

典型草原自然保护地景观空间弹性 GIS 评价

赵方博¹ 岳德鹏¹ 杨晓潇¹ 于强¹ 苏凯¹ 屈志强²

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 呼和浩特 010011)

摘要: 为了解草原植被恢复效果和理解草原生态系统弹性特征,以锡林郭勒草原国家级自然保护区为对象,在 ArcGIS、Fragstats 等软件支持下,从景观格局稳定性(LPS)、生态敏感性(LES)和人类活动干扰3个维度建立概念化景观空间弹性模型(LSR),分析评价了研究区景观空间生态敏感性和弹性特征。研究结果表明:草地、林地等景观格局稳定性较高,尤其是核心区,但 LPS 值远低于理论最优值,亟待提升;自然保护区内近 60% 的景观空间生态敏感性达到中度敏感,绝大多数类型的核心区及其缓冲区处于中高度敏感性水平,且从核心区到缓冲区高度敏感性面积占比呈现增长趋势;由于自然和人为活动双重作用影响,整个自然保护区中度以下低弹性区域面积比超过 70%,从核心区到外部实验区,极低度弹性的空间范围不断增大,保护区 60% 以上区域应加强植被恢复;根据景观空间弹性表现,10.53% 的区域需要重点保护,这些区域分布在保护功能区 C 区东部、E 区西北部和 D、E 两区交汇地带。景观空间弹性框架及其概念化模型能综合考虑景观格局稳定性和景观空间生态敏感性,这对评价认识草原类自然保护地景观空间弹性特征、有针对性地制定草原植被恢复方案和优化保护功能区具有积极的指导作用。

关键词: 草原; 自然保护地; 景观空间弹性; 植被恢复; 地理信息系统

中图分类号: TP751; S812.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)06-0209-09

Evaluation of Spatial Elasticity of Landscape in Typical Grassland Nature Reserve by GIS

ZHAO Fangbo¹ YUE Depeng¹ YANG Xiaoxiao¹ YU Qiang¹ SU Kai¹ QU Zhiqiang²

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010011, China)

Abstract: In order to understand the effect of grassland vegetation restoration and understand the elastic characteristics of grassland ecosystem, Xilin Gole League Grassland National Nature Reserve was taken as the object, supported by ArcGIS, Fragstats and other software, a conceptual landscape spatial elasticity model (LSR) was established from three factors: landscape pattern stability (LPS), landscape ecological sensitivity (LES) and human disturbance, and the landscape spatial ecological sensitivity and resistance characteristics of the study area were analyzed and evaluated. The results showed that the stability of forest and grassland landscape pattern was higher at the class level, especially in the core zone, but the LPS value was far lower than the theoretical optimal value, and the stability level of landscape pattern needed to be improved. The ecological sensitivity of nearly 60% of the protected areas was moderately sensitive, and the majority of the core zones and their buffer zones were at the medium and high sensitivity level, and the ratio of the highly sensitive areas from the core zones to the buffer zones showed an increasing trend. Due to the dual effects of natural and man-made activities, the area ratio of low-elasticity areas below the moderate level in the whole nature reserve was over 70%, from core zone to external experimental zone, the range of extremely low resistance space was increasing, and vegetation restoration should be strengthened in more than 60% of protected areas. According to the spatial resistance of landscape, 10.53% of the areas needed to be protected, which was distributed in the eastern part of the protected functional zone C, northwestern part of zone E and the intersection of the zone D and zone E. The landscape spatial resistance framework and its conceptual model can

收稿日期: 2019-01-24 修回日期: 2019-04-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0507303)和内蒙古自治区自然科学基金项目(2017BS0403)

作者简介: 赵方博(1989—),男,博士生,主要从事林业装备与信息化研究,E-mail: kg21zfb@qq.com

通信作者: 岳德鹏(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事干旱区植被恢复与评价研究,E-mail: yuedepeng@126.com

comprehensively consider the stability and ecological sensitivity of the landscape pattern, and had positive guidance for evaluating and recognizing the landscape spatial resistance characteristics of grassland natural reserves, formulating grassland vegetation restoration plan and optimizing protection function areas.

