

DOI: 10.5846/stxb201601120071

刘晓平, 李鹏, 任宗萍, 苗滋耀, 张军, 刘晓君, 李占斌, 王添. 榆林地区生态系统弹性力的评价分析. 生态学报, 2016, 36(22): - .

Liu X P, Li P, Ren Z P, Miao Z Y, Zhang J, Liu X J, Li Z B, Wang T. Evaluation of ecosystem resilience in Yulin, China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): - .

榆林地区生态系统弹性力的评价分析

刘晓平¹, 李 鹏^{1,*}, 任宗萍¹, 苗滋耀², 张 军¹, 刘晓君³, 李占斌^{1,3}, 王 添¹

1 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048

2 榆林高新技术产业园区管理委员会环境保护局, 榆林 719000

3 中科院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712200

摘要:区域生态系统的弹性力研究是目前生态环境健康评价的重要指标,它反映了生态系统在偏离平衡状态后恢复到初始状态的自我调节和自我恢复的能力。本文以陕西省榆林市一区十一县的生态系统各项指标现状为研究依据,综合运用了 Fragstats 和 ArcGIS 软件对榆林地区生态系统弹性力的各项参数进行计算,评价和分析了十二个县(区)生态系统弹性力的时空演变与分布特征。结果表明:1995—2010 年榆林地区生态系统弹性力呈平稳上升趋势,生态系统的自我调节能力和抗干扰能力不断增强。1995 年榆林地区生态系统弹性力值低于 0.4 的地域面积所占比例为 100%,截至 2010 年该数值降至 41.45%,且主要集中在北部风沙草滩区。整体而言,榆林地区生态系统弹性力呈现南高北低的格局,大于 0.6 的区域主要集中在清涧、吴堡、绥德和米脂四县。研究揭示了榆林地区生态系统弹性力的发展变化趋势,以期为研究区的生态健康诊断与可持续发展决策提供参考。
关键词:榆林地区;生态系统;弹性力;弹性强度系数;弹性限度

Evaluation of ecosystem resilience in Yulin, China

LIU Xiaoping¹, LI Peng¹, REN Zongping¹, MIAO Ziyao², ZHANG Jun¹, LIU Xiaojun³, LI Zhanbin^{1,3}, WANG Tian¹

1 State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

2 Environmental protection agency of management committee of Yulin hi-tech zone, Yulin 719000, China

3 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China

Abstract: Ecosystem resilience is one of the hot topics in regional ecosystem health assessments. As an important indicator, it has attracted widespread attention. Ecosystem resilience refers to the self-regulation capacity of an ecosystem to restore itself to its initial state after deviation from the equilibrium state. The elastic strength coefficient and the elastic limit are two main components of ecosystem resilience, representing the level of the elastic force and elastic range, respectively. Based on the ecosystem indicators (such as landscape diversity index, vegetation Index, precipitation variability, temperature variability, flexible scores, the percentage of land use types) of Yulin City (Shanxi Province, China), Fragstats and ArcGIS software were applied to calculate the various parameters of the ecosystem resilience system in Yulin, including evaluating and analyzing the spatial and temporal characteristics of ecosystem resilience in twelve counties (districts) of the Yulin region. The results indicated that from 1995 to 2010, there was a steady upward trend in ecosystem resilience in the Yulin region. The self-regulation and self-healing ability of ecosystems had strengthened over time. From 2000 to 2005,

基金项目:国家自然科学基金重点项目“黄土高原生态建设的生态-水文过程响应机理研究”(41330858);国家自然科学基金“基于能量过程的坡沟系统侵蚀产沙过程调控与模拟”(41471226);陕西水利科技计划项目“陕北水土保持沟道工程雨洪资源化利用技术研究”(2014slkj-11);陕西水利科技计划项目“陕北黄土高原水资源演变与生态活动响应及调控研究”(2014slkj-13)

收稿日期:2016-01-12; 修订日期:2016-05-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lipeng74@163.com

ecosystem resilience increased rapidly, but the growth rate of resilience slowed after 2005. To facilitate the ecosystem resilience variation study, resilience, in accordance with its value range, was divided into four grades: level 1 (range of 0 to 0.2), level 2 (0.2 to 0.4), level 3 (0.4 to 0.6), and level 4 (0.6 to 0.8). In 1995, 100% of the area had ecosystem resilience less than 0.4 (level 2 or lower), but it dropped to 41.45% in 2010 (mainly concentrated in the wind sandy and grass shoal areas of northern Yulin). For the different counties, after 2000, there was an increase in the area with ecosystem resilience levels greater than 0.4 (level 3 and higher). Before 2000, in the Jiaxian, Zizhou, Mizhi, Suide, Wubu, and Qingjian counties in southern Yulin, 92.2%, 92.6%, 87.1%, 84.9%, 83.5%, and 79.7% of the total area had ecosystem resilience values greater than 0.4, respectively. In contrast, none of the remaining counties (except for Fugu County in northern Yulin) exceeded an area of 60% for the same value. In addition, areas with ecosystem resilience levels higher than 0.6 (level 4), were mainly concentrated in the southern region of Yulin (e.g., Qingjian, Wubu, Mizhi, and Suide counties). Therefore, when the value of ecosystem resilience maintained steady growth in the Yulin region, we found that the value was higher in the southern area than in the northern area. Each year, this gap between areas gradually increased. This study on the elastic strength coefficient and the elastic limit revealed the development and changing trends of ecosystem resilience in Yulin City, and provides a reference for the ecosystem health and sustainable development in the study area.

Key Words: Yulin Prefecture; ecosystem; resilience; elastic strength coefficient; elastic limit

“弹性力”一词最早由 Holling^[1]引入到生态学的研究当中,被定义为生态系统承受外界干扰并保持静止状态的能力^[2]。而后,部分学者^[3-4]对于弹性力的定义更倾向于稳定性的概念,即系统经外界干扰后在一定时间内恢复稳定状态的能力。随着区域可持续发展研究的不断深入,生态系统弹性力的定义也得到丰富和发展,生态系统具有自我调节和自我恢复能力的观点也逐步得到广大学者的认同^[5-6]。其中, Walker^[7]和 Takehiro^[8]等人认为生态系统在一定时间内保持原有结构、特性不变的抗干扰能力就是生态系统弹性力。而高吉喜^[9]、王文婕^[10]等人认为生态系统在偏离平衡状态以后恢复到初始状态的自我调节能力就是弹性力。可以说,生态系统弹性力包含了弹性强度系数和弹性限度两个方面,即生态系统弹性力的高低与弹性范围^[11-12]。

国内外关于生态系统弹性力的研究方法较多^[13-14],如浅水湖泊模型^[15]和牧场模型^[16]。2011年, López^[17]等人提出功能与状态的转换模型(SFSTM),定义了生态系统弹性限度与弹性力间的相关关系;2013年, Guillermo^[18]等人以生态系统的水分利用效率来表征其弹性强度;Stephen^[19]等人则依据物种性状特征构造了“响应—效果”框架模型来评价其弹性力。在国内,高吉喜^[1]、张宝秀^[11]等人以特定区域与时段内的生态系统弹性强度系数不变为前提,通过弹性限度反映研究区生态系统弹性力的大小;而王云霞^[20]等人则以主成分分析法来确定指标权重,采用目标分层法构建了生态系统弹性力指标体系。

