

doi: 10. 6046/zrzyyg. 2020281  
引用格式: 杨蕴雪,张艳芳. 基于空间距离指数的延河流域生态敏感性时空演变特征[J]. 自然资源遥感,2021,33(3):229 – 237. (Yang Y X,Zhang Y F. Temporal – spatial evolutionary characteristics of ecological sensitivity in Yanhe River basin based on spatial distance index[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2021,33(3):229 – 237. )

# 基于空间距离指数的延河流域生态敏感性时空演变特征

杨蕴雪<sup>1,2</sup>, 张艳芳<sup>1,2</sup>  
(1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院,西安 710119; 2. 陕西师范大学  
地理学国家级实验教学示范中心,西安 710119)

**摘要:**生态敏感性是生态系统对自然环境变化和人类活动干扰的敏感程度,可以反映生态环境问题发生的难易程度和可能性大小。以黄土丘陵沟壑区延河流域为例,选取水土流失敏感性指数、生态风险敏感性指数和生物多样性敏感性指数 3 个定量评价指标,基于空间距离指数构建流域综合生态敏感性指数 (comprehensive ecological sensitivity index, CESI),并结合重心模型探讨 1996—2016 年间延河流域生态敏感性的时空变化情况。研究结果表明: ①从时间变化来看,延河流域生态敏感性总体呈下降趋势, CESI 由 1996 年的 1.38 上升到 2016 年的 1.41,表明延河流域生态环境质量有所改善; ②从空间分布变化看,延河流域 1996—2016 年间生态敏感性空间分布情况变化较大,1996 年生态敏感性较高地区集中在延河流域上游部分,2006 年以后生态敏感性较高地区主要分布在延河流域中游及下游的部分地区; ③1996—2016 年,延河流域各级生态敏感性区域重心向延河流域中游转移,生态敏感性分布由 1996 年的集中分布转为 2016 年的集中与分散相结合的分布情况; ④延河流域生态敏感性受土地利用方式影响较大,延河流域“退耕还林(草)”工程及综合治理工程在生态敏感性转好过程中起关键作用。

**关键词:**生态敏感性; 时空变化; 空间距离指数; 重心模型; 延河流域

**中图法分类号:** TP 79   **文献标志码:** A   **文章编号:** 2097 – 034X(2021)03 – 0229 – 09

## 0 引言

随着人口和社会经济的快速发展,人类活动对流域自然环境和生态系统的影响范围及影响强度日益增加,流域生态系统结构发生了较为深刻的变化,生态压力和生态敏感性逐渐增大,致使流域成为区域人地关系十分紧张、敏感而又复杂的地理单元之一<sup>[1]</sup>。生态敏感性分析通过综合多种环境影响因素反映区域生态系统的稳定情况,对其进行探索研究对于区域环境保护和可持续发展具有重要的意义<sup>[2-3]</sup>。关于生态敏感性的研究最早始于 20 世纪 60 年代的美国,麦克哈格 (McHarg) 在适宜性评价的基础上提出了生态敏感性分析模型。国内欧阳志云等<sup>[4]</sup>最早提出生态敏感性概念,并提出了中国生态敏感性分区及各分区的特点。生态敏感性的研究内容主要分为生态敏感性分析、生态敏感性评价及生态敏感性评价理论应用 3 个方面,并多结合遥感 (remote sensing, RS) 与地理信息系统 (geographic

information system, GIS) 等技术手段进行研究<sup>[5-7]</sup>。如颜磊等<sup>[8]</sup>考虑自然和人文两类影响因子,选取 7 个指标,对北京市域生态敏感性进行综合评价; 张广创等<sup>[2]</sup>基于 GIS 对锡尔河中游生态敏感性空间分布特征及分异规律进行了分析。生态敏感性评价理论的应用则体现在生态安全格局构建<sup>[9]</sup>、生态红线划定<sup>[10]</sup>等研究中。研究尺度主要基于国家<sup>[11]</sup>、省域<sup>[12]</sup>、市域<sup>[8]</sup>、流域<sup>[13]</sup>等尺度。研究方法主要包括层次分析法、变异系数法、专家打分法等。目前关于生态敏感性的研究还处于探索与发展阶段,尚未形成统一标准的评价指标体系,且在敏感性影响因素方面重自然环境因素、人类干扰因素,造成评价结果存在极大的不确定性<sup>[3]</sup>。

延河流域作为黄土高原丘陵沟壑区典型区域,降雨时空分配严重不均,导致区域干旱频发,水土流失严重,加之受人类活动干扰的影响,生态环境十分脆弱。基于此,本文以延河流域为例,从自然环境、人类活动、生物干扰 3 个方面分别选取指标构建水土流失敏感性指数、生态风险敏感性指数和生物多

收稿日期: 2020 – 09 – 07; 修订日期: 2021 – 02 – 08  
基金项目: 国家社会科学基金项目“中国丝绸之路经济带生态文明建设评价与路径研究”(编号: 14XKS091)资助。  
第一作者: 杨蕴雪(1995 – ),女,硕士研究生,主要从事生态环境遥感方面的研究。Email: 282166536@qq.com。  
通信作者: 张艳芳(1969 – ),女,副教授,主要从事水土资源评价、生态安全和低碳方面的研究。Email: zhangyf@snnu.edu.cn。

样性敏感性指数,在此基础上构建综合生态敏感性模型,对延河流域生态敏感性时空演变特征进行分析,以期为延河流域甚至黄土高原相似地区的生态环境保护 and 可持续发展提供科学参考。

## 1 研究区概况及数据源

### 1.1 研究区概况

延河流域(图1)地处黄河流域中游陕西省北部,地理范围介于  $N36^{\circ}23' \sim 37^{\circ}28'$ ,  $E108^{\circ}40' \sim 110^{\circ}29'$  之间。延河是黄河的一级支流,为延安市第二大河。发源于靖边县白于山赐湾周山,由西北向东南,流经志丹、安塞、宝塔等区县,于延长县南河沟凉水岸附近汇入黄河,全长 286.9 km,共有 156 条一级支流,主要支流有杏子河、坪桥川、蟠龙川、西川河等。流域总面积 7 725 km<sup>2</sup>。该区域属于典型的黄土高原丘陵沟壑区,地形复杂,植被覆盖条件较差,水土流失情况十分严重,是黄土高原生态环境重点保护区域。

