

吉林省西部地区生态脆弱性的动态评价

田超^{1,2}, 杨夏捷^{1,2}, 鞠园华^{1,2}, 郭福涛^{1,2}

(1. 福建农林大学 林学院, 福州 350002; 2. 海峡两岸红壤区水土保持协同创新中心, 福州 350002)

摘要:以吉林省西部为研究区域,选择人均GDP、人口密度、年末实有耕地面积、土地利用类型、年平均降水量、年平均相对湿度、年平均温度、坡度、高程、植被覆盖度10个指标,通过因子分析,构建了生态脆弱性评价体系,并基于主成分分析法对2000年、2006年、2012年吉林省西部地区生态脆弱性进行了综合定量评价并分级,最后对生态脆弱性的空间分布和动态变化进行了分析。结果表明:研究区2000年、2006年、2012年生态脆弱性指数平均值分别为 0.600 ± 0.129 , 0.5319 ± 0.111 , 0.506 ± 0.118 ,整体处于中度脆弱水平。2000—2012年吉林省西部地区整体生态脆弱性综合指数呈不断下降趋势,说明研究区的整体生态环境呈逐渐好转趋势。吉林省西部地区生态脆弱性呈西高东低的空间分布规律。此外,2000—2012年,研究区生态脆弱度主要受气候因素和人为活动共同影响。

关键词:吉林省西部;生态脆弱性;主成分分析;空间动态变化

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)04-0298-06

Dynamic Evaluation of Ecological Vulnerability in Western Jilin Province

TIAN Chao^{1,2}, YANG Xiajie^{1,2}, JU Yuanhua^{1,2}, GUO Futao^{1,2}

(1. Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Collaborative Innovation Center of Soil and Water Conservation, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Taking western Jilin Province as the study area, we selected 10 indicators including the per capita GDP, population density, actual cultivated land area at the end of the year, land use type, the average annual precipitation, annual average relative humidity, average temperature, slope, elevation and vegetation coverage to build the ecological vulnerability evaluation system by using factor analysis. And based on the principal component analysis, we quantitatively evaluated and classified the ecological vulnerability in 2000, 2006 and 2012. Finally, we analyzed the spatial distribution and dynamic change of ecological vulnerability in western Jilin Province. The results showed that the average value of ecological fragility level index (EVLI) in 2000, 2006 and 2012 were 0.600 ± 0.129 , 0.5319 ± 0.111 and 0.506 ± 0.118 , respectively, indicating that the overall vulnerability index was in a moderately fragile level; During 2000—2012, the EVLI in western Jilin Province presented the downward trend, which indicated that the overall ecological environment of the study area was gradually improved. With respect to spatial distribution pattern, ecological fragility was low in the east and high in the western. Moreover, during 2000—2012, the ecological vulnerability of the study area was mainly affected by climate factors and land use types.

Keywords: western Jilin Province; ecological fragility; principal component analysis; spatial dynamic change

随着社会经济的快速发展和人类活动的不断加剧,对生态环境的干扰日益频繁,导致生态脆弱性问题尤为突出。目前,有关生态环境脆弱性的研究已引起了诸多学者的广泛关注,并成为探讨全球变化和生态环境可持续发展的重要切入点^[1-3]。目前国内外学者已开展了有关生态脆弱性的实践性研究^[4-6]、生态脆弱性的动态评价和预测预报^[7-9]等,这些研究有助

于全面了解区域生态环境质量状况,并为生态环境恢复和重建工作提供科学依据^[10-11]。

吉林省西部地区是我国典型的生态脆弱区。区内土地资源的开发历史虽不长,但由于长期的过度放牧、垦殖,不合理的土地利用,加之恶劣的自然条件的影响,生态脆弱性十分明显。2000年以来吉林省政府生态环境保护政策的陆续出台,加强了对生态问题

严重区的治理力度,西部地区的生态环境不断改善^[12]。然而,目前还缺少对吉林省西部地区,尤其是 2000 年以后的生态环境脆弱性长时间尺度动态变化研究。鉴于此,本研究选取降水、温度、人口密度和土地利用类型等 10 个因子,基于 ArcGIS 10.2,SPSS 19.0 等技术软件,利用主成分分析法和综合指数法,对吉林省西部地区 2000 年、2006 年、2012 年的生态脆弱度进行定量评价,明确生态脆弱性的主导因素,研究结论为吉林省生态建设和生态恢复提供科学依据。

