

云贵高原生态系统弹性力评价分析

张超雅¹, 李 鹏^{1,2}, 龚倪冰¹, 赵晨光¹, 许垚涛¹, 孟永霞¹

(1.西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室,西安 710048;
2.旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室,西安 710048)

摘要: 利用云贵高原 2000 年、2010 年和 2018 年的遥感影像及气象数据,并结合生态系统弹性力计算方法,对云贵高原生态系统弹性力进行计算,分析了云贵高原 25 个市生态系统弹性力的时空分布特征,同时对其变化的主要影响因素进行探究。结果表明:云贵高原生态系统弹性力在研究期内呈现逐年增加趋势;在空间上,云贵高原生态系统弹性力分布为西南高、西北低、中部局部较低,东部较高。将生态系统弹性力分为 4 个等级,其中较弱和中等等级面积占比呈减少趋势,较强和很强等级面积占比逐年增加。驱动因子分析表明,降雨和气温是影响生态系统弹性力空间分布变化的主要因素。研究结果可对云贵高原生态系统保护提供一定的科学依据。

关键词: 云贵高原; 生态系统弹性力; 弹性强度系数; 弹性限度

中图分类号: X826 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2023)02-0120-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.02.015

Evaluation of Ecosystem Resilience in Yunnan-Guizhou Plateau, China

ZHANG Chaoya¹, LI Peng^{1,2}, GONG Nibing¹, ZHAO Chenguang¹, XU Yaotao¹, MENG Yongxia¹

(1.State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2.State Forestry and Grassland Administration Key Laboratory of Eco-hydrology and Disaster Prevention in Arid Areas, Xi'an 710048)

Abstract: Using the remote sensing images and meteorological data of the Yunnan-Guizhou Plateau in 2000, 2010 and 2018 and combining with the calculation method of ecosystem resilience, the ecosystem resilience of the Yunnan-Guizhou Plateau was calculated, the spatial and temporal distribution characteristics of the ecosystem resilience in 25 cities of the Yunnan-Guizhou Plateau were analyzed., and the main influencing factors of its changes were also explored. The results showed that the ecosystem resilience of the Yunnan-Guizhou Plateau increased steadily from 2000 to 2018, indicating that the self-regulation and anti-disturbance capabilities of the ecosystem in this region were continuously enhanced. Spatially, the distribution of ecosystem resilience in the Yunnan-Guizhou Plateau was high in the southwest, low in the northwest, relatively lower in the middle, and relatively higher in the eastern. The ecosystem resilience was divided into four grades, among which the proportion of weak and medium grades showed a decreasing trend; the proportion of strong and very strong grades increased year by year. The driving factor analysis showed that rainfall and temperature were the main factors affecting the spatial distribution of ecosystem resilience. The results can provide a certain scientific basis for ecosystem protection in the Yunnan-Guizhou Plateau.

Keywords: Yunnan-Guizhou Plateau; ecosystem resilience; elastic strength coefficient; elastic limit

Holligg^[1]在 1973 年首次提出“弹性力”的概念,弹性力被定义为:生态系统在受到干扰时自身保持结构和行为的能力^[2-3];Westman^[4]、Derissen 等^[5]认为可以将可持续性的概念与弹性力相结合,生态系统的弹性力对于可持续性是不必要的;Stringham 等^[6]在 Westman^[4]的基

础上进一步深化了可持续性在弹性力方面的研究,并将可持续性概念转化为稳定性。随着弹性力的概念在生态学中的广泛应用,生态系统弹性力(ecosystem resilience, E)的概念也得到丰富和发展^[7]。高吉喜^[8]、王文婕等^[9]对 E 表示生态系统自我恢复和自我调节

收稿日期:2022-07-18

资助项目:国家自然科学基金黄河水科学研究联合基金重点项目“黄河中游水系格局与河流形态变化及水沙效应”(U2243201)

第一作者:张超雅(1995—),女,新疆昌吉人,在读硕士研究生,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:18096812428@163.com

通信作者:李鹏(1974—),男,山东烟台人,教授,博士生导师,主要从事旱区水文过程与生态响应关系研究。E-mail: lipeng74@163.com

的能力的观点也逐步认同。目前 E 被分为弹性强度系数(μ)和弹性限度(ECO_{res})^[7,10-11],其中 μ 与地形地貌、水文条件、气象、土壤理化性质等一些生态系统本身具有的性质密切相关^[12]; ECO_{res} 表示生态系统自我恢复能力的大小^[13]。

关于 E 的研究方法国内外有多种,如采用 VSD^[14] 主要用于计算生态水文弹性力,该模型选取的参数不适用于陆地生态系统弹性力; NPP ^[15] 表示绿色植被在自然环境下的扣除自养呼吸后剩余的有机物质总量,用 NPP 计算弹性力仅考虑植被对其的作用,忽略了降雨等因素对其产生的影响^[16];浅水湖泊模型^[17] 较为广泛地用于计算浅水湖泊生态系统,对于整个区域生态系统不能精确评估其对外部条件的变化^[18],除此之外还有牧场模型^[19]、水利用效率模型^[20]等。上述的几种模型适用范围小,参数选取单一,不能较好地评价一个地区的生态系统弹性力,因此,本文在以往学者的研究基础上综合考虑当地的土地利用状况、气温、降雨、景观指数等影响因素,利用上述影响因素结合 μ 和 ECO_{res} ,再在此基础上引入调节系数(λ)^[21]来建立生态系统弹性力模型。