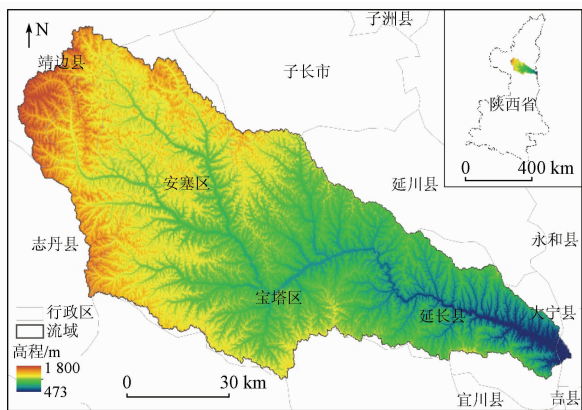


图1 延河流域示意图

Fig.1 The sketch map of Yanhe River Basin

### 1.2 数据源

本文所使用的研究数据主要有:①延河流域 30 m 土地利用数据(参考 1995 年、2005 年、2015 年 30 m 土地利用数据,对 1996 年、2006 年、2016 年 Landsat 数据进行解译,划分为耕地、林地、草地、建设用地、水体、未利用地等 6 种类型,并进行样点核查与校正,解译精度较高,符合研究需求);②延河流域及周围共 17 个气象站 1996—2016 年逐日降水数据,数据来源于中国气象数据网;③数字高程数据(digital elevation model, DEM),分辨率 30 m,来源于地理空间数据云平台;④1:100 万中国土壤数据集,来源于寒区旱区科学数据中心;⑤归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)数据,选取植被覆盖度较高、含云量较低、且时

间相近的 7—8 月份的 Landsat 数据(来源于美国地质调查局),在 ENVI5.3 中进行预处理及 NDVI 计算。将所有数据在 ArcGIS10.2 中统一转化为 WGS\_1984\_Albers 投影坐标,并统一重采样为 30 m × 30 m 的栅格数据。

## 2 研究方法

### 2.1 综合生态敏感性模型的构建

建立科学的生态敏感性模型,有助于对流域生态敏感性进行全面的评价,提高评价的科学性与合理性<sup>[2]</sup>。近些年来,延河流域受人类活动影响巨大,土地利用方式变化频繁,水土流失情况较为严重,生态环境十分脆弱。针对研究区目前的生态情况,本文从水土流失敏感性、生态风险敏感性、生物多样性敏感性 3 方面入手,基于空间距离指数构建综合生态敏感性模型。

#### 2.1.1 水土流失敏感性指数

水土流失敏感性指数可以反映生态过程中水土流失发生的潜在可能性及其程度<sup>[14]</sup>。采用修正通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE),通过计算土壤侵蚀量对延河流域的水土流失敏感性进行定量评估<sup>[15]</sup>。RUSLE 的表达式为:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P, \quad (1)$$

式中:  $A$  为土壤侵蚀量,  $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ ;  $R$  为降水侵蚀力因子,  $MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$ ;  $K$  为土壤可蚀性因子,  $t \cdot hm^2 \cdot h \cdot hm^{-2} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ ;  $LS$  为坡度与坡长因子;  $C$  为地表覆盖因子;  $P$  为水土保持措施因子。

#### 2.1.2 生态风险敏感性指数

生态风险敏感性指数是种群或生态系统及其组分对自然环境变化或人类活动胁迫的反映程度<sup>[13,16]</sup>。已有研究表面土地利用变化对生态系统有着重要的影响,同生态风险之间有着密切的相关性<sup>[17-18]</sup>。因此本文利用土地利用数据对研究区的生态风险敏感性进行研究,重点评估生态系统受人类干扰因素的影响。其表达式为:

$$ERI = \sum_{i=1}^n \frac{S_i W_i}{S}, \quad (2)$$

式中:  $ERI$  为土地生态风险指数;  $S_i$  为样地内第  $i$  种土地利用类型的面积;  $S$  为样地总面积;  $W_i$  为第  $i$  种土地利用类型生态风险强度权重。按照研究区土地利用斑块平均面积的 2~5 倍进行格网采样<sup>[19]</sup>,具体采用 4 km × 4 km 格网对研究区进行划分,将面

积大于 0.5 个格网的作为一个单独样区,面积小于 0.5 个格网的合并到相邻样区,最终得到 480 个样区。对每个样区计算生态风险敏感性指数后将所获得的值赋予其所在样区的中心点,并在 ArcGIS 中插值以进行空间可视化表达<sup>[20]</sup>。根据前人研究成果并结合研究区特点<sup>[21-22]</sup>,延河流域各种土地利用类型的生态风险强度权重分别为:耕地 0.314,林地 0.035,草地 0.055,水体 0.06,建设用地 0.402,未利用地 0.134。

2.1.3 生物多样性敏感性指数

生物多样性敏感性反映了一定时间一定区域内所有生物物种和生态系统的复杂性受人类干扰及环境基质的影响情况<sup>[23]</sup>。最小累积阻力 (minimum cumulative resistance, MCR) 模型被广泛应用在物种保护研究中<sup>[24]</sup>,可用生物空间流动阻力来表示生物多样性敏感性。生物空间流动阻力值越大,生物多样性水平越低,敏感性越高<sup>[3]</sup>。基于此,本研究采用 MCR 模型构建生物多样性敏感性指数。其表达式为<sup>[25]</sup>:

$$MCR = f \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (D_{ij} \times R_i) \quad (3)$$

