

喀斯特山地城市生态系统弹性变化分析

——以贵阳市区为例

牛潜¹ 周旭¹ 张继¹ 杨江州¹ 黄雪勇²¹

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 贵阳市水科学技术院士工作站, 贵州 贵阳 550081)

【摘要】: 生态系统弹性是衡量区域生态系统健康和承载力的重要指标。基于生态系统弹性强度系数和生态系统弹性限度系数构建了生态系统弹性力综合评价模型, 并运用标准差距平法对计算结果进行分级, 对贵阳市区 2000、2005、2010 和 2015 年的生态系统弹性时空演变进行定量研究。结果表明: (1) 贵阳市区的生态系统弹性力分级占比较大的主要为较强、中等和较弱, 占总面积的 95% 左右, 其余为很弱和很强的区域, 占比约 5%; (2) 贵阳市区的生态系统弹性力在 2000~2015 年大体呈波动减弱态势, 其中弹性力分级为较弱和很弱的区域分别增长 3.24% 和 1.12%, 而较强的区域则减少 2.60%; (3) 但弹性力很强的地区面积增加 0.83%, 部分区域的生态系统弹性力有所增强。

【关键词】: 生态系统弹性力 基岩裸露率 归一化植被指数 景观多样性指数 石漠化敏感度 象元二分模型

【中图分类号】: X826 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2019)03-0722-09

生态系统弹性是生态系统在遭遇压力和扰动时自我调节并恢复到原始平衡状态的能力。生态系统弹性的概念最早出现在 C. S. Holling 1973 年发表的“Resilience and Stability of Ecological Systems”一文中, Holling 把弹性和稳定性的概念引入到生态系统中, 认为弹性决定系统内关系的持续性^[1]; Walter^[2]认为, 弹性力指的是在扰动后生态系统中初始结构和功能恢复的程度、方式和速度, 反映了生态系统内稳态过程的性质和复杂性; Darling 等^[3]和 Côté 等^[4]认为生态系统的弹性力提供了一个可以让自身从干扰中恢复的机会, 这个概念包括扰动的幅度和恢复的速度两个独立的过程; Willis 等^[5]认为形成陆地生态系统的弹性因素是复杂的, 生物属性和非生物属性并存。刘晓平等^[6]认为生态系统弹性可以分为弹性强度与弹性限度两个概念, 弹性强度即弹性力的大小, 弹性限度是一个阈值, 表示生态系统可以承受干扰的范围; 王文婕等^[7]认为生态系统弹性原理类似于弹簧, 其承载力与自我调节能力是有限度的, 如果超越这个限度, 生态系统就会受到不可逆的破坏。

对生态系统弹性力的定量分析有多种方法, Sharma 等^[8]比较了陆地净初级生产力(NPP)对印度水文气候扰动在不同尺度(即流域、土地覆盖和气候类型)的响应, 以检验生态系统面对这种不利条件的弹性; Luciano^[9]基于暴露-敏感-响应机制(VSD), 推断了美国南部生态系统的抗逆性、暴露在不利环境下的可能性及其适应能力, 进而评估生态系统在不失去结构和功能的前提下对气候变化的容忍变异量。国内有学者通过层次分析法(AHP)或主成分分析法(PAC)来确定气候、土壤、水文和地物覆被的指标权重, 从而实现目标层(生态系统弹性)的定量分析^[10,11]; 还有学者基于土地利用变化与景观格局对干旱区生态系统弹性进行了研究, 并通

作者简介: 牛潜(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土地变化与生态系统服务. E-mail: 847254129@qq.com; 周旭, E-mail: zxy8178@163.com.