可见,生态系统弹性力在特定区域内的研究成效显著。为解决现阶段弹性力研究中存在的地域局限性和主成分分析等方法的模糊性,本文基于生态系统的动态特性^[17],以弹性强度系数与弹性限度为基础,引入调节系数^[21]建立生态系统弹性力模型。研究以1995—2010年榆林一区十一县的生态环境变化为依据,综合分析生态系统弹性力在不同空间尺度上的动态演变特征,在考虑不同县(区)间环境变量和物种丰富度的复杂性与不确定性的基础上^[22],评价和预测榆林地区生态系统的发展方向,从而为区域生态建设与保护提供科学依据,以期实现生态、社会和经济的协调发展目标。

1 研究区概况

榆林市地处陕西省最北部,毛乌素沙漠南缘,东经107°28—111°15,北纬36°57—39°34,与甘宁蒙晋4省接壤。榆林市下辖榆阳区与神木、府谷、定边、靖边、横山、佳县、米脂、吴堡、绥德、清涧、子洲1区11县(见图1),东西长385km,南北宽263km,总土地面积43578 km²。榆林北部为风沙草滩区,南部为黄土丘陵沟壑区,

分别占总土地面积的 42% 和 58%。该地区昼夜温差大,最高温度 38.9℃,最低温度 -24℃,多年平均降雨量 435.4mm,属典型的中温带半干旱大陆性季风气候。全市水资源总量 32.29 亿 m³,人均占有量仅为 979m³[23],属水资源贫乏地区之一。

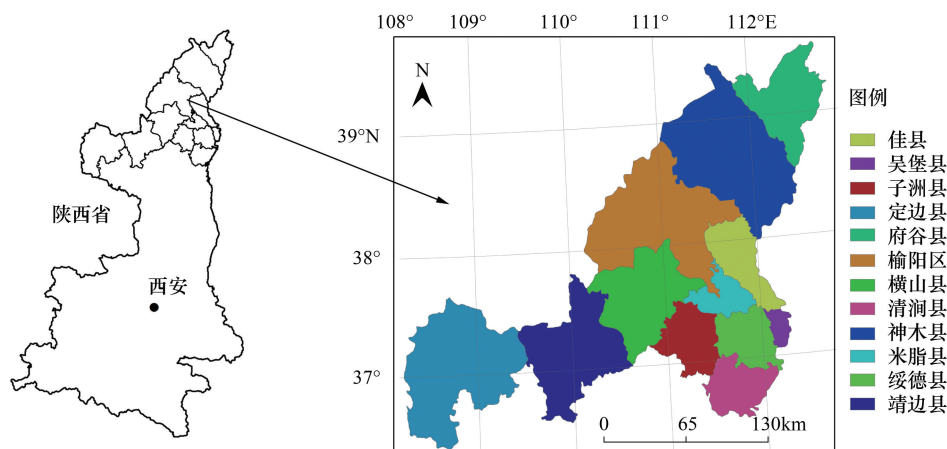


图 1 榆林市行政区划图

Fig.1 Administrative map of Yulin city

2 研究方法

2.1 分析方法

2.1.1 生态系统弹性力计算

综合生态系统弹性强度系数与弹性限度因素,建立生态系统弹性力模型^[21]:

$$E = \lambda \cdot \mu \cdot ECO_{res} \quad (1)$$

式中, E 为生态系统弹性力; λ 为调节系数^[16] (一般取 0.01); μ 为生态系统弹性强度系数; ECO_{res} 为生态系统弹性限度。

根据弹性强度系数和弹性限度的决定因素与自身性质确定计算公式^{[9][11][21]}:

$$\mu = \frac{H \cdot V}{c_1 \cdot c_2} \quad (2)$$

$$ECO_{res} = H \sum_{i=1}^m S_i \cdot P_i \quad (3)$$

式中, μ 为生态系统弹性强度系数; H 为景观多样性指数; V 为植被指数; c_1 为年气温变率; c_2 为年降水变率; ECO_{res} 为生态系统弹性限度; P_i 为土地类型 i 的面积覆盖百分比; S_i 为土地类型 i 的弹性分值。

2.1.2 景观多样性指数计算

景观多样性指数反映了研究区内景观类型的多样化程度及其比例变化^[24-25]。指数越高,景观类型的多样性越大,生态系统弹性力也就越大^[26]。

该指数主要依赖于像元大小、地貌尺度和土地利用分类。运用 ArcGIS 软件将土地利用图栅格化,再经景观指数计算软件 Fragstats3.3^[27] 计算可得,公式为^{[26][28][29]}:

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \ln(P_i) \quad (4)$$

式中, H 为景观多样性指数 (Shannon); P_i 为景观类型 i 所占比例; n 为研究区内景观类型数目。

2.1.3 植被指数计算

植被指数可通过定量监测来反映地表植被覆盖程度与生长活力,目前国内外应用最广的是归一化植被指

数(NDVI),计算公式为^[30]:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (5)$$

式中, NIR 为近红外波段(0.841—0.876 μm); Red 为可见光的红光波段(0.62—0.67 μm); NDVI 值介于-1—1 间,0 以下表示非植被覆盖区。

NDVI 数据采用最大值合成(MVC)方法进行预处理,实现对气溶胶和太阳高度角等影响因素的大气校正、辐射校正以及几何校正^[31-32],表达式如下^[30]:

$$NDVI = \max_{j=1}^n NDVI_j \quad (6)$$

式中,NDVI 为归一化植被指数; $NDVI_j$ 为一定时段内的所有植被指数。

2.1.4 年降水变率 c_1 和年气温变率 c_2 计算

年降水变率指降水量的年际变化,分为降水绝对变率和降水相对变率。通常来说,降水变率代指降水相对变率,即降水绝对变率与多年平均降水量的百分比,公式为^[33]:

$$C_1 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_i - R|}{R} \cdot 100\%, (i = 1, 2, 3 \cdots n) \quad (7)$$

式中, C_1 为研究区多年平均降水相对变率; R_i 为第 i 年某时段内实际降水量; R 为同时段内历年平均降水量。

年气温变率是指气温的年际变化,以年际气温的相对变率来表示,公式为:

$$C_2 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |T_i - T|}{T} \cdot 100\%, (i = 1, 2, 3 \cdots n) \quad (8)$$

式中, C_2 为研究区多年平均气温相对变率; T_i 为第 i 年某时段内温度; T 为同时段内历年平均气温。

2.2 数据来源与处理

榆林市土地利用图来源于中国科学院地理科学与资源研究所的 1:10 万土地利用数据(1995 年、2000 年、2005 年和 2010 年共四期),用于计算景观多样性指数。

为客观反映景观多样性指数的可操作性,建立以一级土地利用类型分类为标准的 GIS 数据库,包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地六类。以 ArcGIS 系统中 Spatial Analyst 分析模块为支撑,进行土地利用类型矢量数据的栅格转换。

NDVI 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>), MODIS^[34] 中国区域 NDVI 植被指数产品是由 MOD(MYD)09GA 经过反演、拼接、切割、投影转换、单位换算等过程加工而成。坐标系为 EPSG:4326(WGS84),空间分辨率为 1km,用于计算榆林地区植被指数。所选数据资料时段为 1995 年、2000 年、2005 年和 2010 年。

