.0423	0.0381	0.0252
	贡献率/%	40.6687	20.2902	11.3192	10.1747	6.7239
	累计贡献率/%	40.6687	60.9589	72.2781	82.4528	89.1767
2005	特征值 λ	0.13396	0.06742	0.04228	0.03839	0.02621
	贡献率/%	37.7133	18.9804	11.9035	10.8075	7.3781
	累计贡献率/%	37.7133	56.6937	68.5972	79.4047	86.7829
2010	特征值 λ	0.1272	0.0986	0.0440	0.0384	0.0235
	贡献率/%	33.5624	26.0144	11.6032	10.1296	6.2053
	累计贡献率/%	33.5624	59.5768	71.1801	81.3097	87.5150
2015	特征值 λ	0.14785	0.08538	0.04368	0.03811	0.02403
	贡献率/%	38.2147	22.0693	11.2894	9.8502	6.2120
	累计贡献率/%	38.2147	60.2841	71.5735	81.4237	87.6358

3.2.3 最小相对信息熵 研究规定 W_{ij} 和 W_{2j} 分别为高程、土地利用、土壤类型等 9 个指标,分别利用 AHP

和 PCA 计算得到主客观权重,那么由最小信息熵原理可知, W_j 与这两个权重越接近则越准确^[27-29],数学模

型如下：同时，利用拉格朗日中值定理可知：

$$\min F = \sum_{j=1}^m w_j (\ln w_j - \ln w_{1j}) + \sum_{j=1}^m w_j (\ln w_j - \ln w_{2j})$$

(5)

$$w_j = \frac{(\omega_{1f} \omega_{2f})^{0.5}}{\sum_{j=1}^m (\omega_{1f} \omega_{2f})^{0.5}} \quad (j=1, 2, \cdots, m)$$

(7)

$$\text{s.t.} \sum_{j=1}^m w_j = 1 \quad (\omega_j > 0, j=1, 2, \cdots, m)$$

(6)

研究区 AHP 权重、PCA 权重和熵权组合权重见表 2。

表 2 2000—2015 年各指标因子权重

指标	W_{1j}	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年	
		W_{2j}	W_j	W_{2j}	W_j	W_{2j}	W_j	W_{2j}	W_j
高程	0.2892	0.0825	0.1818	0.0747	0.1746	0.0961	0.1927	0.0848	0.1820
土地利用	0.2370	0.1133	0.1928	0.1100	0.1917	0.1155	0.1913	0.1209	0.1968
NDVI	0.1881	0.0892	0.1524	0.0892	0.1539	0.0910	0.1512	0.0789	0.1416
年降雨量	0.1035	0.0659	0.0971	0.0944	0.1174	0.0702	0.0985	0.0985	0.1174
年均温度	0.0694	0.0852	0.0905	0.0934	0.0957	0.0979	0.0953	0.0837	0.0886
坡度	0.0496	0.1973	0.1164	0.1964	0.1172	0.1892	0.1120	0.1858	0.1116
GDP	0.0282	0.0738	0.0537	0.0151	0.0245	0.0679	0.0506	0.0697	0.0515
人口	0.0201	0.0957	0.0516	0.1286	0.0604	0.0820	0.0469	0.0864	0.0484
土壤类型	0.0149	0.1970	0.0637	0.1981	0.0645	0.1902	0.0615	0.1915	0.0621

3.3 综合评价

权重虽然可以表征出各指标因子对流域地区生态环境脆弱性不同的影响程度，但其是多因素共同作用下形成的一种状态，只有将各因子的影响作用进行加权综合才能客观地反映出其真实情况^[17,29]。研究采用因子加权叠加模型，计算出不同时期流域地区生态环境脆弱性指数 EVI，以此完成该地区生态环境脆弱状况的定量表征。模型如下：

$$EVI = \beta_1 Y_1 + \beta_2 Y_2 + \beta_3 Y_3 + \cdots + \beta_i Y_i$$

(8)

式中：EVI 为生态环境脆弱性指数； Y_i 为第 i 个评价指标； β_i 为第 i 个指标的权重。

3.3.1 脆弱度分类定级 各时期计算得到的 EVI 是一个连续的数据，为更全面掌握区域整体生态环境的脆弱状况。研究采用自然断点与实际情况相结合的方式完成数据分级^[24-26]，将 EVI 划分为潜在、微度、轻度和中度和重度脆弱 5 个不同等级(表 3)。

