

基于景观格局的干旱区绿洲生态风险评价与管理 ——以青铜峡市为例

韩晓佳¹, 刘小鹏^{1,2}, 王亚娟¹, 温胜强¹, 叶均艳¹

(1. 宁夏大学 资源环境学院, 银川 750021; 2. 宁夏(中阿)旱区资源评价与环境调控重点实验室, 银川 750021)

摘要:干旱区绿洲抗干扰能力弱,开展其生态风险评价具有重要意义。以景观生态学理论为指导,选取青铜峡市作为研究对象,采用三期遥感数据,运用景观格局指数评估生态风险,并对生态风险指数进行空间化,绘制研究区2006年、2010年、2016年的生态风险空间分布图。在此基础上,结合空间统计法分析了研究区生态风险的聚集模式。结果表明:(1)研究期间,青铜峡市景观格局变化明显。耕地、水域和未利用土地的景观破碎度增加,大斑块破碎化趋势明显,区域的景观稳定性降低。景观格局指数的空间分布显示景观破碎度、损失度较高区分布在人口和经济活动聚集的绿洲核心区。(2)研究区的生态风险时空变化差异较大。其中高风险区面积减少最为显著,并随着风险等级之间的转换,中等风险区成为研究区的主要风险类型。生态风险呈现缓和趋势。(3)研究区的生态风险存在显著空间正相关,“低低”和“高高”聚集是主要的生态风险聚集模式,低值为高值包围或高值为低值包围的空间孤立点表现不显著,高低风险之间严重分化是研究区亟待解决的问题。

关键词:景观格局;生态风险;干旱区绿洲;风险管理;青铜峡市

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)05-0285-06

Ecological Risk Assessment and Its Management of Oasis in Arid Area Based on Landscape Pattern —A Case Study in Qingtongxia

HAN Xiaojia¹, LIU Xiaopeng^{1,2}, WANG Yajuan¹, WEN Shengqiang¹, YE Junyan¹

(1. School of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Key Laboratory (China-Arab) of Resource Evaluation and Environmental Regulation of Arid Region in Ningxia, Yinchuan 750021, China)

Abstract: It is of great significance to carry out ecological risk assessment because of the weak anti-interference ability of oasis in arid area. Based on the theory of landscape ecology, we selected Qingtongxia City as the research sample, and used remote sensing data in three periods, and the landscape pattern index to assess the ecological risk, and achieved the spatialization of index, as well as made the spatial distribution maps of ecological risk in 2006, 2010 and 2016. On the basis above, the accumulation mode of ecological risk in the study area was analyzed by spatial statistics. The results showed that: (1) during the study period, the change of landscape pattern was obvious in Qingtongxia City; the fragmentation of cultivated land, water area and unused land increased, the fragmentation trend of large patches was obvious, and the landscape stability decreased; the spatial distribution of landscape pattern index show that the landscape fragmentation and the loss degree of the higher areas distributed in the oasis core area which was gathered by population and economic activity; (2) the spatial and temporal changes of ecological risk in the study area were different; among them, the reduction of high risk area was the most remarkable, and with the conversion of the risk grade, the medium risk area became the main risk type; ecological risk presented the mitigative trend; (3) there was prominent spatial positive correlation between the ecological risks in the study area, the ‘low—low’ and ‘high—high’ accumulations were the main ecological risk accumulation mode, the spatial outliers that low values were surrounded by high values or high values were surrounded by low values were not significant, the serious differentiation between high and low risks is the urgent problem to be solved in the study area.

Keywords: landscape pattern; ecological risk; arid area oasis; risk management; Qingtongxia City