云贵高原地区受地形地貌的影响,全区约 60% 的占地面积坡度在 25° 以上,水土流失严重,极易遭受滑坡等灾害威胁^[22],喀斯特特殊地质条件导致当地的生态环境十分脆弱,石漠化严重。云贵高原作为我国西南部的生态屏障,其 E 的大小对于全国生态文明建设具有重要意义。本文在部分学者研究的基础上,结合生态弹性力的研究意义,根据 2000—2018 年云贵高原地区的相关数据,计算生态系统弹性力并分析其时空变化特征和主要影响因子,确定生态系统弹性力较弱的地区,研究结果可对云贵高原生态系统保护提供科学依据,进而使云贵高原生态系统弹性力向好发展。

1 研究区概况

云贵高原位于我国的西南部(100°—110°E, 22°—30°N),地势西北高、东南低,海拔约 450~3 500 m,东西长 1 000 km,南北宽 400~800 km,总面积约为 55 万 km²,约占我国国土面积的 5.7%^[23],是中国的第四大高原。根据地势、海拔等自然因素,本研究将云贵高原分为东部地区(六盘水市、贵阳市、遵义市、黔西南州、铜仁市、安顺市、黔南州、黔东南州、毕节市、昭通市)、中部地区(昆明市、曲靖市、玉溪市、楚雄市、红河州、文山州)和西部地区(保山市、丽江市、普洱市、临沧市、西双版纳州、大理州、德宏州、怒江州、迪庆州)(图 1)。云贵高原气候湿润,降雨多,气温和降雨受海拔高度和纬度的影响,年平均气温在 3.0~24.0 °C,多年平均降水量为 600~2 000 mm^[24]。

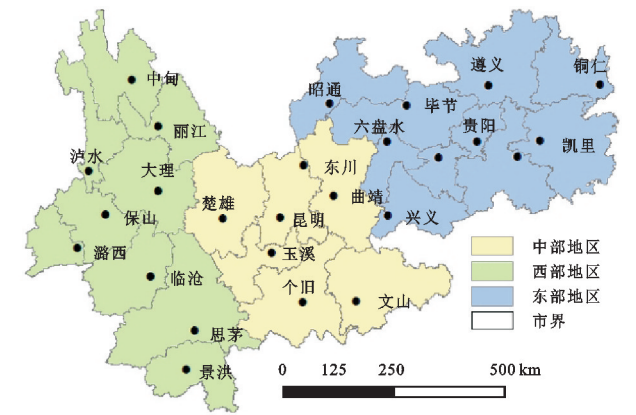


图 1 研究区位置

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

云贵高原土地利用和 NDVI 数据来源于资源环境科学与数据中心,以 2000 年、2010 年和 2018 年作为研究期;降雨和气温数据(2000—2018 年)来源于国家气象科学数据共享服务平台——中国地面气候资料日值数据集(V3.0)。

关于地理探测器前期数据处理:以 Arcgis 10.2 软件为主要应用程序,创建渔网工具,生成网格(1 km×1 km),作为研究区的采样点,网格共 21 025 个,并采用自然断点法对影响因子进行分类,提取生态系统弹性力及各个环境因子数据输入地理探测器软件,分析生态系统弹性力与影响因子之间的关系。

2.2 研究方法

2.2.1 生态系统弹性力和生态系统弹性分值计算
根据 μ 与 ECO_{res} 对 E 的限制因素,建立 E 计算模型^[21]:

$$E = \lambda \cdot \mu \cdot ECO_{res} \tag{1}$$

式中: E 为云贵高原地区生态系统弹性力; λ 为调节系数^[21](参考相关文献并结合研究区实际情况,本文取 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 μ 与 ECO_{res} 的决定因素与自身性质确定计算公式^[7-8,25]:

$$\mu = \frac{H \cdot V}{C_1 \cdot C_2} \tag{2}$$

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

式中: H 表示景观多样性指数; V 为植被覆盖指数; C_1 为研究区多年平均降水相对变率; C_2 为研究区多年平均气温相对变率; P_i 为各土地类型的面积覆盖百分比; S_i 为各土地类型的弹性分值。

根据生态系统中不同的土地利用类型对其恢复程度的不同,并结合云贵高原生态系统的基本特征,确定本文所需要的弹性分值,耕地为 0.5,草地为 0.6,林地为

0.9,水域为 0.8,建设用地为 0.4,未利用地为 0.3^[25]。

2.2.2 景观多样性指数计算 描述一个地区景观类型分布的复杂性及其面积占比变化^[26]的指数称之为景观多样性指数(shannon)。指数越高,表明其景观类型越复杂多样, E 也越大^[27],计算公式为:

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

(4)

式中: n 为研究区内景观类型数量。

2.2.3 NDVI 计算 通常采用应用广泛的归一化植被指数来代表植被指数,计算公式为^[28]:

$$NDVI=\frac{NIR-Red}{NIR+Red}$$

(5)

式中: NIR 为近红外波段($0.841\sim0.876\ \mu\text{m}$); Red 为可见光的红光波段($0.62\sim0.67\ \mu\text{m}$);计算得出的 $NDVI$ 值介于 $0\sim1$ 。

2.2.4 年降水变率(C_1)和年气温变率(C_2)计算 年降水变率表示降水量的年际变化,一般可用降水相对变率来代指降水变率,公式为^[29]:

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

(6)

式中: R_i 为第 i 年某时段内实际降水量(mm); R 为同时段内历年平均降水量(mm)。

年气温变率指气温的年际变化,用年际气温的相对变率来表示,公式为:

表 1 2000 年、2010 年和 2018 年云贵高原土地利用面积

土地利用类型	2000 年		2010 年		2018 年	
	面积/万 km^2	面积占比/%	面积/万 km^2	面积占比/%	面积/万 km^2	面积占比/%
耕地	11.84	21.19	11.77	21.05	11.56	20.69
林地	31.20	55.82	31.36	56.11	31.28	55.95
草地	12.05	21.55	11.92	21.32	11.75	21.02
水域	0.33	0.59	0.33	0.60	0.49	0.87
建筑用地	0.26	0.46	0.30	0.53	0.66	1.19
未利用地	0.22	0.39	0.22	0.39	0.16	0.28
总计	55.89	100.00	55.89	100.00	55.90	100.00

景观多样性指数是反映一个地区景观的复杂性,云贵高原各市景观多样性指数见图 2。从时间分布来看,2000—2018 年云贵高原景观多样性指数整体呈现上升趋势,且后 9 年的增长幅度较大,这与土地利用类型变化相一致,说明云贵高原土地利用结构区域越来越稳定,景观复杂程度升高。从空间分布来看,云贵高原地区的景观多样性指数区域差别较大,由东向西呈递减趋势,这与中东部地区土地利用类型较为分散、连通性低和破碎化程度高有关;而西部地区林地和草地面积占比较大,连通性大,复杂性低导致其景观多样性指数低。

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

(7)

式中: T_i 为第 i 年某时段内温度($^{\circ}\text{C}$); T 为同时段内历年平均气温($^{\circ}\text{C}$)。

2.2.5 基于地理探测器对 E 驱动因子分析 地理探测器是一种空间分析模型,主要用于定量分析影响因素对 E 的影响程度^[30]。本文应用地理探测器中的交互探测器、因子探测器来研究生态系统弹性力驱动力以及多因子交互作用,计算方法见参考文献[31]。

3 结果与分析

3.1 土地利用与景观多样性指数分析

根据研究区土地利用图对土地利用现状进行对比分析,云贵高原各年份土地利用类型面积见表 1。总体来看,云贵高原林地所占比例最大,达 55%以上;其次是耕地和草地,约 22%;未利用地占比最少,仅占 0.3%。时间上,2000—2010 年,耕地和草地呈下降趋势,分别下降 $0.07,0.13\ \text{km}^2$,水域和未利用地占地面积无变化,林地和建筑用地分别增加 $0.16,0.04\ \text{km}^2$;2010—2018 年,耕地和草地面积持续下降,同时林地、未利用地面积也呈下降趋势,分别下降 $0.21,0.17,0.08,0.06\ \text{km}^2$;增加的土地利用类型仅有建设用地和水域,共增加 $0.52\ \text{km}^2$ 。在 19 年间,耕地主要转化为林地和建设用地,说明云贵高原实行退耕还林工程已取得一些成效,在坡度较高且灌溉条件差的耕地上造林种草,同时也对未利用土地进行土地开发,成为林地、建设用地增加的主要来源。

从各市情况来看,2000—2018 年景观多样性指数均值最高的为昆明市,最低为普洱市,这是因为昆明市包含 6 种土地利用类型,景观复杂性高;普洱市以林地为主,有少量的耕地和草地,景观连通性高,破碎化程度低。怒江州、迪庆州和西双版纳州景观指数呈现下降趋势,分别下降 $2.48\%,2.90\%$ 和 4.94% ;从增长幅度来看,安顺市增幅最大(7.91%),黔东南州次之(6.46%)。土地利用类型面积增加,草地和耕地面积减少,导致这些地区景观复杂性、连通性和破碎度均发生明显变化。