式中:  $i$  为景观单元,  $i = 1, \dots, m$ ;  $j$  为生态源地,  $j = 1, \dots, n$ ;  $MCR$  为从源  $j$  扩散到空间某点的最小累积阻力;  $f$  为反映  $MCR$  与变量  $(D_{ij} \times R_i)$  之间正向关系

$$CESI = \sqrt{(A - A_{\max})^2 + (ERI - ERI_{\max})^2 + (MCR - MCR_{\max})^2} \quad (4)$$

式中:  $A$  为某一像元的水土流失敏感性指数;  $ERI$  为某一像元的生态风险敏感性指数;  $MCR$  为某一像元的生物多样性敏感性指数; 下标  $\max$  表示最大值。

2.2 生态敏感性重心转移模型

重心转移模型可以很好地反映出某一地理现象的空间变化情况,多用于经济发展及人口变迁等研究中,本文将重心模型的相关研究方法引入到生态敏感性分析的研究中,通过构建生态敏感性重心转移距离、生态敏感性重心转移角度<sup>[29-30]</sup>两个指标更加直观地显示研究区生态敏感性的时空演变特征。

1) 生态敏感性重心转移距离。通过计算不同时期生态敏感性重心的转移距离,分析生态敏感性的时空演变特征。转移距离  $d$  的计算公式为:

$$d = \sqrt{(x_{t+1} - x_t)^2 + (y_{t+1} - y_t)^2} \quad (5)$$

式中:  $(x_{t+1}, y_{t+1})$  为  $t + 1$  时间点的生态敏感性重心;  $(x_t, y_t)$  为  $t$  时间点的生态敏感性重心。

2) 生态敏感性重心转移角度。生态敏感性重心转移角度可以更加客观、精确地描述生态敏感性

的函数;  $D_{ij}$  为某一质点从源  $j$  扩散到空间某点穿过景观  $i$  的距离;  $R_i$  为景观表面  $i$  对该质点流向某个方向扩散的阻力。

由于延河流域无自然保护区,本文结合研究区特点,选取面积大于 100  $\text{hm}^2$  且在空间上具有连续性的林地、水域作为生态源地<sup>[26]</sup>。

从自然因素和人类活动两方面考虑,以植被覆盖度表示自然环境影响,以土地利用类型表示人类活动干扰情况,选取植被覆盖度和土地利用类型作为阻力因子并将权重各设置为 0.5<sup>[27]</sup>,在 ArcGIS10.2 中利用 cost distance 工具构建最小阻力模型。

2.1.4 综合生态敏感性

当前研究在进行生态敏感性评价时多是选取一定的指标后,对指标赋予不同的权重,将多因子进行加权叠加计算综合生态敏感性。为克服传统赋权方法的主观性,本文采用基于空间距离指数的方法构建延河流域综合生态敏感性:对水土流失敏感性指数、生态风险敏感性指数及生物多样性敏感性指数进行归一化处理,处理后的 3 个指数构成一个三维空间,分别取其最高值作为空间综合生态敏感性最高的点,计算空间中其他点到敏感性最高点的距离,距离越大,敏感性越低<sup>[28]</sup>。综合生态敏感性指数 (comprehensive ecological sensitivity index, CESI) 的计算公式如下:

的重心转移方向。本研究以正北方向为起始方向,顺时针方向旋转角度逐渐增大,旋转的角度表示偏移正北方向的角度,范围为  $0^\circ \sim 360^\circ$ 。转移角度  $\theta$  的计算公式为:

$$\theta = \arctan[(x_{t+1} - x_t)/(y_{t+1} - y_t)] \quad (6)$$

式中,  $\theta$  为生态敏感性重心转移角度,值域为  $(-\pi/2, \pi/2)$ ,根据一定函数将所得值转化到  $0^\circ \sim 360^\circ$  之间,并在应用时根据象限进行具体判断。

3 结果与分析

3.1 单指标生态敏感性时空变化特征

3.1.1 水土流失敏感性时空变化特征

延河流域 1996 年、2006 年、2016 年水土流失敏感性如图 2 所示。由图 2 可以看出,延河流域水土流失敏感性 1996 年、2006 年、2016 年空间分布情况有很大差异。1996 年敏感性较高的区域位于流域上游,2006 年高敏感性区域分散在整个延河流域,而 2016 年水土流失敏感性较高的区域主要位于流

域中下游。原因主要为水土流失受降雨影响较大,水土流失敏感性空间分布与降水侵蚀力空间分布基本一致。从时间上看延河流域水土流失敏感性总体

呈减小的趋势,这与 1998 年延河流域开始实施“退耕还林(草)工程”密不可分。

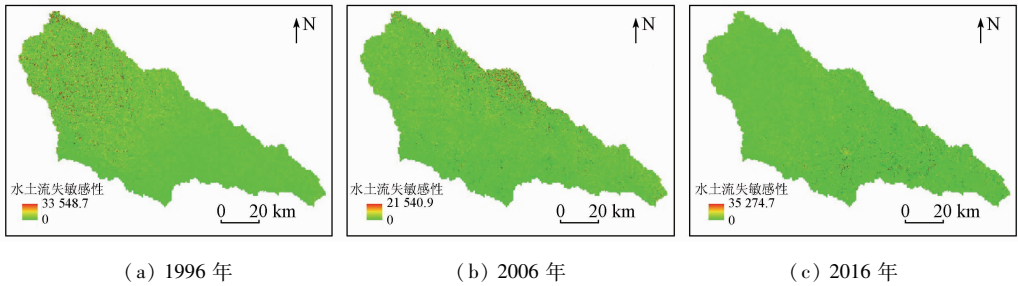


图 2 水土流失敏感性  
Fig.2 Soil erosion sensitivity

3.1.2 生态风险敏感性时空变化特征

延河流域 1996—2016 年生态风险敏感性变化情况如图 3 所示。由图 3 可以看出,延河流域大部分区域生态风险敏感性较高。从空间分布上看,敏感性较高的区域主要分布在安塞区的华子坪至宝塔区甘谷驿的中游部分,从行政区上看主要位于流域中部的宝塔区以及安塞区和延长县的部分地区。而低敏感地区主要位于流域上游的靖边县、志丹县、安塞区交界的地区及流域中下游南部边缘地区。结合研究时段内延河流域土地利用覆盖情况进一步对延河流域生态敏感性进行分析。对比图 4 的土地利用覆盖图可以看出,延河流域 1996—2016 年间耕地面积不断减少,林地、草地及建设用地面积不断增加,