降雨量和气温变化数据来源于榆林市气象局,选取 1972—2001 年连续 30 年的数据序列,用于计算榆林市年降水变率和年气温变率。

3 结果与分析

3.1 生态系统弹性强度系数分析

3.1.1 土地利用及景观多样性指数分析

以 1995 年、2000 年、2005 年和 2010 年榆林地区 30×30m 的栅格土地利用图作为景观类型分布计算的数据源(如图 2)。

由图 2 可知 1995—2010 年榆林各县(区)土地利用情况。

总体来看,榆林地区草地所占比例最大,其次为耕地。其中耕地与水域面积多年来呈下降趋势,而林地与

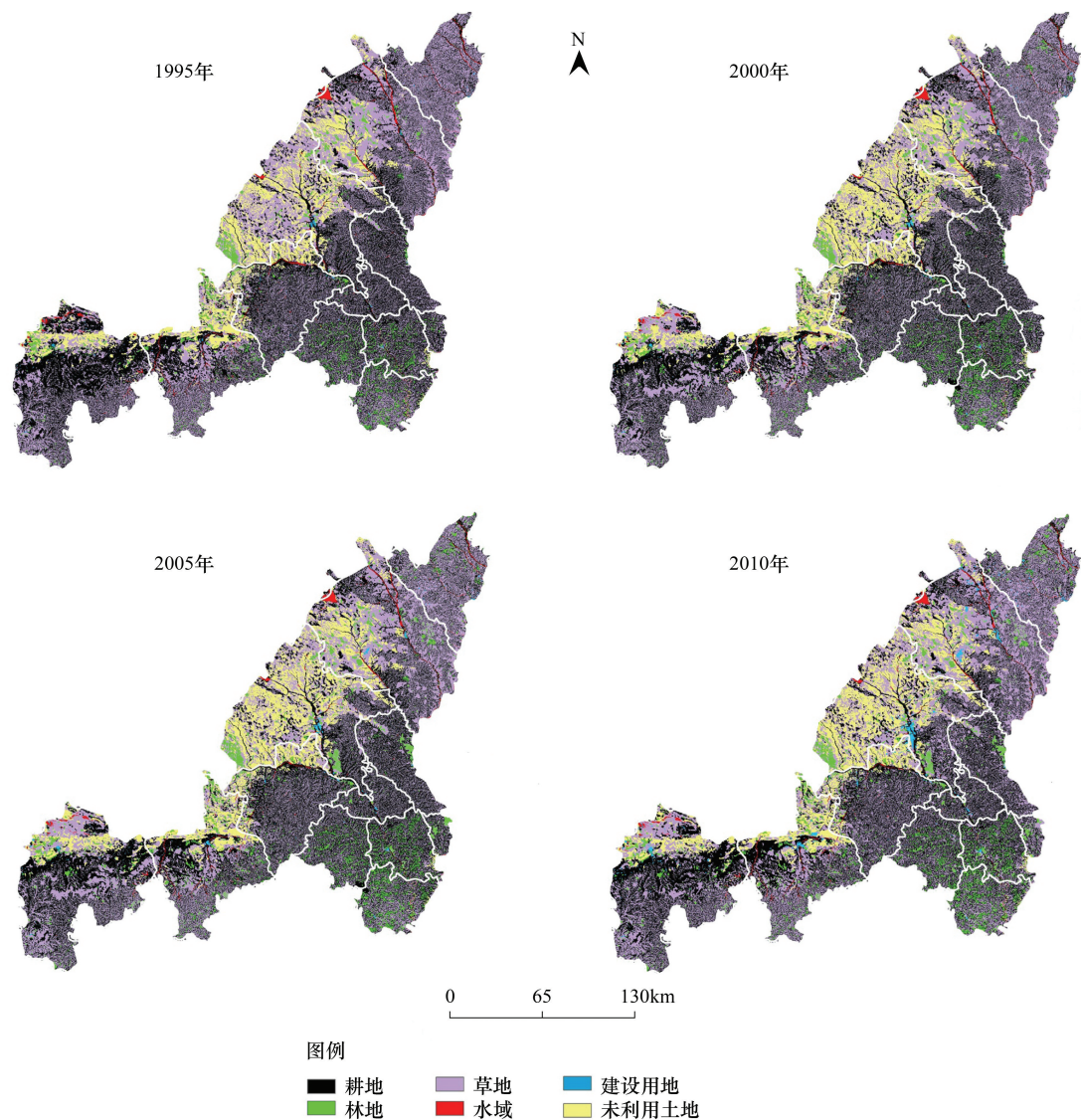


图2 1995、2000、2005 和 2010 年榆林地区土地利用图

Fig.2 The map of land use of Yulin City in 1995,2000,2005 and 2010

建设用地随着年际变化不断增长,草地面积变化幅度较小而保持稳定,未利用土地自 2000 年后呈下降趋势,未利用土地主要转化为建设用地与林地,退耕还林政策的实施和经济的快速发展是 2000 年以来不同土地景观面积转化的较大原因^[35]。

榆林地区南六县与北部六县相比,南六县耕地面积所占比例最大,其次为草地,其中耕地面积比例的历年均值为 53.12%、51.82%、49.97% 和 46.62%,而北部六县耕地面积比例为 37.02%、36.62%、34.84% 和 34.55%。可见,15 年间南北两区耕地面积均呈下降趋势,南六县耕地面积比例下降 6.5%,较北六县(3.74%)降幅大。

以土地利用分类为基础,分别计算榆林市各县(区)景观多样性指数,如表 1 所示。

由表 1 可知,1995—2010 年榆林地区景观多样性指数总体呈上升趋势,生态系统弹性力不断增强。其中 1995—2000 年间增幅最大,这可能得益于上世纪 90 年代年西北地区三北防护林第一阶段工程建设^[36]。

从各县(区)情况来看,15 年间景观多样性指数均值最高的是靖边县(1.25),最低为米脂县(0.77)。从增长幅度来看,府谷县增幅最大(17.7%),米脂县次之(13.4%),增幅最小为靖边县(4.0%)。可见,府谷、米脂两县景观多样性指数尽管均值较低,但增幅空间较大,生态系统弹性力不断增强;而靖边县指数均值虽高,但

由于近年来天然气等资源的不断开采利用,生态环境退化^[37],景观多样性指数增幅最低。

表 1 榆林地区历年景观多样性指数计算结果

Table 1 Calculations of diversity index of Landscape of Yulin Prefecture

县(区) Counties (district)	1995 年 year	2000 年 year	2005 年 year	2010 年 year
榆林地区 Yulin prefecture	1.143	1.188	1.205	1.218
北六县 Six counties in the north				
府谷县	0.796	0.87	0.911	0.937
神木县	1.098	1.137	1.144	1.157
榆阳区	1.195	1.234	1.255	1.273
横山县	1.115	1.119	1.126	1.146
靖边县	1.224	1.244	1.258	1.273
定边县	1.055	1.094	1.101	1.094
均值 Means	1.080	1.116	1.132	1.147
南六县 Six counties in the south				
佳县	0.811	0.845	0.897	0.912
米脂县	0.738	0.776	0.805	0.837
子洲县	0.941	0.946	0.96	0.986
绥德县	1.02	1.064	1.076	1.112
吴堡县	0.965	0.984	1.115	1.077
清涧县	1.061	1.115	1.127	1.132
均值 Means	0.923	0.955	0.997	1.009