Key words: grassland; natural reserves; landscape spatial resistance; vegetation restoration; GIS

0 引言

弹性是物体的一种特性,是指发生弹性变形后可以恢复到原来状态的一种性质(如物理学中的弹簧)。理论生态学家^[1]最早将弹性引入生态系统稳定性中,被定义为维持系统结构、功能、反馈等不变情况下,通过调整系统状态变量和驱动变量等参数,系统能吸收的扰动量^[2-3]。弹性自从提出并引入生态学范畴以来,其概念得到了不断发展。文献[4]认为,弹性是指一个系统在遭受扰动时能吸收干扰和重组,并仍能保持基本相同的功能结构、特性和反馈的能力。文献[5]针对生态-经济系统可持续性与弹性,认为弹性是通过尝试提高受到冲击后恢复到理想状态的能力而适应变化,并与系统可持续性进行了区分。文献[6]认为,弹性是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。可以说,生态学的弹性是系统在保持关键阈值前提下对外在干扰的承受程度,强调“反抗和适应能力”,具有恢复阈值、抵抗力等内涵特点^[7-8]。针对自然和人类活动双重干扰下的生态保护区开展生态系统弹性研究,对于了解特定生态系统组织、调节和自我恢复能力,深化认识生态系统结构与功能持久性、稳定性具有重要意义。

作为生态系统动态性和稳定性的重要测度指标,对其准确识别、评价和提升已成为生态保护、灾害防控、气候变化适应、景观规划等应用领域研究关注的焦点之一,并快速成为理解自然、人类系统及其相互关系的重要工具。文献[9]运用弹性思维对城市生态系统弹性进行了概念化表达和理论分析。文献[10]提出空间弹性的概念,重点关注生态敏感性、水质和植被覆盖等指标建立弹性准则,借助GIS技术对我国太湖流域城市湿地交界带的空间弹性进行了评价和区划研究。文献[11]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,并进行了模型应用和实地分析。文献[12]通过利用景观指标和景观变化空间模式比较,对自然保护区弹性退化进行分析。综合来看,有关生态系统弹性针对特定对象、区域内的研究成效显著,但把生态系统作为一个整体,考虑不同干扰因素下的敏感性特征,并将其与景观分布、生境连通性等空间要素结合,进行弹性识别的研究还较少^[13]。草原作为

一种对气候变化、人类活动较为敏感的生态系统类型^[14-15],是自然和人文景观融合共存的载体^[16],特别在我国北方草原区,受气候变化、过度放牧和旅游开发等影响,生物多样性减少、草原退化的现状令人堪忧^[17-18]。加强这一方面的研究,将有助于认识草原生态系统脆弱性,进一步促进草地资源保护与合理利用。

本文以我国首个草原类自然保护地——锡林郭勒草原国家级自然保护区为对象,评价该地区景观弹性强度及空间分布特征,提出植被恢复分区,从而为自然保护区生态系统保护提供科学依据,实现区域生态、经济和社会协调发展的目标。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

锡林郭勒草原国家级自然保护区位于内蒙古高原东部,与大兴安岭西侧低山丘陵接壤,总面积5 800 km²,地理坐标为北纬43°26′~44°33′,东经115°32′~117°12′,是我国建立的第一个草地类自然保护区,是“国际生物圈保护区”网络成员,主要保护对象为草甸草原、典型草原、沙地疏林草原和河谷湿地生态系统,见图1、2。保护区地势南高北低,锡林河从东向西横穿保护区,沿岸东西绵延分布有风积沙带,沙丘起伏,以沙垄与新月形沙链波状沙地为主。属于温带半干旱区,由于受东部大兴安岭山地的影响,气候具有由半湿润向半干旱地区过渡的特征,但是绝大部分为温带大陆性的半干旱气候所控制,年均温为-1~2℃,年降水量350~450 mm。保护区境内及周围主要河流有锡林河、浩来图河,地带性土壤为黑钙土和暗栗钙土。保护区天然植被类型以森林、草原、湿地为主体,并有沙地疏林、灌丛、河漫滩草甸、沼泽。近年来,全盟多措并举加强草原生态保护与建设,自然保护区生态环境质量逐渐好转,但受气候变化、过度开发等不合理人类活动影响,退化沙化局面在一定区域内并未得到根本性扭转。