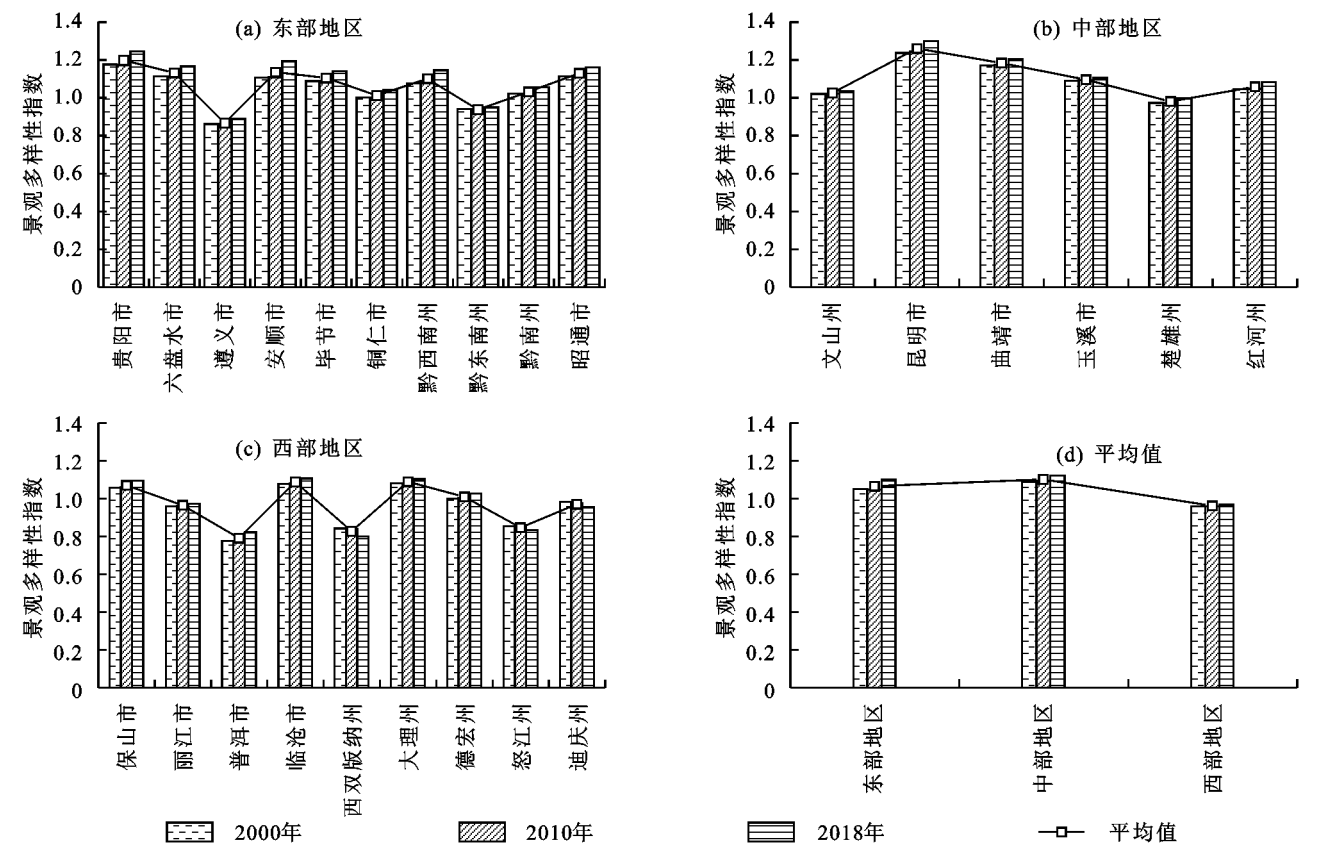


图2 云贵高原地区景观多样性指数分析

3.2 NDVI 分析

云贵高原地区 2000—2018 年 NDVI 空间分布见图 3。由图 3 可知,19 年间 NDVI 数值整体呈起伏上升态势。从年际变化来看,2000—2010 年部分区域 NDVI 的最小值呈下降趋势,其中降幅最大为西双版纳州(0.084)、曲靖市(0.076)和昆明市(0.060),增幅最大为毕节市(0.188);2010—2018 年 NDVI 的最小值持续下降,仅有西双版纳州(0.048)和大理州(0.044)呈上升趋势;从空间分布来看,东部地区 NDVI 值整体较高,西北部和中部地区 NDVI 最低,西南部 NDVI 值最高;从各市情况来看,NDVI 年均值增幅最大为六盘水市(0.137),其次为文山州(0.134),降幅最大为昆明市(0.020)。NDVI 可以检测植被生长状态和植被覆盖程度,从分析可知,NDVI 值下降的地区植被生长状态和植被覆盖度减小,这可能与耕地和草地占地面积减少有关,NDVI 值增加的地区植被生长状态较好,发展覆盖程度增加。

3.3 年降水变率(C_1)和年气温变率(C_2)分析

以云贵高原地区研究期内的降水和气温数据为基础,得到 C_1 和 C_2 结果图(图 4)。由图 4 可知,东部地区 C_1 为 6.7~10.8,中部地区 C_1 为 7.2~9.8,西部地区 C_1 为 7.8~10.3。东部地区 C_1 波动相对较大,西部地区 C_1 较为集中。从近 19 年的气温情况来看,东部和西部地区的 C_2 较大,中部地区较为稳定;中部地区的 C_2 均值最大,西部地区的最小;从各市情况分析,云贵高原各

市年降水率变化最大为贵阳市(10.74),最小为昭通市(6.86);年气温变率变化最大为六盘水市(2.69),最小为临沧市(1.19)。 C_1 和 C_2 的计算结果与郭晓芳等^[32]对云贵高原气温与降水空间分布特征研究结果相一致,经纬度和海拔高度对于 C_1 和 C_2 的影响显著。

3.4 生态系统弹性力分析

根据生态系统弹性力计算结果,利用极差标准化法对其进行分级,经过处理后的结果数值范围为 0~1,按 E 的数值大小分为很强、较强、中等和较弱 4 个等级(图 5)。根据分级对其各级的面积进行统计分析,生态系统弹性力等级面积区域比见图 6。

3.4.1 生态系统弹性力空间分布特征 云贵高原地区生态系统弹性力的空间分布为西南高、西北低、中部局地较低、东部较高。西部地区的临沧州和保山市生态系统弹性力呈上升趋势且变化明显,最大值可达 6.90 和 6.55;生态系统弹性力较低的面积主要分布在迪庆州、怒江州和楚雄州,最小值达 2.53,但由于近年来人们对生态环境的关注热度持续上升,国家对环境保护的力度持续加强,生态系统弹性力逐渐增加,生态系统逐步得到改善。

3.4.2 生态系统弹性力时间变化特征 从图 5 和图 6 可以看出,19 年间研究区 E 总体呈增长趋势,且 2010—2018 年增速较快。从历年 E 等级的面域范围变化来看,2000—2010 年整体变化不大,主要是较弱级面域减少 18%,主要集中在迪庆州、楚雄州和毕节

市;较强级面域增加 4%,主要集中在铜仁市、昭通市和红河州;而弹性力等级达到很强级的地域增加 8%,主要分布临沧市。2010—2018 年间,弹性力等级中等级及以下地域面积缩小 10%,较强级地域扩展速度较为迅速,面域增加 23%,增加的地域主要集中在普洱市、大理州、昆明市、曲靖、文山、黔西南州、黔南州和贵阳市,其中所占比例最大的为普洱市,其次为大理州;很强级地域所占的面积比增加 78%,增加的地域主要集中在西部地区保山市和临沧市。由公式(1)、公式(2)和公式(3)可知, E 与 H 、 $NDVI$ 、 ECO_{res} 和景观类型所占比例呈正相关,与 C_1 和 C_2 呈负相关,生态系统弹性力的计算结果与其变化结果相一致。