从南北两区历年景观多样性指数均值的对比情况可知,北六县的指数均值整体大于南六县,即仅从景观多样性角度来看,北部六县较南六县的生态系统弹性力强。

3.1.2 植被指数分析

经整理计算,可得榆林市 1995—2010 年 NDVI 值的计算结果(见图 3)。

1995—2010 年来榆林地区植被指数整体呈起伏上升态势,年际变化显著。

从各县(区)情况来看,1995—2000 年部分地域的植被指数呈下降趋势,其中年均值降幅最大的为吴堡县(0.16),最小为榆阳区(0.02);2000—2010 年植被指数整体回升,但后 5 年增幅明显变小,这与陈赛赛、孙艳玲等人^[38]基于 2000、2005、2010 年和 2013 年四期 NDVI 数据的三北防护林工程区植被景观格局变化研究相一致。从 15 年来植被指数的整体变化来看,年均值增幅最大的为横山县(0.53),其次为府谷县(0.38),增幅最小的为定边县(0.29)。

从南北两区的对比情况来看,南六县历年植被指数均值大于北部六县,且东部植被优于西部,但其植被增幅较之略小。

3.1.3 年降水变率 c_1 和年气温变率 c_2 分析

本文以榆林地区近 30 年的降水与气温变化数据为基础,通过多年平均相对变率公式进行计算,结果如表 2 所示。

由上表可知,榆林地区降雨波动较为集中,且随着地域纬度降低,各县(区)降雨量自北向南逐步增大。同时,结合近 30 年的气温变化情况来看,各县(区)年平均气温显著上升,且南六县气温均值高于北部六县,这与陈隆勋^[39]等人对中国气温与降水变化的研究结果相一致。

榆林各县(区)年降水变率最大的为吴堡县(0.14),最小为佳县(0.048);年气温相对变率最大的为定边县(0.201),最小为绥德县(0.149),这与李琰^[40]等人关于榆林市 1980—2006 年的气温变化趋势分析相一致。