基金项目: 贵州省科学技术基金项目(黔科合基础[2017]1195号); 贵州省科技支撑项目(黔科合支撑[2015]2855号)。

过弹性分值来构建土地利用类型与生态系统弹性之间的纽带^[12~14];田茂等^[15]、廖柳文等^[16]则改进了弹性分值的确定方法,利用植被净初级生产量(NPP)作为弹性分值的计算标准。

一个地区的生态系统弹性力基本取决于自身的地形地貌、气候条件、土壤理化性质、水文过程、植被盖度与土地利用/覆被等要素^[17]。区域生态系统弹性是区域弹性的重要组成部分,是区域经济弹性、社会弹性和工程弹性的基础^[18],同时也是区域生态系统承载力的基础^[19];贵阳市区是黔中城市群的核心增长极,城市的快速扩张使地表覆被与景观发生改变,生态系统弹性存在时间演变的规律性;同时贵阳市是喀斯特高原山地城市,地形起伏度大、景观破碎度高,生态系统弹性具有较强的空间异质性。国内外对喀斯特地区的生态系统弹性研究仍是空白,且有现有的指标选择都无法较好地反映喀斯地区的区域特性对生态系统弹性的重要影响。因此基于弹性强度系数与弹性限度系数建立生态系统弹性力模型,并利用石漠化敏感度指数对生态系统弹性力模型进行改进,对贵阳市区 2000~2015 年的生态系统弹性的时空变化进行定量分析,为生态环境保护、土地资源利用与规划和区域可持续发展提供科学参考。

1 研究区概况

贵阳市区位于贵州省中部、贵阳市中南部(106° 7' 16" ~107° 3' 10" E, 26° 11' 16" ~26° 56' 9" N),是贵阳市的城市中心、黔中城市群的核心区域。包括云岩区、南明区、白云区、观山湖区、乌当区、花溪区等 6 个市辖区和一个县级市清镇市,六区一市面积共 8042.71km²,占贵阳市总面积的 48.82%,其中建设用地面积 447.39km²,占研究区面积的 11.39%。贵阳市区是长江流域和珠江流域两大水系流域的分水岭,属中亚热带季风性湿润气候,气候温和,降水丰沛,雨热同季,年平均气温约 15.3℃,多年平均降水量约 1096mm^[20]。贵阳市区位于黔中的喀斯特岩溶高原,地形崎岖破碎,最低海拔 773m,最高海拔 1743m,平均海拔 1249m,天然落差达 970m,岩溶地貌发育强烈,60.86%的地区是石灰岩、白云岩等碳酸盐岩广泛分布的典型喀斯特地貌,土层瘠薄且再生困难,易引发水土流失和石漠化灾害,生态系统较为脆弱。2015 年森林覆盖率约 42%,略低于全省平均水平。六区一市常住人口共约 387 万人(2015 年),其中城镇人口 70%以上,2015 年实现 GDP2347.37 亿元。

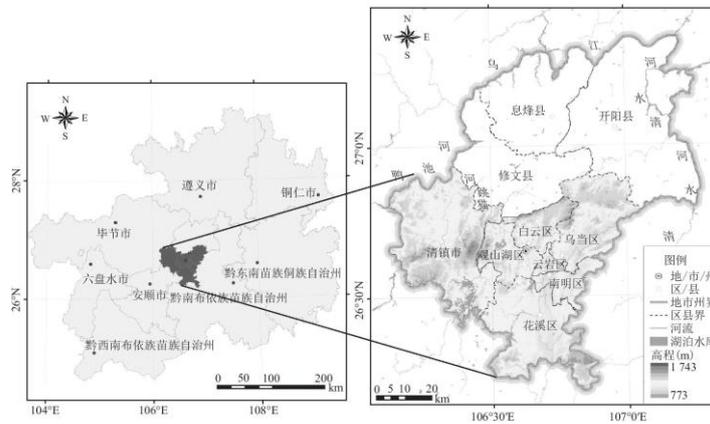


图 1 研究区位置与地形图

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及预处理

研究中用到的数据主要包括 Landsat5(TM)/8(OLI) 遥感影像、归一化植被指数(NDVI)、土地利用数据、DEM 数字高程数据。其中 2000、2005、2010、2015 年 Landsat 遥感影像下载自美国国家航空航天局地球科学数据中心(<https://earthdata.nasa.gov/>),