流域中游人类活动较多的耕地及城镇建设用地区域生态风险敏感性较高,而土地利用覆盖类型以草地和林地为主的区域生态敏感性较低。从时间上看,延河流域生态风险敏感性总体降低。其中,生态风险敏感性最大值呈先减小后增加的趋势,主要是由于黄土高原“退耕还林(草)”工程在 2010 年前后由规模扩张转为成果巩固,且 2010 年后流域城镇化速度加快,尤其是延安市宝塔区,这使得城镇化程度较高的地方敏感性增大,致使敏感性最高值增加,但整体上来看,延河流域生态风险敏感性高的区域面积有所减小,低敏感区域面积逐渐增加,表明延河流域生态风险敏感性总体呈降低趋势。

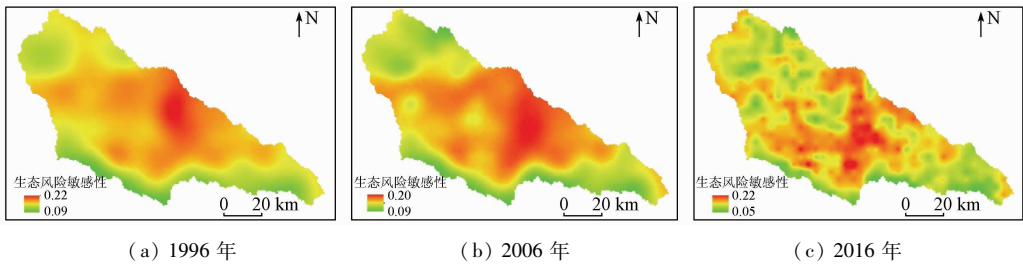


图 3 生态风险敏感性  
Fig.3 Ecological risk sensitivity

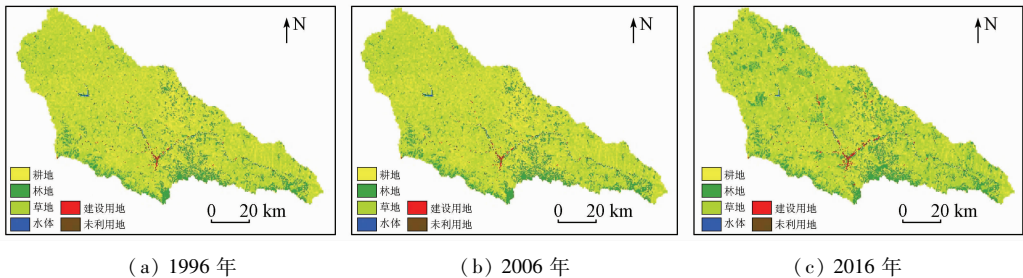


图 4 土地利用覆盖情况  
Fig.4 Land use and coverage

3.1.3 生物多样性敏感性时空变化特征

延河流域 1996—2016 年生物多样性敏感性变

化如图 5 所示。由图 5 可以看出,研究区 1996 年生物多样性敏感性较高的区域位于流域上游西北角,

这是由于延河流域上游为梁峁丘陵沟壑区,且植被覆盖较少。2006 年与 2016 年的生物多样性敏感性空间分布情况较为相似,主要位于中游安塞区中部及上游部分地区。从时间上看 2006 年与 2016 年的生物多样性敏感性最高值同 1996 年相比大幅度降

低,2016 年与 2006 年相比又有所降低,这是由于“退耕还林(草)”工程实施以来,耕地大面积减少,林地草地面积增加,植被覆盖度逐渐增高,生物多样性敏感性有所缓解。

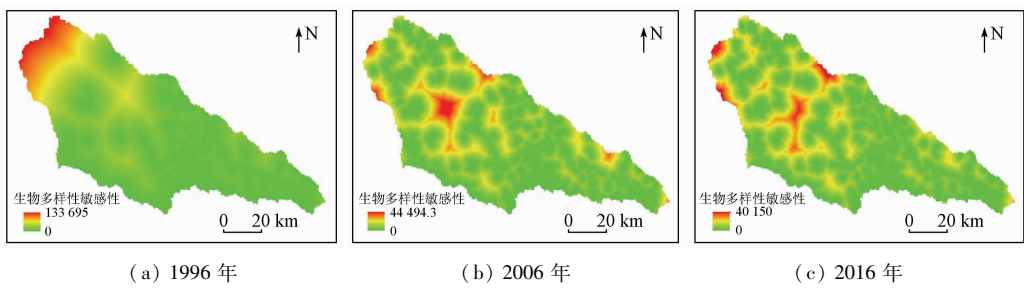


图 5 生物多样性敏感性  
Fig.5 Biodiversity sensitivity

3.2 综合生态敏感性时空变化特征

将生态敏感性根据自然断点法划分为不敏感、轻度敏感、中度敏感、重度敏感、极度敏感 5 个等级,并统计每个等级的面积,结果如表 1 所示。

表 1 延河流域生态敏感性分级及面积统计  
Tab.1 Ecological sensitivity classification and area statistics of Yanhe River Basin

| 敏感性<br>级别 | 1996 年                 |          | 2006 年                 |          | 2016 年                 |          |
|-----------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|
|           | 面积/<br>km <sup>2</sup> | 比例/<br>% | 面积/<br>km <sup>2</sup> | 比例/<br>% | 面积/<br>km <sup>2</sup> | 比例/<br>% |
| 不敏感       | 938.62                 | 12.34    | 1 164.92               | 15.31    | 1 256.07               | 16.50    |
| 轻度敏感      | 2 264.91               | 29.75    | 1 954.29               | 25.67    | 2 668.15               | 35.05    |
| 中度敏感      | 2 364.33               | 31.06    | 2 173.55               | 28.55    | 2 078.20               | 27.30    |
| 重度敏感      | 1 225.01               | 16.09    | 1 456.84               | 19.14    | 1 174.94               | 15.44    |
| 极度敏感      | 819.24                 | 10.76    | 862.51                 | 11.33    | 434.75                 | 5.71     |
| CESI 均值   | 1.38                   |          | 1.38                   |          | 1.41                   |          |