在一定区域内,不确定性的事故和灾害对生态系统造成的不利影响称为生态风险,具有潜在性、不确定性和危害性等特点^[1-2]。随着土地退化、物种灭绝以及环境污染等生态问题相继出现,严重影响和制约了社会经济发展。因此对环境中潜在的不利效应加以评估和识别,并作为风险管理依据应用于风险预警和防范之中^[3],是降低生态风险对生态系统损伤的重要途径。生态风险评价始于 20 世纪 80 年代。历经 30 多年的发展,风险评价的风险源识别由单一的化学污染物扩展到自然灾害、人类活动等宏观因子^[4-6],风险受体也从人体健康扩展到对种群、景观类型以及整个生态系统的研究^[7-9];评价方法由简单的定性描述发展为利用模型法^[10]、嫡值法^[11]并结合 3S 技术^[12]完成定量的计算和空间模拟分析;评价对象的尺度,由流域研究扩展至城市等行政区域^[13-14]。因此,区域生态风险评价便具有了动态性、空间异质性以及综合性等特征。景观格局,综合反映了自然与人为相互作用下产生的区域生态环境,充分体现了生态过程作用在不同研究尺度上的最终结果。基于景观格局的生态风险评价,从景观要素的多样性和空间关系中揭示了区域景观的安全格局,直观地反映出风险压力因子的空间分布规律和风险值梯度演变特征^[15],是目前生态风险研究与评估热点。

绿洲是干旱区内人类生产生活发展的主要空间,是自然与人文要素共同作用下的复合生态系统^[16],属干旱区内特有的生态景观现象。干旱区绿洲的生态安全,直接关系到干旱区的生存环境安全与社会经济发展。因此,对绿洲生态系统的稳定性研究成为近年来干旱区的研究热点,大多集中在绿洲的形成机制与演化规律^[17]、土地覆被变化^[18]以及景观格局^[19]研究上。其中,基于绿洲景观的高度异质性和强烈人为干扰下形成的景观独特性,从景观格局视角研究绿洲生态安全,能充分揭示绿洲景观特征,是评价绿洲生态安全的有效方法。

青铜峡市位于宁夏平原中部,属西北内陆干旱区,境内黄河过境水量约 400 亿 m^3 ,有得天独厚的引黄灌溉条件,是典型干旱区绿洲地带,脆弱性与环境敏感性是其生态环境典型特点。而近年来,随着人类活动的扩张,加之实施的宁夏“十二五”中南部生态移民工程带来的新生态压力,预防和解决青铜峡市面临的生态风险刻不容缓。本研究立足于这一典型区域,选取 2006 年、2010 年和 2016 年三期 TM 遥感影像为数据基础,依据景观生态学原理,结合研究区当地

实际情况构建景观生态风险指标,运用景观格局分析软件 Fragstats 3.4 计算景观指数。在 ArcGIS 平台上,揭示生态风险的空间分异,为研究区的生态风险管理提供科学依据,对于保障整个干旱区生态系统功能与稳定性具有重要意义。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

青铜峡市位于黄河上游,宁夏平原的中部,隶属吴忠市,地处 $105^{\circ}22'—109^{\circ}09'E$, $37^{\circ}41'—38^{\circ}33'N$,南北长 60 km,东西宽 30 km,市辖 8 个镇和 2 个场。地势由西南向东北自高而低呈现阶梯状分布,境内地貌可分为山地、丘陵、洪积扇、黄河冲积平原以及库区 5 大类地貌类型,属中温带大陆性气候,年降水量约 260.7 mm,四季分明,昼夜温差较大,水资源较为丰富,是宁夏回族自治区重要的工业基地之一。“十二五”期间,宁夏实施了大规模的生态移民工程,移民人口约 7.65 万户(32.9 万人),涉及南部山区原州、西吉、隆德、泾源、彭阳、同心、海原等县区。其中青铜峡市,共承接 2.75 万来自南部山区的移民,建成有 4 个生态移民安置区。

1.2 研究方法

研究数据来源于研究区 2006 年、2010 年和 2016 年三期分辨率为 30 m 的 Landsat TM 遥感影像(L129R34)。以 ENVI 5.1 为图像处理平台,采用监督分类、目视解译和实地验证相结合的方法对研究区的遥感影像进行解译。结合研究区的土地利用现状,将景观类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地 6 种作为风险受体。选取样本分离度均高于 1.87,三期影像解译 Kappa 指数分别是 0.84, 0.85, 0.83,达到解译精度需求。最后分别得到三期景观类型图。借鉴巩杰等^[20]学者的相关研究,构建包括景观结构指数、景观脆弱度指数和生态风险综合指数在内的景观格局风险指标体系。