1 研究区概况

吉林省西部地区位于松嫩平原的西南部,地跨东经 123°09′—124°22′,北纬 44°57′—45°46′,其研究范围包括白城及松原市所管辖的 9 个县市(区),国土总面积为 46 000 km²,约占吉林省总面积的 1/4。研究区内地形平缓,海拔为 120~180 m。气候类型属半干旱半湿润的大陆性季风气候,四季分明,雨热同期。夏季炎热多雨,冬季寒冷漫长。热量资源丰富,年平均气温 5.2℃。平均降水量约为 400 mm,年平均蒸发量 1 500~1 900 mm。区内植被类型以针叶混交林、落叶松林为主。土壤类型主要有黑钙土、草甸土、风沙土等。2012 年末,吉林省吉林西部各县(市)人均国内生产总值为 39.911 亿元,年末实有耕地面积为 296.157 hm²,人口总数为 624.34 万人^[13]。

2 研究方法

2.1 评价指标的选择

指标是进行生态环境评价的基本尺度和衡量标

准^[14]。引发区域生态环境脆弱性的原因主要包括自然因素和人为因素两个方面。在遵循科学性、全面性及数据可获取性等原则的基础上,结合前人研究成果,共选取了 10 个指标(表 1)。具体指标选取原则如下:自然因素是生态系统各种因素长期作用的结果,也是生态环境构成的基础^[15]。基于前人研究,本文选取了“年平均降水量”、“年平均相对湿度”、“年平均温度”反映气候特征变化^[16],选取“坡度”、“高程”因子反映地形地貌表征^[17],选取“植被覆盖度”反映植被的生长状况^[18]。人类活动因子的选取对生态环境脆弱度有重要影响。前人研究表明,“土地利用类型”直接影响人类的生存环境,每种土地利用类型在一定程度上承载不同的生态利用价值,是决定生态脆弱程度的关键因素^[19]。姚昆等^[20]研究表明,“人均 GDP”、“人口密度”、“耕地面积”是生态脆弱性的潜在因子,可对生态系统的稳定性造成破坏^[21,14]。因此,本研究选取以上 10 个指标对吉林省西部 2000 年、2006 年、2012 年的生态脆弱性进行评价。

本研究以栅格为基本评价单元,所有数据均采用 Albers 投影,空间数据栅格大小为 100 m×100 m。研究中高程、坡度数据由 DEM 提取,气象数据包括“年平均降水”、“年平均温度”和“年平均湿度”,取吉林省西部 9 个市县及周边地区气象站点数据。“人口密度”、“人均 GDP”、“年末实有耕地面积”来源于吉林省 2000 年、2006 年、2012 年统计年鉴,根据吉林省西部地区各市县的社会经济数据,基于 ArcGIS 10.2 地统计分析中的克里金插值法进行空间确定性插值,实现其空间化。

表 1 生态脆弱性评价指标描述及来源

指标	指标描述	来源
高程	吉林省西部数字高程模型	DEM 数据,分辨率 30 m
坡度	数字高程模型坡度提取	DEM 数据计算,分辨率 30 m
年平均降水		
年平均气温	基于插值控制点的每月气候数据	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)
年平均湿度		
植被覆盖度	利用 NDVI 基于像元二分模型计算	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)
土地利用类型	根据遥感影响分为 6 个类型(耕地、林地、草地、水体、建设用地、未利用地 ^[6])	Landsat 数据,500 m
人口密度	统计数据	
人均 GDP	统计数据	吉林省 2000 年、2006 年、2012 年统计年鉴
年末实有耕地面积	统计数据	

2.2 有效性检验

有效性检验是所选取的指标是否适用于该方法进行检验。因此,在评价前,需要验证相关矩阵中各变量的相关性,即各个变量间是否相互独立。借助 SPSS 19.0 的因子分析(Bartlett's 球形检验)对各指

