

延河流域生态环境脆弱性评价及其特征分析

雷 波¹, 焦 峰^{1,2*}, 王志杰¹, 刘源鑫³, 朱乐天³

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100;
3. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵 712100)

摘 要:以黄土丘陵区延河流域为研究对象,在遥感和 GIS 技术支持下,应用空间主成分分析方法,综合评价该区生态环境脆弱性,对其生态环境脆弱性特征进行简要分析,以期为延河流域生态环境建设提供决策依据。结果表明,延河流域生态环境整体上以中度脆弱为主,其面积占流域总面积的 54.87%,生态系统较不稳定,抗干扰能力较差;微度脆弱最少,仅占 7.55%;重度及以上脆弱程度占 11.36%;轻度及以下脆弱程度占 33.78%。延河流域极度脆弱带主要分布在陕西省靖边县、志丹县西部;重度脆弱带主要分布在安塞县西北部及子长县;中度脆弱带主要分布在安塞县东南部、延川县及宝塔区;轻度脆弱带主要分布在宝塔区东南部及延长县西北部;微度脆弱带主要分布在延长县东南部。延河流域从上游到下游,生态脆弱性程度依次减弱。不同土地利用类型生态脆弱性程度存在很大差异,坡耕地、裸地、荒草地脆弱性程度相对较高。

关键词:延河流域;生态环境脆弱性;空间主成分分析;遥感;地理信息系统

中图分类号:S771.8

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2013)03-0161-07

Eco-environment Vulnerability Evaluation and Characteristics Analysis in Yanhe River Watershed

LEI Bo¹, JIAO Feng^{1,2*}, WANG Zhi-jie¹, LIU Yuan-xin³, ZHU Le-tian³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract:Based on the RS and GIS technologies and the method of spatial principal component analysis (SPCA), the integrated assessment of eco-environment vulnerability in Yanhe River watershed of Loess hilly area was studied, and the characteristics of the eco-environment vulnerability were analyzed briefly. The eco-environment vulnerability in Yanhe River watershed was medium overall, accounting for 54.87% of the total area, ecosystem was relatively unstable and had less ability to anti-interference; slight vulnerability accounted the least area, only 7.55%; heavy and above vulnerability accounted for 11.36%; light and below vulnerability accounted for 33.78%. The extremely fragile zones were mainly located in Jingbian County, west of Zhidan County; heavy fragile zones were mainly distributed in the northwest of Ansai County and Zichang County; moderately fragile zones were mainly located in the southeast of Ansai County, Yanchuan County and Baota District; light fragile zones were mainly distributed in the southeastern Baota District and the northwestern Yanchang County; slight fragile zones were mainly distributed in the southeastern Yanchang County. In the whole watershed, eco-environment vulnerability decreased from upstream to downstream. The eco-environment vulnerability levels among different land use types were sig-

收稿日期:2012-11-25 修回日期:2013-01-19

基金项目:国家自然科学基金(41271043);中科院知识创新重要方向项目(KZCX2-EW-406);中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-04-03);西北农林科技大学科技创新重点项目(QN2011073)。

作者简介:雷波,男,在读硕士,研究方向:遥感与 GIS 应用及资源环境信息技术。E-mail:lb.leibo@163.com

*通信作者:焦峰,男,博士,副研究员,研究方向:GIS 应用、水土保持与环境效应监测评价。E-mail:jiaof11@126.com

nificantly different, slope farmland, bare land and grassland had relatively higher vulnerability level. The results of the research may provide decision basis for environment construction of Yanhe River watershed.

Key words: Yanhe River watershed; eco-environment vulnerability; spatial principal component analysis; remote sensing; geographical information system

生态环境脆弱性是景观或生态系统在特定时空尺度上相对于外界干扰而具有的敏感反应和恢复状态,它是生态系统的固有属性在干扰作用下的表现^[1]。随着社会经济的发展和生态环境问题的日益突出,生态脆弱性研究得到了越来越多研究者的关注^[2-6]。区域生态环境质量是区域经济社会可持续发展的核心和基础^[7],进行区域生态环境脆弱性评价不仅可以从宏观上了解区域的脆弱性现状和分布特征,而且有助于合理配置土地资源和保护脆弱生态环境。诸多关于生态环境的研究,都牵涉到生态脆弱性的评价与表达,因此生态环境脆弱性研究不仅是当前环境资源领域重要问题之一,其评价也是制定区域可持续发展规划的重要前提^[8]。随着西部大开发战略的实施,人类活动对脆弱生态环境造成的压力越来越大,可能会导致土地荒漠化、水土流失、生物多样性减少等生态环境问题进一步加剧,迫切需要进行生态环境保护下的开发研究。

