

DOI: 10.5846/stxb201902250347

李振亚, 魏伟, 周亮, 郭泽呈, 颀斌斌, 周俊菊. 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. 生态学报, 2019, 39(20): - .

Li Z Y, Wei W, Zhou L, Guo Z C, Xie B B, Zhou J J. 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. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): - .

# 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

李振亚<sup>1</sup>, 魏 伟<sup>1,\*</sup>, 周 亮<sup>2</sup>, 郭泽呈<sup>1</sup>, 颀斌斌<sup>3</sup>, 周俊菊<sup>1</sup>

1 西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070

2 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100010

3 兰州城市学院 旅游学院, 兰州 730070

**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反映程度及生态环境问题发生难易程度和可能性大小的重要因素之一。本文以中国西北地区典型的干旱内陆河流域—石羊河流域为例,通过借鉴前人研究成果及实地调查研究,将石羊河流域生态敏感性分为生态风险敏感性、水土流失敏感性和生物多样性敏感性三个方面,并系统构建生态风险敏感性指数、水土流失敏感性指数和生物多样性敏感性指数三个定量评价指标,对石羊河流域综合生态敏感性进行研究。并通过网格编码、圈层分析,探讨近 30 年石羊河流域生态敏感性的时空变化。研究结果表明:(1)1987—2016 年间石羊河流域生态敏感性总体上逐年降低,综合生态敏感性指数(Comprehensive ecological sensitivity index, CESI)值从 1987 年的 1.143 上升到 2016 年的 1.287,反映出流域生态环境当前还是向着可持续发展的方向发展;(2)流域生态敏感性整体偏高,常年极度敏感区和常年重度敏感区占流域总面积的 42.26%,空间分异明显,流域上游及下游荒漠区敏感性相对稳定,中下游绿洲区敏感性波动变化较为频繁,且波动变化区占总面积的 51.24%,这说明流域生态敏感性与人类活动及工农业生产有较为密切的关系;(3)目前流域生态敏感性整体趋于好转,但局部地区有恶化的趋势,敏感性波动降低的区域面积为 11 693.57 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 28.82%,敏感性波动升高的区域面积为 9 099.66 km<sup>2</sup>,占波动变化区总面积的 22.43%,这说明一方面在国家宏观政策的引导下,当地在生态环境保护方面做了大量工作,另一方面也表现出在全球生态环境逐渐恶化的大背景下,当地的生态环境治理工作仍然任重道远。

**关键词:**生态敏感性;时空变化;空间分析(圈层分析);干旱内陆河;石羊河流域

## 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

LI Zhenya<sup>1</sup>, WEI Wei<sup>1,\*</sup>, ZHOU Liang<sup>2</sup>, GUO Zecheng<sup>1</sup>, XIE Binbin<sup>3</sup>, ZHOU Junju<sup>1</sup>

1 College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

2 State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China

3 School of Urban Economics and Tourism Culture, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China

**Abstract:** Ecological sensitivity is reflection of ecological system to the change of natural environment and the interruption

基金项目:国家自然科学基金项目(41861040, 41761047)

收稿日期:2019-02-25; 修订日期:2019-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weiweigis2006@126.com

of human activities and one of the important factors for the difficulty and possibility of the occurrence of eco-environmental problem. We selected Shiyang River Basin—a typical arid inland river basin in the northwest region of China as an example. Through the reference on the research results of predecessors and field research, the ecological sensitivity of Shiyang River Basin is divided into three aspects which are the ecological risk sensitivity, soil erosion sensitivity, and biological diversity sensitivity. We established three quantitative assessing indexes including the ecological risk sensitivity index, soil erosion sensitivity index, and biological diversity sensitivity index. The comprehensive ecological sensitivity is studied in Shiyang River Basin. The temporal and spatial changes of ecological sensitivity in Shiyang River Basin in recent 30 years were discussed through grid coding and circle analysis. The results show that: (1) the ecological sensitivity of the Shiyang River Basin decreased from 1987 to 2016. The comprehensive ecological sensitivity index (CESI) value increased from 1.143 in 1987 to 1.287 in 2016, reflecting that the ecological environment of the basin is still in the direction of sustainable development. (2) The overall ecological sensitivity of the basin is high. The perennial extreme sensitive area and the perennial severe sensitive area account for 42.26% of the total area of the basin, and the spatial differentiation is obvious. The sensitivity of the upstream and downstream desert areas is relatively stable. The middle and lower reaches of the oasis area sensitivity fluctuations are more frequent, and fluctuations vary by 51.24% of the total area. This indicates that the ecological sensitivity of the basin is closely related to human activities and industrial and agricultural production. (3) At present, the overall ecological sensitivity of the basin tends to improve, but the local area has a tendency to deteriorate. The area with reduced sensitivity fluctuation is 11 693.57 km<sup>2</sup>, accounting for 28.82% of the total area of the basin. The area with increased sensitivity fluctuation is 9 099.66 km<sup>2</sup>, accounting for 22.43% of the total area of the volatility change zone. On the one hand, the local government has done a lot of work on the ecological environmental protection under the guidance of the national macro-policy. On the other hand, the local ecological environment management still has a long way to go because the global ecological environment is gradually deteriorating.

**Key Words:** ecological sensitivity; temporal and spatial changes; spatial analysis (circle analysis); arid inland river; Shiyang River Basin

进入 21 世纪以来,人们对生产、生活空间的需求不断增长,城镇空间、农业空间和生态空间的矛盾进一步加剧,导致生态空间不断被挤压,生态功能破坏,生态系统退化,生态环境恶化等一系列区域生态安全问题<sup>[1-2]</sup>。而生态敏感性作为反映区域潜在生态问题的重要参数,对其进行探索研究对区域生态建设和可持续发展具有重要的意义。

敏感性的概念最初由医学和生物学学者提出,20 世纪 70 年代 Coleman G 和 DeCoursey DG 将敏感性的概念引入生态学领域,开启了生态敏感性研究的序幕<sup>[3]</sup>。当前,生态敏感性的研究主要集中于对区域景观的敏感性研究,如对湿地<sup>[4]</sup>、地下水<sup>[5]</sup>、林带<sup>[6]</sup>、水域<sup>[7]</sup>等进行研究;对环境演变过程中的生态敏感性研究,主要是对酸雨<sup>[8]</sup>、土壤侵蚀<sup>[9]</sup>、沙漠化<sup>[10]</sup>、盐渍化<sup>[11]</sup>、水土流失<sup>[12]</sup>等进行研究;对特定生态过程的敏感性研究,主要对作物光合作用<sup>[13]</sup>、作物生长<sup>[14]</sup>、碳循环<sup>[15]</sup>等进行研究;对敏感性目的的研究,主要通过敏感性评价进行生态功能区划分<sup>[16]</sup>、城市选址<sup>[17]</sup>和旅游区划<sup>[18]</sup>等<sup>[19]</sup>。此外,在敏感性的研究尺度上主要包含国家<sup>[20]</sup>、省域<sup>[21]</sup>、流域<sup>[22]</sup>、市域以及县域<sup>[23]</sup>。其研究成果主要应用于指导城市规划建设、生态保护红线划定、土地科学利用、生态环境保护和建设和土地资源承载力分析等方面<sup>[24]</sup>。本文在整理上述研究结果后发现,虽然相关学者对生态敏感性的研究做了大量的工作,且取得长足进步,但对其的研究还处于发展阶段,在评价指标体系上并没有形成统一的标准,且评价指标主题单一,存在着很大的不确定性和随意性,造成评价体系普适性不强。在研究方法方面,主成分分析法、层次分析法、专家打分法等传统方法权重在生态敏感性评价与分区中应用广泛<sup>[25]</sup>。在敏感性影响因素方面,重自然环境因素研究,而忽视了人类干扰因素的研究,造成评价结果失真。