3.5 生态系统弹性力变化驱动因子分析

为了研究不同环境因子对云贵高原地区生态系统弹性力空间分布的影响,参考沈威等^[33] 在分析长江中游城市群城市生态承载力的影响因素中,选取的影响因子是作为评价指标体系的指标层,结果显示,指标层中的社会发展水平、城镇居民收入水平等对生态系统弹性力空间分布影响较为显著;郑欣等^[25] 在评价鄂尔多斯市的生态弹性力时同样也选取指标层作为评价的影响因素,结果显示,水资源供给能力是影响生态系统弹性力波动的首要因素。综合上述并结合本文的评价因素,在进行地理探测器分析时,本文选取 7 种影响因子,通过计算得到解释力(q)值,分别为降水 0.416,气温 0.352,NDVI 0.175,高程 0.145,坡度 0.083,坡向 0.007,土地利用 0.033,显著性均为 0。 q 值(解释力)从小到大依次为坡向、土地利用、坡度、高程、NDVI、气温和降水。解释力(q)值 >0.3 的有气温和降水,表明这 2 个影响因素是影响 E 空间分布的主导因子;NDVI 和高程对生态系统弹性力空间分布的解释力中等;坡度、坡向和土地利用对生态系统弹性力的解释力最弱, q 值均小于 0.1。