1.2.1 景观结构分析 人类活动通过土地利用影响区域的生态系统。在区域生态系统受到干扰后,风险受体的变化显著地表现在景观结构的空间组成上。而景观结构指数用以反映景观生态系统遭受到外界压力干扰和胁迫程度。考虑青铜峡市的实际情况,本研究选取景观破碎度(C_i)、景观分离度(D_i)和面积周长分维度(F_i)衡量景观的空间结构变化,参考相关研究文献,将三项指数通过附加权重后可得到景观结构指数(S_i)。

$$S_i = aC_i + bD_i + cF_i$$

式中: a, b, c 为各个指标的权重,权重的大小,依据已有学者的相关研究^[21],并运用专家打分法,分别赋值为0.5、0.3、0.2。

1.2.2 脆弱性分析 不同景观类型其本身的脆弱程度不同,在受到风险源干扰后呈现出不同程度上的损害。景观脆弱度指数(V_i)表明该类型景观对外部干扰的抵抗能力。对于易损数值的确定,常采用专家赋值归一化处理和层次分析法。本研究在借鉴已有的研究成果和经验^[22],结合研究区景观的实际情况,采用专家赋值法,对6类景观脆弱性分级打分,最后进行归一化处理得到各类景观的脆弱度指数 V_i ,对其由高到低依次排序为未利用土地(0.285 7)、水域(0.238 1)、耕地(0.190 5)、草地(0.142 9)、林地(0.095 2)、建设用地(0.047 6)。而景观损失度(R_i)指数,用以描述不同景观类型在遭受到干扰后所受到生态损失的多少,是由一种土地类型景观的景观结构指数(S_i)和景观脆弱度指数(V_i)相乘而得到:

$$R_i = S_i \times V_i$$

1.2.3 综合生态风险分析 基于景观结构的变化分析,仅能从表面体现区域生态风险的特征变化,为了更好地描述研究区综合生态风险,构建起景观结构与生态风险的联系,需利用每一类型景观的损失度指数与该类型景观的面积比重来量化区域综合生态风险(ERI)。

$$ERI_i = \sum_{j=1}^n \frac{A_{ij}}{A_j} R_i$$

式中: A_{ij} 是风险小区内第*i*类景观的面积; A_j 是风险小区的面积; R_i 是第*i*类型景观的生态损失度; n 是景观类型;ERI是第*i*个风险的生态风险指数。

依据景观生态学中对景观样本的基本要求,即样本面积应介于平均斑块面积的2~5倍^[23],将青铜峡市以3 km×3 km网格划分单元进行采样,共243个风险小区。分别计算各个风险小区的综合生态风险值,利用ArcGIS中的Kriging空间插值法,将量化后的生态风险指数转化成为空间分布形式。

1.2.4 空间自相关分析 探究区域内生态风险的空间异质性规律一般采用空间统计学方法进行分析^[24-25]。其中,运用空间自相关分析法可以分析风险小区的风险取值与相邻风险区值的相似程度,即空间正相关为某一风险小区的取值与其相邻区取值有相同的变化趋势,相反则为空间负相关。空间自相关的相似度一般采用Moran指数进行刻画,一般分为全局Moran指标和局部Moran指标。其中局部Moran指数可揭示研究区局部空间变异情况以及与相邻间风险小区的空间关系,其计算公式为:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{S}, S = \frac{1}{n} \sum_i (x_i - \bar{x})^2$$

式中: I_i 为风险小区*i*的局部Moran's I值; x_i 为风险小区*i*的风险值; \bar{x} 为所有风险小区的风险值均值; w_{ij} 是空间权重; n 为风险小区数。 I_i 值的高低反映相似值的空间聚集情况,值越高,说明相似风险值的风险小区空间聚集,相反是不相似的风险小区空间聚集。本文运用自相关分析软件OpenGeoDa生成Moran's I散点图和LISA聚类图,以揭示整个研究区生态风险空间模式和各研究风险小区间的空间关联性。