针对上述问题,本文以石羊河流域为例,从人类干扰因素、自然干扰因素和生物干扰因素 3 个层面出发,

选取生态风险敏感性指数、水土流失敏感性指数和生物多样性敏感性指数,构建综合生态敏感性指标,对石羊河流域的生态敏感性时空变化特征进行研究。石羊河流域是我国人口最密集、水资源开发利用程度最高、用水矛盾最突出、生态环境问题最严重的干旱区内陆河流域之一<sup>[26]</sup>。对其进行生态敏感性研究具有重要的现实意义,如可以明确生态环境保护的重点区域。此外,由于当前学术界对于干旱区内陆河流域的生态敏感性研究偏少。因此,对该区域的生态敏感性研究显得尤为重要。鉴于此,本文以极具代表性的干旱内陆河流域-石羊河流域为例,为中国及全球干旱内陆河流域的生态环境保护工作提供科学参考。

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区概况

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部,祁连山北麓,黄土、青藏、蒙新三大地理景观的交汇过渡地带,东以乌鞘岭、毛毛山、老虎山与黄河流域为界,西以大黄山、马营滩与黑河流域为界。地理位置介于  $101^{\circ}22'$ — $104^{\circ}16'$  E,  $36^{\circ}29'$ — $39^{\circ}27'$  E (图 1)<sup>[27]</sup>。流域行政区划包括凉州区、金昌市、民勤县、古浪县全部与天祝县部分地区,还有张掖肃南裕固族自治县和山丹县的部分区域、白银市景泰县的少部分地区。总面积约为  $4.16 \times 10^4$  km<sup>2</sup>。流域内地势南高北低,自西南向东北倾斜,且深居大陆腹地,属大陆性温带干旱气候,降水稀少,蒸发强烈。上游覆被类型有亚寒带针叶林、温带阔叶林和灌丛,间有高山草甸,中下游为人工灌溉绿洲和荒漠化植被。

### 1.2 数据源

本研究的数据主要包括土地利用、DEM、NDVI、坡度、土壤侵蚀、降水量及石羊河流域基础地理信息数据等。其中土地利用数据来源于地理国情监测云平台([www.dsac.cn](http://www.dsac.cn)),时间为 1987—2016 年。DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)。NDVI 数据由 Landsat TM/OIL 影像计算获取,Landsat TM/OIL 影像来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)。坡度数据是利用 ArcGIS10.2 的 Spatial Analyst 工具从高程数据中提取所得。土壤侵蚀数据来源于中国科学院资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn>)。降水数据来源于中国气象科学数据共享服务网的中国地面气候资料数据集,时间为 1987—2016 年,通过 ArcGIS10.2 软件插值成  $100 \times 100$  m 分辨率的栅格数据。最后将所有数据的分辨率通过重采样为  $100 \times 100$  m。

## 2 研究方法

### 2.1 综合生态敏感性模型的构建

本研究通过前人对生态敏感性的研究及对石羊河流域诸多地理生态环境问题综合分析的基础上,经过调查研究与相关资料查阅,将石羊河生态敏感性分为生态风险敏感性、水土流失敏感性、生物多样性敏感性三个模块,利用这三个模块构建综合生态敏感性模型,对石羊河流域的生态敏感性进行综合评价。

#### 2.1.1 生态风险敏感性指数

生态风险敏感性指数是生态系统及其组分受自然或人类活动胁迫程度的反映,本文更侧重于人类活动对生态系统的胁迫程度的研究<sup>[28-29]</sup>。土地利用是人与自然交互作用的核心环节,它与诸多环境与生态问题密切相关<sup>[30]</sup>。因此,本文在此模块中运用土地利用数据研究生态风险敏感性,其表达式为:

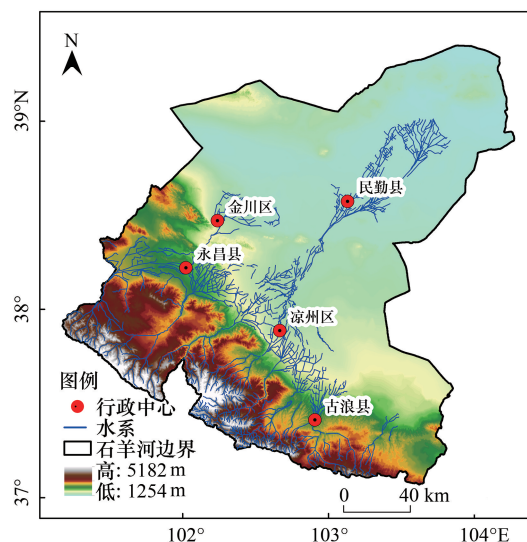


图 1 研究区概况图

Fig.1 Research area overview

$$F = \sum_i^m \frac{S_i W_i}{S} \quad (1)$$

式中,  $F$  为生态风险指数;  $i$  为各类土地利用类型;  $S_i$  为样地内第  $i$  种土地利用类型的面积;  $W_i$  为第  $i$  种土地利用类型所反映的生态风险强度权重;  $S$  为样地总面积。通过借鉴前人的研究成果<sup>[31]</sup>, 同时结合石羊河流域土地利用实际状况, 将生态风险强度权重分别设定为: 林地 0.14, 草地 0.16, 耕地 0.32, 水域 0.45, 未利用地 0.82, 建设用地 0.72。

### 2.1.2 水土流失敏感性指数

水土流失敏感性指数是反映生态过程中发生水土流失的潜在可能性及其程度。根据 Wischmeier 和 Smith 提出的通用土壤侵蚀方程 (USLE)<sup>[32-33]</sup>, 水土流失敏感性指数表达式为:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (2)$$

式中,  $A$  为土壤侵蚀量;  $R$  为降水侵蚀力;  $K$  为土壤因子;  $LS$  为坡度坡长因子;  $C$  为地表覆盖因子;  $P$  为人工措施因子。

### 2.1.3 生物多样性敏感性指数

根据最小累计阻力模型<sup>[34-35]</sup>, 生物多样性敏感性可以用生物空间流动阻力来表征, 生物空间流动阻力值越大, 生物多样性的敏感性越高。最小累计阻力模型表达公式为:

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

式中,  $MCR$  为最小累计阻力;  $f$  为  $MCR$  与变量  $(D_{ij} \times R_i)$  之间的函数;  $D_{ij}$  为源  $j$  到景观  $i$  的距离;  $R_i$  为景观单元  $i$  对景观流向某个方向扩散的阻力。

“源”: 源地一般在生态过程中发挥重要作用, 具有空间扩展性、连续性, 是生境质量极高的区域。本文借鉴前人的研究成果<sup>[31]</sup>, 选用自然保护区核心区及面积大于 100hm<sup>2</sup> 且在空间上具有连续性、面积较大的林地和水域作为生态“源”。