1.2 数据来源与处理

数据包括:专题图件(草原景观类型图、植被类型图等),来源于《内蒙古自治区锡林郭勒草原国家级自然保护区总体规划》图集;DEM、Landsat8 OLI数据(2017年7月17日),来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>);气候数据(年均降水量、



图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of research area

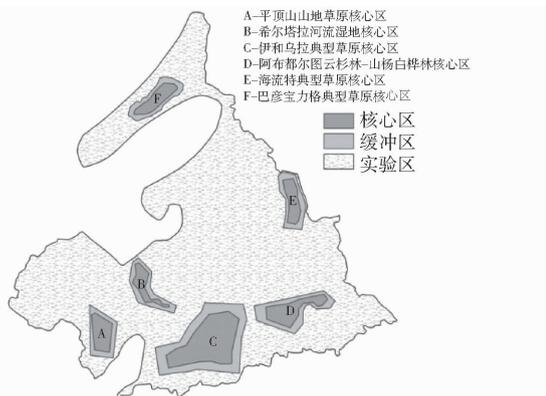


图 2 自然保护区功能分区图

Fig. 2 Current functional zoning of nature reserves

年均气温), 来源于人地系统主题数据库 (<http://www.data.ac.cn>)。数据经过空间校正、数据矢量化、数据库建设等处理过程, 通过分析制图得到研究所需的景观类型、坡度、高程、植被盖度、河流洼地、人为干扰要素(道路、城乡居民点、牧人之家等)等因子的空间分布信息(图 3~8)。数据处理软件: ERDAS IMAGINE 9.2、ArcGIS 9.3 等。

