

基于景观格局的榆阳区生态脆弱性评价

封建民, 郭玲霞, 李晓华

(咸阳师范学院 资源环境与历史文化学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要:为了定量评价榆阳区生态脆弱性的空间差异,为区域土地利用规划和环境保护提供依据,选取景观分维数、破碎度、连通性和优势度 4 个景观格局指数,以及人类活动干扰强度、地形指数、景观与荒地的邻接度,从生态系统压力度、敏感性和恢复力 3 个方面出发构建生态系统脆弱度评价模型,对榆阳区主要的生态系统及各乡镇的生态脆弱性进行了综合定量的分析和评价。结果表明:各生态系统中,水体的生态脆弱性最高,为 0.319 3,草地和林地次之,分别为 0.095 9,0.068 4,耕地最低,为 0.047 4;24 个乡镇中,小纪汗乡、榆阳镇、鱼河镇和鱼河峁镇最高,分别为 0.056 6,0.058 8,0.057 5,0.059 9,岔河则乡最低,为 0.019 8;空间上,生态脆弱性由中部向东、西两个方向逐渐减弱;从区域上来看,生态脆弱性南部黄土丘陵沟壑区>中部过渡区>风沙草滩区;景观分布格局,地形、矿区、居民点等人为干扰是影响生态脆弱性空间分异的主要原因。

关键词:景观格局;生态脆弱性;榆阳区

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)06-0179-06

Analysis of Ecological Vulnerability in Yuyang District Based on Landscape Pattern

FENG Jianmin, GUO Lingxia, LI Xiaohua

(College of Resources & Environment and Historical Culture, Xianyang Normal University, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: In order to quantitatively assess the spatial difference of ecological vulnerability in the Yuyang District of Northern Shaanxi Province, and provide a support for land use planning and environmental projection, an assessment index system was developed from the aspects of ecological supporting pressure, ecosystem sensitivity, and ecological resilience by using landscape fractal dimension, fragmentation, dominance, connectivity, human disturbance intensity, adjacency degrees of landscape with wasteland and topographic index. Then according to the distribution characteristics of rural landscape, the map of ecological vulnerability distribution was made, and spatial difference of the ecological vulnerability was analyzed and assessed. The results showed that: (1) among the various types of ecosystems, water body had the highest ecological vulnerability, followed by the grassland and woodland, while the farmland had the lowest one, with the values of 0.319 3, 0.095 9, 0.068 4 and 0.047 4, respectively; (2) among the entire 24 towns, Xiaojihan, Yuyang, Yuhe and Yuhemao had the highest ecological vulnerability, while Chaheze had the lowest one, with the values of 0.056 6, 0.058 8, 0.057 5, 0.059 9 and 0.019 8, respectively; (3) ecological vulnerability appeared gradually weakening trend from central section to east and west. In the three landform patterns, the southern loess hilly-gully region had the highest ecological vulnerability, followed by the central transition area and northern wind-sandy grass shoal area. The dominant factors affecting the spatial pattern of the regional ecological vulnerability were land use pattern and topography, whereas the major factors inducing spatial heterogeneity of ecological vulnerability were human disturbances such as mining and settlement. In the following land resources exploitation and utilization, more attention should be paid to reduce the disturbance of human activities on the ecological systems, and protect landscape with high vulnerability such as woodland and grassland, thus reduce the vulnerability of the regional ecosystem.

Keywords: landscape pattern; ecological vulnerability; Yuyang District

收稿日期:2015-06-05

修回日期:2015-12-30

资助项目:国家自然科学基金(41261040,41661042);陕西省普通高等学校优势学科建设项目—历史地理学(0602);陕西省教育厅专项科研计划项目(15JK1785);咸阳师范学院科研计划项目(13XSYK030)