行列号为 127/41、42, 空间分辨率 30m, 云量均<0.1%, 利用 ENVI5.3 对数据进行辐射定标、大气校正、地形校正以及拼接、裁剪等处理, 并剔除部分异常值。2000、2005、2010 和 2015 年的 NDVI 数据来源于美国地质调查局地球资源观测与科学中心 (<https://cr.usgs.gov/>), 选取 MODIS 系列产品中的 MOD13Q1 植被覆盖产品进行下载, 行列号为 H27V06, 合成时间为 16d, 空间分辨率为 250m; 利用 MRT 软件对原始数据进行格式与投影的转换, 并利用 ArcGIS 软件中的 Cell Statistics 工具对植被生长季(6、7、8 月, 每月两景数据)的 NDVI 值进行最大值合成(MVC)处理。2000、2005 和 2010 年土地利用数据来源于“贵州省生态环境十年变化遥感调查与评估”项目, 2015 年土地利用数据是在 2010 年的基础上, 以 Google-earth 遥感影像为底图, 通过目视解译得到, 采用《全国遥感监测土地利用/覆盖分类体系》(LUCC), 把土地利用分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 大类。DEM 数字高程数据下载自地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率 30m。本研究所有空间数据均采用 Albers Conical Equal Area 投影坐标系, GCS_WGS_1984 地理坐标系统, 基准面为 D_WGS_1984。

2.2 研究方法

2.2.1 生态系统弹性力模型

生态系统弹性力包括 2 个方面: 一是生态系统弹性力的强度, 指的是弹性力的大小; 二是生态系统弹性力的限度, 指的是弹性的范围(阈值), 若超过这个范围, 受到破坏的生态环境就难以自我恢复, 该地区的生态安全就将面临失控。结合生态系统弹性强度系数与弹性限度两个指标, 建立生态系统弹性力综合评价模型:

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

式中: E 为生态系统弹性力, 值越大说明弹性越大; μ 为生态系统弹性强度系数; ECO_{res} 为生态系统弹性限度; 其中:

$$\mu = \frac{SHDI \times NDVI}{K_{rs}} \quad (2)$$

$$ECO_{res} = \frac{\sum_{i=1}^m (S_i \times P_i)}{C} \quad (3)$$

式中: SHDI 为景观多样性指数 (Shannon); NDVI 为归一化植被指数; K_{rs} 为石漠化敏感度; S_i 为土地利用类型 i 的弹性分值; P_i 为土地利用类型 i 的面积百分比; C 为景观破碎度; m 为土地利用类型的种类。

2.2.2 距标准差分级法

基于综合评价模型对贵阳市区的生态系统弹性力进行计算后, 利用距标准差法对计算结果进行分级, 可以在一定程度上避免主观分级的盲目性, 使分析结果更清晰、更可信。

(1) 计算弹性力距标准差的倍数:

$$\alpha = \frac{x_i - \bar{x}}{\delta} \quad (4)$$

式中： α 为每个栅格的弹性力数值距标准差倍数； x_i 为某一期弹性力第 i 个栅格的值； \bar{x} 为该期弹性力（即该期所有栅格）的平均值； δ 为生态系统弹性力的标准差。平均值与标准差在栅格属性中均可查询。

(2) 根据生态系统弹性力距标准差倍数对计算结果进行分级，分级标准如表 1 所示^[20]。

表 1 生态系统弹性力分级标准

距标准差倍数	相当于弹性力等级
≤ -1.5	很弱
$-1.5 \sim -0.5$	较弱
$-0.5 \sim 0.5$	中等
$0.5 \sim 1.5$	较强
≥ 1.5	很强