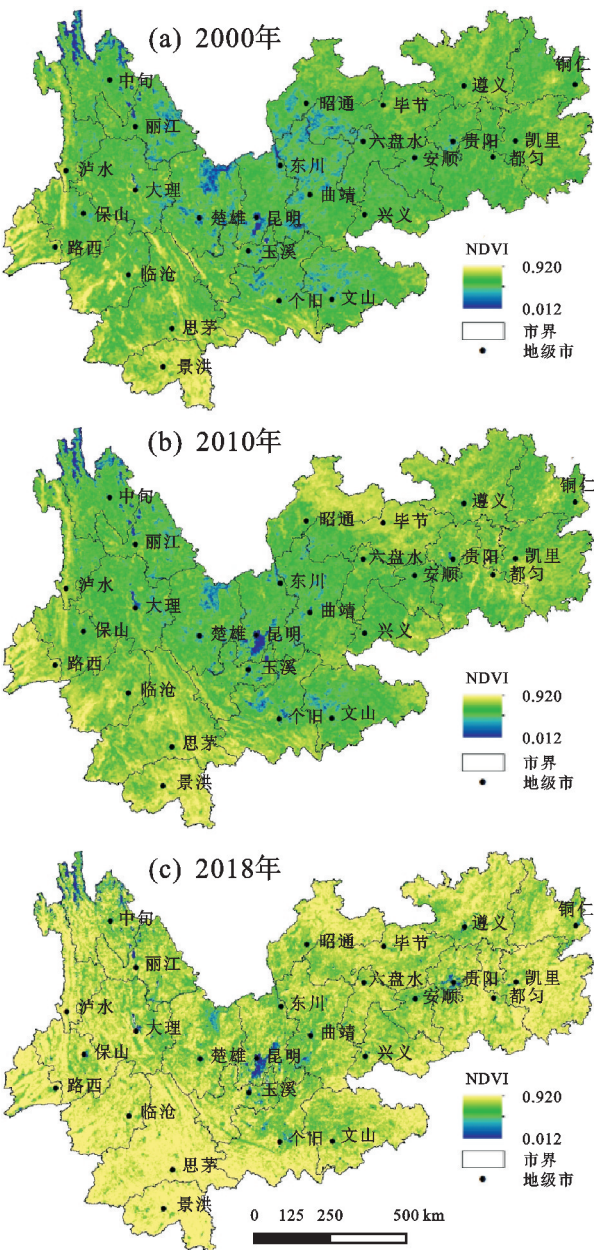


图 3 云贵高原多年 NDVI 空间分布

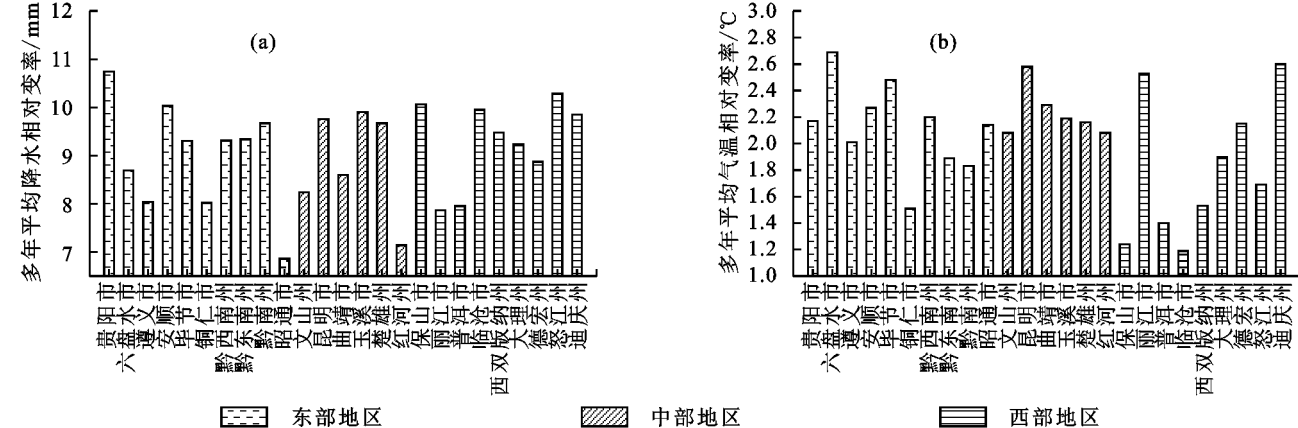


图 4 云贵高原地区降水和气温年变率分析

双因子交互作用下可加强生态系统弹性力的解释力(图 7)。其中降雨 $\cap$ 高程(q 值为 0.617),气温 $\cap$ 降雨(q 值为 0.806),NDVI $\cap$ 降雨(q 值为 0.551),气温 $\cap$ NDVI(q 值为 0.499)、气温 $\cap$ 坡度(q 值为 0.441)和土地利用 $\cap$ 降雨(q 值为 0.479)对云贵高原地区生态系统弹性力空间分布的解释力较大。由此

可以看出,降雨作为云贵高原地区生态系统弹性力空间分布的主导气候类因子,在同其他环境因子的交互作用下,对生态系统弹性力影响最大;解释力不超过 0.1 的影响因子有坡向、土地利用和坡度,在交互作用下,对生态系统弹性力的影响也较低。

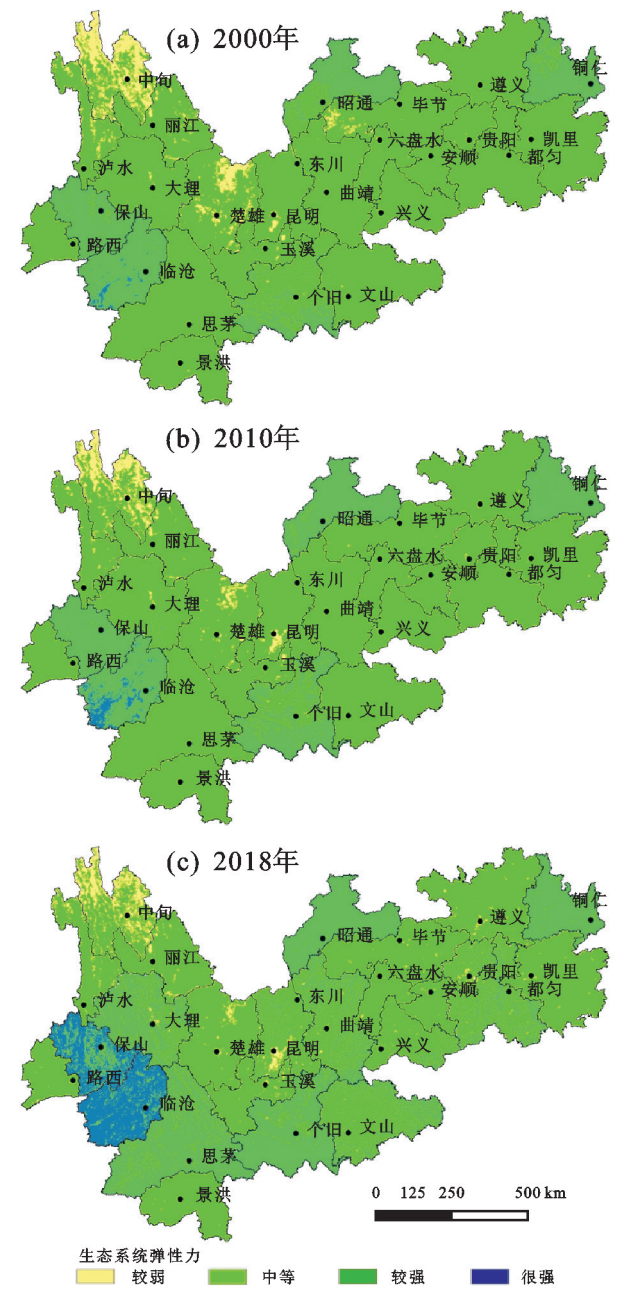


图 5 云贵高原地区历年生态系统弹性力分布

4 讨论与结论

本文计算并分析 2000—2018 年云贵高原 E 的时空变化,并用地理探测器定量分析不同环境因子对 E 的影响,与杨超等^[34]在中国县域生态系统弹性力分析中云贵高原属于高值区的结果大致相似,其研究结果呈现东西部高、中部低的空间分析,与本文的研究结果相一致。本文补充了云贵高原生态系统发展中关于生态系统弹性力这方面的欠缺,同时为其可持