研究表明,1996—2016 年间,延河流域的生态敏感性总体降低,CESI 均值在 1996 年和 2006 年持平,为 1.38,到 2016 年增加到 1.41,表明延河流域生态环境从 2006 年开始明显好转。由表 1 可以看出,延河流域生态敏感性为不敏感的面积整体呈上升趋势:1996 年不敏感区域面积占总面积的 12.34%,到 2006 年上升为 15.31%,2016 年不敏感区域占总面积的比例达到 16.50%。轻度敏感区域面积在 1996—2016 年间呈“V”型结构:1996 年面

积比例为 29.75%,2006 年下降为 25.67%,到 2016 年上升为 35.05%。1996—2016 年间中度敏感区域呈下降趋势:从 1996 年占总面积的 31.06%下降到 2006 年的 28.55%,再下降到 2016 年的 27.3%。重度敏感区域和极度敏感区域变化都呈倒“V”结构:1996 年生态敏感性为重度敏感、极度敏感的区域面积分别占总面积的 16.09%和 10.76%;2006 年重度敏感区域上升为 19.14%,极度敏感区域有小幅上升,为 11.33%;2016 年重度敏感区域下降为 15.44%,极度敏感区域大幅度下降到 5.71%。总体来看,重度、极度敏感区域面积在 20 a 间都有所下降。这说明延河流域“退耕还林(草)”及综合治理工程取得了积极的效果。

从空间分布上看,延河流域 1996—2016 年间不同等级生态敏感性分布情况有所变化,如图 6 所示。由图中可以看出,1996 年重度、极度敏感区域主要分布在延河流域上游及中游安塞区部分地区,不敏感、轻度敏感地区在流域南部呈带状分布。2006 年与 1996 年相比,上游大部分重度、极度敏感区域转为不敏感、轻度敏感,重度、极度敏感区域主要分布在安塞区中部地区及宝塔区、延长县部分地区,不敏感、轻度敏感区分布在流域南部边缘地区。2016 年各级敏感性区域空间分布情况与 2006 年大致相同,

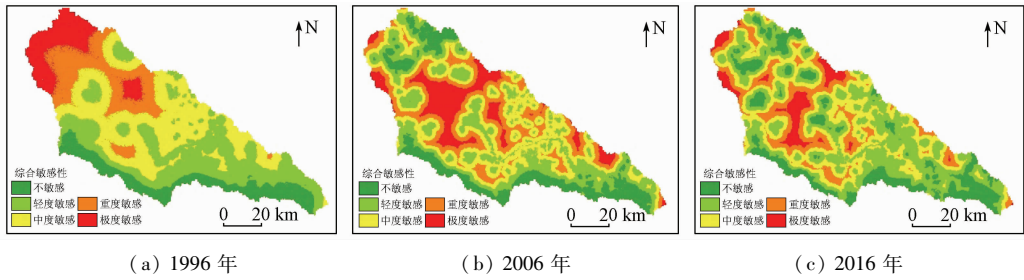


图 6 综合敏感性分级图  
Fig.6 Comprehensive ecological sensitivity classification map

但生态敏感性为重度、极度敏感的面积明显减少且分布更加分散。造成敏感性分布情况发生变化的原因主要有两点：一是受人类活动影响,土地利用类型发生转变,使得敏感性随之变化;二是在延河流域上游地区,梁多峁少,河床比降大,水土流失情况严重,因此在 1996 年流域上游地区生态风险敏感性较高,随着流域上游植被覆盖度的增加,水土流失情况有所缓解,生态敏感性随之减小。

3.3 生态敏感性重心转移特征

为了进一步了解延河流域生态敏感性的时空变化特征,对延河流域不同时期不同等级的生态敏感性进行重心转移变化分析,见图 7、表 2。由图 7 及表 2 可知,延河流域 1996—2016 年间不同等级的生态敏感性重心都有一定的转移。1996 年不敏感区域重心落在流域南部边缘,2006 年向北偏西 31.22° 方向转移,转移距离 23.404 km,2016 年向东北方向小距离转移,总体呈向西北方向转移,转移距离较

大。这是由于延河流域历史时期天然植被破坏严重,只有流域中下游南部边缘区留有天然次生林分布,“退耕还林(草)”工程实施以后,中上游部分耕地转换为林地草地,生态敏感性减小,因此不敏感区域重心向上游方向转移。轻度敏感区域重心转移情况与不敏感区域重心转移情况类似,1996 年重心落在中下游分界部分,其后 20 a 里向上游方向转移 16.426 km。中度敏感区域重心变化较小,总体向上游方向转移 5.987 km。极度、重度敏感区域重心转移情况同不敏感、轻度敏感重心转移方向相反,1996 年极度、重度敏感性区域重心分别落在上游、中上游分界部分,其后向流域下游方向转移,转移距离分别为 30.036 km 和 19.087 km。综合图 7 及表 2 可以发现,各级生态敏感性区域重心逐渐向流域中部转移,这表明不同等级的生态敏感性区域在流域分布更加均匀且更加分散,流域各县(市)生态环境质量差异逐渐减小,生态环境治理已见成效。