2.2.3 石漠化敏感度指数

石漠化敏感度是指喀斯特地区面对自然环境和人类活动的扰动时石漠化灾害的敏感程度，即发生石漠化可能性的大小。石漠化是喀斯特地区土地退化最极端的形式，石漠化敏感度高的区域，其植被与土壤状况较差，生态脆弱度高，生境容易恶化，进而使生态系统弹性力下降。

$$K_s = \sqrt[3]{(F_r \times NDVI \times T)} \quad (5)$$

式中： K_s 是石漠化敏感度； T 、 $NDVI$ 、 F_r 分别为评价区域的坡度、植被指数和基岩裸露率。坡度指数以 DEM 数字高程数据为基础，通过 ENVI5.3 Topographic 工具得出。坡度、植被指数与基岩裸露率均通过 ArcGIS10.2 Reclassify 工具进行重分类并赋值。分级与赋值标准参考前人研究成果如表 2 所示^[21~25]。

表 2 石漠化敏感度分级标准

坡度	$\leq 5^\circ$	$5^\circ \sim 8^\circ$	$8^\circ \sim 15^\circ$	$15^\circ \sim 25^\circ$	$\geq 25^\circ$
植被指数	≥ 0.8	$0.7 \sim 0.8$	$0.6 \sim 0.7$	$0.5 \sim 0.6$	≤ 0.5
基岩裸露率	≤ 0.3	$0.3 \sim 0.5$	$0.5 \sim 0.6$	$0.6 \sim 0.7$	≥ 0.7
分级赋值	1	3	5	7	9

敏感度分级标准	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5
敏感度	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感

2.2.4 象元二分模型

基岩裸露率是在 NDRI 的基础上,利用象元二分模型反演得出的。基于 NDRI 计算基岩裸露率的公式为:

$$F_r = \frac{(NDRI - NDRI_0)}{(NDRI_r - NDRI_0)} \quad (6)$$

式中: F_r 为基岩裸露率; $NDRI_0$ 是全无裸岩组成的 NDRI 值; $NDRI_r$ 是全由裸岩组成的 NDRI 值。在无实测数据时, $NDRI_0$ 和 $NDRI_r$ 为影像上给定置信度的置信区间内的最小值和最大值,本文依据经验将 $NDRI_0$ 和 $NDRI_r$ 确定为累计百分比为 1%和 99%时所对应的象元值。

2.2.5 其他各单项指标

模型中所要使用的 NDVI、NDRI 等数据方法均较为成熟且使用广泛^[26],文中不再赘述,详见表 3。

表 3 单项指标公式与属性

指标	计算公式	释义	意义
NDVI	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$	即归一化植被指数,NIR 为近红外波段的反射值; R 为红光波段的反射值	可以反映土地覆被、植被盖度、农作物长势
NDRI	$NDVI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}$	即归一化岩石指数,SWIR 为短波红外波段的反射值; NIR 为近红外波段的反射值	可以反映地表碳酸盐岩的裸露状况
SHDI	$SHDI = - \sum_{i=1}^n (P_i \times \ln P_i)$	即景观多样性指数, P_i 为景观类型(土地利用类型) i 面积所占的比率; n 为研究区内景观类型的数目	可以反映景观异质性
C	$C=N/A$	即景观破碎度,N 为景观的斑块数; A 为景观的总面积	可以反映景观的破碎程度
T	$T=Arctan(dZ/dS)$	即坡度,(dZ)为高度变化;(dS)为水平距离变化	可以反映地表单元陡缓的程度

3 结果分析

3.1 生态系统弹性强度分析

从图 2 中可以看出,贵阳市区范围内,清镇市北部、乌当区北部、花溪区南部、观山湖区西部生态系统弹性强度较高,主要是这些地区植被状况较好,基岩裸露率低,石漠化敏感度较低,生态系统对外界的干扰与破坏具有较强的自我调节能力。贵阳中心城区周边生态系统弹性强度较低,包括云岩区大部、南明区西部、白云区南部、花溪区北部以及清镇市东南部,这些地区建设用地面积广大,景观结构单一,植被盖度低,部分山体基岩直接裸露在外,增加了水土流失的风险,从而使生态系统弹性强度较低。