再从南北两区情况看,北部六县的年降水变率和年气温变率普遍较南六县大,这主要与南北两区的地理特征有关。

3.1.4 生态系统弹性强度系数结果分析

由公式 2 可得榆林地区生态系统弹性强度系数分布图,如图 4 所示。

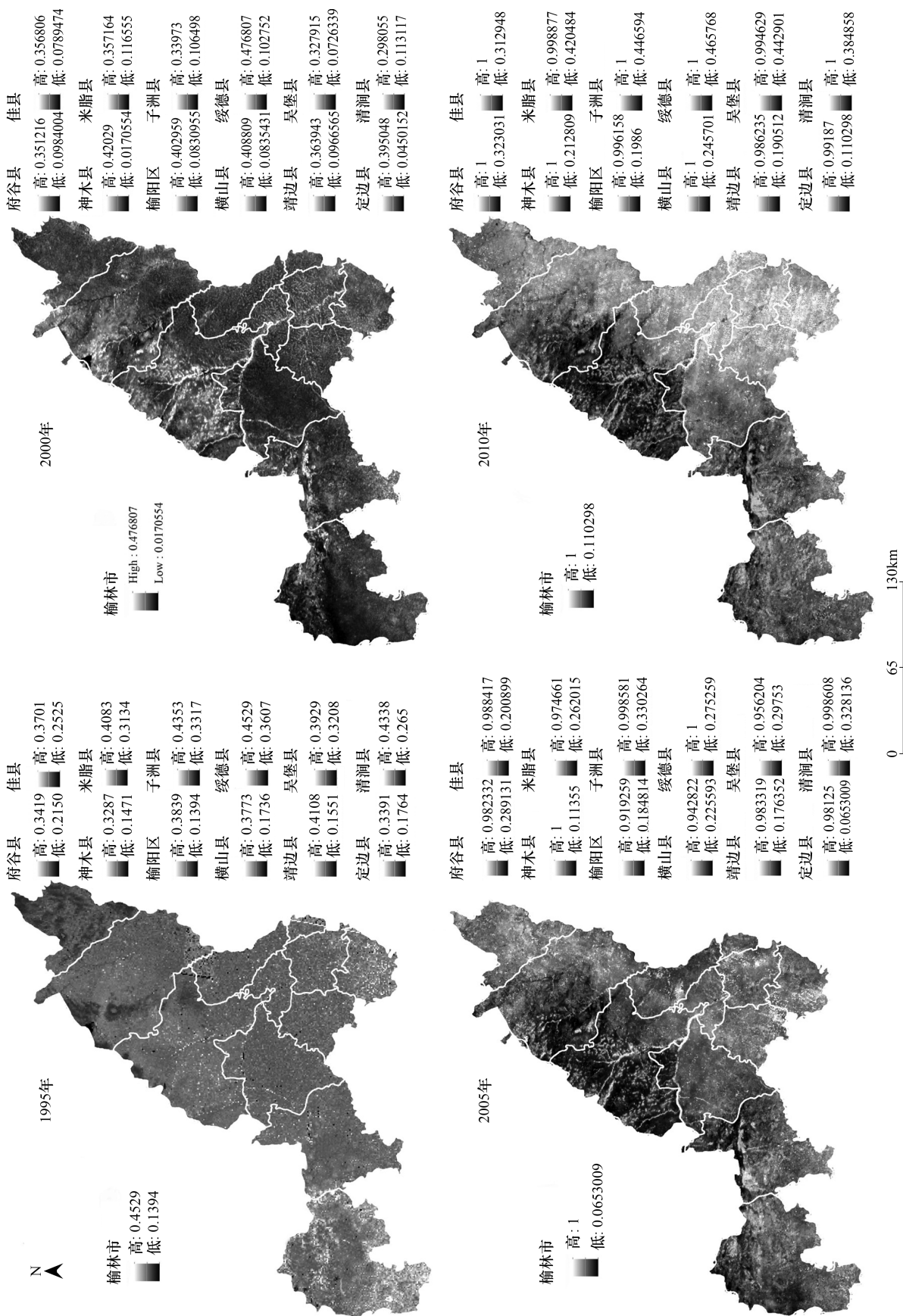


图 3 榆林地区NDVI值的计算结果
Fig.3 The results of NDVI values of Yulin prefecture

表 2 榆林地区降水和气温变化率

Table 2 Change rate of precipitation and temperature of Yulin Prefecture

县(区)Counties (district)		降水 C ₁ precipitation / mm				气温 Temperature /C ₂			
		最大值	最小值	均值	年变率	最大值	最小值	均值	年变率
		Maximum /mm	Minimum /mm	Means /mm	Rate Changes/%	Maximum /℃	Minimum /℃	Means /℃	Rate changes/%
北六县 Six counties in the north	府谷县	678.4	227.7	407.9	5.6	10.8	8.3	9.3	18.7
	神木县	646.5	233.1	404.0	7.2	10.6	7.3	8.7	19.4
	榆阳区	568.7	254.8	372.8	7.6	10.0	7.2	8.4	17.8
	横山县	516.9	211.4	353.7	5.6	10.4	7.8	8.9	18.1
	靖边县	569.8	210.2	384.1	7.1	9.9	7.1	8.3	19.7
	定边县	520.9	179.9	307.2	6.9	10.0	7.0	8.3	20.1
南六县 Six counties in the south	佳县	576.3	235.7	390.1	4.8	11.7	9.2	10.2	16.0
	米脂县	692.6	268.3	422.4	6.0	10.5	8.1	9.1	16.3
	子洲县	655.0	248.7	435.6	4.9	10.7	8.2	9.4	19.0
	绥德县	628.0	277.6	431.9	5.2	11.3	8.8	9.9	14.9
	吴堡县	658.3	277.1	441.0	14.0	12.9	7.0	10.6	18.1
	清涧县	702.9	247.3	489.9	4.9	11.0	8.7	9.8	16.5
榆林地区 Yulin prefecture				6.6				17.9	

从各县(区)来看,弹性强度系数年均值增幅最大的为绥德县(39.36—105.18),其次为清涧县(33.83—96.95),增幅最小的为米脂县(37.10—60.74),其中吴堡县的生态系统弹性强度系数值呈现负增长(34.53—30.55)。南北两区相比,南六县历年弹性强度系数较北部六县大,且增幅也显著大于北部六县。

图 4 中将生态系统弹性强度系数按照数值范围进行 5 级划分,即 1 级范围 0—20,2 级 20—40,3 级 40—60,4 级 60—80,5 级为 80 以上。表 3 为榆林地区生态系统弹性强度系数的等级划分与面域比。

表 3 榆林地区生态系统弹性强度系数的等级划分与面域比

Table 3 Classification and ratio of surface domain of elastic strength coefficient of ecosystem resilience of Yulin Prefecture

等级 Grade	1995 年 year		2000 年 year		2005 年 year		2010 年 year	
	面积	比例	面积	比例	面积	比例	面积	比例
	Area /km ²	Scale /%	Area/km ²	Scale /%	Area/km ²	Scale /%	Area/km ²	Scale /%
1	42808.87	99.36	38258.50	88.78	63.58	0.15	4.42	0.01
2	223.91	0.52	4828.68	11.21	9904.88	22.99	3483.98	8.09
3	53.98	0.12	4.08	0.01	26710.40	61.99	14574.44	33.82
4	—	—	—	—	5985.70	13.89	19737.34	45.80
5	—	—	—	—	426.70	0.98	5290.40	12.28

从历年生态系统弹性强度系数各等级面域比的变化趋势来看,2000 年榆林地区 2 级面域较 1995 年增加 10.69 个百分点,而 3 级面域下降 0.11 个百分点;2005 年 2 级和 3 级面域较 2000 年分别增加 11.78 和 61.98 个百分点,4 级与 5 级面域首次出现;2010 年 4 级和 5 级面域较 2005 年分别增加 31.91 和 11.3 个百分点,增速放缓。

由图可知,榆林地区生态系统弹性强度系数随年际变化不断增强,其中,2000—2005 年间弹性强度系数增长最快,2005—2010 年增长幅度变缓,表明榆林地区生态系统自我调节和抗干扰能力增强,系统稳定度增大。

整体来看,榆林地区生态系统弹性强度系数逐年平稳上升,表明榆林地区生态系统自我调节和抗干扰能力增强,系统稳定度增大。其中,增长速度最快的区间为 2000—2005 年,但自 2005 年后,增幅逐渐变缓,这可能与后续年间榆林地区资源滥采、生态环境的可持续发展受到制约有关^[41]。

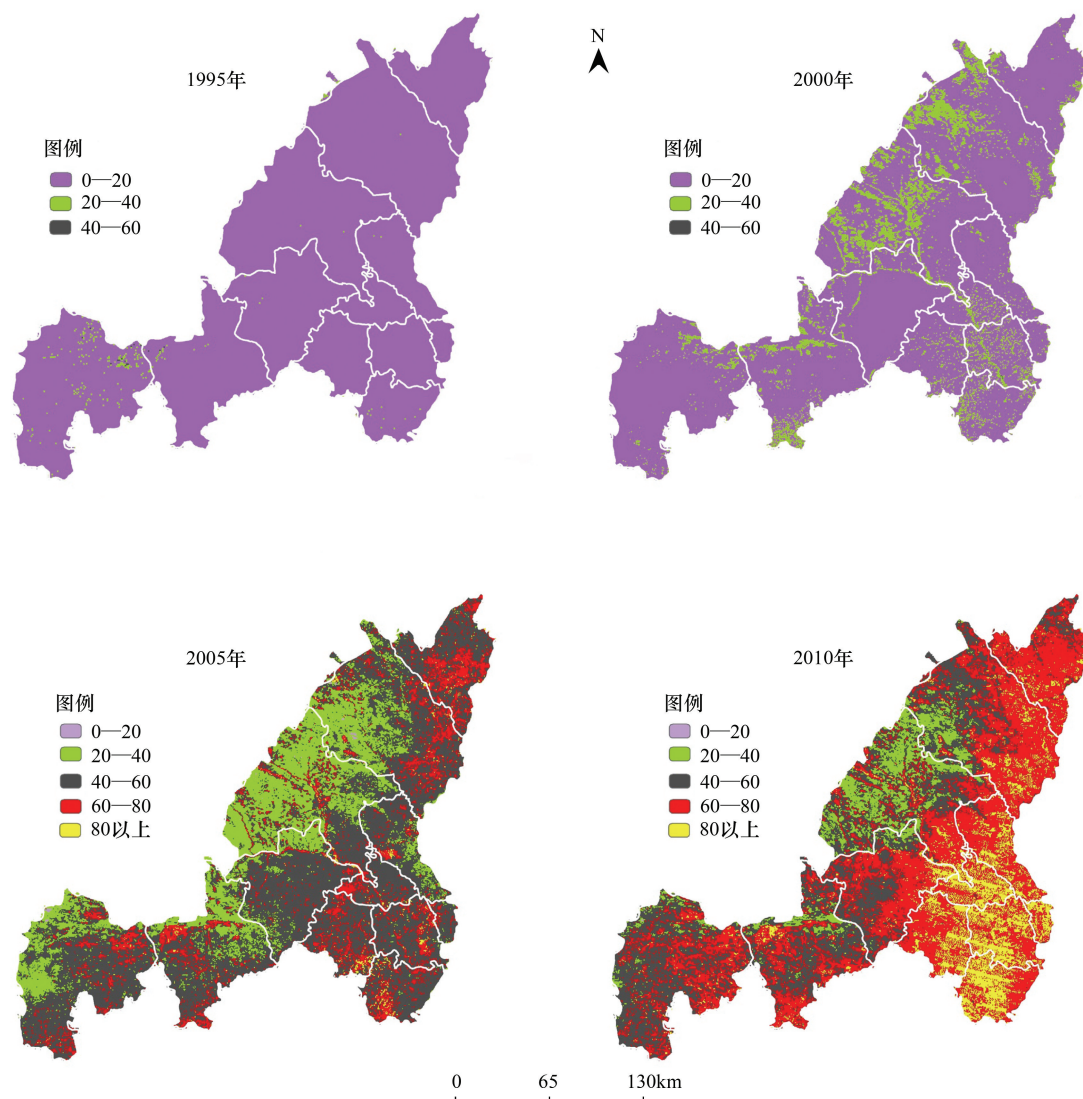


图 4 榆林地区生态系统弹性强度系数分布图

Fig.4 The map of intensity coefficient of ecosystem resilience of Yulin Prefecture