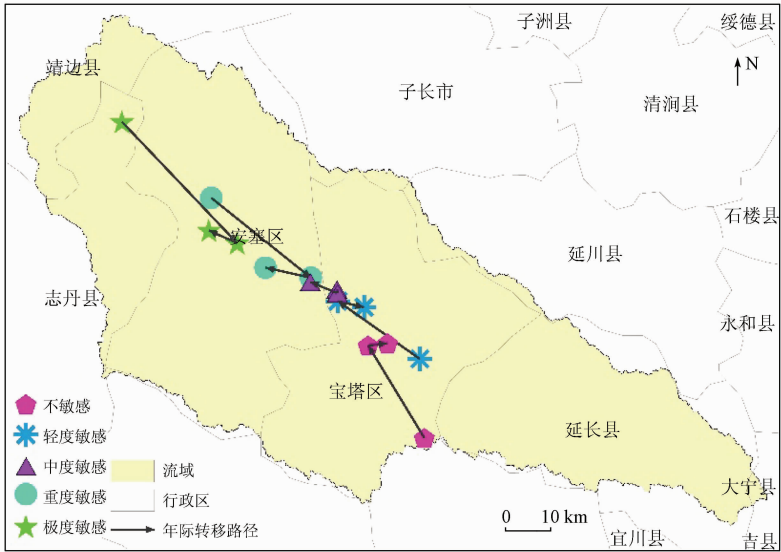


图 7 生态敏感性重心转移图  
Fig.7 Ecological sensitivity shift map

表 2 1996—2016 年生态敏感性重心转移距离及转移角度  
Tab.2 The transfer distance and angle of the ecological sensitivity center of gravity from 1996 to 2016

| 敏感性<br>级别 | 1996—2006 年 |              | 2006—2016 年 |              | 1996—2016 年 |              |
|-----------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|           | 转移距<br>离/km | 转移角<br>度/(°) | 转移距<br>离/km | 转移角<br>度/(°) | 转移距<br>离/km | 转移角<br>度/(°) |
| 不敏感       | 23.404      | 328.78       | 4.205       | 83.72        | 21.964      | 338.77       |
| 轻度敏感      | 21.635      | 305.15       | 5.791       | 102.81       | 16.426      | 312.85       |
| 中度敏感      | 0.809       | 173.67       | 6.332       | 292.32       | 5.987       | 285.51       |
| 重度敏感      | 27.577      | 128.72       | 10.054      | 282.46       | 19.087      | 142.20       |
| 极度敏感      | 36.146      | 136.52       | 6.713       | 114.34       | 30.036      | 141.36       |

①: 以正北方向为 0°。

4 结论与讨论

4.1 结论

本研究结合延河流域的多源数据,选取生态敏

感性风险指数、水土流失敏感性指数、生物多样性敏感性指数基于空间距离构建流域 CESI,综合分析了延河流域生态敏感性的时空演变特征,主要结论如下:

1) 延河流域 1996—2016 年间生态敏感性总体呈降低趋势,不敏感、轻度敏感区域面积由 1996 年的 3 203.53 km<sup>2</sup> 增加到 2016 年的 3 924.22 km<sup>2</sup>,重度、极度敏感区域面积由 1996 年的 2 044.25 km<sup>2</sup> 减少到 2016 年的 1 609.69 km<sup>2</sup>,综合生态敏感性指数由 1996 年的 1.38 上升为 2016 年的 1.41。表明延河流域生态环境整体向好的方向发展,流域生态环境治理取得了积极成效。

2) 1996—2016 年延河流域生态敏感性分布情

况变化较大,1996 年生态敏感性较高区域集中分布在流域上游及流域中游部分地区,其后开始向中下游转移,2006 年及 2016 年极度、重度敏感性区域主要位于流域中游及下游部分地区。而上游生态敏感性呈好转趋势。

3)1996—2016 年间,延河流域各级生态敏感性重心发生较大变化,流域极度、重度敏感性区域重心向中下游方向转移,不敏感、轻度敏感性区域重心向中上游方向转移,各等级生态敏感性重心总体呈现向流域中心集中转移趋势,生态敏感性由 1996 年的集中分布转为 2016 年的集中与分散相结合的分布特点。

4)延河流域生态敏感性分布受土地利用方式影响较大,1996—2016 年间,“退耕还林(草)”工程及延河流域综合治理工程对延河流域生态敏感性降低、生态环境好转起到了关键性作用,此外,在流域上游的梁峁丘陵沟壑区除受人类活动影响外,由于植被覆盖度的增加使得水土流失情况减弱,也是生态敏感性降低的重要原因。建议继续加大流域水土保持、植被恢复力度。

4.2 讨论

本文结合研究区特点,从相对独立的自然因素、人类干扰因素及生物多样性因素 3 方面选取敏感性指标,以此构建综合生态敏感性指数分析延河流域生态敏感性时空演变特征。在 CESI 构建方面,本文采取了基于生态距离的计算方法,一定程度上克服了传统根据专家知识进行赋权的主观性,并且为了验证该方法的可用性收集查阅了延河流域相关资料及前人研究成果<sup>[21,31-32]</sup>,发现其与本文研究结果基本吻合,说明本文研究内容具有一定的可信度。此外,本文在分析生态敏感性时空变化时引入重力模型,研究不同等级的生态敏感性的重心转移特征,更加直观的体现了延河流域生态敏感性的时空演变趋势。但是本文仅对延河流域整体的时空演变特征进行了分析,尚未从行政单元或分区进行进一步研究,而不同时期、不同区域的生态敏感性特征及主要影响因素都可能有所差异,因此可以进一步在更小尺度单元上进行研究,使评价结果可以更加方便地应用到具体实践中。

参考文献(References):

[1] 许妍,高俊峰,赵家虎,等. 流域生态风险评价研究进展[J]. 生态学报,2012,32(1):284-292.  
Xu Y, Gao J F, Zhao J H, et al. The research progress and prospect of watershed ecological risk assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(1): 284-292.  
[2] 张广创,王杰,刘东伟,等. 基于 GIS 的锡尔河中游生态敏感