标进行检验,若 KMO 统计量在 0.5 以上,说明适合应用因子分析法。若 Bartlett's 球形检验结果变量拒绝原假设,说明生态环境指标间存在一定的相关性,因子分析有效^[22]。由于指标的生成和提取需要从研究区内选取一定数量的随机点作为样点进行研究,在参考

其他文献的基础上^[19],基于 ArcGIS 10.2 随机生成研究区 900 个点,根据这些点提取各指标所需数据。

根据检验结果显示,2000 年、2006 年、2012 年 Bartlett's 的卡方值为分别为 5 742.838,42 313.103,6 494.726,且显著性均 Sig. < 0.05 (即 p 值 < 0.05),故应拒绝原假设,认为相关系数矩阵与单位阵有显著差异。KMO > 0.5,根据 Kaiser 给出的 KMO 度量标准可知原有变量适合进行因子分析。由此可见,所选取的生态环境指标适宜作因子分析。

2.3 数据处理

2.3.1 评价指标标准化 生态评价指标具有不同的含义,因为在数量级和量纲上都不同^[23],为保证数据的客观性和科学性,需要按照一定的标准对参评因子进行标准化处理。由于评价指标与生态环境脆弱性关系有正逆两种,其算法也不同。标准化采用以下两种公式:

$$X'_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$$X'_i = (X_{\max} - X_i) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中: X'_i 为第 i 个指标的标准化值; X_i 表示第 i 个指标的初始值; X_{\max} , X_{\min} 分别表示第 i 个指标的最大值和最小值。 X'_i 越大,表明生态环境越脆弱,越容易受到外界干扰而破坏。其中,定量正向指标包括:“人口密度”、“高程”、“坡度”、“年均温度”、“年末实有耕地面积”。定量负向指标包括:“人均 GDP”、“年均降水”、“年均湿度”、“土壤类型”、“植被覆盖度”。当指标因子值与生态环境呈正相关时使用公式(1);当指标因子值与生态环境呈负相关时使用公式(2)。

定性指标中的土地利用类型通过分等级赋值法实现指标的定量处理,最后进行极差标准化计算(表 2)^[4]。

表 2 定性指标赋值标准

指标	指标赋值				
	2	4	6	8	10
土地覆盖类型	林地、林地	草地	耕地	建设用地	未利用地

2.3.2 贡献率及累计贡献率 第 h 个主成分累计贡献率达到 70%~90% 时^[24],取前 q 个主成分(表 3)。贡献率公式为:

$$\alpha = \sum_{i=1}^q a_i \quad (3)$$

2.3.3 特征值和特征向量 主成分因子负荷是主成分因子与原始变量因子间的相关系数。主成分的特征向量,又称系数向量,等于对应的载荷系数除以特征值的平方根^[14]。

2.3.4 综合得分模型 各主成分的系数分别乘上所对应的贡献率再除以 4 个主成分贡献率之和,最后所有主成分每个系数前的值相加,即可得到综合得分模型:

$$F_i = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_m X_m \quad (4)$$

综合得分模型中的各指标前的系数($\beta_1 - \beta_m$)即为各指标因子得分值。

表 3 各成分的特征值、贡献率和累计贡献率

年份	项目	第一主成分	第二主成分	第三主成分	第四主成分
2000	特征值	3.874	1.59	1.202	1.03
	贡献率/%	38.74	15.899	12.015	10.297
	累计贡献率/%	38.74	54.639	66.654	76.951
2006	特征值	3.273	1.712	1.104	1.051
	贡献率/%	32.732	17.121	11.035	10.505
	累计贡献率/%	32.732	49.853	60.888	75.394
2012	特征值	3.783	1.741	1.091	1.036
	贡献率/%	37.831	17.411	10.908	10.363
	累计贡献率/%	37.831	55.242	66.149	76.512

2.3.5 确定权重 各指标的权重等于公式(4)中每个指标的得分值除以指标的总得分。

2.3.6 生态环境脆弱度 生态环境脆弱度是用于研究研究区内生态环境状况和表征生态环境脆弱度一个重要标准^[11]。通过多因子综合分析,结合研究区内自然因素、社会经济因子等方面构建生态脆弱综合指数(Ecological Vulnerable Degree)。用公式(5)表达吉林省西部地区生态脆弱度:

$$EVD_i = \sum_{j=1}^{10} p_{ij} \times w_j \quad (5)$$

式中: EVD_i 为第 i 个评价区域生态脆弱度,其值为(0,1); P_{ij} 为第 i 个区域 j 个指标; w_j 为各指标权重值。 EVD_i 值越高,脆弱程度越严重。