表 3 大渡河流域地区生态环境脆弱性分级

脆弱度	范围	等级	特征描述
潜在	<0.2735	I	生态系统的稳定性强，系统结构完整，土壤抗肥沃、抗侵蚀能力强，海拔相对低，植被覆盖度高
微度	$[0.2735, 0.3862)$	II	生态系统的稳定性相对较强，系统结构相对完整，土壤肥沃、抗侵蚀能力相对强，海拔相对较低，植被覆盖度较高
轻度	$[0.3862, 0.4921)$	III	生态系统的稳定性一般，系统结构出现部分缺损，土壤相对贫瘠、抗侵蚀能力相对较差，植被覆盖状况一般
中度	$[0.4921, 0.2984)$	IV	生态系统的稳定性弱，系统机构缺损严重但尚在承受范围内，土壤贫瘠、抗侵蚀能力差，植被覆盖相对稀疏
重度	≥ 0.5984	V	生态系统的稳定性极弱，系统结构极度不完整已超过能承受的极限，土壤非常贫瘠且抗侵蚀能力极差，海拔相对较高，植被覆盖度极低

3.3.2 脆弱性综合指数 本文在进行流域地区生态环境脆弱性整体状况分析时，通过计算该区域不同时期的脆弱性综合指数 ESVI，并对其进行比较定量描述区域整体脆弱性变化状况^[17,26,29]。模型如下：

$$ESVI = \sum_{i=1}^n P_i \times \frac{A_i}{S}$$

(9)

式中：ESVI 为流域整体脆弱性综合指数； P_i 为各脆弱度区域的等级； A_i 为第 i 级的面积； S 为流域总面积；ESVI 越大脆弱度越高。

4 结果与分析

4.1 空间分布特征

本文从整体和局部两个视角出发，对区域生态环境脆弱性在空间分布特征上存在的差异进行综合分析。通过对流域地区 EVI 空间分布变化(图 1)可知，其生态环境脆弱性整体呈现出明显垂直分布的空间变化特征，具体表现为由南向北脆弱程度有增加的变化趋势。同时，各等级空间分布差异明显，潜在和微

度脆弱在整个区域的面积比例最大,达到整个地区的 50%以上,主要分布于河流两侧地势相对平缓的地区,区内人口密度相对较高,大部分地区以有林地和灌木林地等为主,植被覆盖度较高;轻度和中度主要分布在流域下游南部地区,土地景观类型以草地和疏林地等为主;重度脆弱区在整个区域面积比例最小,仅有 8%左右主要集中于流域南部海拔最高的区域,这些地地市陡峭植,区域内土地利用类型以低覆盖度

草地、耕地和裸岩石质地等为主,区内人类活动明显,植被覆盖度相对较低。

4.2 脆弱度结构差异

对 EVI 指数分类定级结果进行比较,可表征出区域脆弱性在结构分布上的差异性,有利于实现区域结构变化状况的及时掌握。2000—2015 年大渡河流域各时期不同等级脆弱区栅格数量及比例概况见表 4。