阻力面的建立: 参考有关文献<sup>[34-37]</sup>, 结合研究区的实际情况, 选用生态系统服务价值当量与植被覆盖度作为阻力因子, 将生态系统服务价值当量因子和植被覆盖度因子的权重各设置为 0.5。根据“阻力面 = 生态系统服务价值当量 × 0.5 + 植被覆盖度 × 0.5”, 运用栅格计算器进行栅格计算生成阻力面, 再利用  $MCR$  模型获得生物空间流动阻力表面。

### 2.1.4 综合生态敏感性

传统的生态敏感性评价多采用主观赋权重的方法, 为克服传统的赋权法, 本文以归一化生态风险敏感性指数、归一化水土流失敏感性指数和归一化生物多样性敏感性指数的最大值为空间中生态敏感性最高点, 计算空间中其他点到敏感性最高点的距离来构建综合生态敏感性指数 (Comprehensive ecological sensitivity index, CESI), 距离越大, 指数越大, 生态敏感性越低, 反之越高 (图 2)。CESI 的计算公式如下<sup>[38]</sup>:

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

式中,  $CESI$  为综合生态敏感性指数;  $F$  为某一像元的生态风险敏感性指数;  $A$  为某一像元的水土流失敏感性指数;  $MCR$  为某一像元的生物多样性敏感性指数。

## 2.2 生态敏感性变化模式分析

网格是突破行政界线并在空间上表达生态敏感性变化的有效方法<sup>[39]</sup>。它可以通过网格编码反映生态敏感区在空间上的聚集情况。本文将研究区划分为 1km×1km 等大小的格网单元, 分析研究区长时间序列的生态敏感区变化。格网累计变化模型的公式为:

$$C = \sum_{i=1}^{n-1} |G_i - G_{i+1}| \quad (5)$$

式中,  $C$  为同一格网内生态敏感性累计变化次数;  $n$  为样本年;  $G_i$  为前一期的生态敏感性代码;  $G_{i+1}$  为后一期的



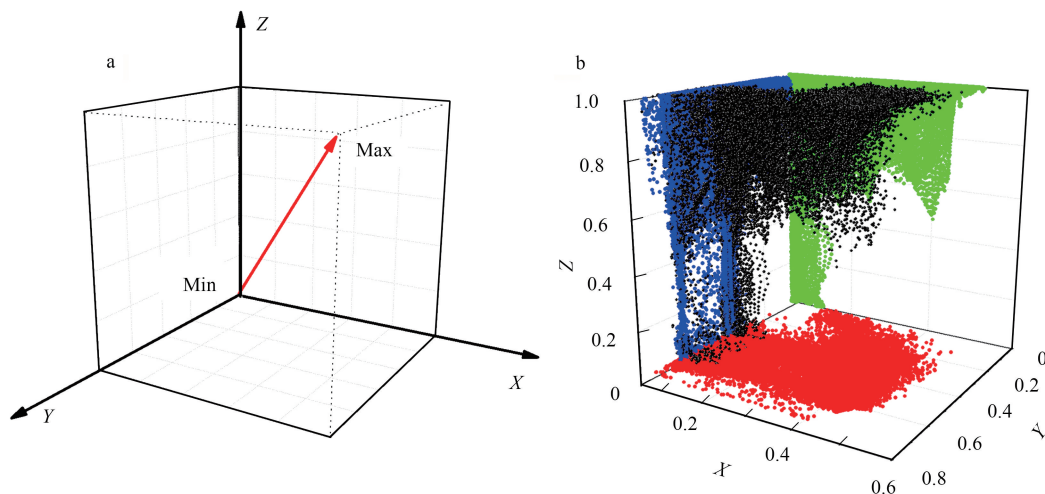


图2 综合生态敏感性指数构建原理图(X轴为水土流失指数,Y轴为生态风险指数,Z轴为生物多样性指数)

Fig.2 Schematic diagram of the comprehensive ecological sensitivity index(X-axis is the soil erosion index, the Y-axis is the ecological risk index, and the Z-axis is the biodiversity index)

生态敏感性代码。其中,当  $G_i - G_{i+1} < 0$  时,生态敏感性变差,令  $G_i - G_{i+1} = -1$ 。即生态敏感性变差一次;当  $G_i - G_{i+1} > 0$  时,生态敏感性变好,令  $G_i - G_{i+1} = 1$ 。即生态敏感性变好一次;当  $G_i - G_{i+1} = 0$  时,生态敏感性不变。

生态敏感性变化模式及分类描述:为了更好地了解生态敏感性的变化,我们将生态敏感性变化分为不敏感区、轻度敏感区、中度敏感区、重度敏感区和极度敏感区,又将其代码分别赋值为:1、2、3、4、5。此外,本文结合编码方法,运用排列组合等数学算法获得不同代码的总数,然后采用分区方法将生态敏感性变化模式分为不同的类型,具体的生态敏感性变化模式划分标准如下(表1)。

表1 生态敏感性变化模式划分标准述

Table 1 Standardization of the classification of ecological sensitivity change patterns

| 分区 Zone                             | 编码 Code                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 描述 Description                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 常年不变区<br>Perennial invariant region | 常年不敏感区<br>1111                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 生态敏感区一直为不敏感区                                                                                                                                                                           |
|                                     | 常年轻度敏感区<br>2222                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 生态敏感区一直为轻度敏感区                                                                                                                                                                          |
|                                     | 常年中度敏感区<br>3333                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 生态敏感区一直为中度敏感区                                                                                                                                                                          |
|                                     | 常年中度敏感区<br>4444                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 生态敏感区一直为重度敏感区                                                                                                                                                                          |
|                                     | 常年极度敏感区<br>5555                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 生态敏感区一直为极度敏感区                                                                                                                                                                          |
| 波动变化区<br>Fluctuating region         | 波动升高区<br>1112、1122、1212、1222、1223、1323、1324、1333、2112、2122、2123、2124、2212、2213、2223、2233、2234、2244、2245、2312、2323、2324、2333、2334、2335、2344、2423、2424、2434、2444、3122、3123、3133、3212、3223、3224、3233、3234、3235、3244、3245、3312、3323、3324、3334、3335、3344、3345、3423、3424、3434、3435、3444、3445、3455、3534、3545、4223、4233、4234、4244、4312、4323、4334、4344、4345、4355、4423、4424、4434、4435、4445、4455、4534、4535、4545、4555、5223、5233、5244、5323、5334、5344、5345、5423、5424、5434、5435、5445、5455、5534、5535、5545 | 低敏感区向高敏感区转化,敏感性升高。敏感性波动,但总体趋势上升都被划分为波动升高区。其中:不变-降低-升高;降低-升高-不变;降低-不变-升高;降低-降低-升高;升高-不变-不变;升高-降低-升高;不变-升高-不变;不变-不变-升高;降低-升高-升高;升高-升高-不变;升高-不变-升高;不变-升高-不变;升高-不变-不变;不变-升高-不变,等都被归纳为波动升高区 |