研究区生态脆弱等级的划分,对全面认识区内生态环境状况具有重要意义^[25]。结合国内外研究现状^[7,14],并综合吉林省西部地区自然环境和生态脆弱度的表现特征,按照生态脆弱度的大小将研究区生态环境脆弱度划分为 5 个等级(表 4)。

2.3.7 生态脆弱度变化趋势 使用定量的生态环境脆弱性综合性指数(EVSI)能够更加直观全面地反映研究区生态环境质量,而对研究区生态脆弱度变化趋势可根据变化率进行描述^[18],计算公式如下:

$$EVSI = \sum_{i=1}^n p_i \times \frac{A_i}{S} \quad (6)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \times A_{im} - \sum_{i=1}^n p_i \times A_{in}}{S \times T} \times 100 \quad (7)$$

式中:EVSI 为生态脆弱综合指数; P_i 为第 i 类脆弱性等级值; A_i 为第 i 类脆弱性面积; S 为研究区总面积(km^2); R 为综合指数变化率; A_{im} 和 A_{in} 分别为 m, n 时间,第 i 类脆弱性面积。若 $R < 0$,则生态环境呈恢复趋势,若 $R > 0$,则生态环境呈恶化趋势,不容乐观。

表 4 生态环境脆弱性等级

等级	等级范围	脆弱性	特征描述
I	<0.44	微度脆弱	生态环境基本未受干扰,服务功能很好,生态功能结构完整社会经济水平较高,生态脆弱性低
II	0.44~0.52	轻度脆弱	生态功能基本未遭到破坏,服务功能良好,生态系统结构尚完整,生态环境污染不明显,生态脆弱性较低
III	0.52~0.59	中度脆弱	生态系统可维持基本功能,服务功能有一定的退化但可维持基本运作,环境污染较为明显,生态灾害时有发生,在一般干扰下尚可恢复,生态脆弱性较高
IV	0.59~0.66	强度脆弱	生态系统结构有较大变化,服务功能退化且不全,环境污染比较严重,生态灾害较多,受损后恢复较困难,生态脆弱性高
V	>0.66	极强度脆弱	生态系统结构很不完整,服务功能完全丧失,生态功能遭到破坏,环境污染严重,受损后恢复非常困难,生态脆弱性极高

3 结果与分析

3.1 研究区生态脆弱性评价

表 5 显示,2000 年各指标权重排序为:年平均气温>年平均降水>年平均湿度>人口密度>年末实有耕地面积>植被覆盖度>坡度>土地利用类型>人均 GDP>高程,2006 年指标权重排序:年平均降水>土地利用类型>年平均湿度>人均 GDP>年末实有耕地面积>年平均气温>植被覆盖度>坡度>人口密度>高程,2012 年各指标权重排序为:土地利用类型>年平均降水>年平均湿度>年平均气温>人口密度>年末实有耕地面积>植被覆盖度>人均 GDP>坡度>高程。

此外,根据表 5 可知,2000 年气象因子所占比重较大,说明 2000 年吉林省西部地区的生态脆弱度主要受气象因素的影响。2006 年和 2012 年,年平均降水和土地利用类型在 2 个年份中权重最大,分别为 0.216,0.204。说明 2006—2012 年吉林省西部生态环境脆弱度主要受气象因素和人为活动共同影响。

表 5 评价指标权重

指标	2000 年	2006 年	2012 年
高程	0.055	0.010	0.008
坡度	0.106	0.047	0.056
年平均降水	0.169	0.216	0.204
年平均气温	0.171	0.144	0.147
年平均湿度	0.165	0.178	0.170
植被覆盖度	0.108	0.072	0.066
土地利用类型	0.098	0.209	0.211
人口密度	0.129	0.027	0.125
人均 GDP	0.089	0.151	0.062
年末实有耕地面积	0.123	0.145	0.083