2000~2015 年,贵阳市区的生态系统弹性强度不断增加,2000、2005、2010 和 2015 年生态系统强度系数分别为 1.8833、1.9642、2.3652 和 2.5167,增加 33.63%(表 4)。近年来贵阳市不断进行城市绿地建设、植被恢复、生态修复等工程,使植被状况好转,NDVI 均值从 2000 年的 0.7358 增长到 2015 年的 0.7693,增长约 4.55%,生态环境好转,贵阳市区生态系统弹性强度不断增加,生态系统抗压和抗扰的能力不断增强。但南明区、云岩区等中心城区生态系统强度较低,这与其建设用地面积广大的现状是相对应的。

3.2 生态系统弹性限度分析

不同土地利用类型对维持生态系统弹性有不同程度的贡献率,参考国内学者的研究成果,基于专家打分法对贵阳市区 6 大土地利用类型的弹性分值进行赋值^[17],见表 5。

2000~2015 年间,贵阳市区的生态系统弹性限度不断降低,由 2000 年的 12.8370 减少到 2015 年的 11.9582,降低 11.76%(表 6)。各土地利用类型中,建设用地扩张最多,2000~2015 年间共增长了 213.66%,建设用地面积扩张了 3 倍以上;而林草地面积增长幅度较小,分别增加 4.43%和 5.72%。城市建设用地与交通用地的扩张导致贵阳市区的建设用地面积增加、景观破碎度增加,部分大面积的生态源地被割裂,使弹性限度降低,生态系统可承受压力范围的阈值降低。

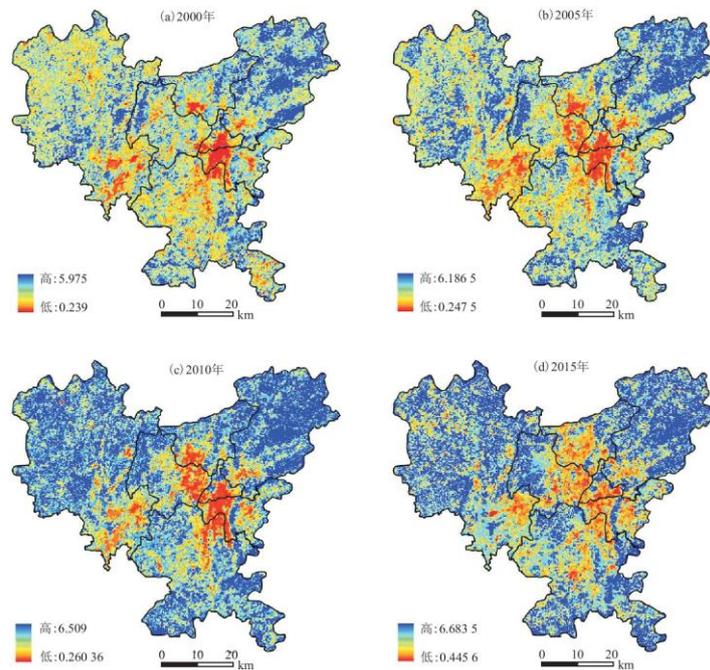


图 2 贵阳市区 2000~2015 年生态系统弹性强度系数变化图

表 4 贵阳市区 2000~2015 年生态系统弹性强度系数变化图

区、县县级市	生态系统弹性强度系数	增长率(%)
--------	------------	--------

	2000	2005	2010	2015	
白云区	1.9810	1.8769	2.2506	2.2208	12.10%
花溪区	1.7946	1.9704	2.3337	2.4999	39.30%
乌当区	2.2707	2.3823	2.7408	2.7859	22.69%
观山湖区	1.8532	1.7815	2.0320	2.3061	24.44%
南明区	1.6004	1.6054	1.7692	2.0849	30.28%
云岩区	1.2570	1.2047	1.4071	1.8169	44.54%
清镇市	1.8068	1.8983	2.4321	2.5970	43.74%
总计	1.8833	1.9642	2.3652	2.5167	33.64%