续表

| 分区 Zone | 编码 Code                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 描述 Description                                                                                                                                                                         |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 波动降低区   | 1121、1131、1132、1141、1142、1151、1211、1221、1232、1242、1251、2111、2121、2131、2132、2141、2142、2151、2211、2221、2231、2232、2242、2243、2251、2252、2253、2322、2332、2342、2343、2352、2432、2433、2443、2543、2552、2553、3121、3131、3132、3211、3221、3222、3231、3232、3242、3243、3252、3253、3322、3332、3342、3343、3352、3353、3354、3422、3432、3433、3443、3453、3454、3533、3544、3552、3553、3554、4222、4231、4232、4242、4243、4322、4332、4333、4342、4343、4352、4353、4354、4422、4433、4443、4452、4453、4454、4533、4544、4553、4554、5222、5232、5242、5322、5332、5333、5342、5343、5353、5433、5443、5444、5453、5454、5533、5543、5544、5553、5554 | 高敏感区向低敏感区转化,敏感性降低。敏感性波动,但总体趋势降低都被划分为波动降低区。其中:不变-升高-降低;升高-降低-不变;升高-不变-降低;升高-升高-降低;降低-不变-不变;降低-升高-降低;不变-降低-不变;不变-不变-降低;升高-降低-降低;降低-降低-不变;降低-不变-降低;不变-降低-不变;降低-不变-不变;不变-降低-不变,等都被归纳为波动降低区 |

2.3 圈层分析

圈层分析是基于圈层结构理论,以区域几何中心依次向外发展为依据,在对研究区进行缓冲区分析及方向划定之后,按照划分不同圈层和不同方向对研究区的生态敏感性变化进行分析的一种方法<sup>[39]</sup>。本文以石羊河流域几何中心为圆心,构建半径为 15km 的圆形缓冲区(图 3),再将其分为东北、西北、西南、东南四个不同方向。利用时间序列分析方法对每个圆环内的生态敏感区变化进行了监测。最终构建了 12 个圆形层,覆盖整个研究区。在 ArcGIS 中分别对 1987、1995、2006、2016 年每个圆环内的各类生态敏感区面积进行统计。

3 结果与分析

3.1 单指标生态敏感性空间分布特征

由图 4 可以看出,石羊河流域生态风险敏感性呈现由西南向东北升高的趋势,且流域内大部分区域生态风险较高。从空间分布来看,生态风险敏感性较高的区域主要分布在流域中下游,而上游的敏感性相对较低。这主要是流域上游祁连山区水资源充沛,人类活动少,生态破坏小。流域中游绿洲区是人类聚居区,经济发达,人口密度大,城镇建设用地和居民点广布,人类对自然环境的开发力度较大,这使得中游生态环境十分严峻。流域下游地区分布着大量戈壁荒漠,该区域景观类型单一,生物量较少,生态环境极度敏感。

由图 5 可以看出,研究区水土流失敏感性较高的区域主要分布在流域上游的祁连山山区,植被覆盖较高的区域水土流失敏感性较低。这主要是流域上游山区坡度较大,降水较多,且为石羊河流域主干河发源地,水域充沛,水土流失也最为严重。中、下游地区地势较平坦,降水较少,且绿洲区植被覆盖较高,水土流失较少。

由图 6 可以看出,研究区生物多样性敏感性空间分布趋势总体上与生态风险敏感性类似。流域上游及河流周边区域的生物多样性敏感性较低,这里水量丰沛,植被覆盖高,动植物资源丰富,自我调节能力较强。生物多样性敏感性较高的区域主要分布在流域下游的绿洲-沙漠过渡带及沙漠区,该区域水资源匮乏,动植物资源稀少,生态弹性差,自我修复能力弱,生物多样性敏感性极高。

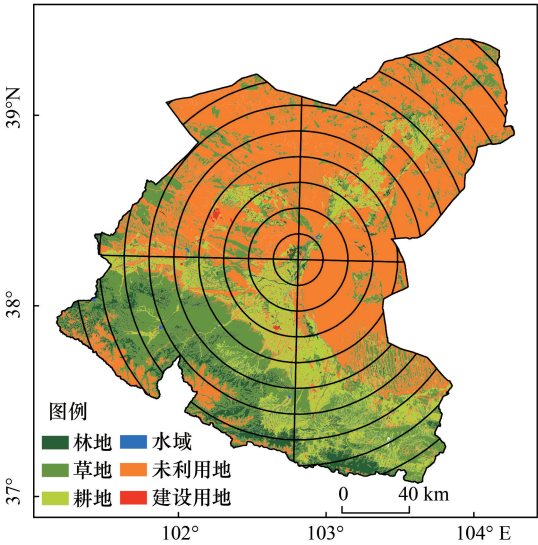


图 3 圈层分析示意图  
Fig.3 Circle analysis diagram

### 3.2 综合生态敏感性时空变化分析

研究结果表明,1987—2016 年间石羊河流域的 CESI 均值先降低再升高,从 1987 年的 1.143 降低到 1995 年的 1.137,再降低到 2006 年的 1.130,后又升高到 2016 年的 1.287,这表明自 2006 年后研究区综合生态敏感性明显降低。此外,为更好的探讨流域生态敏感性的时空变化,本文对 4 个时期的生态敏感性进行分级,共分为 5 级:不敏感区( $S \leq 0.15$ )、轻度敏感区( $0.15 < S \leq 0.30$ )、中度敏感性( $0.30 < S \leq 0.45$ )、重度敏感性( $0.45 < S \leq 0.60$ )、极度敏感区( $S \geq 0.60$ ),分级结果如图 7,并分别对不同分区面积占比进行统计,统计结果表明(表 2):1987 年石羊河流域生态敏感性分区为不敏感区的面积占总面积的 15.50%,1995 年的比例为 17.45%,2006 年的比例为 18.06%,到 2016 年,其占总面积的比例上升到 18.58%,30 多年间不敏感区的面积增长了 1246.11km<sup>2</sup>。与此同时,石羊河流域生态敏感性分区为极度敏感区的面积占总面积的比例由 1987 年的 26.86%下降到 1995 年的 24.66%,到 2006 年上升为 26.25%,最终在 2016 年又下降为 23.21%。总体而言,1987—2016 年的极度敏感区面积占总面积的比重有所波动,但其总体上呈现减少趋势,30 多年间共减少 1481.08km<sup>2</sup>。其余分区波动平衡。结果表明:近 30 年石羊河流域生态敏感性有所改善,尤其是 2006 年以后,生态敏感性改善较为明显,这说明近 10 年以来石羊河流域的生态环境治理取得了显著效果。

从空间分布来看,综合生态敏感性较高的区域主要分布在流域下游巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠区。此外,在流域绿洲的外围区域生态敏感性也较高。生态敏感性较低的区域主要分布在流域的中上游,主要包括流域上游的祁连山山区和中游的绿洲内部。

表 2 石羊河流域综合敏感性分区面积统计表

Table 2 Classification of ecological risk sensitivity factors in Shiyang River Basin

| 分区<br>Zone                   | 1987                       |                    | 1995                       |                    | 2006                       |                    | 2016                       |                    |
|------------------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|
|                              | 面积/km <sup>2</sup><br>Area | 比例/%<br>Proportion | 面积/km <sup>2</sup><br>Area | 比例/%<br>Proportion | 面积/km <sup>2</sup><br>Area | 比例/%<br>Proportion | 面积/km <sup>2</sup><br>Area | 比例/%<br>Proportion |
| 不敏感 Insensitive              | 6 293.39                   | 15.50              | 7 081.06                   | 17.45              | 7 327.11                   | 18.06              | 7 539.50                   | 18.58              |
| 轻度敏感 Mildly sensitive        | 9 934.44                   | 24.48              | 10 926.55                  | 26.93              | 10 576.59                  | 26.06              | 9 506.77                   | 23.43              |
| 中度敏感<br>Moderately sensitive | 8 087.9                    | 19.31              | 7 762.35                   | 19.13              | 7 369.03                   | 18.16              | 8 480.33                   | 20.72              |
| 重度敏感<br>Severely sensitive   | 5 362.75                   | 13.22              | 4 802.53                   | 10.16              | 4 652.91                   | 11.47              | 5 632.96                   | 13.88              |
| 极度敏感<br>Extremely sensitive  | 10 900.35                  | 26.86              | 10 006.34                  | 24.66              | 10 653.20                  | 26.25              | 9 419.27                   | 23.21              |