2 结果与分析

2.1 青铜峡市景观格局特征

由表1可知,在2006—2016年青铜峡市的景观格局有明显的变化。耕地、水域和未利用土地呈现景观破碎化趋势,区域景观的稳定性有所降低。由于人类活动的扩张,耕地和水域的破碎化较为明显,破碎度呈上升趋势,耕地的分维度变小,说明耕地和水域这两类景观受人类活动干扰明显,较大斑块被分割,数量随之增多,景观的破碎度加大。其中建设用地的破碎度在2006—2010年增加明显,是由于此期间处于研究区城镇迅速扩张阶段,土地利用管理较为松散,城镇建成区尚未形成,破碎化较为严重。之后的2010—2016年,城镇扩张速度下降,加强对城镇土地的集约利用,破碎度随之明显下降,景观类型的分维度也随之变小。未利用土地的破碎度有所增加,且变化较为明显,是因为除城镇扩张开垦了部分未利用土地外,研究区还承接了宁夏“十二五”期间生态移民工程搬迁的27 577人,建成4个规模较大的生态移民安置区,且均在未利用土地的荒滩上新建而成,一定程度上加大了未利用地的破碎度。但较耕地、建设用地等利用率高的景观类型,破碎化程度和受人为干扰程度还较低。草地、林地的破碎化趋势和分维度均有所下降。究其原因是研究区较好地响应政府退耕还林还草政策,大面积地种植人工林地和草地,景观形状较为规则,受人类活动影响明显。景观的生态损失度显示:除耕地和草地有较为明显的上升趋势外,其余景观类型整体上变化不明显。

从景观格局指数的空间分布来看,景观破碎度、损失度较高区分布在研究区人口和经济活动聚集的东北部,且分维度较低,该景观类型的斑块形状趋于规则,人类活动的干扰表现明显。分布在研究区西部和东南部的未利用土地景观破碎度、损失度较低,景观的分维度较大,说明未利用土地较好地保存了原有

的自然状态,受到人为干扰较小。从景观格局指数的时间变化看,研究区东北部和中南部的破碎度和损失度范围在 2006—2016 年呈扩大趋势,分维度范围也

随之增大,说明景观受人为干扰影响在不断加大。这些变化多分布在东北部(绿洲核心区)的边缘,属生态敏感区,需加强生态风险防范。

表 1 2006—2016 年青铜峡市景观格局指数

景观类型	年份	破碎度 C_i	分离度 D_i	分维度 F_i	干扰度 S_i	脆弱度 V_i	损失度 R_i
耕地	2006	0.0254	0.5335	1.1200	0.3968	0.1905	0.0756
	2010	0.0303	0.5441	1.0687	0.3921		0.0747
	2016	0.0343	0.7844	1.0562	0.4637		0.0883
草地	2006	0.0229	0.2810	1.1248	0.3207	0.1429	0.0458
	2010	0.0217	0.3790	1.1223	0.3490		0.0499
	2016	0.0195	0.5517	1.0705	0.3894		0.0556
林地	2006	0.0296	0.2293	1.1141	0.3064	0.0952	0.0292
	2010	0.0261	0.2477	1.1038	0.3081		0.0293
	2016	0.0231	0.1939	1.1076	0.2849		0.0271
水域	2006	0.0177	0.1563	1.1580	0.2873	0.2381	0.0684
	2010	0.0198	0.1479	1.1631	0.2869		0.0683
	2016	0.0201	0.1827	1.1512	0.2951		0.0703
建设用地	2006	0.0254	0.3574	1.1280	0.3455	0.0476	0.0164
	2010	0.0359	0.5441	1.0939	0.4000		0.0190
	2016	0.0299	0.2011	1.0521	0.2857		0.0136
未利用土地	2006	0.0055	0.0154	1.2290	0.2532	0.2857	0.0723
	2010	0.0013	0.0200	1.2012	0.2469		0.0705
	2016	0.0042	0.0216	1.1931	0.2472		0.0706

2.2 青铜峡市生态风险时空分异

计算已划分的生态风险小区风险值,在 ArcGIS 平台利用克里金空间插值法将量化后的生态风险转化至空间上,能够较为直观地表现出研究区内生态风险的空间分布状况。统计结果显示,在 2006—2016 年各风险小区的风险值为 0.001 3~0.651 8,高低风险值之间差值较大,但 3 期数据风险平均值变化不明显。在 ArcGIS 中,按等间隔重分类将生态风险值由小到大依次划分 5 个等级,即低风险区(0.001 3~0.131 4)、较低风险区(0.131 4~0.261 5)、中等风险区(0.261 5~0.391 6)、较高风险区(0.391 6~0.521 7)和高风险区(0.521 7~0.651 8)。