表 5 不同土地利用类型的弹性分值

土地利用类型		弹性分值	说明
重要型	林地	0.9	对维持生态系统弹性具有非常重要的作用,是生态系统弹性力的主要蓄存载体
	水域	0.8	
中间型	草地	0.6	对维持生态系统弹性有重要的作用,但利用不好容易造成退化,且易受人类活动的干扰
	耕地	0.5	
威胁型	建设用地	0.4	受人类干扰较大,对维持生态系统弹性作用较小
	未利用地	0.3	

表 6 贵阳市区 2000~2015 年生态系统弹性限度系数变化

区、县县级市	生态系统弹性限度系数				增长率(%)
	2000	2005	2010	2015	
白云区	10.9169	11.1121	10.4918	9.9517	-8.84%
花溪区	13.9936	13.6919	13.5951	13.0901	-6.46%
乌当区	13.4785	13.6916	13.8406	12.8769	-4.46%
观山湖区	11.3675	11.2354	10.4643	9.6776	-14.87%
南明区	11.4328	11.4413	10.4710	9.0173	-21.13%

云岩区	11.1062	11.3995	11.1135	10.7614	-3.10%
清镇市	9.6357	10.2134	11.3652	10.2393	6.26%
总计	12.8370	13.1808	12.8593	11.9582	-11.67%

3.3 生态系统弹性力分析

利用标准差距平法对生态系统弹性力的研究结果进行分级,按弹性力由大到小的顺序分别分为很强、较强、中等、较弱和很弱 5 个等级。从图 3 可知,生态系统弹性力很弱和较弱的区域主要集中在以云岩区为中心的城市建成区,且范围不断向周边扩张;此外还包括清镇市北部及东南区域。弹性力较强和很强的区域主要集中在花溪区南部、乌当区北部和观山湖区建成区以西的地区。清镇市的生态系统弹性力有增强趋势,但较弱的地区分布零星;南明区西部、白云区南部、观山湖区东部、花溪区北部的生态系统弹性力有明显下降趋势。

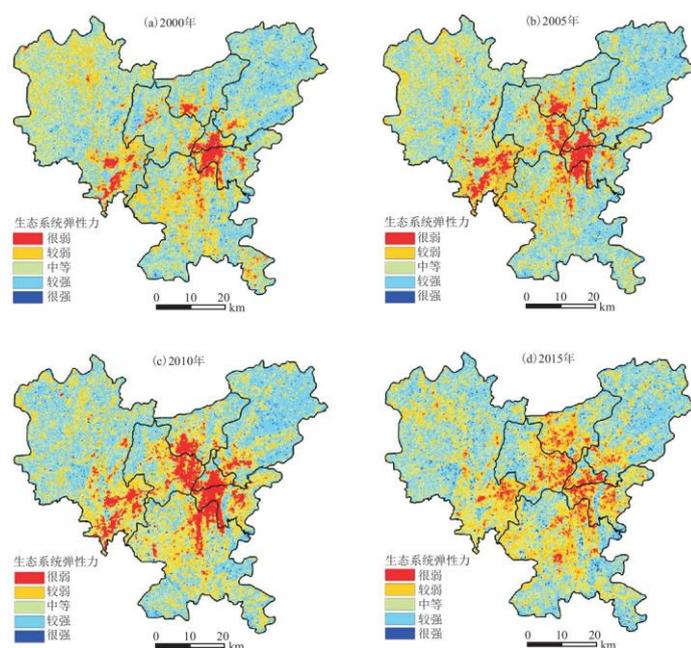


图 3 贵阳市区 2000~2015 年生态系统弹性力变化图

2015 年的生态系统弹性力分级中,很强、较强、中等、较弱和很弱的区域分别占总面积的 1.36%、36.68%、30.16%、28.55% 和 1.12%,其中较强、中等和较弱占绝大部分,占比约 95%左右(表 7)。2000~2015 年,弹性力很弱的区域在 2000~2010 年递增,在 2010~2015 年又有所下降,说明贵阳市区经历了一个由城市扩张为主导到重视生态环境保护的过程。弹性力很强的区域 2000~2015 年间增加 0.83%,说明大规模的植被恢复、生态治理和生态保护区划定效果显著。