黄土丘陵区是我国生态环境最脆弱的地区之一,区域自然、人文、经济、地理条件复杂,加之自然灾害以及人为因素的影响,使得黄土丘陵区生态环境不断恶化,特别是水资源短缺、水土流失、土地荒漠化等生态环境问题逐步加剧。黄土丘陵区生态环境的改善关系到当地人民的生存和发展。因此,选择黄土丘陵区延河流域为研究对象,对其生态环境脆弱性进行评价,有助于决策和管理者了解造成各种脆弱性的内外因,了解该区生态环境脆弱性现状及空间分布特征,为生态环境综合整治和恢复,为当地的生态环境建设提供决策依据。

1 研究区概况

延河流域位于陕北黄土高原中部,地理位置 $36^{\circ}23' \sim 37^{\circ}17'N$, $108^{\circ}45' \sim 110^{\circ}28'E$ 之间,属黄河一级支流,全长286.9 km,总面积7 687 km²,包括志丹县、安塞县、宝塔区、延长县等县区。该区属于典型的暖温带大陆性半干旱季风气候,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨。从东南向西北,降水、温度具有明显的梯度变化特征。年降水量少且季节分配极不均匀,年均降雨量500 mm左右,其中6—9月降雨量占全年降雨量的75%以上。年均气温约9℃。流域内地形破碎,沟壑纵横,黄土丘陵沟壑面积占全流域的90%。主要土壤类型为黄土母质上发育而来

的黄绵土,土质疏松,抗蚀抗冲性差,土壤侵蚀剧烈,水土流失严重,生态环境脆弱。研究区位置示意图如图1。

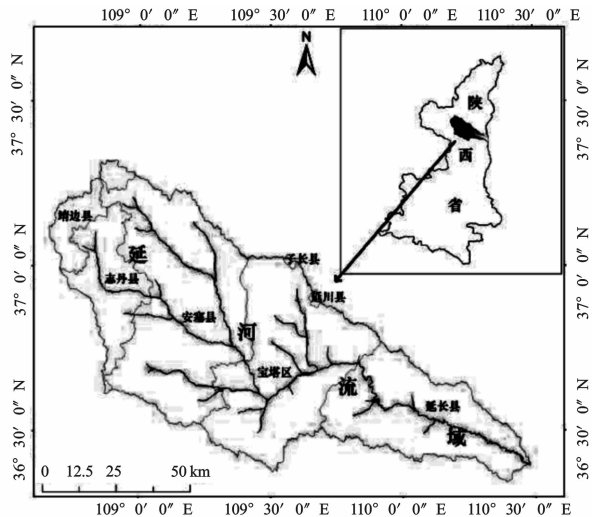


图1 研究区位置示意图
Fig.1 Location of the study area

2 研究方法

2.1 数据源与处理

遥感影像数据为三景覆盖延河流域的美国陆地卫星 Landsat TM 影像,数据获取时间为2010年6、9月,其中6月2景,轨道号分别为127/34和127/35,9月1景,轨道号为126/35。DEM数据由中国科学院水土保持研究所区域水土保持研究室提供,分辨率为25 m。

遥感影像数据的预处理包括辐射定标、大气校正、几何精校正、影像拼接及研究区范围裁剪。各数据由于来源不同、投影方式、比例尺等不一致,在使用前按照要求进行了数据标准化处理。对各图件进行几何配准和数据重采样,将空间数据统一到 Albers 等面积割圆锥投影,并采用统一的中央经线和双标准纬线,中央经线为109.5°,双标准纬线分别为北纬36.5°和北纬36.17°,所采用的椭球体为 krasovsky 椭球体。在 ArcGIS 软件平台中,所有数据均被统一栅格化成25 m×25 m的 grid 数据。

2.2 土地利用现状分类

通过野外调查,建立分类解译标志,参照我国现行土地利用分类系统并考虑延河流域实际情况,采用监督分类和目视解译相结合的方法对 TM 影像

进行分类,共分为 7 类:耕地、林地、草地、水域、沟台地、居民地和裸地(图 2)。梯田具有良好的保持水土的作用,对黄土丘陵区生态环境建设具有积极的作用,由于 TM 影像分辨率所限,本研究未将梯田单独划分出来,而是根据对生态脆弱性的影响大小,将梯田划归到草地当中。参考野外调查数据,对土地利用分类结果进行精度评价,Kappa 系数为 0.76,能够满足研究要求。