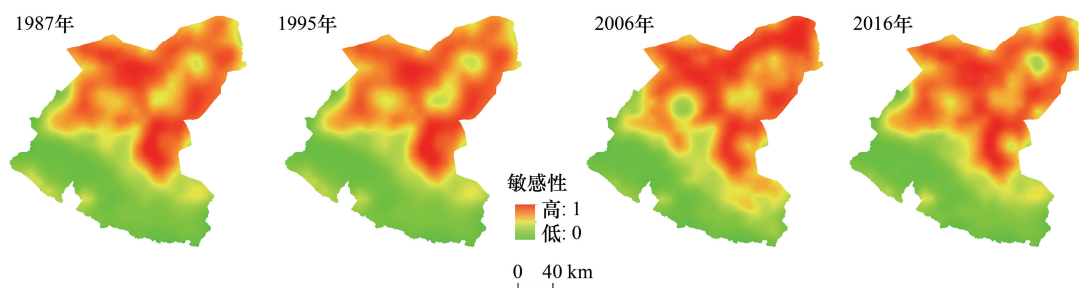


图 4 生态风险敏感性图

Fig.4 Ecological risk ecological sensitivity map

### 3.3 生态敏感性变化模式分析

为了更加深入的认识石羊河流域生态敏感性变化的时空特征和规律,需要同时从空间分布和数量变化两个方面确定每一个格网上生态敏感性的动态变化情况。因此,本文通过格网编码法将石羊河流域生态敏感性变化特征划分为两大分区(表 1):常年不变区(表 3)和波动变化区(表 4),又将常年不变区又分为常年不敏

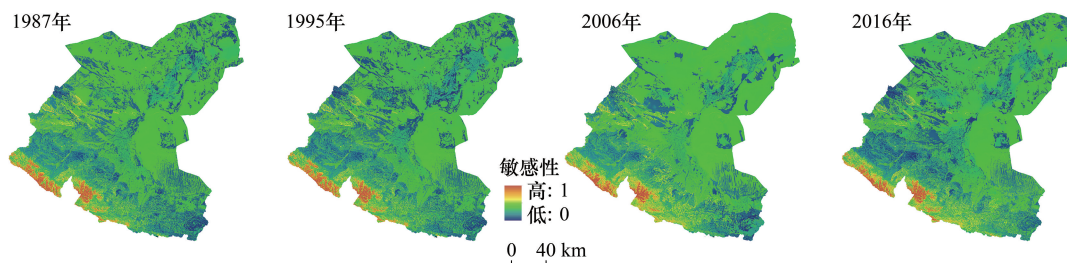


图5 水土流失敏感性图

Fig.5 Soil erosion ecological sensitivity map

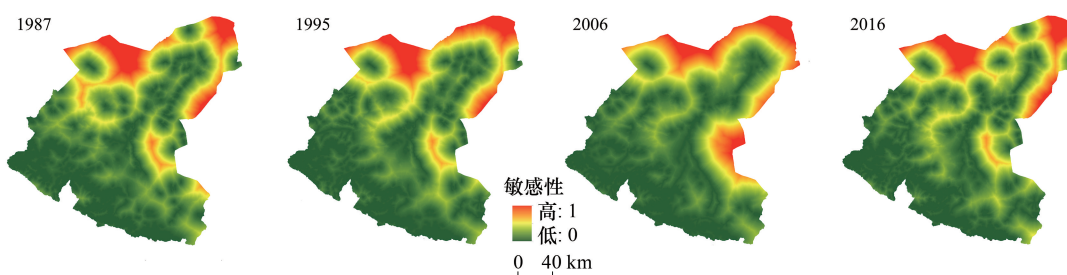


图6 生物多样性敏感性图

Fig.6 Biodiversity ecological sensitivity map

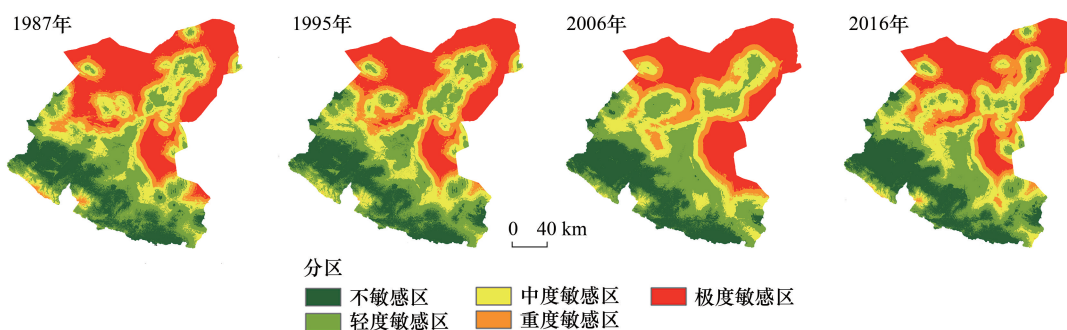


图7 综合生态敏感性图

Fig.7 Integrated ecological sensitivity map

感区、常年轻度敏感区、常年中度敏感区、常年重度敏感区和常年极度敏感区(图 8a)。其中常年不敏感区和常年轻度敏感区主要分布在流域的上游地区,常年中度敏感区和常年重度敏感区主要分布在流域中游和下游的绿洲区边缘,常年极度敏感区主要分布在流域下游的沙漠区。石羊河流域生态敏感性常年不变分区面积统计结果表明(表 3),常年极度敏感区占有所有分区的 37.84%,是分区中面积第一大的区。这表明石羊河流域生态敏感较高。同时又将波动变化区分为波动升高区和波动降低区(图 8b)。波动变化区主要集中于流域中下游的绿洲区。

从生态敏感性变化分区图(1987—2016 年)可以看出(图 8b),敏感性波动降低的区域主要分布在流域中下游绿洲外围区域。敏感性波动升高的区域主要分布在流域中下游绿洲区。相比常年不变区,波动变化区面积更大,占总面积的 51.24%,这表明,石羊河流域生态敏感性变化比较活跃。此外,根据波动变化分区面积统计结果(表 4),敏感性波动降低的区域面积为 11 693.57km<sup>2</sup>,占波动变化区总面积的 56.24%。敏感性波动升



高的区域面积为

9 099.66km<sup>2</sup>,占波动变化区总面积的 43.76%,这表明石羊河流域近 30 年来生态敏感性有所降低,尤其是流域中下游绿洲外围区域,说明近些年来石羊河流域生态环境治理取得积极效果。但与此同时,由于中下游绿洲区人类生产、生活活动较多,该地区的生态敏感性波动升高,需引起高度重视。