表 7 贵阳市区 2000~2015 年生态系统弹性力面积比例变化

弹性力	分级标准	2000	2005	2010	2015	增长率
		比例(%)	比例(%)	比例(%)	比例(%)	

很弱	≤ -1.5	4.13	6.10	7.43	5.25	1.12
较弱	$-1.5 \sim -0.5$	25.31	23.85	24.41	28.55	3.24
中等	$-0.5 \sim 0.5$	30.74	30.21	29.38	30.16	-0.58
较强	$0.5 \sim 1.5$	39.28	39.36	38.97	36.68	-2.60
很强	≥ 1.5	0.53	0.47	0.81	1.36	0.83

但弹性力较弱的比例不断增加,增长 3.24%,而弹性力较强的区域则不断减少,减少 3.61%,弹性力中等的区域变化很小,这些地区面积广大,说明贵阳市区整体的生态系统弹性力有明显减弱趋势。这些区域建设用地扩张迅速,植被状况恶化,石漠化风险增大,景观类型单一,破碎度增高,生态系统抵御外界干扰和压力的能力较弱,生态系统的弹性力随着城市扩张而降低。

4 结论

从生态系统弹性强度系数和生态系统弹性限度系数两个维度出发,建立生态系统弹性力综合评价模型,对贵阳市区 2000~2015 年的生态系统弹性力进行了时空演变定量分析并运用标准差距平法对计算结果进行分级。结果表明:

(1) 贵阳市区的生态系统弹性力在 2000~2015 年大体呈波动减弱态势,其中弹性力分级为较弱和很弱的区域分别增长 3.24% 和 1.16%,而较强的区域则减少 2.60%,生态系统弹性力不断降低,应引起足够警惕与重视。

(2) 2000~2015 年间,贵阳市区的生态系统弹性强度不断增加,弹性限度却不断降低。主要由于植被状况整体好转,但基岩裸露率增加,景观破碎度也不断增加。

(3) 贵阳市区的生态系统弹性力分级占比较大的主要为较强、中等和较弱,占总面积的 95%左右,其余为很弱和很强的区域,占比约 5%。其中很弱和较弱的区域集中在贵阳市区的建成区和地形较为破碎的植被指数低值区域,包括云岩区、南明区西部、观山湖区东部、白云区西南部、乌当区西南部、花溪区中轴线的北部以及清镇市东南部;弹性力较强的地区主要分布在乌当区北部、花溪区南部和观山湖区西部。

(4) 城市化进程中,应制定合理的城市空间扩张策略,根据功能区的划分和经济发展的需要有序扩张,避免在扩张时炸山毁林、填湖填河和大量侵占基本农田,并针对一些重要的成片林地和重要湖区水库划定生态保护红线;城市除外部蔓延、拉伸框架外,也应重视内部填充的发展方式,提高土地资源的利用效率,避免出现大量裸地的长期闲置;并且应重视城市绿地和沿河生态廊道的建设,增强景观类型的多样性。在建成区以外的郊区和乡村,应大力推进退耕还林还草和防护林工程,增加森林面积,保持土壤、涵养水源,降低石漠化发生的风险;同时应引导农民因地制宜发展生态农业、绿色农业,在保证农民生计的前提下改善广大乡村地区的生态环境质量。综上,针对贵阳市区部分区域的生态系统弹性有所降低的情况,应制定相关政策措施、规划措施与工程措施,改善局部地区逐渐降低的生态系统弹性力,增强区域应对气候变化、自然灾害以及人类活动等外界干扰的能力,促进区域经济社会-自然环境复合生态系统的可持续发展。

参考文献:

[1] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology & Systematics, 1973, 4(4):1-23.