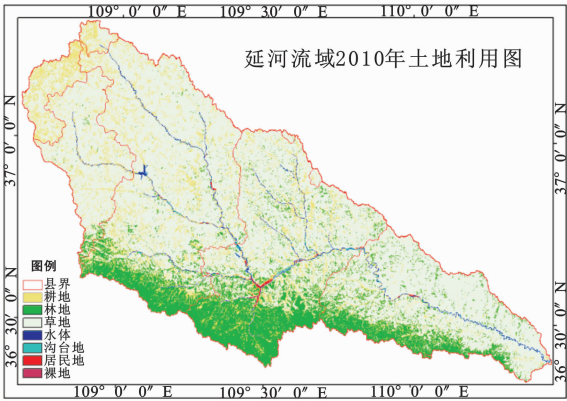


图 2 延河流域2010年土地利用图

Fig. 2 Land use map of the Yanhe River watershed in 2010

2.3 生态环境脆弱性评价方法

2.3.1 评价指标体系 从研究区主要的生态环境问题出发,选择适宜的生态脆弱性评价指标。水土流失是黄土丘陵区最主要的生态环境问题,而影响水土流失的因素主要有气候、地形、土壤、植被、人为等几个方面。1)气候因素:气候是生态环境形成和演化的重要动力,气候条件影响生态环境的稳定性程度^[19]。延河流域属典型的暖温带大陆性半干旱季风气候,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,从东南向西北,降水、温度具有明显的梯度变化特征。2)地形条件:地形作为一种相对稳定的要素,是构成生态环境的基础,其高低起伏、不同部位直接或间接影响着物质和能量的再分配,制约人类的土地利用方式,从而影响生态环境的稳定^[19]。延河流域属于典型的黄土丘陵沟壑区,地形复杂,千沟万壑,南北高差较大。3)土壤因素:土壤是地表物质与能量转化的场所,土壤类型及其空间分布从一定程度上指示了生态环境的优劣,其肥力水平体现了生态系统的生产能力,关系到人们对土地资源利用的程度。4)植被因素:植被具有保持水土、净化空气、涵养水源、调节气候等多种间接生态调节功能,是生态环境的最敏感和最主要的环境因子,它的变化直接或间接的影响到其他环境因子的变化^[26],植被覆盖度的高低在很大程度上指示了生态环境的优劣。5)土地利用/覆被状况:土地是人类对生态环境作用的直接对象。土地利用/覆被状况反映了人类对生态系统的

开发利用水平,其数量与质量对生态环境的稳定性有直接的影响。不同的土地利用类型体现出不同的土地利用程度,并具有不同的生态功能。

基于上述对研究区生态环境特点的定性分析,本研究选择年平均气温、年平均降水量、坡度、坡向、海拔、土壤类型、植被指数和土地利用类型作为评价延河流域生态环境脆弱性的指标。指标体系及数据来源见表 1。其中,气象数据来自 2010 年国家气象局统计数据;地形数据基于 DEM 数据,在 ArcGIS Spatial Analyst 模块下直接生成坡度、坡向专题数据;土壤类型数据来自中科院水土保持研究所区域水土保持研究室;植被指数通过归一化植被指数(NDVI)来表征。

$$NDVI=\frac{\rho_{NIR}-\rho_R}{\rho_{NIR}+\rho_R}$$

(1)

式中, ρ_{NIR} 为近红外波段的反射率, ρ_R 为红波段的反射率。TM 影像的波段 4 为近红外波段,波段 3 为红波段。

表 1 延河流域生态环境脆弱性评价指标

Table 1 The eco-environment vulnerability evaluation index of Yanhe River Basin			
一级指标	二级指标	三级指标	数据来源
自然因素	气候	年平均气温	国家气象局统计资料
		年平均降水量	国家气象局统计资料
	地形	海拔	DEM 数据
		坡度	DEM 数据计算
		坡向	DEM 数据计算
	土壤	土壤类型	中科院水土保持研究所
人为活动	土地利用	植被指数	遥感影像计算
		土地利用类型	遥感影像解译

2.3.2 数据标准化 由于各指标性质不同,量纲各异,没有可比性,不能直接进行生态环境脆弱性评价。因此,在综合评价前对所有参评因子进行标准化处理。所选取的 8 个指标按照对生态脆弱性的影响可以分为正向指标和逆向指标。正向指标表示指标值越大,生态脆弱性程度越高;逆向指标表示指标值越大,生态脆弱性程度越低。其中,正向指标包括年平均气温、坡度、海拔,逆向指标包括年平均降水量、植被指数,其余为定性指标。在标准化之前需要对定性指标进行量化处理。黄方^[19]等进行吉林省西部生态环境脆弱态势评价研究时和张红梅^[22]等进行福州市生态环境脆弱性研究时,按照一定标准对定性指标进行量化分级,均取得较好的效果。本研究参照黄方^[19]和张红梅^[22]的无量纲标准,并参考李勉^[21]等对黄土丘陵区坡向差异对生态环境的影响研究,结合延河流域具体情况,对本研究中定性指标进行量化取值。在取值的过程中,咨询了专家意