表 3 石羊河流域生态敏感性常年不变分区面积统计表  
Table 3 Shiyang River Basin Ecological Sensitivity Code Zoning Area Statistics

| 分区<br>Zone                            | 面积/ km <sup>2</sup><br>Area | 比例/%<br>Proportion |
|---------------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 常年不敏感 Perennial insensitivity         | 5325.83                     | 26.92              |
| 常年轻度敏感 Perennial mild sensitivity     | 4333.45                     | 21.90              |
| 常年中度敏感 Perennial moderate sensitivity | 1763.63                     | 8.91               |
| 常年重度敏感 Perennial severe sensitivity   | 875.11                      | 4.42               |
| 常年极度敏感 Perennial hypersensitivity     | 7487.58                     | 37.84              |

表 4 波动变化分区面积统计表  
Table 4 Fluctuation change partition area statistics

| 分区<br>Zone                | 面积/ km <sup>2</sup><br>Area | 比例/%<br>Proportion | 分区<br>Zone                   | 面积/ km <sup>2</sup><br>Area | 比例/%<br>Proportion |
|---------------------------|-----------------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 波动升高 Volatility increases | 9 099.66                    | 43.76              | 波动降低 Reduce the fluctuations | 11 693.57                   | 56.24              |

3.4 生态敏感性圈层变化分析

为准确了解生态敏感性在不同方向、不同距离上的变化,将研究区 1987、1995、2006 和 2016 年 4 期综合生态敏感性分区与划分后的圈层矢量数据分别进行叠加,计算各圈层内各个方向上不同敏感区的面积所占比例,得出不敏感区、轻度敏感区、中度敏感区、重度敏感区和极度敏感区 5 种分区在各个圈层、各个方向上的分布(图 9)。由图 10 可以看出,1987—2016 年间石羊河流域不敏感区在第六圈层分布最广,且主要分布在西南象限,东南象限也有分布,但比重不大。极度敏感区分布范围较广,在西北象限、东北象限和东南象限都有所分布。总体而言,石羊河流域西南象限的生态敏感性最低,除了不敏感区、轻度敏感区和中度敏感区有所分布,再无其他类型敏感区分布。其次是东南象限,极度敏感区集中分布在 2—5 圈层,且极度敏感区与重度敏感区在整个东南象限的面积占比较低。西北象限和东北象限敏感性最高,二者包含了所有的敏感性分区类型。虽然相比较西北象限,东北象限的极度敏感区分布圈层多,总面积多,但西北象限在圈层内的面积比重更大,且分布面积也较多。此外,二者都有敏感性随圈层的增加而升高的共同规律,因此本文将西北象限和东北象限一起划分为生态环境治理的重点关注区域。值得注意的是,4 个象限中,极度敏感区主要分布在西北象限和东北象限的外缘,这也体现了干旱内陆河流域生态敏感性的空间分布特征。

4 讨论

4.1 指标共线性诊断

本文考虑到评价指标间可能会存在信息重叠影响生态敏感性的评价,因此对评价指标进行共线性诊断。运用 SPSS 软件,用辅助回归方法对评价指标间的共线性状况进行检验。一般用方差膨胀因子(VIF)和容忍度(TOL)表示共线性程度,TOL<0.1 和 VIF>10 表明所选指标的共线性比较严重。本文以 2016 年石羊河流域各指标为例探讨指标间的共线性程度,共线性统计结果表明(表 5):生态风险敏感性指数、水土流失敏感性指数和生物多样性敏感性指数之间不存在严重的共线性,具备构建生态敏感性评价指标的合理性。

4.2 石羊河流域生态敏感性演变动因

生态敏感性是自然环境和人类活动共同作用的结果,自然环境决定了石羊河流域的生态环境与人类生存

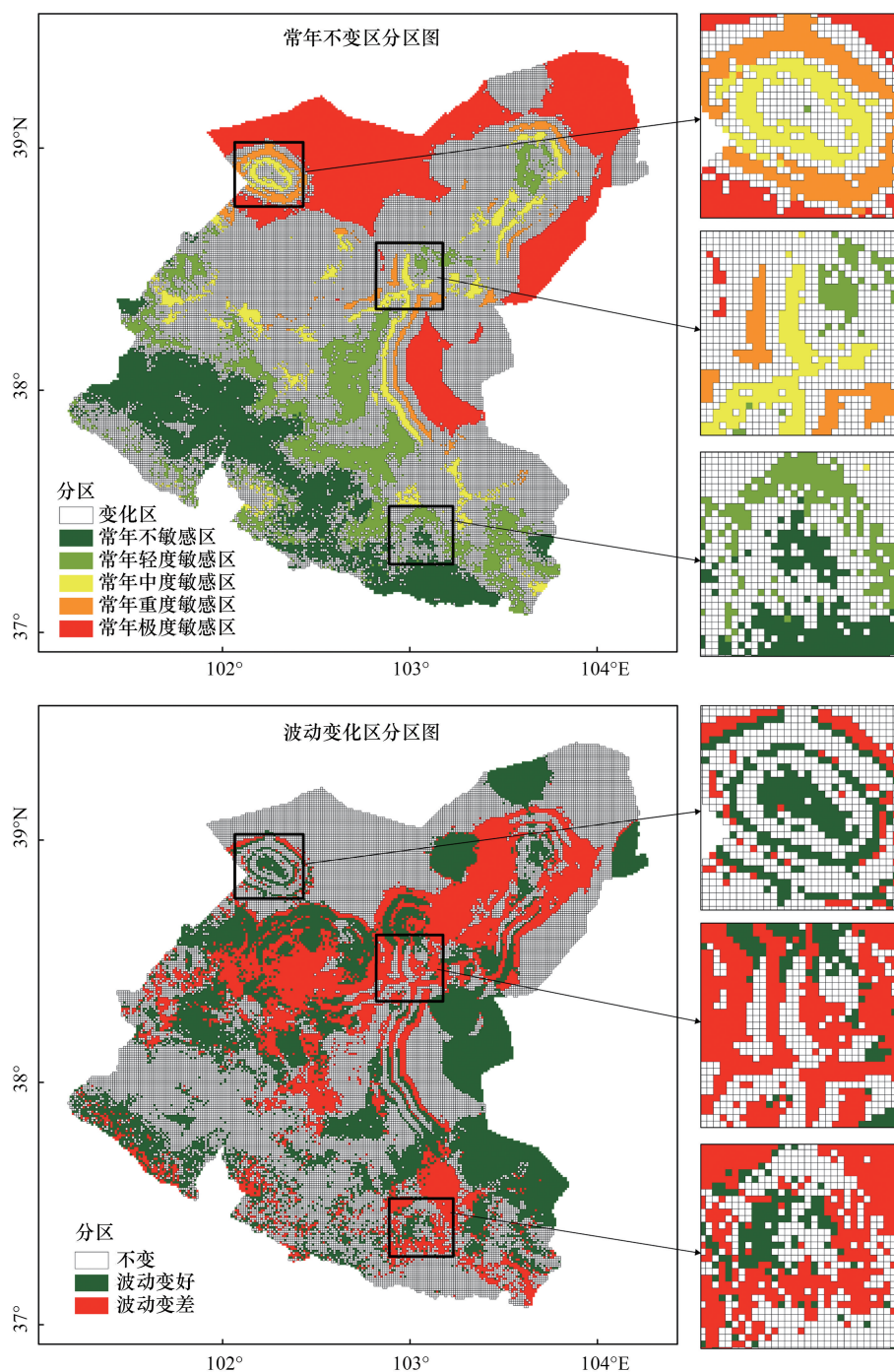


图 8 生态敏感性变化分区图(图 a 为常年不变区分图;图 b 为波动变化区分图)