第一作者:封建民(1972—),男,陕西省凤翔县人,博士,副教授,研究方向为环境遥感与土地利用。E-mail:feng_jianmin@aliyun.com

生态脆弱性是指生态系统自身的不稳定性及对外界干扰的敏感性^[1],这种不稳定性及敏感性往往使系统在面对超过自身恢复能力的外界干扰时,朝着不利于自身和人类开发利用的方向发展^[2]。自 20 世纪 80 年代以来,生态脆弱性的研究成为景观生态学研究的热点和重要研究领域^[3-4]。开展生态脆弱性研究不仅对保护环境具有重要意义,同时也对区域土地资源合理利用及可持续发展具有重要指导意义。目前学术界普遍认为,脆弱性是可度量的^[5-6],并且与生态系统暴露、受干扰程度和自身适应性、敏感性、恢复力和稳定性等因素密切相关^[7-8]。景观空间格局指数高度浓缩了景观格局信息,包含了景观结构信息和景观类型对外界环境的响应特征,因而可以准确地反映各景观类型的脆弱性。近年来,国内外学者在区域生态环境脆弱评价方面开展了大量的研究。但值得注意的是,在评价指标体系上没有统一标准,多是以自然环境、社会经济等离散的统计数据作支撑,从自然、社会、经济和环境 4 个维度^[9],或者自然和社会两个维度^[10]来建立评价指标体系;在景观格局指数选取上,一般从斑块、类型或景观 3 个层次出发,选取破碎度、分维数、分离度等指数来构建景观干扰度指数,用以表征人类活动的干扰强度^[11],而对不同景观格局指数所表征生态脆弱性的基本属性差异没有区分;在各指标权重赋值上则多采用 AHP 法,人为因素影响较大,难于客观反映各指标在评价指标体系中的贡献和重要程度。

榆阳区是能源富集、生态脆弱的典型区域,在地貌、气候、植被、景观上均呈明显的过渡性特征。近 10 a 来随着城市化进程的加快和矿产开发力度的加大,生态系统受到严重的人为干扰,对榆阳区开展生态脆弱性研究具有必要性和典型性。因此,本文从生态系统的状态、压力和响应 3 个方面出发,结合榆阳区的实际情况,参照已有的研究成果^[12],基于景观格局指数,从生态系统压力度、敏感度和恢复力 3 个方面构建脆弱性评价指标体系,采用熵权法对各指标赋权重,对研究区自然、半自然生态系统和各行政区域单元的生态脆弱性进行分析和评价,为研究区土地利用规划、区域生态环境保护和环境经济协调发展提供科学依据和决策参考。

1 研究区概况

榆阳区位于陕西省北部、榆林市中部,范围位于东经 108°56′—110°24′,北纬 37°49′—38°30′,地处陕北黄土高原丘陵沟壑区向毛乌素沙地的过渡地带,是典型的风沙过渡区、农牧交错区和生态脆弱区;东西宽 128 km,南北长 124 km,总面积为 705 300 hm²。地势呈东北高,中部、南部低的特点,海拔最高 1 413

m,最低 870 m,地形地貌以长城为界可分为 2 个区域,长城以北为广阔无际的风沙草滩区,地势开阔平坦,沙丘、草滩交错分布,约占总面积的 75%,土地利用以沙地、灌木林地、草地和水浇地为主;长城以南为黄土丘陵沟壑区,区内梁峁起伏,沟壑纵横,约占全区总面积的 25%,土地利用以旱地、草地和林地为主。榆阳区属于中温带干旱、半干旱大陆性季风季候,寒暑剧烈,雨水不均,气候干燥,四级分明,冬季严寒、夏季燥热,日照时间长、昼夜温差大,日照充足,年平均气温 8.8℃,历年无霜期平均为 155 d,历年平均降雨量 412.2 mm,全年日照时数为 2 666.6 h。全区下辖 24 个乡镇,人口 42 万。

2 研究方法

2.1 数据源及信息提取

本研究以 2010 年 9 月 12 日分辨率为 5 m 的 Rapideye 影像,1:5 万地形图和 30 m 分辨率的 DEM 为基本数据源。景观类型的分类标准以 2007 年 8 月颁布的《土地利用现状分类》^[13]为基础,根据研究需要和榆阳区实际情况,将研究区土地利用类型归纳划分为耕地(水浇地和旱地)、林地(有林地和灌木林地)、草地、水域、工矿建设用地(工矿用地和建设用地)、荒地(沙地和裸地)6 个类型。数据处理过程主要为:(1)利用 ERDAS 9.2 软件对影像进行融合、校正、裁剪等预处理。(2)在 ERDAS 9.2 软件中应用监督分类方法对影像进行解译分类获得土地利用数据。在数据获取过程中,根据各种地物的判读标志,参考研究区相关年份土地利用数据,并结合野外实地调查,对解译分类结果进行多次校正,最终得到精度较高的土地利用空间数据。(3)运用 ArcGIS 9.3 平台对 DEM 进行坡度提取,计算地形指数;采用缓冲区分析、叠置分析计算扰动指数;运用 Fragstats 3.3 软件计算景观格局指数。