性分析与评价[J]. 干旱区研究,2020,37(2):506-513.  
Zhang G C, Wang J, Liu D W, et al. Analysis and evaluation of the ecological sensitivity in the middle reaches of the Syr Darya River based on GIS[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 506-513.  
[3] 李振亚,魏伟,周亮,等. 基于空间距离指数的中国西北干旱内陆河流域生态敏感性时空演变特征——以石羊河流域为例[J]. 生态学报,2019,39(20):7463-7475.  
Li Z Y, Wei W, Zhou L, et al. Temporal and spatial evolution of ecological sensitivity in arid inland river basins of northwest China based on spatial distance index: A case study of Shiyang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7463-7475.  
[4] 欧阳志云,王效科,苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J]. 生态学报,2000,20(1):9-12.  
Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. China's eco-environmental sensitivity and its spatial heterogeneity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(1): 9-12.  
[5] 李益敏,管成文,朱军. 基于 GIS 的星云湖流域生态敏感性评价[J]. 水土保持研究,2017,24(5):266-271,278.  
Li Y M, Guan C W, Zhu J. GIS-based ecological sensitivity analysis in Xingyun Lake Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(5): 266-271, 278.  
[6] 钟林生,唐承财,郭华. 基于生态敏感性分析的金银滩草原景区旅游功能区划[J]. 应用生态学报,2010,21(7):1813-1819.  
Zhong L S, Tang C C, Guo H. Tourism function zoning of Jinyintan grassland scenic area in Qinghai Province based on ecological sensitivity analysis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7): 1813-1819.  
[7] 刘春霞,李月臣,杨华,等. 三峡库区重庆段生态与环境敏感性综合评价[J]. 地理学报,2011,66(5):631-642.  
Liu C X, Li Y C, Yang H, et al. RS and GIS-based assessment for eco-environmental sensitivity of the Three Gorges Reservoir area of Chongqing[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 631-642.  
[8] 颜磊,许学工,谢正磊,等. 北京市域生态敏感性综合评价[J]. 生态学报,2009,29(6):3117-3125.  
Yan L, Xu X G, Xie Z L, et al. Integrated assessment on ecological sensitivity for Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3117-3125.  
[9] 杜腾飞,齐伟,朱西存,等. 基于生态安全格局的山地丘陵区自然资源空间精准识别与管制方法[J]. 自然资源学报,2020,35(5):1190-1200.  
Du T F, Qi W, Zhu X C, et al. Precise identification and control method of natural resources space based on ecological security pattern in mountainous hilly area[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(5): 1190-1200.  
[10] 王雅竹,段学军. 生态红线划定方法及其在长江岸线中的应用[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(11):2681-2690.  
Wang Y Z, Duan X J. Ecological red line demarcation method and its application in the Yangtze River coastline[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(11): 2681-2690.  
[11] 刘军会,高吉喜,马苏,等. 中国生态环境敏感区评价[J]. 自然资源学报,2015,30(10):1607-1616.  
Liu J H, Gao J X, Ma S, et al. Evaluation of ecological sensitivity in China[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(10): 1607-

- 1616.
- [12] 杨月圆,王金亮,杨丙丰. 云南省土地生态敏感性评价[J]. 生态学报,2008,28(5):2253–2260.  
Yang Y Y, Wang J L, Yang B F. Eco-sensitivity assessment of land in Yunnan Province[J]. Acta Ecologica Sinica,2008,28(5):2253–2260.
- [13] 魏伟,石培基,周俊菊,等. 基于区统计方法的石羊河流域土地生态敏感性评价[J]. 水土保持研究,2015,22(6):240–244.  
Wei W, Shi P J, Zhou J J, et al. Land ecological sensitivity evaluation of Shiyang River basin based on zonal statistics[J]. Research of Soil and Water Conservation,2015,22(6):240–244.
- [14] 王娇,程维明,祁生林,等. 基于 USLE 和 GIS 的水土流失敏感性空间分析——以河北太行山区为例[J]. 地理研究,2014,33(4):614–624.  
Wang J, Cheng W M, Qi S L, et al. Sensitive evaluation and spatial analysis of soil and water loss based on USLE and GIS: Taking Taihang Mountain area of Hebei Province as an example[J]. Geographical Research,2014,33(4):614–624.
- [15] 秦伟,朱清科,张岩. 基于 GIS 和 RUSLE 的黄土高原小流域土壤侵蚀评估[J]. 农业工程学报,2009,25(8):4,157–163.  
Qin W, Zhu Q K, Zhang Y. Soil erosion assessment of small watershed in Loess Plateau based on GIS and RUSLE[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2009,25(8):157–163.
- [16] 徐兰,罗维,周宝同. 基于土地利用变化的农牧交错带典型流域生态风险评价——以洋河为例[J]. 自然资源学报,2015,30(4):580–590.  
Xu L, Luo W, Zhou B T. Landscape ecological risk assessment of farming-pastoral ecozone based on land use change: A case study of the Yanghe Watershed, China[J]. Journal of Natural Resources,2015,30(4):580–590.
- [17] 臧淑英,梁欣,张思冲. 基于 GIS 的大庆市土地利用生态风险分析[J]. 自然灾害学报,2005,14(4):141–145.  
Zang S Y, Liang X, Zhang S C. GIS-based analysis of ecological risk on land-use in Daqing City[J]. Journal of Natural Disasters,2005,14(4):141–145.
- [18] 傅丽华,谢炳庚,张晔,等. 长株潭城市群核心区土地利用生态风险评价[J]. 自然灾害学报,2011,20(2):96–101.  
Fu L H, Xie B G, Zhang Y, et al. Ecological risk assessment of land use in core area of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban group[J]. Journal of Natural Disasters,2011,20(2):96–101.
- [19] 黄木易,何翔. 近 20 年来巢湖流域景观生态风险评估与时空演化机制[J]. 湖泊科学,2016,28(4):785–793.  
Huang M Y, He X. Landscape ecological risk assessment and its mechanism in Chaohu Basin during the past almost 20 years[J]. Journal of Lake Science,2016,28(4):785–793.
- [20] 苏海民,何爱霞. 基于 RS 和地统计学的福州市土地利用分析[J]. 自然资源学报,2010,25(1):91–99.  
Su H M, He A X. Analysis of land use based on RS and geostatistics in Fuzhou City[J]. Journal of Natural Resources,2010,25(1):91–99.
- [21] 段艺芳,任志远,周晓,等. 延安市土地生态风险时空格局演变研究[J]. 国土资源遥感,2020,32(1):120–129. doi:10.6046/gtzyyg.2020.01.17.
- Duan Y F, Ren Z Y, Zhou X, et al. Spatio-temporal variation in the land ecological risk of Yan'an City[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2020,32(1):120–129. doi:10.6046/gtzyyg.2020.01.17.
- [22] 马彩虹. 陕西黄土台塬区土地生态风险时空差异性评价[J]. 水土保持研究,2014,21(5):216–220.  
Ma C H. Assessment on spatiotemporal ecological risk in loess highland region of Shaanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation,2014,21(5):216–220.
- [23] 刘希朝,李效顺,韩晓彤,等. 基于最小阻力模型的资源型城市景观安全格局诊断研究——以徐州市为例[J]. 生态经济,2020,36(6):221–229.  
Liu X Z, Li X S, Han X T, et al. Research on diagnosis of resource-based urban landscape safety pattern based on MCR model: A case study of Xuzhou City[J]. Ecological Economy,2020,36(6):221–229.
- [24] 黄木易,岳文泽,冯少茹,等. 基于 MCR 模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化[J]. 自然资源学报,2019,34(4):771–784.  
Huang M Y, Yue W Z, Feng S R, et al. Analysis of spatial heterogeneity of ecological security based on MCR model and ecological pattern optimization in the Yuexi County of the Dabie Mountain Area[J]. Journal of Natural Resources,2019,34(4):771–784.
- [25] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报,1999,19(1):8–15.  
Yu K J. Landscape ecological security patterns in biological conservation[J]. Acta Ecologica Sinica,1999,19(1):8–15.
- [26] 潘竟虎,刘晓. 疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建[J]. 生态学杂志,2016,35(3):791–799.  
Pan J H, Liu X. Landscape ecological risk assessment and landscape security pattern optimization in Shule River Basin[J]. Chinese Journal of Ecology,2016,35(3):791–799.
- [27] 夏敏,张智超,文博,等. 苏南地区土地利用的生态敏感性分区[J]. 水土保持通报,2016,36(4):112–117.  
Xia M, Zhang Z C, Wen B, et al. Ecological sensitive zoning of land use in southern Jiangsu Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2016,36(4):112–117.
- [28] 石三娥,魏伟,杨东,等. 基于 RSEDI 的石羊河流域绿洲区生态环境质量时空演变[J]. 生态学杂志,2018,37(4):1152–1163.  
Shi S E, Wei W, Yang D, et al. Spatial and temporal evolution of eco-environmental quality in the oasis of Shiyang River Basin based on RSEDI[J]. Chinese Journal of Ecology,2018,37(4):1152–1163.
- [29] 何玉花,张东水,邱炳文,等. 中国红树林与典型区红树林群落重心迁移特征及共性关系[J]. 生态学杂志,2019,38(8):2326–2336.  
He Y H, Zhang D S, Qiu B W, et al. Gravity transfer characteristics and common relationships of mangroves in China and mangrove communities in typical area[J]. Chinese Journal of Ecology,2019,38(8):2326–2336.
- [30] 孙芹芹,吴志峰,谭建军. 基于热力重心的广州城市热环境时空变化分析[J]. 地理科学,2010,30(4):620–623.  
Sun Q Q, Wu Z F, Tan J J. Spatio-temporal changes of urban thermal environment with thermal centroid in Guangzhou[J]. Sci-