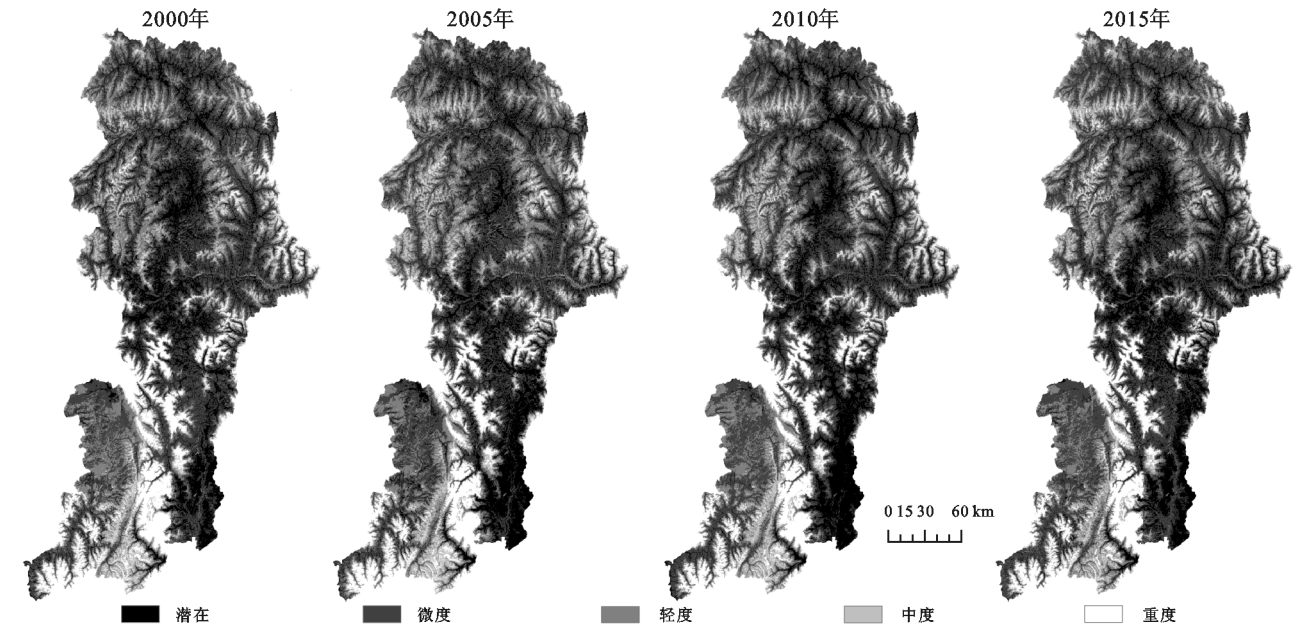


图 1 2000—2015 年大渡河流域区生态环境脆弱性评价

表 4 2000—2015 年大渡河流域不同脆弱度比例

等级	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年	
	栅格数	比例/%	栅格数	比例/%	栅格数	比例/%	栅格数	比例/%
潜在	90641	15.70	95591	16.55	95543	16.63	99498	17.32
微度	232476	40.26	222575	38.54	231228	40.25	239352	41.67
轻度	138057	23.91	144357	25.00	132832	23.12	130661	22.74
中度	62489	10.82	66159	11.46	64846	11.29	61837	10.76
重度	50798	8.80	45779	7.93	46008	8.01	43139	7.51

由各区栅格像元占地区总数的百分比可知,流域地区不同程度脆弱区在结构上存在明显差异。以 2015 年为例,整个流域地区微度和重度的比例分别为 41.67%和 7.51%分居流域比例的两端;其次,轻度、潜在和中度的比例分别为 22.74%,17.32%和 10.76%为列第二、第三和第四;同时,进行进一步分析可以发现轻度及以下脆弱区的栅格累计百分比达到 81.73%,一定程度上反映出流域整体的生态环境脆弱状况处于中等水平。

4.3 整体趋势变化

通过对比 2000—2015 年各脆弱区面积占流域整

体的比例可以发现,15 a 内潜在和微度脆弱区面积比例整体均呈现出增加的变化状态分别增加了 2.32%和 1.41%,特别是微度脆弱区在整个阶段内面积增加的幅度最明显且均呈现出稳步上升的趋势;轻度、中度和重度这 3 类脆弱区的栅格比例均呈现减小的变化状态,分别减少了 1.17%,0.06%和 1.29%,特别是重度减少的幅度最明显且其在整个阶段内也是呈现出持续减少的变化状态。

同时,研究利用生态环境脆弱性综合指数计算模型(9)得到流域地区 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年的 ESVI,分别为 2.552 1,2.541 0,2.517 0,2.494 9。整个研

究阶段内,流域地区的 ESVI 值呈现出持续减小的变化状态,这表明其生态环境状况呈现出持续好转的变化趋势。

4.4 驱动力分析

为实现流域地区生态环境脆弱性变化规律的进一步认识,对其驱动力进行分析十分必要^[15,19]。研究采用主成分分析将各指标对流域地区生态环境脆弱性的影响程度进行分析,以进一步分析其主要驱动因素(图 2)。