2.2 评价指标的选取与计算

参照已有的研究成果,从生态系统压力度(Pressure)、敏感度(Sensitivity)和恢复力(Resilience)三个方面构建脆弱性评价指标体系。压力度、敏感度和恢复力的评价采用综合评价法,即将各自对应的评价指标进行加权求和,计算其值的大小。各自对应的评价指标及计算如下:

2.2.1 生态压力度评价指标的选取与计算 生态压力度由分维数、扰动指数和景观与荒地的边界邻接度 3 个指标来衡量。各指标的计算公式和含义如下^[14]:

(1) 分维数(fractal dimension, FD),计算公式为:

$$FD = 2 \log(p/4) / \log_2 A$$

式中:A 为斑块的总面积;p 为斑块的周长。分维数反映景观形状的复杂程度和空间稳定程度,其值的大

小与受干扰程度密切相关,一般来说,受干扰小的景观,其分维数值高,而受干扰大的景观分维数值低,故取分维数倒数来反映景观类型受干扰的程度,其值越高,表示干扰越强烈。

(2) 扰动指数(disturbance index, DI)。扰动指数用来衡量人类活动对生态系统的影响。研究表明,人类活动对生态系统的影响程度与距离存在递减关系^[15]。以提取出的居民区、矿区为基础,设 300, 600, 1 000 m 三个缓冲区,分别赋值 0.85, 0.35, 0.15, 同时考虑累计影响,如果受到多个居民区或矿区不同程度的影响,则累加影响值。计算公式如下:

$$DI_i = \sum_{j=1}^3 A_{ij} W_j / A_i$$

式中: A_{ij} 为景观 i 在第 j 个缓冲区的面积; W_j 为第 j 个缓冲区的权重; A_i 为景观 i 的总面积。

(3) 景观与荒地的边缘邻接度(boundary adjacency degree, BAD), 计算公式如下:

$$BAD_i = L_{ih} / L_i$$

式中: L_{ih} 为景观 i 与荒地邻接的边缘长度; L_i 为景观 i 边缘总长度。

景观与荒地的边缘邻接度越高,其安全程度越低,受荒地的威胁程度越高。

2.2.2 生态敏感度评价指标的选取与计算 生态敏感度由景观破碎度和地形指数来衡量。各指标的计算公式和含义如下:

(1) 景观破碎度

$$C_i = N_i / A_i$$

式中: C_i 为景观 i 的破碎度; N_i 为景观 i 的斑块数; A_i 为景观 i 的总面积。景观破碎度是区域生态脆弱性评价中最常用的指标,是景观格局由连续变化的结构向斑块变化的过程的度量,景观破碎度越高,抗外界干扰能力越差,生态敏感性越高。

(2) 地形指数(topographic index TI)。地貌是影响生态系统脆弱性的重要因子,在一定的地形坡度下,地表处于潜在不稳定状态,当受到人类破坏,在流水和重力作用下极易加速侵蚀退化,一般坡度越大,景观反映越敏感,造成的侵蚀退化程度越大。根据已有的研究成果和榆阳区地形特征,设微坡($2^\circ \sim 5^\circ$)、较缓坡($5^\circ \sim 8^\circ$)、缓坡($8^\circ \sim 15^\circ$)和陡坡($> 15^\circ$) 4 个坡度级,分别赋值 0.1, 0.3, 0.5, 0.9。地形指数的计算公式如下:

$$TI = \sum_{j=1}^4 A_{ij} W_j / A_i$$

式中: A_{ij} 为景观 i 在第 j 个坡度级的面积; W_j 为第 j 个坡度级的权重; A_i 为景观 i 的总面积。地形指数越大,系统抗外界干扰能力越差,生态敏感性越高。

2.2.3 生态恢复力评价指标的选取与计算 生态恢复力因子包括优势度和景观连通性指数。优势度采用最大斑块指数(LPI)衡量,LPI 指数越大,表示该类型景观抗外界干扰能力越强,即在相同压力的情况下,其恢复力越强。景观连通性指数采用 IIC(Integral Index of Connectivity)指数衡量,并设定 200 m 的距离阈值。景观连通性指数越高,表示该类型生态系统中物质、能量流动越便利,生态系统越稳定,恢复力越强。