**Fig.8 Zoning map of ecological sensitivity change** (Figure a is the perennial constant zone partition map; Figure b is the fluctuation change zone partition map)

状况,而人类活动反过来可以改变石羊河流域生态环境的原本面貌。从单指标生态敏感性时空变化特征来看,生态风险敏感性、水土流失敏感性和生物多样性敏感性总体上呈下降趋势。因此,受单指标敏感性影响,流域综合生态敏感性总体上也呈现出好转趋势,尤其是流域中下游绿洲外围区域,这反映出来流域的生态环境总体上是向着可持续的方向在发展。其中,绿洲中下游绿洲外围区敏感性降低,主要因为 2009 年 9 月以来,甘肃省开始实施景电二期工程,开始将黄河水调入石羊河,使得石羊河流域可用水量增加,缓解了流域生

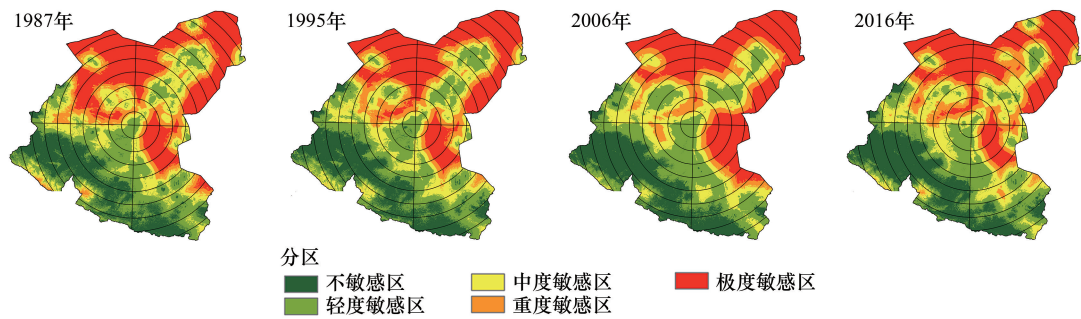


图 9 分区结果圈层叠加示意图

Fig.9 Partition result circle layer overlay diagram

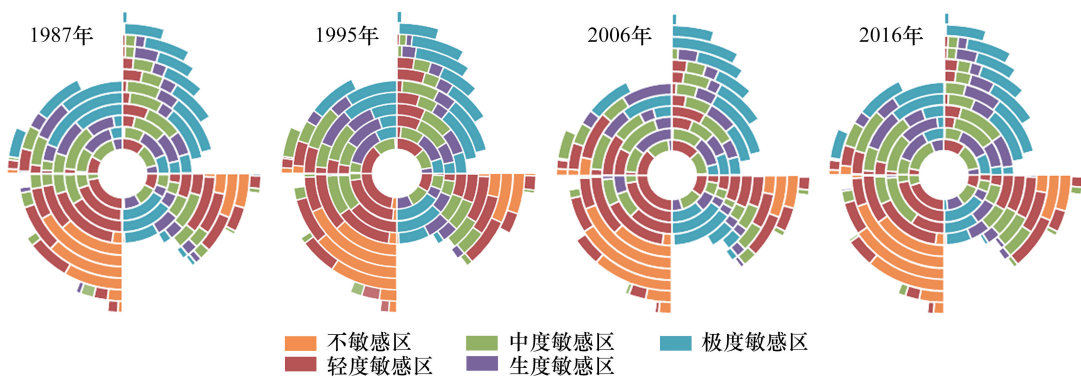


图 10 圈层分析图

Fig.10 Circle analysis chart

表 5 共线性诊断结果

Table 5 Result of co-linearity diagnosis

| 指标 Index                                    | $P$   | $R^2$ | TOL   | VIF   |
|---------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 生态风险敏感性指数 Ecological risk sensitivity index | 0.000 | 0.337 | 0.675 | 1.482 |
| 水土流失敏感性指数 Soil erosion sensitivity index    | 0.000 | 0.102 | 0.998 | 1.002 |
| 生物多样性敏感性指数 Biodiversity sensitivity index   | 0.000 | 0.763 | 0.676 | 1.480 |

物生存需水压力。且 2007 年国务院颁布《石羊河流域重点治理规划》,自此以后,当地政府对石羊河流域实施一系列治理措施,如关井压田、节水灌溉、人工压沙、退耕造林、生态移民等措施。关井压田措施缓解了因过度抽取地下水而导致的地下水埋深问题;节水灌溉措施提高了流域的用水效率,节省了农业灌溉用水量,保证了生态用水量;人工压沙措施通过人为干预,防范腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠对流域生态环境的侵蚀;退耕造林和生态移民措施减轻了人类活动对当地生态环境的破坏。这一系列措施的实施对全流域,尤其是中下游绿洲外围区域的生态风险敏感性、水土流失敏感性和生物多样性敏感性的降低起到重要作用,从而使得该区域的综合生态敏感性状况得到改善<sup>[38]</sup>。与此同时,流域中下游绿洲区随着社会经济的发展,人口不断聚集,土地利用强度进一步加大,生态风险敏感性、水土流失敏感性和生物多样性敏感性逐年升高。这使得该区域的综合生态敏感性呈逐年升高趋势。

#### 4.3 研究结果的不确定性分析

本文在总结前人研究成果的基础上,通过生态距离法构建综合生态敏感性指数,将评价指标归纳为人类干扰、自然干扰和生物干扰这 3 个方面。有效地得到研究区生态敏感性分布及其时空变化结果。但考虑到影



响生态敏感性的因子具有综合性和复杂性等特点,而就目前的评价技术和实践还不能做到精确与全面的评价。此外,本文在归纳生态敏感性影响因素及其表征指数时仍存在不足之处,且这种思路与方法有待于进一步验证其准确性。但从综合评价区域生态敏感性视角来看,利用该文提出的基于生态距离计算方法得到的综合生态敏感性指数仍然为其他类似区域提供了一种全新的视角和思路,是今后值得深入探索和推广使用的方法。

## 5 结论

(1)1987—2016年间石羊河流域生态敏感性总体上逐年降低,CESI值从1987年的1.143上升到2016年的1.287,这反映出流域生态环境当前还是向着可持续发展的方向发展。但另一方面,流域中下游绿洲区生态敏感性逐渐升高,且在绿洲外围区呈现两极分化现象(图8)。此外,流域大部分区域生态敏感性变化波动较为频繁,波动变化的区域面积为20 793.23 km<sup>2</sup>,占流域总面积的51.24%,呈现不稳定变化态势,此类问题应引起相关部门的重视。

(2)流域生态敏感性整体偏高,空间分异明显。极度、重度和中度敏感区占比较高,1987—2016年间,三者占比之和分别为59.39%、53.95%、55.88%、57.81%。生态敏感性空间差异显著,不敏感区主要聚集分布在流域的上游,极度敏感区和重度敏感区主要聚集分布在流域的下游沙漠腹地和绿洲与沙漠过渡地带,这说明流域生态敏感性与人类活动及工农业生产有较为密切的关系。

(3)研究发现,目前流域生态敏感性整体趋于好转,但局部地区有恶化的趋势,敏感性波动升高的区域占总面积的22.43%,这说明一方面在国家宏观政策的引导下,当地在生态环境保护方面做了大量工作,另一方面也表现出在全球生态环境逐渐恶化的大背景下,当地的生态环境治理工作仍然任重道远。