表 2 延河流域定性指标的量化处理

Table 2 Quantification of qualitative indices in the Yanhe River watershed

量化分值	2	4	6	8	10
坡向	阴坡(315°~0°,0°~45°)	半阴坡(270°~315°,45°~90°)	平地(-1°)	半阳坡(225°~270°,90°~135°)	阳坡(135°~225°)
土壤类型	典型黑垆土	石灰紫色土	冲积土	复钙红粘土	黄绵土
土地利用类型	水域、林地	草地	居民地、沟台地	裸地	坡耕地

见,取值结果具有一定的合理性和科学性。定性指标的量化处理见表 2。根据定性指标量化标准(即分值越大,生态脆弱性程度越高),将其量化后按照正向指标处理。

采用极差标准化法对各参评因子进行处理。其中正向指标采用式(2),逆向指标采用式(3)^[23]。

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min,j}}{X_{\max,j} - X_{\min,j}} \tag{2}$$

$$Y_{ij} = 1 - \frac{X_{ij} - X_{\min,j}}{X_{\max,j} - X_{\min,j}} \tag{3}$$

式中, Y_{ij} 表示第 i 栅格的指标 j 的标准化值,变化范围为 $0 \sim 1$, X_{ij} 表示第 i 栅格的指标 j 的初始值, X_{\min} 、 X_{\max} 分别表示第 i 栅格的指标 j 的最小值和最大值。

2.3.3 评价方法 生态环境脆弱性评价的方法有很多,最常见的有层次分析法^[9-11]、模糊综合评判法^[12-13]、生态脆弱度指数(ecological fragility index)法^[14]、主成分分析法^[15,23]等。其中,以层次分析法应用最为广泛。然而,层次分析法在进行指标权重赋值时需要综合考虑多位专家的意见,受不同专家个人偏好及识别能力的影响,主观性太强,从而使评价结果具有一定的相对性和随意性。与层次分析法不同,主成分分析的整个过程不再需要专家打分,提高了评价结果的客观性。其基本原理是将 N 个相关变量 X_i 线性组合成 M 个独立变量 Y_j ($M < N$), Y_j 中保存了 X_i 中大部分信息,于是 N 个相关变量就缩减成 M 个独立变量 Y_j , Y_j 就是通常所说的主成分^[7]。空间主成分分析是在地理信息系统软件的支持下,通过将原始空间坐标轴旋转,将相关的多变量空间数据转化为少数几个不相关的综合指标,实现用较少的综合指标最大限度地保留原来较多变量所反映的信息^[16-17]。

采用空间主成分分析法进行生态脆弱性评价,在生态环境脆弱性评价中,脆弱性评价指数定义为 n 个主成分的加权和,而权重用每个主成分对应的贡献率来表示,即:

$$EVI = \sum_{i=1}^n P_i W_i (i = 1, 2, \cdots, n) \tag{4}$$

式中, EVI 为生态环境脆弱性指数; P_i 为第 i 个主成分; W_i 为第 i 主成分对应的贡献率。

在 ArcGIS 平台中,将年平均降水量、年平均气温、海拔、坡度、坡向、土壤类型、植被指数、土地利用

等因子进行主成分综合分析,计算出延河流域的生态环境脆弱性指数。

3 结果与分析

3.1 生态环境脆弱性评价结果

根据空间主成分分析原理,由式(4)和表 3 可以得出延河流域生态环境脆弱性指数计算公式:

$$EVI = 0.380\ 6 \times P_1 + 0.231\ 1 \times P_2 + 0.182\ 6 \times P_3 + 0.083\ 9 \times P_4 \tag{5}$$

式中, EVI 为生态环境脆弱性指数, $P_1 \sim P_4$ 为原始空间变量进行主成分提取的前 4 个主因子。4 个主因子累计贡献率超过 85%。

表 3 空间主成分分析结果

Table 3 The results of spatial principal component analysis

主因子	特征值/ λ	贡献率/%	累计贡献率/%
1	4.80	38.06	38.06
2	2.91	23.11	61.17
3	2.30	18.26	79.43
4	1.06	8.39	87.82