2.3 指标权重赋值

采用熵权法对各指标赋权值。熵权法是一种在综合考虑各因素提供的信息量的基础上计算一个综合指标的数学方法,它可以最大限度地克服主观因素的影响,客观地反映各个指标所含的信息量,真实的反映其重要程度和贡献^[16]。为了消除量纲的影响,取各乡镇该类指标的值与 24 个乡镇该类指标总和的比值进行标准化处理。在 Excel 软件中运用熵权法计算各指标的权重(表 1)。

表 1 神木县生态系统脆弱性评价指标体系

标价指标	参数	景观类型			
		耕地	林地	草地	水体
生态压力度(P)	分维数倒数	0.1716	0.2022	0.2465	0.2107
	扰动指数	0.3500	0.3887	0.3829	0.3332
	与荒地邻接度	0.4784	0.4091	0.3706	0.4561
生态敏感度(S)	破碎度	0.3715	0.5149	0.4971	0.4310
	地形指数	0.6285	0.4851	0.5029	0.5690
生态恢复力(R)	优势度	0.7338	0.3603	0.8658	0.4083
	连通性	0.2662	0.6397	0.1342	0.5917

从生态压力度指标来看,分维数倒数影响最大的是草地,其次为水域和林地,对耕地的影响最小;工矿、建设用地对林地和草地的影响高于水域和耕地,这可能是由于在经济发展过程中,这两类用地最容易被侵占而向其他用地转化;荒地、耕地和水体的邻接度较高,因而对这两类景观产生的压力也较大,而对

草地影响最小。从生态敏感性指标来看,景观破碎度对林地的影响最大,对草地的影响次之,对耕地的影响最小;而地形指数则相反,对耕地的影响最大,对林地的影响最小。从生态恢复力来看,景观连通性指数对林地和水域的影响较大,对草地的影响最小;而草地的优势度权重值最大。

2.4 生态脆弱性指数(CVI)

生态脆弱性是压力度,敏感度和恢复力的函数,随敏感性和压力度的增大而增大,随恢复力的增大而减小,其评价模型如下^[17]:

$$CVI = P \times S/R$$

利用景观类型脆弱性指数和景观类型面积的比重来计算区域生态脆弱性指数(RVI),计算公式如下^[18]:

$$RVI = \sum \frac{A_i}{A} CVI$$

式中:RVI为各乡镇的自然生态系统脆弱性; A_i 为各乡镇景观*i*的面积;A为所在乡镇生态系统总面积。

3 结果与分析

3.1 景观类型的生态脆弱度

根据上述公式计算出各个乡镇的生态脆弱性(表2)。综合分析研究区各景观类型脆弱度排序为:水体>草地>林地>耕地。这表明水体景观稳定性不强,对外界干扰反映敏感,恢复力差,在受到外界较大干扰后发生退化的机率大。

林地是榆阳区面积最大的用地类型,面积为276 362.1 hm²,占总面积的39.18%,主要连片分布在南部黄土丘陵沟壑区和北部风沙区的红石桥乡,在其他乡镇也有零星分布。总体来讲林地破碎度大,与荒地邻接度高,人类活动对其影响大,但因为其分布较为集中,优势度大而连通性好,恢复力强,因而其脆弱性较弱。从区域上来看,北部风沙草滩区脆弱性远大于南部丘陵沟壑区。各乡镇中,小壕兔乡林地面积少,景观破碎度最大、连通性最差,敏感性最强因而其脆弱性最高;余兴庄乡地处丘陵沟壑区,林地分布广,受人类活动干扰较小,压力度低,景观连通性最大,恢复力最强,因而其脆弱性也最低,但受地形影响较大,敏感性高,表明受到外界干扰极易发生退化,因而有必要采取措施严格限制开发,以确保良性发展。