-
- [2]WESTMAN W E. Measuring the inertia and resilience of ecosystems[J]. *Bioscience*, 1978, 28(11):705-710.
- [3]DARLING E S, CÔTÉ I M. Seeking resilience in marine ecosystems. [J]. *Science*, 2018, 359(6379):986-987.
- [4]CÔTÉ I M, DARLING E S. Rethinking ecosystem resilience in the face of climate change[J]. *Plos Biology*, 2010, 8(7):e1000438.
- [5]WILLIS K J, JEFFERS E S, TOVAR C. What makes a terrestrial ecosystem resilient?[J]. *Science*, 2018, 359(6379):988-989.
- [6]刘晓平, 李鹏, 任宗萍, 等. 榆林地区生态系统弹性力评价分析[J]. *生态学报*, 2016, 36(22):7479-7491.
- [7]王文婕, 葛大兵, 周双, 等. 平江县生态弹性定量分析评价研究[J]. *环境科学与管理*, 2015, 40(3):130-134.
- [8]ANJOS L, DE P T. Measuring resilience and assessing vulnerability of terrestrial ecosystems to climate change in South America. [J]. *Plos One*, 2018, 13(3):e0194654.
- [9]SHARMA A, GOYAL M K. Assessment of ecosystem resilience to hydroclimatic disturbances in India[J]. *Global Change Biology*, 2017, 24(2):432-441.
- [10]赵雪雁. 甘肃省生态承载力评价[J]. *干旱区研究*, 2006, 23(3):506-512.
- [11]王云霞, 陆兆华. 北京市生态弹性力的评价[J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(2):97-100.
- [12]邵紫阳, 张永福. 近 25 年干旱区土地利用变化对生态安全弹性恢复的影响——以温宿县为例[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(21):5507-5512.
- [13]徐长春. 于田绿洲景观格局及生态弹性度研究[D]. 新疆大学, 2004.
- [14]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[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(6):112-114.
- [15]田茂, 张艳芳. 陕西关中地区生态弹性计量模型与测算[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2018, 45(2):226-233.
- [16]廖柳文, 秦建新. 城镇化进程中的区域生态弹性研究——以湖南省为例[C]中国土地资源开发整治与新型城镇化建设研究, 2015.
- [17]彭翀, 袁敏航, 顾朝林, 等. 区域弹性的理论与实践研究进展[J]. *城市规划学刊*, 2015(1):84-92.
- [18]赵强, 李秀梅, 谢嘉欣. 济南市生态弹性力评价研究[J]. *生态科学*, 2015, 34(2):156-160.
- [19]廖柳文, 秦建新, 刘永强, 等. 基于土地利用转型的湖南省生态弹性研究[J]. *经济地理*, 2015, 35(9):16-23.
- [20]高江波, 侯文娟, 赵东升, 等. 基于遥感数据的青藏高原自然生态系统脆弱性评估[J]. *地理科学*, 2016(4):580-587.

-
- [21]肖荣波, 欧阳志云, 王效科, 等. 中国西南地区石漠化敏感性评价及其空间分析[J]. 生态学杂志, 2005, 1(5):551-554.
- [22]安宏锋, 安裕伦, 袁士聪, 等. 贵州省石漠化敏感性的动态演变与模拟预测[J]. 中国农学通报, 2010, 26(13):388-395.
- [23]安宏锋, 徐浩, 安宁, 等. 喀斯特山区生态环境脆弱性综合评价——以贵州省黔中地区为例[J]. 环境影响评价, 2016, 38(4):51-56.
- [24]安宏锋, 安裕伦, 李晗, 等. 贵州省石漠化敏感性在不同地貌类型区的动态变化[J]. 贵州农业科学, 2010, 38(11):159-164.
- [25]兰安军, 文锡梅, 吴保国. 栅格数据空间分析在喀斯特石漠化敏感性评价中的应用——以贵州省开阳县为例[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(2):827-830.
- [26]王仰麟, 赵一斌, 韩荡. 景观生态系统的空间结构:概念、指标与案例[J]. 地球科学进展, 1999, 14(3):235-241.