在 ArcGIS 中,采用栅格计算的方法计算出生态脆弱性指数 EVI 值,根据生态脆弱性指数大小,参考前人研究^[18-19]及相关标准^[20],结合延河流域自身情况,将延河流域划分为 5 级不同的生态脆弱区。所选的 8 个指标从气候、地形、土壤、植被和人为 5 个方面综合反映了水土流失的强度,作为黄土丘陵区最严重的生态环境问题,水土流失强度可以在很大程度上反映该区生态环境状况。植被指数可以代表植被覆盖度的高低,而植被具有保持水土、净化空气、涵养水源、调节气候等多种间接生态调节功能。因而植被覆盖度越高及水土流失强度越低,生态系统越稳定,抗干扰能力越强。因此,可以从植被覆盖度、水土流失强度、生态系统稳定性及抗干扰能力等方面描述各等级之间的差异。各等级标准及相应特征见表 4。并得出延河流域生态环境脆弱性分布图(图 3)和评价结果统计表(表 5)。

评价结果表明,延河流域生态环境整体以中度脆弱为主,占总面积的 54.87%,生态系统较不稳定,抗干扰能力较差;轻度以下脆弱等级占总面积的 33.78%,其中微度脆弱等级仅占 7.55%,表明延河流域中生态系统稳定的区域只占很少一部分;重度及以上脆弱等级占到 11.36%,该区生态系统不稳定,需重

点治理;以上结果表明,延河流域的生态环境质量整体一般,还需要进一步加强该区的生态环境建设。

表 4 延河流域生态环境脆弱性分级标准

等级	EVI 值	程度	特征
1	<3.5	微度脆弱	植被覆盖度高、微度水土流失、生态系统稳定、抗干扰能力强
2	3.5~5.0	轻度脆弱	植被覆盖度较高、轻度水土流失、生态系统较稳定、抗干扰能力较强
3	5~7.5	中度脆弱	植被覆盖度中等、中度水土流失、生态系统较不稳定、抗干扰能力较差
4	7.5~8.5	重度脆弱	植被盖度较差、强度水土流失、生态系统不稳定、抗干扰能力差
5	>8.5	极度脆弱	植被覆盖度差、极强度水土流失、生态系统极不稳定、抗干扰能力极差

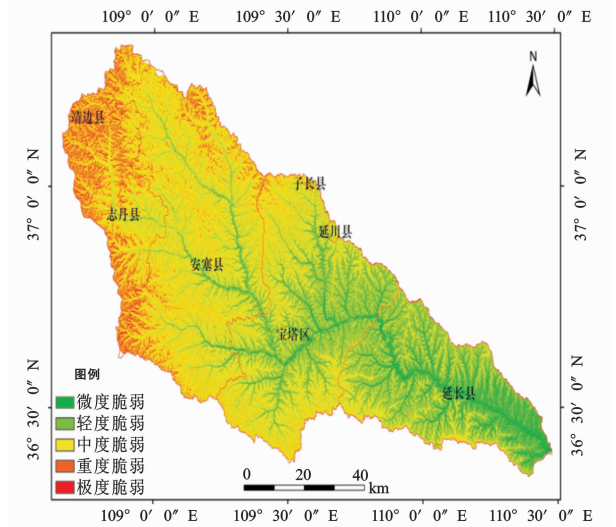


图 3 2010 年延河流域生态脆弱性分布图

Fig. 3 Distribution of eco-environmental vulnerability in 2010 in the Yanhe River watershed

表 5 延河流域生态脆弱性评价结果

评价等级	栅格数	面积/km ²	面积百分比/%
1	911 648	577.13	7.55
2	1 920 639	2 005.99	26.23
3	5 470 911	4 196.44	54.87
4	2 523 639	712.90	9.32
5	1 410 358	155.68	2.04
合计	12 237 195	7 648.13	100.00

3.2 生态脆弱性的空间分布特征

3.2.1 生态脆弱性随地理位置的分布特征 从延河流域生态脆弱性评价等级图(图 3)中可以看出,从西北到东南整体生态脆弱性程度依次降低,极度脆弱带主要分布在靖边县、志丹县西部;重度脆弱带主要分布在安塞县西北部及子长县;中度脆弱带主要分布在安塞县东南部、延川县及宝塔区;轻度脆弱带主要分布在宝塔区东南部及延长县西北部;微度脆弱带主要分布在延长县东南部。因此,在延河流域进行水土保持生态环境建设时,可以将靖边县、志丹县、安塞县及子长县作为重点治理区;将宝塔区、延川县作为预防保护区;将延长县作为监督区。

3.2.2 生态脆弱性随海拔高度的分布特征 延河

流域地形起伏,从西北到东南,海拔高度呈现出明显的梯度变化特征,相对高差 1 300 m 左右。不同的海拔区,温度、植被、土地利用等均有所差异,从而导致生态环境质量的差异。因此有必要研究延河流域生态环境脆弱性的垂直地带性分布特征。