草地是榆阳区第2大用地类型,总面积为220 091.4 hm²,占总面积的31.21%,主要分布于北部风沙草滩区,长期受过度放牧等因素的影响,退化严重,其脆弱性较强。从区域上来看,南部丘陵沟壑区脆弱性大于北部。各乡镇中,鱼河镇草地面积少,分布零散,景观破碎度较大,优势度小,恢复力为各乡镇中最小,因而脆弱性最高;小壕兔乡草地分布广,连通性高,地形指数和破碎度最低,因而其脆弱性最低。

耕地占全区总面积的14.95%,空间上分布较为均匀,北部脆弱性小于南部,但从扰动指数来看,北部乡镇耕地受人为干扰较为强烈,表明在煤矿开发中对耕地破坏严重,因而要注重对耕地的保护。在24个乡镇中,鱼河崮镇脆弱性最高,牛家梁镇最低。主要

原因是鱼河崮镇位于丘陵沟壑区,耕地基本为山旱地,受地形分割严重、破碎度大、连通性差、优势度低,而牛家梁镇为连片分布的水浇地,地形指数和破碎度最小,优势度指数表明其恢复力较高,因而脆弱性低。

榆阳区水域较少,面积仅有3 330.18 hm²,占全区面积的0.47%,重要分布在中部和北部的马合镇。总体人类活动对其干扰强烈,破碎度高,优势度低,因而最为脆弱。北部和南部水域主要以湖泊和水库为主,受人为影响较大,破碎度高,连通性和优势度低,脆弱性大;中部基本为河流,连通性好,恢复力强,脆弱性弱。各乡镇中马合镇水体的生态脆弱性最低,小纪汗乡最高。值得注意的是,北部的小纪汗、岔河则、巴拉素、榆阳、孟家湾等乡镇受煤矿开发影响大,扰动指数都远大于其他乡镇,加之采矿会侵占水域,或者引起地面沉降甚至塌陷,采矿排放的砷、硫、磷等会对水域造成严重污染,因而在这些乡镇对水域的保护至关重要。

3.2 生态脆弱度的空间差异

各乡镇的区域生态系统脆弱性指数中,小纪汗乡、榆阳镇、鱼河镇和鱼河崮镇最高,均大于0.055,岔河则乡最低,仅0.019 8。其中鱼河镇和鱼河崮镇的林地占52.50%和66.01%,耕地占31.68%和29.58%,林地和耕地处于绝对优势,对其生态系统脆弱性影响较大,榆阳镇工矿建设用地所占比例最大,因而人类活动对生态系统影响也最为强烈,小纪汗乡林草植被占63%以上,受荒地分割严重。对于生态脆弱性较高的乡镇,需要重点保护其生态脆弱性较高的用地类型,如鱼河镇和鱼河崮镇的耕地、林地,岔河则乡的草地、林地,通过退耕后及时恢复林草植被,合理开发利用等保护措施,提高区域生态系统的完整性和稳定性,降低其生态脆弱性,保证整个生态系统健康运行。

为了更好的展示生态脆弱性的空间差异,在ArcGIS中按照Natural Breaks方式将各乡镇生态脆弱性分为5个等级(图1)。可以看出,生态脆弱性在空间上相间分布,沿马合镇—榆阳镇—鱼河镇一线向东、西呈现逐渐减弱的趋势,从面积上来看,3级脆弱区范围较大,占26.02%,4级脆弱区次之,占21.61%,2级、5级和1级脆弱区较少,分别占18.12%,17.96%和16.28%。从区域上来看,生态脆弱性由大到小排序为丘陵沟壑区>过渡区>风沙草滩区。其中黄土丘陵沟壑区属于一级脆弱区的面积占24.7%,三级占43.16%,其余为二级、四级和五级脆弱区。丘陵沟壑区地势西北高,东南低,土地利用以林地和草地为主,耕地占全县耕地总面积的25%以上,地貌上以丘陵为主,水力侵蚀强烈,地形破碎,人类向山要地,砍伐、放牧等人为干扰强烈,尽管没有矿产开

采,但整体上景观破碎度高,连通性差,在四类生态系统中林地和水体的生态脆弱性最高,草地最低。因此丘陵沟壑区应减少对林地的开发、破坏,提高土地利用的有效性。过渡区三级脆弱区面积最大,占 49.62%,一级比例小于丘陵沟壑区,本区人类活动干扰较小,景观上以自然生态系统为主,林地和草地占 89.34%。风沙草滩区 1 级脆弱区仅占 14.18%,二