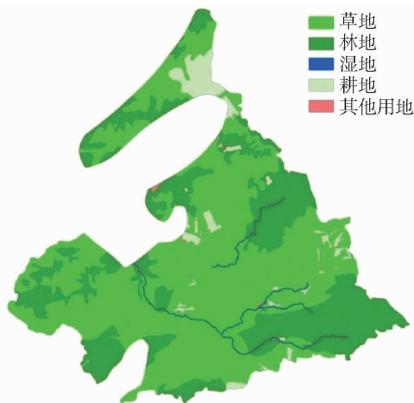


图 3 保护区草原景观类型

Fig. 3 Landscape types in research area

1.3 景观空间弹性评价方法

北方草原是我国重要生态安全屏障, 结合草原分布及其防沙治沙生态服务功能特点, 从景观格局

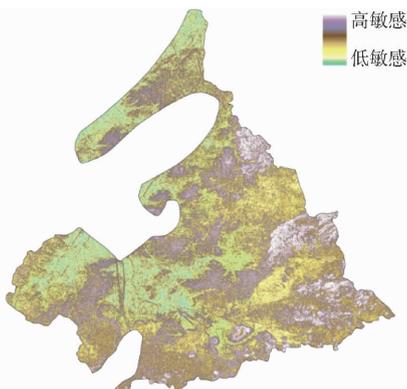


图 4 水土流失敏感性分布

Fig. 4 Sensitivity distribution of soil and water loss

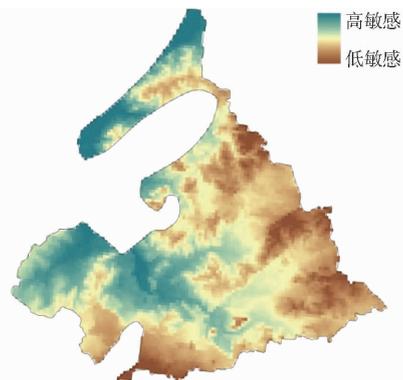


图 5 气候干湿变化敏感性分布

Fig. 5 Sensitivity distribution of climate dry and wet change

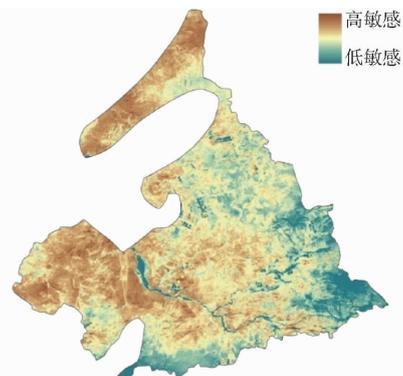


图 6 基于 NDVI 的土地沙化敏感性分布

Fig. 6 Sensitivity distribution of land desertification based on NDVI

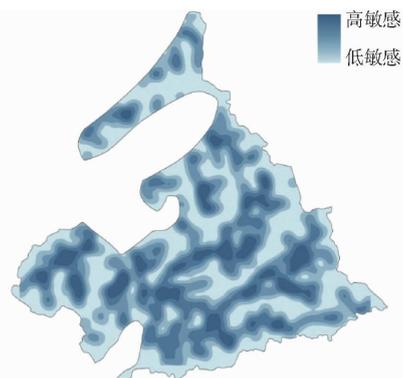


图 7 洪涝灾害敏感性分布

Fig. 7 Sensitivity distribution of flood disasters

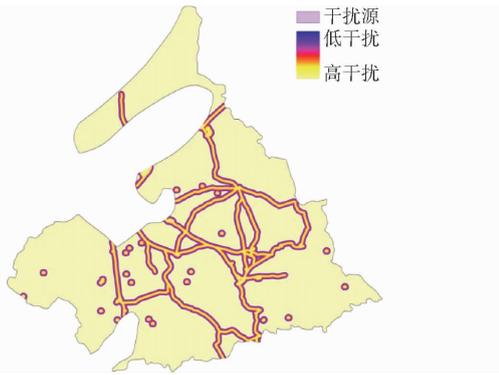


图8 人类活动干扰强度分布

Fig. 8 Distribution of human disturbance intensity

稳定性、景观空间生态敏感性、人类活动干扰程度3个因子刻画景观空间弹性(Landscape spatial resistance, LSR),建立草原类自然保护地景观空间弹性概念框架。景观空间弹性与景观格局稳定性成正比,与生态敏感性成反比,并与人类活动干扰及其影响下的生态敏感性有关,其模型可表示为

$$L_{SR} = \frac{L_{SS}}{(1 + aH)L_{ES}} L_{RC} \quad (1)$$

式中 L_{SR} ——景观空间弹性值,强度通过极差标准化法确定

L_{SS} ——景观格局稳定性值(Landscape pattern stability)

L_{ES} ——景观空间生态敏感性值(Landscape ecological sensitivity)

H ——人为干扰因子,用人类活动强度表示

L_{RC} ——景观弹性调节系数,取0.01

a ——干扰系数,与人类活动管控及与自然生态系统耦合作用有关,设定为0.05

$0 \leq L_{SR} \leq 100$,为无量纲,数值越大,景观空间弹性越高,景观系统越稳定。 H 介于0~100之间,与要素的像元敏感性值相对应。

1.3.1 景观格局稳定性

景观稳定性与内部景观斑块类型、形状、数量及其空间连通有关^[19-20]。考虑自然保护地保护类型和功能区划特征,从景观连通度、破碎度、分维度、核心区指标4个因素刻画景观格局稳定性(LSS)。结合景观等级斑块动态理论及相关研究^[21-22],考虑景观指数代表性和独立性,景观连通度用凝结度指数(COHESION)来表示,代表草原景观空间联通程度;景观破碎度以散布与并列指数(IJI)来表示,代表草原斑块空间分离与破碎化程度;斑块景观分维度用平均分维度指数(FRAC_MN)来表示,代表斑块受干扰后的斑块形状的复杂性;景观核心区指标用最大斑块指数(LPI)来表示,代表某种景观类型核心斑块重要性。景观格局稳定性与景观连通度、最大