续发展提供理论支撑,对区域生态系统保护和恢复具有重要参考价值。

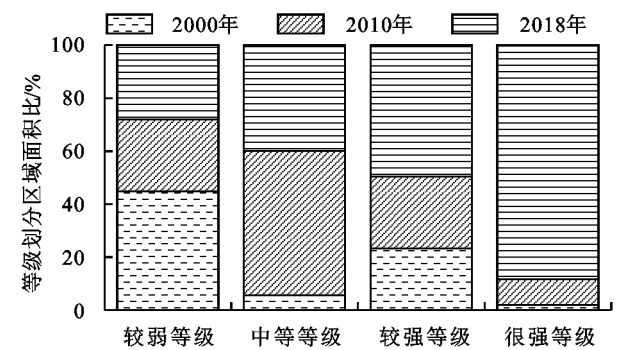


图 6 云贵高原生态系统弹性力的等级划分与区域面积比

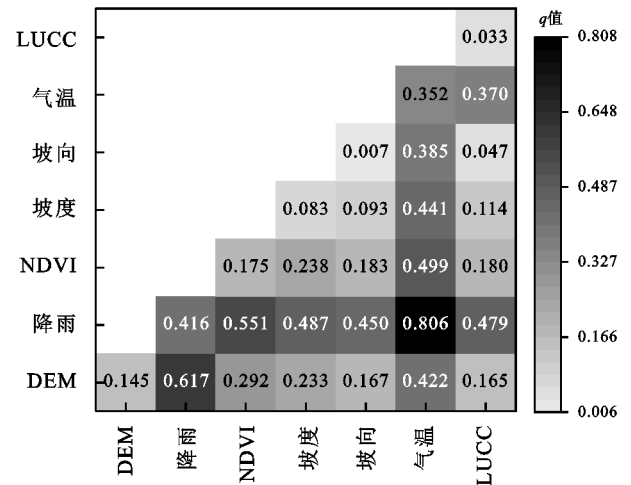


图 7 云贵高原地区各环境因子交互探测解释力(q)以及生态检测

主要结论为:

(1)2000—2018 年土地利用总面积呈增加趋势,其中持续减少的地类有耕地、草地和未利用地,而林地、建设用地和水域则呈增加趋势;2000—2018 年景观多样性指数的变化趋势与土地利用大体一致,也呈上升趋势,说明该地区的土地利用结构逐渐稳定,其景观复杂性增加;2000—2018 年 NDVI 数值整体呈上升势态,说明云贵高原整个地区植被覆盖度在增加;2000—2018 年东中部地区 C_1 值较高,西部地区 C_1 较低,而 C_2 的变化与 C_1 相反,西部地区较高,东中部较低。

(2)2000—2018 年 E 的变化趋势整体呈增加趋势,空间分布为西南高、西北低、中部局部较低、东部较高, E 变化趋势和空间分布说明云贵高原地区的生态恢复性和稳定性逐渐增强,每个地区的增加幅度不同。对 E 有正向作用的主要指标有土地利用、景观多样性指数和 NDVI,这 3 种指标在 2000—2018 年同样也呈增加趋势,而 C_1 和 C_2 的变化是导致 E 空间分布特征的主要原因,说明关于 E 的计算结果可信。

(3)根据 E 的数值大小,将 E 分为很强、较强、中等和较弱 4 个等级。对于 E 属于较弱等级的地区,应增加

其景观类型的复杂程度,使其结构更加稳定;对于 E 属于中等等级及以上地区应在保持现状 E 的基础上,加强对生态环境的保护,使其朝着更好的方向发展。

(4)降水和气温是影响 E 空间分布的主导环境因子,坡度、坡向和土地利用对生态系统弹性力的解释力最低,在交互作用中以气温 $\cap$ 降雨解释力最高为 0.806。

(5)从采用的计算模型适用于现阶段研究中存在的主成分分析和地域局限性等方法的模糊性,但在计算过程中主要以自然要素(土地利用、气候因素和植被覆盖等)为主,缺乏社会和人为活动对其产生的影响,未来在关于生态系统弹性力的研究中应综合考虑上述影响因子的影响。

云贵高原 E 的升高表明其生态系统的抗干扰能力和恢复能力逐渐增加,但为了促进 E 较弱等级地区的上升,云贵高原应考虑合理配置资源以提高土地利用效率,增加景观多样性,以此提高生态系统的自我调节和恢复能力,对于不同等级的生态系统弹性力地区应因地制宜,提高和保护其生态弹性力,从而实现云贵高原地区可持续发展战略。

参考文献:

- [1] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1-23.
- [2] 王宁,刘平,黄锡欢.生态承载力研究进展[J].中国农学通报,2004,20(6): 278-281.
- [3] Zhu J M. Exploring the resilience of industrial ecosystems[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 122: 65-75.
- [4] Westman W E. Measuring the inertia and resilience of ecosystems[J]. BioScience, 1978, 28(11): 705-710.
- [5] Derissen S, Quaas M F, Baumgartner S. The relationship between resilience and sustainability of ecological-economic systems[J]. Ecological Economics, 2011, 70(6): 1121-1128.
- [6] Stringham T K, Kruege W C, Shaver P L. State and transition modeling: An ecological process approach[J]. Journal of Range Management, 2003, 56(2): 106-113.
- [7] 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.
- [8] 高吉喜.可持续发展理论探索[M].北京:中国环境科学出版社,2001.
- [9] 王文婕,葛大兵,周双,等.平江县生态弹性度定量分析评价研究[J].环境科学与管理,2015,40(3): 130-134.
- [10] 王凡,吴一平,李汇文,等.陕北煤炭基地榆神矿区生态系统弹性力时空演变分析[J].生态学报,2021,41(20): 8016-8029.