3.2 生态系统弹性限度分析

在表征研究区生态系统弹性限度时,可根据该地区不同土地利用类型的恢复能力大小建立指数模型(公式3)进行计算,即对各土地利用类型赋以不同的弹性分值,然后加权求和得其生态系统弹性限度值。

3.2.1 弹性分值分析

根据不同土地类型对生态系统的恢复程度不同,对六大地类赋以不同的弹性分值,弹性分值的确定参考了有关学者和专家的研究^[42],并结合研究区生态环境的基本特征,得如下结果,如表4所示。

3.2.2 生态系统弹性限度结果分析

在弹性限度的各项计算指标中,景观多样性指数 H 见表1,土地利用类型面积百分比 P_i 及弹性分值 S_i 见图2和表4。计算可得研究区历年生态系统弹性限度,如表5所示。

由表5可知,15年间榆林地区生态系统弹性限度稳定增长,但自2005年以后增幅放缓。

其中,历年生态系统弹性限度增长最大的是吴堡县(0.099),最小为榆阳区(0.021)。这主要与草地地类面积的百分比变化有关(表5),其中吴堡县草地面积增长率为11.9%,居各地之首,而榆阳区降幅最大(5.78%),且在1995—2000年和2000—2010年两个时段内,榆阳区草地面积变化呈现先增长后下降的趋势,这

与该区弹性限度的历年变化相一致,可见草地面积百分比变化对弹性限度的影响较大。

表 4 不同土地利用类型的弹性分值
Table 4 Elasticity scores of different types of land use

土地利用类型 Landuse	分值 Scores	说明 Explanation
耕地 Farmland	0.5	对维持区域生态系统的弹性度有重要的作用,但利用不好,容易退化致使生态弹性力下降
草地 Grassland	0.6	
林地 Forest land	0.9	对维持和调节区域生态系统的弹性度起决定性作用,生态弹性度较佳
水域 Water area	0.8	
建设用地 Construction land	0.4	对维持区域生态系统的弹性度作用力较小
未利用土地 Unused land	0.3	

表 5 榆林地区历年生态系统弹性限度
Table 5 Elastic limit of ecosystem resilience of Yulin Prefecture

县(区) Counties (district)	1995 年 year	2000 年 year	2005 年 year	2010 年 year	增幅 Increase
榆林地区 Yulin prefecture	0.623	0.647	0.660	0.669	0.046
北六县 Six counties in the north	府谷县	0.454	0.501	0.529	0.092
	神木县	0.610	0.628	0.633	0.032
	榆阳区	0.616	0.608	0.623	0.021
	横山县	0.590	0.593	0.599	0.023
	靖边县	0.663	0.680	0.689	0.034
	定边县	0.564	0.593	0.599	0.028
	均值 Means	0.583	0.601	0.612	0.038
南六县 Six counties in the south	佳县	0.443	0.463	0.497	0.067
	米脂县	0.399	0.422	0.439	0.060
	子洲县	0.540	0.544	0.555	0.036
	绥德县	0.580	0.621	0.630	0.079
	吴堡县	0.536	0.552	0.656	0.099
	清涧县	0.627	0.676	0.687	0.070
	均值 Means	0.521	0.546	0.577	0.069

将历年北部六县与南六县的生态系统弹性限度均值相比,北部六县高于南六县,这与南北两区的景观多样性指数均值变化相一致。此外,就弹性限度增幅来看,南六县增幅为北六县的 1.82 倍,可见南六县生态系统的抗干扰能力不断增强。

3.3 生态系统弹性力分析

利用 ArcGIS 中的 Raster calculator 进行计算,再经 Reclassify 工具重新分类后可得榆林地区生态系统弹性力分布图(图 5)。

结合弹性力模型(公式 1)的各项指标计算结果,可知 1995、2000、2005 和 2010 年榆林地区生态系统弹性力范围,即 0.09—0.28、0.01—0.31、0.04—0.67、0.08—0.69。可见,15 年间研究区生态系统弹性力总体呈增长趋势,且后期增速变缓。

从各县(区)情况来看,清涧县与绥德县部分地域生态系统弹性力较大,最大可达 0.68 和 0.69,可恢复性强;而吴堡县和米脂县大部,定边县和府谷县的局部地带生态系统弹性力小,最小为 0.01,生态系统脆弱,自我调节能力和可恢复性差。

再从南北两区的统计数据来看,南六县生态系统弹性力普遍高于北部六县,且差距随年际变化逐渐增大。

图 5 将生态系统系统弹性力 μ 按照数值范围(0—0.8)进行 4 级划分,即 1 级范围 0—0.2,2 级 0.2—0.4,3 级 0.4—0.6,4 级 0.60—0.8。表 6 为榆林地区生态系统弹性力的等级划分与面域比。