将生态脆弱性评价结果图与 DEM 叠加,分别统计每海拔段各脆弱性等级的面积百分比(图 4)表明:高海拔区(>1 500 m)生态环境质量最差,极度脆弱区占 57.54%,主要分布在延河流域上游;低海拔区(<1 000 m)以微度脆弱和轻度脆弱为主,分别占 40.48%、35.58%,生态环境质量最好,主要分布在延河流域下游;中海拔区(1 000~1 200 m)以轻度脆弱和中度脆弱为主,分别占 28.47%、57.52%,生态环境质量中等;中高海拔区(1 200~1 500 m)以中度脆弱和重度脆弱为主,分别占 46.80%、32.97%,生态环境质量较差。总趋势表现为从上游到下游,生态环境脆弱性程度逐渐减弱。

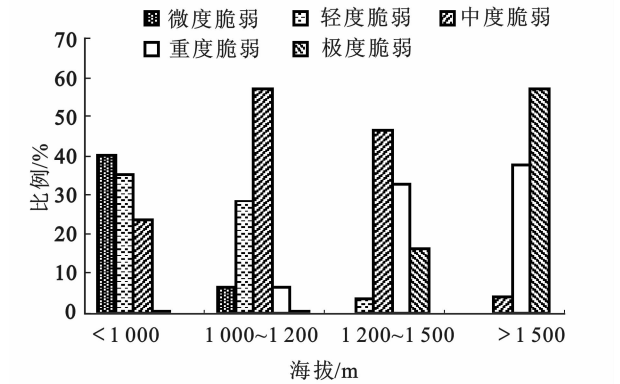


图 4 不同海拔段各生态脆弱性等级分布图

Fig. 4 Distribution of eco-environmental vulnerability in different altitudes

3.2.3 生态脆弱性随土地利用类型的分布特征 不同的土地利用类型由于其自身结构的差异,对生态环境质量的贡献及生态过程的影响也就不同。将土地利用类型图与生态脆弱性评价图进行叠加分析,可以统计出不同土地利用类型的脆弱等级分布情况(表 6)。结果表明,耕地基本处于中度和重度脆弱状态;林地绝大部分属于微度和轻度脆弱状态;草地以中度脆弱状态为主,轻度脆弱和重度脆弱状

态所占比例也较大;水体基本处于中度脆弱等级以下;沟台地和居民地基本处于微度和轻度脆弱状态;裸地中重度和中度脆弱等级比例最大。因此,延河

流域生态环境脆弱程度较高的土地利用类型主要为坡耕地、荒草地和裸地,进行生态环境治理时,应重点针对这 3 类土地利用类型。

表 6 不同土地利用类型的脆弱等级分布

Table 6 Distribution of vulnerability levels for different land use types

土地利用 类型	微度脆弱		轻度脆弱		中度脆弱		重度脆弱		极度脆弱	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
耕地	77.13	7.30	163.72	15.49	442.96	41.92	227.33	21.51	145.64	13.78
林地	260.58	23.12	588.72	52.24	135.11	11.99	113.48	10.07	113.48	2.58
草地	430.49	8.01	872.37	16.23	2 363.37	43.98	1 086.89	20.23	620.47	11.55
水体	23.71	36.58	21.94	33.85	18.25	28.15	0.78	1.21	0.13	0.21
沟台地	4.14	47.63	2.93	33.71	1.60	18.42	0.01	0.11	0.01	0.12
居民地	5.06	42.68	4.02	33.93	2.73	23.03	0.04	0.36	0.00	0.00
裸地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	71.79	0.01	23.08	0.00	5.13

4 结论与讨论

在分析延河流域地理特征及生态环境特点的基础上,选择影响延河流域生态环境脆弱性的主要因子,运用空间主成分分析方法,建立生态环境脆弱性评价模型,从不同空间尺度,对该流域生态环境脆弱性现状进行评价与分析。

延河流域生态环境质量整体一般,生态环境脆弱性以中度等级为主。微度和轻度脆弱区面积占全区面积的 34%左右,主要分布在宝塔区东南部和延长县,是延河流域生态环境质量最好的区域;中度脆弱区面积占全区的 54.87%,主要分布在安塞县东南部、延川县及宝塔区;重度和极度脆弱区面积较小,占全区面积的 11%左右,但集中分布的趋势明显,主要分布在靖边县、志丹县西北部、安塞县西北部及子长县部分区域,是延河流域生态环境质量最差的区域,应作为该流域的重点治理区。研究结果与延河流域生态环境实际情况基本一致。