由表 2 可知,青铜峡在研究期间的 10 年内生态风险有较大的变化。2006 年研究区的生态风险以较低风险区和高风险区为主,生态风险等级两极分化严重。2010 年高风险区面积开始减少,中等风险区和较高风险区面积加大,生态风险表现出一定的缓和趋势。2016 年高风险区大面积减少,变化剧烈,较低风险区和中等风险区占研究区面积的 73.75%,成为青铜峡市的主要风险等级类型。其中,城镇面积的迅速扩张和积极响应退耕还林还草政策是生态风险降低的重要原因。

生态风险的空间分布显示,高风险和较高风险区分布在未利用土地面积较大的西部和东南部,这部分是自然景观保存完好却易于受到人为干扰的区域。

随着城镇扩张,大部分未利用土地被开垦利用,一定程度上增加了高风险区景观的空间异质性,原有未利用土地的生态损失度下降,高生态风险也随之降低。而绿洲核心区,尽管人为干扰度较大,但由于林地和草地的面积增加,生态风险类型以较低和低风险为主。从整体来看,中等生态风险逐渐成为研究区主要的生态风险类型。

2.3 青铜峡市生态风险聚集模式

计算研究区 2006 年、2010 年、2016 年生态风险的全局 Moran 指数均为正值,说明在研究区内,生态风险空间分布上存在显著的空间正相关,即生态风险表现出相似值之间的空间聚集趋势。运用空间自相关分析软件 OpenGeoDa 生成 Moran 散点图(图 1)和 LISA 聚类图(图 2)。由图 1 可知,大部分风险小区位于第一、第三象限,空间正相关联系显著,属于“低低”聚集(低值包围低值区)和“高高”聚集(高值包围高值区)风险聚集模式。第二象限的“低高”聚集模式和第三象限的“高低”聚集模式也有零星分布,但数量上明显要小于“低低”和“高高”聚集模式。从 LISA 聚类图中(图 2),可以更为清晰地看到在 2006—2016 年生态风险聚集模式的空间分布状况。“低低”风险聚集区分布在绿洲核心区和中南部低风险区上,且面积有所扩展,位置向南偏移。“高高”风险聚集区随时间变化有缩小趋势,位置向西北、西南偏移。说明研究区的生态风险有一定的缓和趋势,但高风险和低风险之间分化严重。

表 2 2006—2016 年青铜峡市生态风险级别面积统计

生态风险等级	2006 年		2006—2010 年 面积变化	2010 年		2010—2016 年 面积变化	2016 年		2006—2016 年 面积变化
	面积/km ²	比例%		面积/km ²	比例%		面积/km ²	比例%	
低风险区	30.60	1.45	24.05	54.65	2.59	38.19	92.84	4.40	62.24
较低风险区	745.46	35.33	-114.57	630.89	29.90	50.64	681.53	32.30	-63.93
中等风险区	365.87	17.34	131.25	497.12	23.56	377.48	874.60	41.45	508.73
较高风险区	244.76	11.60	39.67	284.43	13.48	-87.36	197.07	9.34	-47.69
高风险区	723.10	34.27	-79.98	643.13	30.48	-466.94	176.19	8.35	-546.91