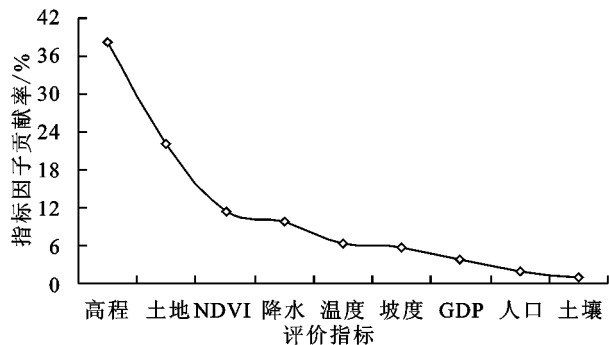


图 2 大渡河流域区生态环境脆弱性指标因子贡献率变化

通过分析各指标因子的贡献率可以发现,其呈现逐渐递减的变化趋势。指标个数到温度时,各指标的累计因子贡献率已经达到 87.64%,客观程度上可以判定前 5 项指标为影响区域环境脆弱状况改变的主要驱动因子。研究进一步分析可以发现,高程、坡度这 2 项指标的相对稳定,对利于地区生态环境的变化的影响作用相对较弱;降水和温度两项因素对其的驱动影响作用也是相对有限的,研究通过对比不同时期的 EVI 分布图发现,其空间分布与变化特征与 NDVI 和土地利用类型均有相似性,特别是 NDVI 的相似度最高。

研究发现 15 a 内流域大部分地区生态环境发展状态良好,主要是整个研究时段内该地区先后实施了“退耕还林(草)”和“天然林保护”等系列环保工程,随着时间的推移这些措施的效果愈加明显,研究区林草地得以保护与恢复。林草地面积的增加较大程度促进了流域大部分地区植被覆盖度的明显上升,趋势流域地区生态环境的良好发展。然而,局部极小部分地区仍表现出脆弱性加重的变化趋势。主要原因两个:一是部分地区自然环境复杂,某些特殊区域人工干预措施无法实施;二是,流域地区水资源相对丰富,大量水电设施的修建也对环境的脆弱性的加剧造成一定影响。

5 讨论

(1) 潜在和微度脆弱区该区具有植被类型多样且覆盖状况较高的优点,随着系列环保措施的实施,区域的生态环境质量得到了较明显的提高。然而,该

区主要集中于水资源丰富的河流两侧,水电资源的大量开发对其造成一定威胁,为实现该地区生态环境的保护与恢复治理,有关部门在进行水电资源开发时应更加重视该问题的解决方案。

(2) 轻度和中度脆弱区区内土地景观以疏林地和地覆盖度草地为主植被覆盖度相对低,为更好的维持和保护生态环境状况,应当严控制其植被资源过度开采,并继续实施“退耕还林(草)”和“天然林保护”工程等措施。

(3) 重度脆弱区大部分分布于流域海拔相对较高的地区,由于特殊的地形和气候条件,区内植被类型相对单一且覆盖度极低,更有部分地区终年被冰川雪被覆盖或为裸岩。因此,选择恰当的植被进行植树造林,最大限度阻止其进一步扩散具有十分重要的意义。

6 结论

(1) 从空间角度分析:流域地区生态环境脆弱性整体呈现出明显垂直分布的空间变化,具体表现为由南向北脆弱度有逐渐增高梯度变化,北部相比南部地区生态环境整体状况较好;各等级脆弱区在空间分布上也呈现出明显的空间差异性,潜在和微度脆弱区,主要集中在分布于河流两侧地势相对平缓的区域,轻度和中度脆弱区则主要集中分布于流域下游西南部地区,重度脆弱区则主要集中于流域南部海拔最高的区域。

(2) 从时间角度分析:整个流域地区各等级脆弱区的面积比例呈现出明显的结构差异性,微度和重度脆弱区的面积比例约为 40% 和 16%,分别占据上下限阈值,其次轻度、潜在、中度呈现依次递减的变化状态;随着时间的迁移潜在和微度的面积比例均呈现增长的变化趋势,而且他 3 类均为减少的变化状态。

(3) 15 年内研究区生态环境整体呈现明显好转的变化趋势,进一步分析驱动因素可知,土地利用类型和植被被覆盖度的改变是影响其改变的主要因素。近年来,随着国家系列生态环境保护与恢复性建设工程的实施,流域内林草地得到大面积保护恢复,很大程度促进植被覆盖度的提高,从而促进其生态环境的好转;同时,水电资源的大量开发利用也对脆弱性的加剧造成一定影响。

参考文献:

- [1] 高江波,侯文娟,赵东升,等.基于遥感数据的西藏高原自然生态系统脆弱性评估[J].地理科学,2016,36(4): 580-587.
- [2] 邵怀勇.川西山原区生态环境脆弱性评价[C]//2017 年中国地理学会经济地理专业委员会学术年会论文摘要集.中国地理学会经济地理专业委员会:中国地理学会,