延河流域从西北到东南,海拔依次降低,呈阶梯状分布,生态脆弱性程度依次降低。所以应加大高海拔区的退耕还林力度,增强高海拔区的环境保护与治理。

不同土地利用类型的生态环境脆弱性程度存在很大差异。耕地基本处于中度及以上脆弱状态;林地绝大部分属于微度和轻度脆弱状态;草地绝大多数属于中度脆弱状态;水体基本处于中度脆弱等级以下;沟台地和居民地基本处于微度和轻度脆弱状态;裸地中重度和中度脆弱等级比例最大。该区草地的生态环境质量不甚理想,主要有几个原因:1)该区草地类型单一,覆盖度较低。2)下垫面因素较差,绝大多数土壤为黄绵土,土质疏松,且坡陡沟深,容易造成水土流失。3)放牧及陡坡耕种造成部分草地退化。因此,应加大植被建设力度,提高植被覆盖度及物种多样性,禁止一切放牧及陡坡耕种行为,加强

草地的自然恢复。同时,在延河流域进行生态环境建设时,应重点对坡耕地、荒草地、裸地进行治理。

王正杲^[24]在进行延河流域水土保持生态建设规划方案研究时,根据陕西省水土保持工作分区公告、延河流域植被覆盖分布、水土流失现状等将延河流域从上游到下游依次划分为重点治理区、重点监督区、重点预防保护区。王经民^[25]等采用数学方法评价黄土高原生态环境脆弱性,得出黄土高原从南向北,生态脆弱程度依次增大。与本研究结果基本一致。

采用空间主成分分析方法进行延河流域生态脆弱性评价是可行的,且采用 GIS 等计算机技术,使得评价过程更加方便快捷,结果更加客观,因此具有一定的应用价值。此外,生态环境脆弱性是动态变化的,由于时间及数据所限,本研究仅进行了延河流域生态脆弱性现状评价,为今后生态脆弱性演变的研究奠定了基础。

参考文献:

[1] 王让会,樊自立.塔里木河流域生态脆弱性评价研究[J].干旱环境监测.1998,12(4):218-223.
WANG R H,FAN Z L. Study on the evaluation of ecological frangibility of Tarim River Basin [J]. Arid Environmental Monitoring,1998,12(4):39-44. (in Chinese)

[2] 赵越龙,张玲娟.脆弱生态环境定量评价方法的研究[J].地理科学进展,1998,17(1):67-72.
ZHAO Y L,ZHANG L J. A study on index and method of quantitative assessment of fragile environment[J]. Progress in Geography,1998,17(1):67-72. (in Chinese)

[3] 冉圣宏,金建君,薛纪渝.脆弱生态区评价的理论与方法[J].自然资源学报,2002,17(1):117-122.
RAN S H,JIN J J,XUE J Y. Assessment of vulnerable ecological regions: theory and methodology[J]. Journal of Natural Resources.2002,17(1):117-122. (in Chinese)

[4] WANG S Y,LIU J S,YANG C J. Eco-environmental vulnerability evaluation in the Yellow River Basin, China[J]. Pedosphere,2008,18(2):171-182.

[5] SONG G B,CHEN Y,TIAN M R,et al. The ecological vulnerability evaluation in southwestern mountain region of China based on GIS and AHP method[J]. Procedia Environmental