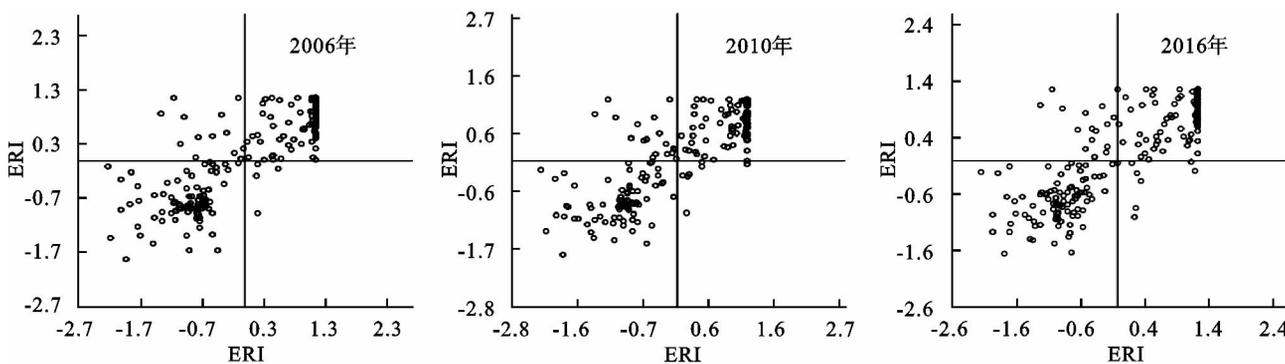


图 1 2006—2016 年研究区生态风险小区 Moran 散点图



图 2 2006—2016 年研究区生态风险小区 LISA 聚类图

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 研究期间,青铜峡市的景观格局变化明显。耕地、水域和未利用土地三种景观类型的破碎度增加,大斑块破碎化趋势明显,研究区的景观稳定性降低。景观格局指数的空间分布显示景观破碎度、损失度较大的区域分布在研究区人口和经济活动聚集的绿洲核心区。

(2) 青铜峡市生态风险的时空变化差异较大。其中高风险区面积减少显著,并随着风险等级之间的转换,中等风险区成为青铜峡市的主要风险类型。其中,积极响应退耕还林还草政策是近 10 年研究区生态风险缓和的主要原因。

(3) 研究区的生态风险存在显著空间正相关,LISA 聚类图显示,“低低”和“高高”聚集是主要生态风险聚集模式,低值为高值包围或高值为低值包围的

空间孤立点不显著。高低风险之间严重分化是研究区亟待解决的问题。

3.2 讨论

近些年,生态风险评价的侧重点由污染因子对生态系统的破坏向人类活动对生态系统干扰转变,如开始探究土地利用变化、气候变化等对生态系统的胁迫。研究对象尺度从种群扩展至整个区域景观研究。这种变化有利于将生态风险评价与区域的环境与发展之间相结合,能为区域发展监测和预测生态环境变化^[26]。依据青铜峡生态风险评价结果,结合不同等级风险区的特点和实际情况,提出相应的风险管理对策,对降低和减少研究区的生态风险损失具有重要意义。针对研究区各级生态风险区的空间分布情况并结合研究区的实际情况提出相应的风险管理对策建议如下:

(1) 应对高生态风险和较高生态风险的管理建议。青铜峡市的高生态风险区和较高生态风险区主要分布

在未利用土地面积广泛、地势较高的西部和东南地区。这些地区本身的脆弱性较高,且为水土流失、滑坡等地质灾害高发区。虽受到的人类活动和干扰较少,但却是生态系统恢复和重建的困难地区,一旦受到人类活动的破坏,将会加剧地质灾害的发生。因此,该地区的风险管理重点应放在加强生态环境的建设上,严格控制对该地区未利用土地的随意利用,加强地表植被种植,优化配置山区间的土地利用,遵循自然生态适应性规律,以提高生态系统的服务能力。

(2) 应对中等生态风险的管理建议。研究区的中等风险区主要分布在绿洲核心区边缘与未利用地广布的交界处。建设用地、草地、水域是该风险区的主要景观类型,植被覆盖度中等,并随着城镇绿洲区扩张逐渐成为青铜峡市的主要风险等级。该区的风险管理对策应从维持现状和降低生态风险入手,加强因地制宜建设,合理地布局工业和农业生产活动,增加草地和林地等植被的覆盖度,积极推进研究区内的产业向环保产业转型。

(3) 应对低生态风险和较低生态风险的管理建议。低风险区和较低风险区分布在研究区东北部,即绿洲区核心。虽然人口和人类活动在这里高度聚集,但该区草地、林地等植被覆盖度较高,河流、水库以及沼泽等水域湿地广布,生物量相应较大,景观类型的异质性较强,生态风险等级分布呈现出以较低风险和低风险为主。针对该区的风险管理应注重对现阶段低生态风险的维持,合理地规划和利用土地,有效调控人类的生产生活活动,提高人们的环保和可持续发展理念,加强公众参与生态风险防范意识和途径,以减少区域环境污染,降低不合理的人类活动对生态系统的破坏,积极地维护并提高土地的生态系统服务价值。