- 2017;1.
- [3] 韦晶,郭亚敏,孙林,等.三江源地区生态环境脆弱性评价[J].生态学报,2015,34(7):1968-1975.
- [4] 陈金月,王石英.岷江上游生态环境脆弱性评价[J].长江流域资源与环境,2017,26(3):471-479.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 解雪峰,吴涛,肖翠,等.基于 PSR 模型的东阳江流域生态安全评价[J].资源科学,2014,36(8):1702-1711.
- [9] 谢余初,巩杰,张玲玲.基于 PSR 模型的白龙江流域景观生态安全时空变化[J].地理科学,2015,35(6):790-797.
- [10] 孙平军,修春亮,王忠芝.基于 PSE 模型的矿业城市生态脆弱性的变化研究:以辽宁阜新为例[J].经济地理,2010,30(8):1354-1359.
- [11] 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.
- [12] 赵乾坤,王治国,张光灿,等.山西省水土保持功能区生态脆弱性评价[J].中国水土保持科学,2014,12(6):16-22.
- [13] 杨存建,陈静安,白忠,等.利用遥感和 GIS 进行四川省生态安全评价研究[J].电子科技大学学报,2009,38(5):700-706.
- [14] 谢人栋,赵翠薇.基于栅格尺度的喀斯特槽谷区生态环境脆弱性时空分异研究[J].长江科学院院报,2018,35(4):48-53.
- [15] Xiaobin R, Zhibao D, Guangyin H, et al. A gis-based assessment of vulnerability to aeolian desertification in the source areas of the Yangtze and Yellow Rivers[J]. Remote Sensing, 2016,8(8):626-649.
- [16] 宋豫秦,曹明兰.基于 RS 和 GIS 的北京市景观生态安全评价[J].应用生态学报,2010,21(11):2879-2895.
- [17] 马骏,李昌晓,魏虹,等.三峡库区生态脆弱性评价[J].生态学报,2015,35(21):7117-7129.
- [18] Shao H, Liu M, Shao Q, et al. Research on eco-environmental vulnerability evaluation of the Anning River Basin in the upper reaches of the Yangtze River[J]. Environmental Earth Sciences, 2014,72(5):1555-1568.
- [19] 赵冰,张杰,孙希华.基于 GIS 的淮河流域桐柏—大别山区生态脆弱性评价[J].水土保持研究,2009,16(3):135-138.
- [20] 于伯华,吕昌河.青藏高原高寒区生态脆弱性评价[J].地理研究,2011,30(12):2289-2295.
- [21] 夏兴生,朱秀芳,李月臣,等.基于 AHP-PCA 熵组合权重模型的三峡库区(重庆段)农业生态环境脆弱性评价[J].南方农业学报,2016,47(4):548-556.
- [22] 侯成成,赵雪雁,张丽,等.基于熵组合权重属性识别模型的草原生态安全评价:以甘南黄河水源补给区为例[J].干旱区资源与环境,2012,26(8):44-51.
- [23] 吴开亚,金菊良.区域生态安全评价的熵组合权重属性识别模型[J].地理科学,2008,28(6):754-758.
- [24] Li A, Wang A, Liang S, et al. Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS: A case study in the upper reaches of minjiang River, China[J]. Ecological Modelling, 2006,192(1/2):175-187.
- [25] Shao H, Sun X, Tao S, et al. Environmental vulnerability assessment in middle-upper reaches of Dadu River Watershed using Projection Pursuit Model and gis[J]. Carpathian Journal of Earth & Environmental Sciences, 2015,10(4):143-146.
- [26] Shao H, Sun X, Wang H, et al. A method to the impact assessment of the returning grazing land to grassland project on regional eco-environmental vulnerability[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2016,56:155-167.
- [27] 谭剑波,李爱农,雷光斌.青藏高原东南缘气象要素 Anusplin 和 Cokriging 空间插值对比分析[J].高原气象,2016,35(4):875-886.
- [28] 徐庆勇,黄玫,陆佩玲,等.基于 RS 与 GIS 的长江三角洲生态环境脆弱性综合评价[J].环境科学研究,2011,24(1):58-65.
- [29] 邵秋芳,彭培好,黄洁,等.长江上游安宁河流域生态环境脆弱性遥感监测[J].国土资源遥感,2016,28(2):175-181.