级脆弱区占 28.86%,40%以上为 4 级和 5 级脆弱区。本区地势较高,地形波状起伏较为平坦,风力侵蚀强烈,土地利用以沙地和草地为主,本区处于神府煤田腹地,矿点均匀分布于东部乡镇,人类活动干扰最为强烈,在 4 类生态系统中草地和耕地的生态脆弱性较高,林地最低。因此在矿产开发过程中加强对草地和耕地的保护显得尤为重要。

表 2 神木县各乡镇生态系统脆弱性与区域生态脆弱性

区域	乡镇	耕地	林地	草地	水域	区域	等级
风沙草滩区	红石桥乡	0.0653	0.0180	0.0524	0.0662	0.0263	4
	补浪河乡	0.0073	0.0512	0.0214	0.1669	0.0268	4
	巴拉素镇	0.0238	0.0513	0.0111	1.3473	0.0243	5
	小纪汗乡	0.0257	0.2665	0.0067	1.5353	0.0566	1
	马合镇	0.0089	0.2184	0.0194	0.0008	0.0392	2
	岔河则乡	0.0085	0.0357	0.0108	0.1343	0.0198	5
	孟家湾乡	0.0096	0.1095	0.0045	0.0275	0.0354	3
	小壕兔乡	0.0117	0.3236	0.0017	0.2158	0.0474	2
	芹河乡	0.0114	0.0808	0.0397		0.0429	2
	金鸡滩镇	0.0078	0.0727	0.0071		0.0263	5
	加权平均	0.0499	0.0262	0.0612	0.0371	0.0356	
	牛家梁镇	0.0064	0.0342	0.0530	0.0041	0.0305	3
	榆阳镇	0.0894	0.0818	0.2019	0.0463	0.0588	1
	青云镇	0.0815	0.0237	0.0548		0.0346	3
过渡区	麻黄梁镇	0.1352	0.0486	0.0138	0.0333	0.0344	3
	大河塔镇	0.0614	0.0391	0.0219	0.9543	0.0282	4
	加权平均	0.0306	0.0260	0.0496	0.0542	0.0369	
	鱼河镇	0.0237	0.0591	0.2821	0.0120	0.0575	1
	古塔镇	0.0618	0.0117	0.2197	0.6054	0.0348	3
	刘千河乡	0.1113	0.0203	0.0315	0.4669	0.0310	3
	安崖镇	0.0667	0.0061	0.1415		0.0305	3
黄土丘陵沟壑区	余兴庄乡	0.0866	0.0053	0.1700	0.3773	0.0260	4
	鱼河峁镇	0.1477	0.0101	0.2729	0.1050	0.0599	1
	清泉镇	0.0217	0.0097	0.1470	0.2562	0.0231	5
	上盐湾镇	0.0208	0.0210	0.2488	0.0134	0.0246	5
	镇川镇	0.0447	0.0428	0.2691	0.0172	0.0434	2
	加权平均	0.0320	0.0595	0.0188	0.0572	0.0371	
	全县加权平均	0.0474	0.0684	0.0959	0.3193	0.0474	



图 1 研究区生态系统脆弱性空间分异

4 结论

(1) 各景观类型生态脆弱性表明,榆阳区水体的生态脆弱性最高,草地和林地次之,耕地最低。在今后的土地资源利用中,需要重点保护脆弱性较高的用地,如巴拉素镇和小纪汗乡的水体,鱼河镇和鱼河峁镇的林地,岔河则乡的草地、林地等,以降低整个区域生态系统的脆弱性,提高其稳定性。

(2) 区域生态脆弱性显示,24 个乡镇中,小纪汗乡、榆阳镇、鱼河镇和鱼河峁镇最高,均大于 0.055,岔河则乡最低。从区域上来看,生态脆弱性黄土丘陵沟壑区 > 过渡区 > 风沙草滩区,其中丘陵沟壑区林地的生态脆弱性最高,水体最低;过渡区草地和水体脆弱性较高,林地最低;风沙草滩区草地和耕地的脆弱

性最高,而林地最小。各乡镇在开发过程中应尽量减少人类活动对生态系统的干扰,降低生态敏感性,增强其恢复力,从而降低其生态脆弱性。

参考文献:

- [1] 邱彭华,徐颂军,谢跟踪,等. 基于景观格局和生态敏感性的海南西部地区生态脆弱性分析[J]. 生态学报, 2007,27(4):1257-1264.
- [2] 刘晶,刘学录,侯莉敏. 祁连山东段山地景观格局变化及其生态脆弱性分析[J]. 干旱区地理,2012,35(5):795-805.
- [3] Tixier J, Dandrieux A, Dusserre G, et al. Environmental vulnerability assessment in the vicinity of an industrial site in the frame of ARAMIS European project[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006,130(3):251-264.
- [4] 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.
- [5] 张笑楠,王克林,张伟,等. 桂西北喀斯特区域生态环境脆弱性[J]. 生态学报,2009,29(2):749-757.
- [6] Birkmann J, Tetzlaff G, Zentel K O. Measuring vulnerability to natural hazards: towards disaster resilient societies[M]. New York: United Nations University, 2006.
- [7] He L I, Pingyu Z. 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.
- [8] 喻鸥,阎建忠,张懿铨. 区域气候变化脆弱性综合评估研究进展[J]. 地理科学进展,2011,30(1):27-34.
- [9] 石青,陆兆华,梁震,等. 神东矿区生态环境脆弱性评估[J]. 中国水土保持,2007(8):24-26.
- [10] 顾康康,刘景双,王洋,等. 辽中地区矿业城市生态系统脆弱性研究[J]. 地理科学,2008,28(6):759-764.
- [11] 卢远,苏文静,华瑾. 基于景观格局和生态敏感性的左江流域生态脆弱性分析[J]. 水土保持研究,2011,18(3):78-82.
- [12] 孙平军,修春亮. 基于PSE模型的矿业城市经济发展脆弱性研究[J]. 地理研究,2011,30(2):301-310.
- [13] 陈百明,周小萍. 《土地利用现状分类》国家标准的解读[J]. 自然资源学报,2007,22(6):994-1003.
- [14] 封建民,郭玲霞,李晓华. 基于景观格局的陕北资源富集区生态脆弱性评价:以陕西省神木县为例[J]. 水土保持通报,2015,35(4):271-276.
- [15] 曹运江,宋伟,冯少真,等. 贵州广致煤矿矿山环境影响范围与程度界定研究[J]. 湖南科技大学学报:自然科学版,2010,25(3):36-41.
- [16] 贾艳红,赵军,南忠仁,等. 基于熵权法的草原生态安全评价:以甘肃牧区为例[J]. 生态学杂志,2006,25(8):1003-1008.
- [17] 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.
- [18] 黄莹,包安明,刘海隆,等. 基于景观格局的新疆生态脆弱性综合评价研究[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(3):261-266.
- [7] 白美兰,郝润全,沈建国. 近46a气候变化对呼伦湖区域生态环境的影响[J]. 中国沙漠,2008,28(1):101-107.
- [8] 王素慧,梁宏伟,杨玉生. 呼伦湖湿地水环境治理对策[J]. 内蒙古水利,2006,105(1):35-40.
- [9] Mann HB. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1945,13(3):245-259.
- [10] Kendall MG. Rank [M]. Correlation Measures, London: Charles Griffin, 1975.
- [11] Hu Y, Maskey S, Uhlenbrook S. Trends in temperature and rainfall extremes in the Yellow River source region, China [J]. Climatic Change, 2012,110(1/2):403-429.
- [12] 陆志华,夏自强,于岚岚,等. 松花江流域年降水和四季降水变化特征分析[J]. 水文,2012,32(2):62-71.
- [13] 顾润源,李思慧,赵慧颖,等. 呼伦湖流域径流对气候变化的响应[J]. 生态学杂志,2012,31(6):1517-1524.
- [14] 郑广芬,陈晓光,孙银川,等. 宁夏气温,降水,蒸发的变化及其对气候变暖的响应[J]. 气象科学,2006,26(4):412-421.
- [15] 吉磊,何新林,刘兵,等. 近50a玛纳斯河流域上游气候变化的分析[J]. 长江科学院院报,2014,31(12):21-27.
- [16] 李敏敏,延军平. “蒸发悖论”在北方农牧交错带的探讨[J]. 资源科学,2013,35(11):2298-2307.
- [17] Stanhill G, Cohen S. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences [J]. Agricultural and forest meteorology, 2001,107(4):255-278.

(上接第178页)