参考文献:

- [1] 彭建,党威雄,刘焱序,等.景观生态风险评价研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(4):664-677.
- [2] 邓飞,于云江,全占军.区域生态风险评价研究进展[J].环境科学与技术,2011,34(S1):141-147.
- [3] 周平,蒙吉军.区域生态风险管理研究进展[J].生态学报,2009,29(4):2097-2106.
- [4] Mohamed M, Mohamed S, Mehdi M, et al. Environmental and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Nador lagoon, Morocco[J]. Ecological Indicators, 2015,48(1):616-626.
- [5] 许学工,颜磊,徐丽芬,等.中国自然灾害生态风险评价[J].北京大学学报:自然科学版,2011,47(5):901-908.
- [6] 石朋浩,于开芹,冯永军.基于景观格局的城乡结合部生态风险分析:以泰安市岱岳区为例[J].应用生态学报,2013,24(3):705-712.
- [7] 张思锋,刘晗梦.生态风险评价方法述评[J].生态学报,2010,30(10):2735-2744.
- [8] 王亚娟,米文宝,李建华.宁夏中部干旱带农业景观格局变化研究[J].水土保持研究,2013,20(4):203-206.
- [9] 康鹏,陈卫平,王美娥.基于生态系统服务的生态风险评价研究进展[J].生态学报,2016,36(5):1192-1203.
- [10] Petra T B, Douglas P. An ecological risk management and capacity building model [J]. Human Ecology, 2014,42(4):591-603.
- [11] 周婷,蒙吉军.区域生态风险评价方法研究进展[J].生态学杂志,2009,28(4):762-747.
- [12] 王文杰,张永福,王慧杰.基于GIS干旱区绿洲县域土地利用变化生态风险分析:以新疆泽普县为例[J].水土保持研究,2016,23(6):216-220.
- [13] 李博,石培基,金淑婷.石羊河流域植被生态系统生态风险评价研究[J].水土保持通报,2013,33(1):201-205.
- [14] 王美娥,陈卫平,彭驰.城市生态风险评价研究进展[J].应用生态学报,2014,25(3):911-918.
- [15] Echeverría C, Newton A, Nahuelhual L, et al. How landscapes change: Integration of spatial patterns and human processes in temperate landscapes of southern Chile[J]. Applied Geography, 2012,32(2):822-831.
- [16] 赵文智,庄艳丽.中国干旱区绿洲稳定性研究[J].干旱区研究,2008,25(2):155-162.
- [17] 王永兴,张小雷,阚耀平.绿洲地域系统及其演变规律的初步研究[J].干旱区地理,1999,22(1):62-68.
- [18] 吴文婕,石培基,张学斌,等.干旱区内陆河流域绿洲水土资源生态风险动态研究[J].水土保持通报,2012,33(3):249-255.
- [19] 宋冬梅,肖笃宁,张志城,等.甘肃民勤绿洲的景观格局变化及驱动力分析[J].应用生态学报,2003,14(4):535-539.
- [20] 巩杰,赵彩霞,谢余初,等.基于景观格局的甘肃白龙河流域生态风险评价与管理[J].应用生态学报,2014,25(7):2041-2048.
- [21] 谢花林.基于景观结构的土地利用生态风险空间特征分析:以江西兴国县为例[J].中国环境科学,2011,31(4):688-695.
- [22] 李程程,南忠仁,王若凡,等.基于景观结构和3S技术的干旱区绿洲生态风险分析:以高台县为例[J].干旱区资源与环境,2012,26(11):31-35.
- [23] 邬建国.景观生态学[M].北京:高等教育出版社,2012.
- [24] 魏伟,石培基,雷莉,等.基于景观结构和空间统计方法的绿洲区生态风险分析[J].自然资源学报,2014,29(12):2023-2035.
- [25] 谢花林.基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析[J].生态学报,2008,8(10):5020-5026.
- [26] 巫丽芸.区域景观生态风险评价及生态风险管理研究[D].福州:福建师范大学,2004.