entia Geographica Sinica,2010,30(4):620-623.

[31] 吴金华,李纪伟,朱鸿儒. 基于 ArcGIS 区统计的延安市土地生态敏感性评价[J]. 自然资源学报,2011,26(7):1180-1188.

Wu J H,Li J W,Zhu H R. Land ecological sensitivity evaluation of Yan'an based on zonal statistics of ArcGIS[J]. Journal of Natural Resources,2011,26(7):1180-1188.

[32] 刘 琪. 基于土地利用变化的延河流域景观生态风险评价[D]. 西安:西北大学,2016.

Liu Q. Landscape ecological risk assessment of Yanhe watershed based on land use change[D]. Xi'an:Northwest University,2016.

Temporal – spatial evolutionary characteristics of ecological sensitivity in Yanhe River basin based on spatial distance index

YANG Yunxue<sup>1,2</sup>, ZHANG Yanfang<sup>1,2</sup>

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Geography, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** Ecological sensitivity refers to the sensitive degree of an ecosystem to the changes in the natural environment and the interference of human activities. It can be used to reflect the liable degree and possibility of the occurrence of ecological environmental problems. Taking the Yanhe River basin in the loess hilly and gully region as an example, this study selected three quantitative assessment indicators (i. e., sensitivity indices of soil erodibility, ecological risks, and biodiversity) to construct a composite environmental sensitivity index (CESI) based on spatial distance index for a river basin. Then it explored the temporal – spatial changes in the ecological sensitivity of the Yanhe River basin during 1996—2016 by combining the center of gravity model, obtaining the following results. ①From the perspective of temporal change, the ecological sensitivity in the Yanhe River basin during 1996—2016 showed a downward trend, with CESI increasing from 1.38 in 1996 to 1.41 in 2016. This indicates that the quality of the ecological environment in the Yanhe River basin improved during the period. ②From the perspective of spatial change, the spatial distribution of the ecological sensitivity in the Yanhe River basin greatly changed during 1996—2016. In detail, the areas with high ecological sensitivity were concentrated in the upper reaches in 1996 but were mainly distributed in the middle and lower reaches after 2006. ③The center of gravity of the ecologically sensitive areas at all levels shifted toward the middle reaches during 1996—2016. Meanwhile, the ecologically sensitive areas were distributed in a concentrated way in 1996 but in a both concentrated and dispersed manner in 2016. ④The ecological sensitivity in the Yanhe River basin was greatly affected by land use. The project of returning farmland to forest (grass) and comprehensive management project in the Yanhe River basin played a key role in the process of reducing ecological sensitivity.

**Keywords:** ecological sensitivity; temporal – spatial changes; spatial distance index; center of gravity model; Yanhe River basin

(责任编辑: 张 仙)