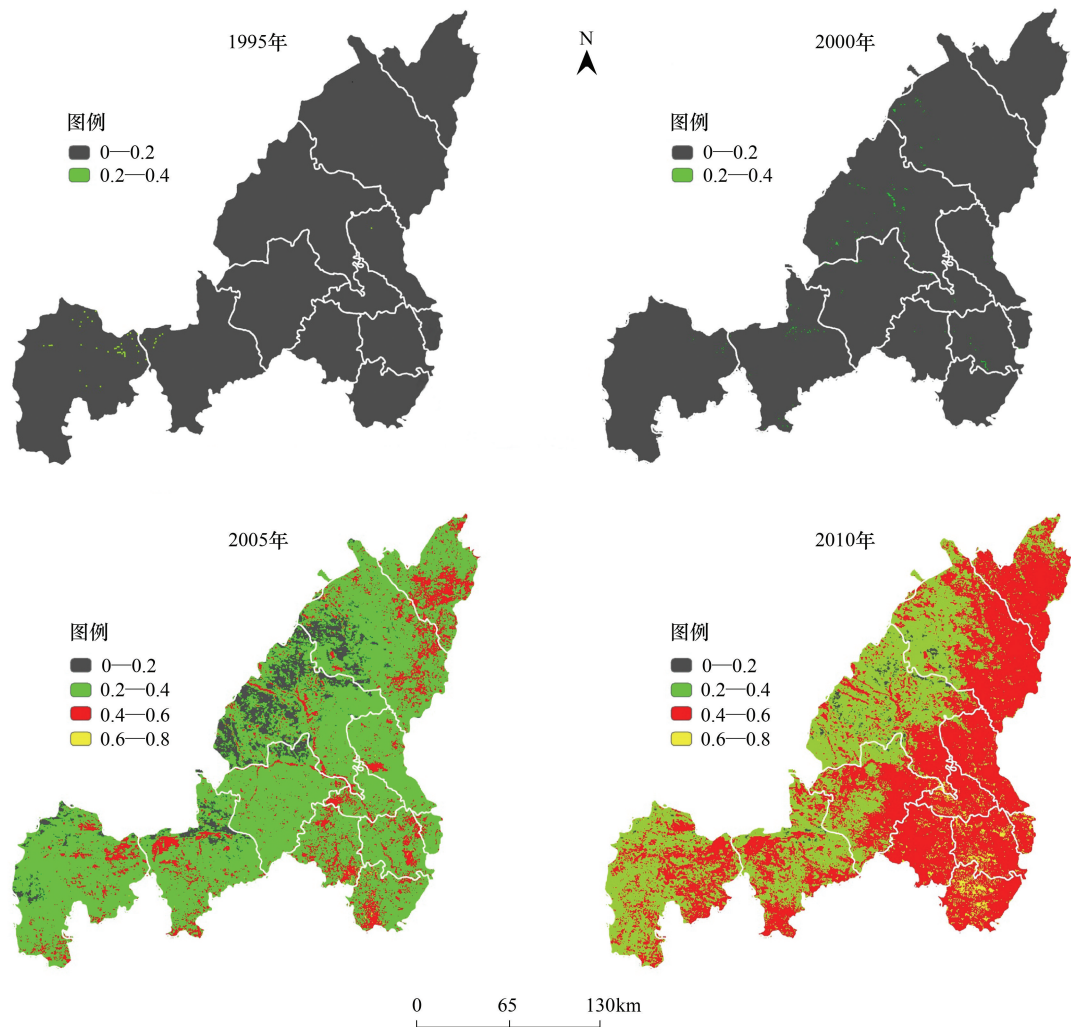


图 5 榆林地区历年生态系统弹性力分布图

Fig.5 The map of resilience of ecosystem resilience of Yulin Prefecture

表 6 榆林地区生态系统弹性力的等级划分与面域比

Table 6 Classification and ratio of resilience of ecosystem resilience of Yulin Prefecture								
等级 Grade	1995 年 year		2000 年 year		2005 年 year		2010 年 year	
	面积 Area /km ²	比例 Scale /%	面积 Area/km ²	比例 Scale /%	面积 Area/km ²	比例 Scale /%	面积 Area/km ²	比例 Scale /%
1	42999.80	99.80	43012.38	99.82	3452.02	8.01	405.62	0.95
2	86.97	0.20	78.88	0.18	33704.54	78.22	17451.86	40.50
3	—	—	—	—	5840.52	13.56	23941.10	55.56
4	—	—	—	—	94.18	0.22	1292.00	3.00

由图 5 和表 6 可知,1995 和 2000 年榆林地区生态系统弹性力值均低于 0.4,等级划分为 1 级和 2 级,2005 和 2010 年分别有 86.23%和 41.45%的弹性力值低于 0.4,2010 年榆林地区 3 级以上地域面域比首次超过 50%,其中 4 级地域所占比例为 3%,可见,研究区生态系统的抗干扰能力不断增强。

从历年生态系统弹性力各等级面域比的变化趋势来看,2000 年榆林地区 2 级面域较 1995 年下降 0.02 个百分点,基本持平;2005 年 2 级面域较 2000 年增加 78.04 个百分点,3 级与 4 级面域首次出现;2010 年 3 级和 4 级面域较 2005 年分别增加 42 和 2.78 个百分点,增速放缓。整体来看,榆林地区生态系统弹性力呈逐年平

稳上升趋势,其中,增长速度最快的区间为 2000—2005 年,但自 2005 年后,增速逐渐放缓。

从历年弹性力等级的面域范围变化来看,3 级及以上地域的扩展发生在 2000 年以后,且主要集中于南六县。而北部六县当中,从 2005 年来看仅府谷和神木两县的南部、靖边与定边两县的北部局部地域达 3 级标准,其中所占比例最大的为府谷县(30%),其次为靖边县(13.5%),比例最小的为横山县(6%)。与此相比,南六县中按 3 级标准地域所占比例由高到低排列分别为子洲县(24.6%)、清涧县(23.4%)、绥德县(20.4%)、米脂县(18.1%)、吴堡县(14%)和佳县(8.7%),普遍较北六县大。这一结果表明,北部六县整体生态环境的稳定性差,生态系统恢复力较弱,抵御外界干扰的能力低。因此,需进一步加强对当地风沙草滩区的保护与建设。

2005—2010 年的 5 年间,北部六县生态系统弹性力增长缓慢,除府谷县于 2010 年有 82.8%的地域达到 3 级标准外,其余各县(区)达到 3 级标准的面域比均未超过 60%,与此相比,南部佳县、子洲、米脂、绥德、吴堡和清涧六县大部分地域的生态系统弹性力等级于 2010 年基本达到 3 级标准,分别为 92.2%、92.6%、87.1%、84.9%、83.5%和 79.7%。而弹性力等级达到 4 级的地域主要分布在清涧、吴堡、绥德和米脂四县,其中面域比最大的为清涧县,达 19.7%,最小的为佳县,为 3.8%。这一结果表明,南六县所处地域的生态环境恢复力强,稳定性较好,抵御外界干扰的能力强。

就影响生态系统弹性力动态演变的驱动力因素来看,植被指数较景观多样性指数的影响作用显著。尽管榆林地区北部六县景观类型丰富,多样性指数高于南六县,但其植被的生长状况与主要土地利用类型(如草地)均劣于南六县,加之南北两区的整体地形格局因素的影响,榆林地区生态系统弹性力呈现南高北低的格局。

4 结论

(1) 运用 Fragstats 和 ArcGIS 软件进行数据处理和获取弹性力各项指标值,可以提高榆林地区生态系统弹性力分析评价的可操作性和实用性。

(2) 榆林地区生态系统弹性力随年际变化呈增长趋势,生态系统的自我调节和抗干扰能力逐年增强,发展向好,但其增长趋势自 2005 年起逐渐减缓,这主要与研究区的经济发展和植被生长变化相关。2005 年以来,榆林作为中国能源重化工基地,资源不断开采,严重破坏了部分地区植被生长状态,从而形成其生态系统弹性力增长减缓的现状。

(3) 榆林地区生态系统弹性力呈现南高北低的差异变化,总体来讲,其差异主要同南北两区的地域环境有关。北六县多为风沙草滩区,生态环境脆弱,生态系统可恢复性较弱,而南六县多为丘陵沟壑区,生态环境较好,生态系统的弹性力较强。

从南北两区的动态演变来看,南六县生态系统弹性力增幅显著大于北六县,这主要同两地的经济发展水平相关。北六县较南六县自然资源丰富,经济发达,但其经济高速发展的背后却是以生态环境破坏为代价,这亦体现在南北两区生态系统弹性力的变化对比上。

(4) 结合榆林地区生态系统弹性力的地域演变特征及研究区经济发展特点,如何保持该地区生态系统的健康可持续发展,制定合理的生态保护纲要,正确引导其经济发展方向就显得尤为重要。对于经济发展迅速的北部地区,应在保持经济优势的同时进一步带动南部地区发展,同时避免盲目发展形成环境的次生破坏,从而建立健康稳定的生态经济发展新格局。

参考文献(References):

- [1] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 1-23.
- [2] Zhu J M, Ruth M. Exploring the resilience of industrial ecosystems. *Journal of Environmental Management*, 2013, 122: 65-75.
- [3] Westman W E. Measuring the inertia and resilience of ecosystems. *BioScience*, 1978, 28(11): 705-710.
- [4] Stringham T K, Kruege W C, Shaver P L. State and transition modeling: an ecological process approach. *Journal of Range Management*, 2003, 56(2): 106-113.