3.2 生态脆弱性空间分析

根据生态脆弱度分类标准,基于 ArcGIS 10.2 软件中的重分类函数对生态脆弱图进行分类,从而得到吉林省西部地区生态脆弱性分级表(表 6)。并根据 2000 年、2006 年、2012 年吉林省西部地区生态脆弱度可对其进行半方差函数结构和克里格差值,基于 ArcGIS 10.2 区域分析中的分区统计功能可得到不同地区生态脆弱度的空间平均分布(图 1)。

表 6 吉林省西部生态脆弱性分级

等级	综合评价等级	等级范围	2000 年		2006 年		2012 年	
			面积/ km ²	占总面积 百分比/%	面积/ km ²	占总面积 百分比/%	面积/ km ²	占总面积 百分比/%
I	微度脆弱	<0.44	126.347	21.787	98.720	17.023	204.730	35.304
II	轻度脆弱	0.44~0.52	163.668	28.223	252.751	43.585	189.586	32.693
III	中度脆弱	0.52~0.59	85.202	14.692	88.805	15.313	74.188	12.793
IV	强度脆弱	0.59~0.66	56.059	9.666	55.227	9.524	58.175	10.032
V	极强度脆弱	>0.66	148.625	25.629	84.398	14.554	53.222	9.178

根据表 6 可知,2000 年、2006 年、2012 年生态脆弱性指数平均值分别为:0.600±0.129,0.531 9±0.111,0.506±0.118,整体处于中度脆弱水平。2006 年与 2000 年相比,吉林省西部地区轻度脆弱的土地面积增长较快,增加了 15.362%,中度脆弱的面积增长不是很大,增

加了 0.621%,而“微度脆弱”、“强度脆弱”和“极强度脆弱”都有所减少,分别降低了 4.764%,0.142%,11.075%。2012 年较 2006 年相比,吉林省西部地区“轻度脆弱”土地面积增长最快,增长了 18.281%，“强度脆弱”面积有较小幅度的增加,增长了 0.508%,而“轻度脆

弱”、“中度脆弱”、“极强度脆弱”都有不同程度的减少,分别降低了 10.892%,2.52%,5.376%。吉林省西部地区生态环境脆弱度由 2000 年以“轻度脆弱”和“极强度脆弱”为主变为 2006 年以“轻度脆弱”为主,再变为 2012 年以“微度脆弱”和“轻度脆弱”为主的趋势。由图 1 可知,2000—2012 年研究区生态脆弱性空间分布特征明显,呈现自西向东降低的变化特征。整个时间段里,“强度脆弱”和“极强度脆弱”主要分布在研究区西部包括洮南市、白城市和通榆县等。该地区为与研究区西部,人口密度大、气候干燥、盐碱化较为严重,自然环境较为恶