## 参考文献(References):

- [1] 熊善高,秦昌波,于雷,路路,关杨,万军,李新. 基于生态系统服务功能和生态敏感性的生态空间划定研究—以南宁市为例. 生态学报, 2018, 38(22): 7899-7911.
- [2] 李永格,李宗省,冯起,卫伟,杨静,吕越敏,桂娟,袁瑞丰,张百娟. 基于生态红线划定的祁连山生态保护性开发研究. 生态学报, 2019, 39(7): 2343-2352.
- [3] Coleman G, Decoursey D G. Sensitivity and model variance analysis applied to some evaporation evaporation and evapotranspiration models. Water Resources Research, 1976, 12(5): 873-879.
- [4] 王琳,孙苑苑,王晋. 滨海湿地生态系统敏感性评价方法研究. 中国人口·资源与环境, 2016, 20(S2): 223-227.
- [5] 孙才志,杨磊,胡冬玲. 基于GIS的下辽河平原地下水生态敏感性评价. 生态学报, 2011, 31(24): 7428-7440.
- [6] 禹艺娜,王中美. 基于GIS和AHP的贵阳市环城林带生态敏感性评价. 中国岩溶, 2017, 36(3): 359-367.
- [7] 李德旺,李红清,雷晓琴,雷明军. 基于GIS技术及层次分析法的长江上游生态敏感性研究. 长江流域资源与环境, 2013, 22(5): 633-639.
- [8] 郝吉明,段雷,谢绍东. 中国土壤对酸沉降的相对敏感性区划. 环境科学, 1999, 25(4): 1-5.
- [9] 王春菊,汤小华,郑达贤,陈文惠. GIS支持下的土壤侵蚀敏感性评价研究. 水土保持通报, 2005, 25(1): 68-70, 74-74.
- [10] 赵明月,赵文武,靳婷,安艺明,徐海亮. 青海湖流域土地沙漠化敏感性评价. 中国农学通报, 2012, 28(32): 237-242.
- [11] 王宏,塔西甫拉提·特依拜,谢霞,樊亚辉,张飞,买买提·沙吾提. 新疆艾比湖地区不同土地利用类型的土壤盐渍化敏感性评价. 地理科学进展, 2011, 30(5): 593-599.
- [12] 李阳兵,邵景安,王世杰,李荣彪. 基于岩溶生态系统特性的水土流失敏感性评价. 山地学报, 2007, 25(6): 671-677.
- [13] Qin Y, Yi S H, Chen J J, Ren S L, Wang X Y. Responses of ecosystem respiration to short-term experimental warming in the alpine meadow ecosystem of a permafrost site on the Qinghai - Tibetan Plateau. Cold Regions Science and Technology, 2015, 115: 77-84.
- [14] Briceño-Elizondo E E, García-Gonzalo J, Peltola H, Matala S, Kellomäki S. Sensitivity of growth of Scots pine, Norway spruce and silver birch to climate change and forest management in boreal conditions. Forest Ecology and Management, 2006, 232(1/3): 152-167.
- [15] Raupach M R, Haverd V, Briggs P R. Sensitivities of the Australian terrestrial water and carbon balances to climate change and variability. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 182-183: 277-291.
- [16] 尤南山,蒙古军. 基于生态敏感性和生态系统服务的黑河中游生态功能区划与生态系统管理. 中国沙漠, 2017, 37(1): 186-197.



- [17] 陈志芬. 面向贵州省南部新城规划的生态敏感性评价. 生态科学, 2017, 36(2): 113-118.
- [18] 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. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1813-1819.
- [19] 管青春, 郝晋珉, 王宏亮, 李牧, 陈爱琪, 谢保鹏. 经济转型视角下矿产资源城市生态敏感性评价. 农业工程学报, 2018, 34(21): 253-263.
- [20] 刘军会, 高吉喜, 马苏, 王文杰, 邹长新. 中国生态环境敏感区评价. 自然资源学报, 2015, 30(10): 1607-1616.
- [21] 杨月圆, 王金亮, 杨丙丰. 云南省土地生态敏感性评价. 生态学报, 2008, 28(5): 2253-2260.
- [22] 魏伟, 石培基, 周俊菊, 雷莉, 魏晓旭, 颀斌斌. 基于区统计方法的石羊河流域土地生态敏感性评价. 水土保持研究, 2015, 22(6): 240-244.
- [23] 潘峰, 田长彦, 邵峰, 周伟, 陈飞. 新疆克拉玛依市生态敏感性研究. 地理学报, 2012, 66(11): 1497-1507.
- [24] 汤峰, 张蓬涛, 张贵军, 赵丽, 郑宇, 魏明欢, 简卿. 基于生态敏感性和生态系统服务价值的昌黎县生态廊道构建. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2675-2684.
- [25] 甘琳, 陈颖彪, 吴志峰, 千庆兰, 郑子豪. 近 20 年粤港澳大湾区生态敏感性变化. 生态学杂志, 2018, 37(8): 2453-2462.
- [26] 陈明. 关于石羊河流域重点治理的思考. 中国水利, 2010(1): 36-38.
- [27] 魏伟, 赵军, 王旭峰. 石羊河流域土地利用类型景观异质性. 生态学杂志, 2010, 29(4): 760-765.
- [28] 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. 自然资源学报, 2011, 26(7): 1180-1188.
- [29] 魏伟, 石培基, 雷莉, 周俊菊, 颀斌斌. 基于景观结构和空间统计方法的绿洲区生态风险分析——以石羊河武威、民勤绿洲为例. 自然资源学报, 2014, 29(12): 2023-2035.
- [30] 徐羽, 钟业喜, 冯兴华, 徐丽婷, 郑林. 鄱阳湖流域土地利用生态风险格局. 生态学报, 2016, 36(23): 7850-7857.
- [31] 宫继萍, 石培基, 魏伟, 杨雪梅, 吴文婕. 基于土地利用变化的民勤县土地生态风险研究. 土壤通报, 2012, 43(5): 1029-1035.
- [32] 王娇, 程维明, 祁生林, 周成虎, 张文杰, 仝迟鸣. 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. 地理研究, 2014, 33(4): 614-624.
- [33] 陈佳, 吴孔森, 尹莎, 杨晴青. 水土流失风险扰动下区域人地系统适应性研究——以榆林市为例. 自然资源学报, 2016, 31(10): 1688-1701.
- [34] 潘竞虎, 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. 生态学杂志, 2016, 35(3): 791-799.
- [35] 杨远琴, 任平, 洪步庭. 基于生态安全格局的三峡库区腹地低丘缓坡土地开发利用. 水土保持研究, 2019, 26(3): 305-310, 317-317.
- [36] 程迎轩, 王红梅, 刘光盛, 郑标, 王海云, 刘翠霞. 基于最小累计阻力模型的生态用地空间布局优化. 农业工程学报, 2016, 32(16): 248-257.
- [37] 夏敏, 张智超, 文博, 邹伟. 苏南地区土地利用的生态敏感性分区. 水土保持通报, 2016, 36(4): 112-117.
- [38] 石三娥, 魏伟, 杨东, 胡鑫, 周俊菊, 张强. 基于 RSEDI 的石羊河流域绿洲区生态环境质量时空演变. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1152-1163.
- [39] Ramachandra T V, Aithal B H, Sanna D D. Insights to urban dynamics through landscape spatial pattern analysis. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 18: 329-343.