- [11] 姚焱中,李诗婷,苏美蓉,等.区县生态系统健康评价方法:以东莞市各镇区为例[J].生态学报,2021,41(15): 5998-6011.
- [12] 卢航,孙桂丽,陆海燕,等.干旱区生态弹性度与土地利用分析[J].新疆农业科学,2020,57(10): 1901-1911.
- [13] 豆明伟,唐莉华,徐翔宇,等.安徽省生态弹性力时空变化及影响因素研究[J].生态科学,2018,37(6): 184-190.
- [14] Sharma A, Goyal M K. Assessment of ecosystem resilience to hydroclimatic disturbances in India[J]. Global Change Biology, 2017, 24(2): 432-441.
- [15] Anjos L J S, Mann D T P, Silva L C P. Measuring resilience and assessing vulnerability of terrestrial ecosystems to climate change in South America[J]. PLoS One, 2018, 13(3): e0194654.
- [16] 苏胜涛,曾源,赵旦,等.中国陆地植被净初级生产力估算模型优化与分析:基于中国生态系统研究网络数据[J].生态学报,2022,42(4): 1276-1289.
- [17] Anastasios X, Karl-Goran M, de Zeeuw A. The economics of shallow lakes[J]. Environmental and Resource Economics, 2003, 26(4): 603-624.
- [18] 胡文,王济,李春华,等.浅水湖泊模型 PCLake 及其应用进展[J].生态与农村环境学报,2019,35(6): 681-688.
- [19] Janssen M A, Anderies J M, Walker B H. Robust strategies for managing rangelands with multiple stable attractors[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2004, 47(1): 140-162.
- [20] Ponce C, Guillermo E, Moran M, et al. Ecosystem resilience despite large-scale altered hydroclimatic conditions[J]. Nature, 494(7437): 349-352.
- [21] 闫旭骞.矿区生态承载力定量评价方法研究[J].矿业研究与开发,2006,26(3): 82-85.
- [22] 许开鹏,王晶晶,迟研研,等.基于综合生态风险的云贵高原土地利用优化与持续利用对策[J].生态学报,2016,36(3): 821-827.
- [23] 王静爱.中国地理教程[M].北京:高等教育出版社,2007.
- [24] 刘翔卿,王雷,刘阳,等.1951—2010 年云贵高原大理和丽江气温、降水的气候特征分析[J].气候与环境研究,2018,23(5): 513-523.
- [25] 郑欣,程艳妹,任彩凤,等.鄂尔多斯市生态弹性力评价研究[J].生态科学,2019,38(5): 185-192.
- [26] McGarigal K, Cushman S A, Neel M C, et al. FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for categorical maps [C/OL]. Computer software program produced by the University of Massachusetts. <http://www.umass.edu.html>, 2002.
- [27] 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[J].生态学报,2011, 31(1): 267-275.

in water discharge and sediment load in the Yellow River [J].Global and Planetary Change,2011,76:196-205.

[13] Zhang J J, Gao G Y, Fu B J, et al. Investigation of the relationship between precipitation extremes and sediment discharge production under extensive land cover change in the Chinese Loess Plateau[J].Geomorphology,2020,361:e107176.

[14] 刘海,刘凤,郑粮.气候变化及人类活动对黄河流域植被覆盖变化的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):143-151.

[15] 胡春宏,张晓明.黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J].水利水电技术,2020,51(1):1-11.

[16] 胡彩虹,管新建,吴泽宁,等.水土保持措施和气候变化对汾河水库入库径流贡献定量分析[J].水土保持学报,2011,25(5):12-16.

[17] 王随继,闫云霞,颜明,等.皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析:累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J].地理学报,2012,67(3):388-397.

[18] 许文龙.皇甫川流域侵蚀产沙特征及土地退化研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2019.

[19] Zhao G J, Kondolf G M, Mu X M, et al. Sediment yield reduction associated with land use changes and check dams in a catchment of the Loess Plateau, China [J].Catena,2017,148:126-137.

[20] 魏艳红.延河与皇甫川流域典型淤地坝淤积特征及其对输沙变化的影响[D].陕西 杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2017.

[21] Tian P , Zhao G J, Mu X M, et al. Check dam identification using multisource data and their effects on streamflow and sediment load in a Chinese Loess Plateau catchment[J].Journal of Applied Remote Sensing, 2013,7:1-13.

[22] 周佩华,王占礼.黄土高原土壤侵蚀暴雨的研究[J].水土保持学报,1992,6(3):1-5.

[23] 姚文艺,冉大川,陈江南.黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J].水科学进展,2013,24(5):607-616.

[24] 刘晓燕,李晓宇,高云飞,等.黄土丘陵沟壑区典型流域产沙的降雨阈值变化[J].水利学报,2019,50(10):1177-1188.

[25] Sillmann J, Kharin V, Zhang X, et al. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate[J].Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2013,118:1716-1733.

[26] 谢云,刘宝元,章文波.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报,2000,14(4):6-11.

[27] 中国气象局.降水量等级 GB/T 28592—2012[S].北京:中国标准出版社,2012:1-2.

[28] 景可,郑粉莉.黄土高原水土保持对地表水资源的影响[J].水土保持研究,2004,11(4):11-12,73.

[29] 刘晓燕,杨胜天,王富贵,等.黄土高原现状梯田和林草植被的减沙作用分析[J].水利学报,2014,45(11):1293-1300.

[30] 魏艳红,焦菊英.黄土丘陵沟壑区不同土地利用方式下小流域侵蚀产沙特征[J].水土保持学报,2021,35(3):96-103.

[31] 杨媛媛,李占斌,高海东,等.大理河流域淤地坝拦沙贡献率分析[J].水土保持学报,2021,35(1):85-89.

(上接第 126 页)

[28] 田庆久,闵祥军.植被指数研究进展[J].地球科学进展,1998,19(4):10-16.

[29] 谢仁波,舒国勇.铜仁西部不同时间尺度温度降水变率分析[J].贵州气象,2012,36(6):16-19.

[30] Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneity[J].Ecological Indicators,2016,67:250-256.

[31] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.

[32] 郭晓芳,李旭东,程东亚.云贵高原气温与降水空间分布特征及其影响因素[J].水土保持研究,2021,28(1):159-163,170.

[33] 沈威,鲁丰先,秦耀辰,等.长江中游城市群城市生态承载力时空格局及其影响因素[J].生态学报,2019,39(11):3937-3951.

[34] 杨超,陈万旭,冉端,等.中国县域生态系统弹性力时空演变特征分析[J].水土保持研究,2020,27(4):279-285.