- [5] 程国栋. 承载力概念的演变及西北水资源承载力的应用框架. 冰川冻土, 2002, 24(4): 361-367.
- [6] Derissen S, Quaas M F, Baumgärtner S. The relationship between resilience and sustainability of ecological-economic systems. *Ecological Economics*, 2011, 70(6): 1121-1128.
- [7] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, Kinzig A. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 2004, 9(2): 5-5.
- [8] Sasaki T, Furukawa T, Iwasaki Y, Seto M, Mori A S. Perspectives for ecosystem management based on ecosystem resilience and ecological thresholds against multiple and stochastic disturbances. *Ecological Indicators*, 2015, 57: 395-408.
- [9] 高吉喜. 可持续发展理论探索. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [10] 王文婕, 葛大兵, 周双, 黄静虹. 平江县生态弹性度定量分析评价研究. *环境科学与管理*, 2015, 40(3): 130-134.
- [11] 张宝秀, 熊黑钢, 徐长春. 新疆于田绿洲生态弹性度与景观环境分析. *水土保持研究*, 2008, 15(6): 112-114.
- [12] Sterk M, Gort G, Klimkowska A, van Ruijven J, van Teeffelen A J A, Wamelink G W W. Assess ecosystem resilience; linking response and effect traits to environmental variability. *Ecological Indicators*, 2013, 30: 21-27.
- [13] Naeem S. Species redundancy and ecosystem reliability. *Conservation Biology*, 1998, 12(1): 39-45.
- [14] Mitchell R J, Auld M H D, Le Duc M G, Robert M H. Ecosystem stability and resilience; a review of their relevance for the conservation management of lowland heaths. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2000, 3(2): 142-160.
- [15] Mäler K G, Xepapadeas A, de Zeeuw A. The economics of shallow lakes. *Environmental and Resource Economics*, 2003, 26(4): 603-624.
- [16] Janssen M A, Anderies J M, Walker B H. Robust strategies for managing rangelands with multiple stable attractors. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2004, 47(1): 140-162.
- [17] López D R, Brizuela M A, Willems P, Aguiar M R, Siffredi G, Bran D. Linking ecosystem resistance, resilience, and stability in steppes of North Patagonia. *Ecological Indicators*, 2013, 24: 1-11.
- [18] Ponce-Campos G E, Moran M S, Huete A, Zhang Y G, Bresloff C, Huxman T E, Eamus D, Bosch D D, Buda A R, Gunter S A, Scalley T H, Kitchen S G, McClaran M P, McNab W H, Montoya D S, Morgan J A, Peters D P C, Sadler E J, Seyfried M S, Starks P J. Ecosystem resilience despite large-scale altered hydroclimatic conditions. *Nature*, 2013, 494(7437): 349-352.
- [19] Perz S G, Muñoz-Carpena R, Kiker G, Holt R D. Evaluating ecological resilience with global sensitivity and uncertainty analysis. *Ecological Modelling*, 2013, 263: 174-186.
- [20] 王云霞, 陆兆华. 北京市生态弹性力的评价. *东北林业大学学报*, 2011, 39(2): 97-100.
- [21] 闫旭骞. 矿区生态承载力定量评价方法研究. *矿业研究与开发*, 2006, 26(3): 82-85.
- [22] Tschamtké T, Tylíaniakis J M, Rand T A, Didham R K, Fahrig L, Batáry P, Bengtsson J, Clough Y, Crist T O, Dormann C F, Ewers R M, Fründ J, Holt R D, Holzschuh A, Klein A M, Kleijn D, Kremen C, Landis D A, Laurance W, Lindenmayer D, Scherber C, Sodhi N, Steffan-Dewenter I, Thies C, van der Putten W H, Westphal C. Landscape moderation of biodiversity patterns and processes-eight hypotheses. *Biological Reviews*, 2012, 87(3): 661-685.
- [23] 张华. 榆林能源化工基地工业园区和重点城镇水资源配置. *水利与建筑工程学报*, 2013, 11(4): 170-174.
- [24] 布仁仓, 胡远满, 常禹, 李秀珍, 贺红土. 景观指数之间的相关分析. *生态学报*, 2005, 25(10): 2764-2775.
- [25] 李晓文, 胡远满, 肖笃宁. 景观生态学与生物多样性保护. *生态学报*, 1999, 19(3): 399-407.
- [26] 宋兰兰, 陆桂华, 刘凌, 贺瑞敏. 区域生态系统健康评价指标体系构架—以广东省生态系统健康评价为例. *水科学进展*, 2006, 17(1): 116-121.
- [27] McGarigal K, Cushman S A, Neel M C, Ene E. FRAGSTATS: spatial pat tern analysis program for categorical maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats.html>, 2002.
- [28] 刘宇, 吕一河, 傅伯杰. 景观格局—土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性. *生态学报*, 2011, 31(1): 267-275.
- [29] 卢玲, 李新, 程国栋, 肖洪浪. 黑河流域景观结构分析. *生态学报*, 2001, 21(8): 1217-1224.
- [30] 王正兴, 刘闯, Huete A. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI. *生态学报*, 2003, 23(5): 979-987.
- [31] Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K, Slayback D, Shabanov N V, Myneni R B. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D17): 20069-20083.
- [32] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究. *生态学报*, 2011, 31(19): 5495-5504.
- [33] 谢仁波, 舒国勇. 铜仁西部不同时间尺度温度降水变率分析. *贵州气象*, 2012, 36(6): 16-19.
- [34] MODIS homepage. <http://modis.gsfc.nasa.gov/>, 2010.
- [35] 贾科利, 常庆瑞, 张俊华. 陕北农牧交错带土地利用变化及驱动机制分析. *资源科学*, 2008, 30(7): 1053-1060.
- [36] 康华. 陕西省三北防护林工程建设成效分析问题与发展对策研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [37] 王灿. 陕北天然气能源区土地利用变化与土地生态安全评价[D]. 西安: 陕西师范大学, 2014.
- [38] 陈赛赛, 孙艳玲, 杨艳丽, 王中良. 三北防护林工程区植被景观格局变化分析. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(12): 85-90.
- [39] 陈隆勋, 朱文琴, 王文, 周秀骥, 李维亮. 中国近 45 年来气候变化的研究. *气象学报*, 1998, 56(3): 257-271.
- [40] 李琰, 刘晓琼, 赵昕奕. 陕西省榆林市气候变化特征分析. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(1): 157-161.
- [41] 刘洪丽, 吴军年, 徐兴东. 基于集对分析的矿区生态承载力定量评价. *干旱区研究*, 2008, 25(4): 568-573.
- [42] 徐明德, 李静, 彭静, 钮键, 曹露. 基于 RS 和 GIS 的生态系统健康评价. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1809-1814.