- Sciences, 2010(2):465-475.
- [6] 白艳芬, 马海州, 张宝成, 等. 基于遥感和 GIS 技术的青海湖环湖地区生态环境脆弱性评价[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(5):635-640.
- BAI Y F, MA H Z, ZHANG B C, *et al.* Eco-environmental vulnerability analysis around Qinghai lake based on RS and GIS technology[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(5):635-640. (in Chinese)
- [7] 刘瑞民, 沈珍瑶. 大宁河流域生态环境综合评价及其演变[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 2006, 42(2):200-203
- LIU R M, SHEN Z Y. Integrated assessment and changes of ecological environment in Daning River watershed[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2006, 42(2):200-203. (in Chinese)
- [8] 周嘉慧, 黄晓霞. 生态脆弱性评价方法评述[J]. 云南地理环境研究, 2008, 20(1):55-59.
- ZHOU J H, HUANG X X. A review on the assessment methods of ecological vulnerability[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2008, 20(1):55-59. (in Chinese)
- [9] 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
- WANG Y P, LIU X, YAO X Y, *et al.* AHP analysis of soil and water conservation ecological fragility assessment in Yimeng Mountain Area of Huaihe River Valley[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(3):20-27. (in Chinese)
- [10] 史振华, 程婕, 王百田. 天津市生态脆弱性评价[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(6):74-78
- SHI Z H, CHENG J, WANG B T. Ecological fragility evaluation of Tianjin[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(6):74-78. (in Chinese)
- [11] 龚新梅, 马媛, 桂东伟. 干旱区典型流域天然草地生态脆弱性评价研究[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2007, 34(2):216-220
- GONG X M, MA Y, GUI D W. The ecological fragility appraisal of the natural meadow in a typical basin of arid area[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2007, 34(2):216-220. (in Chinese)
- [12] 王金叶, 程道品, 胡新添, 等. 广西生态环境评价指标体系及模糊评价[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(4):5-8
- WANG J Y, CHENG D P, HU X T, *et al.* Fuzzy evaluation and evaluation index system of ecological environment in Guangxi[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(4):5-8. (in Chinese)
- [13] 蒙海花, 王腊春. 贵州普定后寨河流域岩溶生态脆弱性的模糊综合评价[J]. 四川环境, 2007, 26(3):62-66
- MENG H H, WANG L C. Fuzzy-based evaluation of Karst eco-environment fragility at Houzhai underground basin in Puding County, Guizhou Province[J]. Sichuan Environment, 2007, 26(3):62-66. (in Chinese)
- [14] 王让会, 樊自会. 塔里木河流域生态脆弱性评价研究[J]. 干旱环境监测, 1998, 12(4):39-44
- WANG R H, FAN Z H. Study on ecological vulnerability assessment in Tarim river basin[J]. Environmental Monitoring, 1998, 12(4):39-44. (in Chinese)
- [15] 冯利华, 黄亦君. 生态环境脆弱度的综合评价[J]. 热带地理, 2003, 23(2):102-114
- FENG L H, HUANG Y J. Comprehensive evaluation of fragility of ecological environment[J]. Tropical Geography, 2003, 23(2):102-114. (in Chinese)
- [16] 王思远, 张增祥, 赵晓丽, 等. 遥感与 GIS 技术支持下的湖北省生态环境综合分析[J]. 地球科学进展, 2002, 17(3):426
- WANG S Y, ZHANG Z X, ZHAO X L, *et al.* Eco-environmental synthetic analysis based on RS and GIS technology in Hubei province[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(3):426. (in Chinese)
- [17] 王思远, 王光谦, 陈志祥. 黄河流域生态环境综合评价及其演变[J]. 山地学报, 2004, 22(2):133
- WANG S Y, WANG G Q, CHEN Z X. Eco-environmental evaluation and changes in Yellow River Basin[J]. Journal of Mountain Research, 2004, 22(2):133. (in Chinese)
- [18] 左伟, 王桥, 王文杰, 等. 区域生态安全评价指标与标准研究[J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(1):67-71
- ZUO W, WANG Q, WANG W J, *et al.* Study on regional ecological security assessment index and standard[J]. Geography and Territorial Research, 2002, 18(1):67-71. (in Chinese)
- [19] 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):95-99
- HUANG F, LIU X N, ZHANG Y Z. GIS-based eco-environmental vulnerability evaluation in west Jilin Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(1):95-99. (in Chinese)
- [20] HJ/T192-2006. 生态环境状况评价技术规范(试行)[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2006.
- [21] 李勉, 姚文艺, 李占斌. 黄土丘陵区坡向差异及其在生态环境建设中的意义[J]. 水土保持研究, 2004, 11(1):37-39
- LI M, YAO W Y, LI Z B. Significance of aspect in eco-environment construction in Loess Hilly Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(1):37-39. (in Chinese)
- [22] 张红梅, 沙晋明. 基于 RS 与 GIS 的福州市生态环境脆弱性研究[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(2):133-137
- ZHANG H M, SHA J M. RS and GIS based study on fragility of ecological environment in Fuzhou City[J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(2):133-137. (in Chinese)
- [23] 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
- ZHONG X J, SUN B P, ZHAO Y, *et al.* Ecological vulnerability evaluation based on principal component analysis in Yunnan province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(1):109-113. (in Chinese)
- [24] 王正泉. 延河流域水土保持生态建设规划方案研究[D]. 南京:河海大学, 2005
- WANG Z G. Study on the soil and water conservation and ecological rehabilitation plan scheme in Yanhe river basin[D]. Nanjing: Hehai University, 2005. (in Chinese)
- [25] 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
- WANG J M, WANG Y K. On the calculation of eco-environment fragility in Loess Plateau Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1996, 16(3):32-36. (in Chinese)
- [26] 胡振琪, 陈涛. 基于 ERDAS 的矿区植被覆盖度遥感信息提取研究——以陕西省榆林市神府煤矿区为例[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(2):164-167
- HU Z Q, CHEN T. ERDAS aided extraction of vegetation fraction from remote sensing information in coalmine area based—a case study of Shenfu Coalmine[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(2):164-167. (in Chinese)