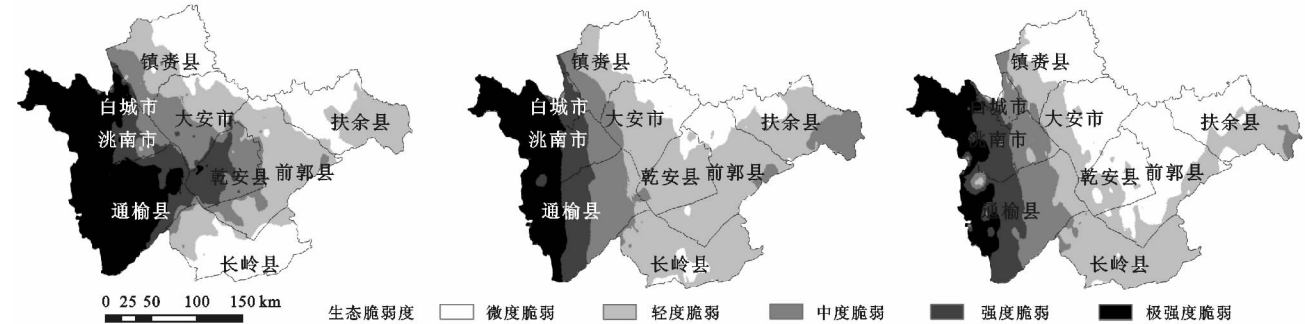


图 1 吉林省西部地区生态环境脆弱性评价

3.3 生态脆弱度变化趋势分析

根据公式(6)—(7),可得到及吉林省西部地区的生态环境脆弱性综合指数和变化率(表 7)。由表 7 可知,吉林省 2000 年、2006 年、2012 年生态环境脆弱指数分别为 2.891,2.610,2.251。在由此可见,吉林省西部地区生态脆弱指数在整个时段内呈下降趋势,可能由于“强度脆弱”和“极强度脆弱”的综合指数均呈不断下降趋势,在一定程度上影响了吉林省西部地区生态环境状况的变化。

表 7 吉林省西部生态环境脆弱性综合指数变化

脆弱性综合指数			综合指数变化率/%		
2000 年	2006 年	2012 年	2000—2006 年	2006—2012 年	2000—2012 年
2.891	2.610	2.251	-4.688	-5.986	-10.673

由吉林省西部生态脆弱度的变化率可知,2000—2006 年、2006—2012 年、2000—2012 年的 R 值均小于 0,说明生态环境呈不断改善趋势。在一定程度上,自然条件的改善和人为活动的限制对研究区生态环境产生了良好影响,加之 2000 年开始吉林省政府加大对西部地区生态环境建设和保护,在对江河洪水调蓄区、防风固沙区、水土流失保护区等实施了生态治理和保护项目^[12],退耕还林、还草等措施已初见成效。在一定程度上减少了生态环境压力缓解了生态环境的脆弱程度。综上所述,吉林省西部十多年来生态环境状态发展较好,但生态环境保护措施和力度仍需提高和加强。

劣。这些自然条件和人为因素特征导致该地区的生态自我修复能力较差,生态问题显著。“中度脆弱”和“轻度脆弱”主要分布在研究区中部,随着年份的增长逐渐向西部扩展。“微度脆弱”主要分布在研究区东部包括前郭县、长岭县等地区。该区域降水量相对较多,植被覆盖度较高,土地盐碱化程度较轻,经济水平较高,加之近些年来的生态环境保护措施的实施和治理力度的加大,对生态环境起到了良好的作用,沙漠化得到基本控制。这些地区抗干扰和生态恢复能力较强,生态环境状况比较乐观。

4 讨论与结论

(1) 吉林省西部地区生态环境脆弱性的空间分布差异明显,自西向东逐渐降低。整体上,研究区的东部和中部地区的生态环境质量较好,生态环境脆弱性较轻。而西部地区由于人类干扰频繁导致生态脆弱性较高。生态脆弱性综合指数(EVSI)表明,2000—2012 年吉林省西部地区生态环境脆弱性不断减弱,生态环境呈不断改善趋势。这与麻素挺等^[26]研究相一致。

(2) 生态指标的权重排名表明,2000—2012 年吉林省西部地区生态脆弱变化的影响因子由以气象因素为主变为以土地利用状况为主。近 10 a 间,由于吉林省西部地区的耕地面积大幅度增加,草地面积大幅度减少,人工建设用地规模不断增长,加剧了土地利用变化^[27]。

本研究主要基于主成分分析方法进行对生态脆弱性进行评价。基于主成分分析方法能够实现对原始数据的降维,并考虑了时间序列的变化^[28],从而实现了生态脆弱度动态评价,保证了数据的统一性和可比性,从而为区域生态环境评价提供了科学依据。但在构建指标体系时,较多考虑数据资料的可获得性,对其他影响生态环境的重要因子如土壤农药用量、水资源开发度等较难获取的指标并未纳入生态环境评价体系中,评价指标如人类社会经济活动的量化比较困难,有一定的局限性,无疑会对评价结果造成一定

的影响,对今后的评价指标的选择和等级的划分具有一定的主观性。因此,对于指标的合理选取和评价体系的制定,需后续研究进一步完善。

参考文献:

- [1] Ippolito A, Sala S, Faber J H, et al. Ecological vulnerability analysis: A river basin case study[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(18): 3880-3890.
- [2] 毛晓曦,郭云继,崔江慧,等.滨海生态脆弱区土地生态系统服务价值动态变化分析:以黄骅市为例[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(2): 249-254.
- [3] 靳毅,蒙古军.生态脆弱性评价与预测研究进展[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(11): 2646-2652.
- [4] 周永娟,仇江啸,王姣,等.三峡库区消落带生态环境脆弱性评价[J]. *生态学报*, 2010, 30(24): 6726-6733.
- [5] 张德君,高航,杨俊,等.基于GIS的南四湖湿地生态脆弱性评价[J]. *资源科学*, 2014, 36(4): 874-882.
- [6] Metzger M J, Rounsevell M D A, Acosta-Michlik L, et al. The vulnerability of ecosystem services to land use change[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 114(1): 69-85.
- [7] 钟晓娟,孙保平,赵岩,等.基于主成分分析的云南省生态脆弱性评价[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(1): 109-113.
- [8] 陈佳,杨新军,尹莎,等.基于VSD框架的半干旱地区社会—生态系统脆弱性演化与模拟[J]. *地理学报*, 2016, 71(7): 1172-1188.
- [9] 廖炜,李璐,吴宜进,等.丹江口库区土地利用变化与生态环境脆弱性评价[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(11): 1879-1889.
- [10] 廖雪琴,李巍,侯锦湘.生态脆弱性评价在矿区规划环评中的应用研究:以阜新矿区为例[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(10): 1891-1896.
- [11] 乔青,高吉喜,王维,等.生态脆弱性综合评价方法与应用[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(5): 117-123.
- [12] 吉林省地方志编纂委员会.吉林省志:自然地理卷[M]. 长春:吉林人民出版社,1992.
- [13] 吉林省统计局.吉林统计年鉴[Z]. 长春:吉林大学音像出版社,2001-2013.
- [14] 于国强,杜保佳,刘吉平.1986—2012年吉林省西部湿地生态系统脆弱性评价[J]. *湿地科学*, 2016, 14(3): 439-445.
- [15] 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.
- [16] Xia X S, Zhu X F, Yue-Chen L I, et al. Evaluation for vulnerability of agroecological environment in Three Gorges Reservoir area (Chongqing section) based on AHP-PCA entropy combination weight mode [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2016, 47(4): 548-556.
- [17] 张丽谦,韩海荣,刘利,等.山地森林生态脆弱性评价指标体系构建与应用:以北京百花山自然保护区为例[J]. *林业资源管理*, 2011(1): 67-71.
- [18] 王延平,刘霞,姚孝友,等.淮河流域沂蒙山区水土保持生态脆弱性的AHP分析[J]. *中国水土保持科学*, 2010, 8(3): 20-27.
- [19] 姚雄,余坤勇,刘健,等.南方水土流失严重区的生态脆弱性时空演变[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 735-745.
- [20] 姚坤,吴亮,相恒星,等.凉山地区生态脆弱性的时空变化[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(1): 329-334.
- [21] 向楠,李俊清,于琳倩.内蒙古鄂温克族自治县生态脆弱性动态研究[J]. *西北林学院学报*, 2014, 29(4): 93-97, 150.
- [22] 茶增芬,张翊,李银富,等.基于全局主成分分析的罗平县资源环境承载力动态评价[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(32): 43-46, 52.
- [23] 吴健生,宗敏丽,彭建.基于景观格局的矿区生态脆弱性评价:以吉林省辽源市为例[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(12): 3213-3220.
- [24] 王敏,熊丽君,黄沈发,等.崇明生态岛建设的生态环境指标体系研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(3): 341-344.
- [25] 黄润,朱诚,葛向东,等.皖西大别山西北坡水土流失与生态修复[J]. *水土保持通报*, 2004, 24(6): 90-93.
- [26] 麻素挺,汤洁,林年丰.基于GIS和RS多元空间信息的吉林西部生态环境综合评价[J]. *资源科学*, 2004, 26(4): 140-145.
- [27] 黄方,刘湘南,张养贞. GIS支持下的吉林省西部生态环境脆弱态势评价研究[J]. *地理科学*, 2003, 23(1): 95-100.
- [28] 陈涛.中部六省经济发展状况分析:基于SPSS主成分分析方法[J]. *湖南工业职业技术学院学报*, 2008, 8(4): 30-42.