斑块指数成正比,与破碎度、景观分维度指数成反比,景观格局稳定性计算公式见文献[20]。

FRAC_MN取值范围为[1,2],COHESION、IJI、LPI取值范围为[0,100],均无量纲。理论上,景观单元 L_{SS} 介于0~100间,值越大,景观格局稳定性越高,景观敏感性越低。

1.3.2 景观空间生态敏感性

综合考虑水土流失敏感性、气候干湿变化敏感性、土地沙化敏感性、洪涝灾害敏感性4个因子来表达景观空间生态敏感性

$$L_{ES} = \sum_{i=1}^4 S_i W_i \quad (2)$$

式中 S_i ——评价因子的强度

W_i ——评价因子的权重

i ——评价因子序号

考虑各因子对生态敏感性贡献程度,结合相关研究和经验分析,采用专家打分法进行权重设定,水土流失、气候干湿变化、土地沙化、洪涝灾害因子一级权重分别为0.20、0.30、0.35、0.15,其中水土流失因子中坡度二级权重设定0.65,高程二级权重为0.35。

(1) 水土流失敏感性

地形地貌空间差异是决定水土流失过程和强度的重要因素。选取坡度和高程两个指标,按坡度、高程大小,采用中位数法将敏感性程度由弱到强分为5个等级,分值依次为1、2、3、4、5。

(2) 气候干湿变化敏感性

气候干燥度是干旱预测中的关键参数,反映干旱成因和程度。利用温度与降水两个气候因子计算de Martonne干燥度^[23],公式为

$$I_{DM} = P / (T + 10) \quad (3)$$

式中 P ——多年平均降水量,mm

T ——多年平均气温,℃

I_{DM} ——气候干燥度

降水量和温度均采用多年降水量(1961—2000年)、温度栅格数据(1961—1998年)。采用中位数法对气候变化敏感性进行分级,划分为5个等级,分值同上。

(3) 土地沙化敏感性

采用修正型土壤调节植被指数(MSAVI)确定草原沙化土地等级^[24]。该指数是由遥感信息推算而获得的反映地表植被分布的定量值,同步减弱大气、土壤背景的影响,已在辽西草原沙地得到了验证,计算公式为

$$M_{fc} = \frac{M_{SAVI} - M_{SAVIveg}}{M_{SAVIveg} - M_{SAVIsoil}} \quad (4)$$

其中 $M_{SAVIveg} = 0.352$ $M_{SAVIsoil} = 0.259$

式中 M_{fc} ——修正型植被盖度
 $M_{SAVIsoil}$ ——裸土像元 SAVI 值
 $M_{SAVIveg}$ ——纯植被覆盖 SAVI 值
 M_{SAVI} ——像元光谱信息

本文采用保护区沙区和植被区特征点平均值,敏感性分级及分值设定同上。

(4) 洪涝灾害敏感性

基于 GIS 路径距离模块进行水流路径距离提取,运用栅格运算器对水流路径距离表面求倒数来确定研究区洪涝灾害敏感性分布。采用中位数法进行敏感性等级划分,等级数量和分值同上。

1.3.3 人为干扰强度

影响草原生态系统的人为干扰因子有道路、居民点、旅游景点(牧人之家)等。结合人为干扰范围和特点,设定最大影响距离为 1 000 m,采用欧氏距离计算,参照极差标准化法将距离拉伸至 0 ~ 1 (100%) 间,越靠近干扰源的景观受干扰程度越大。

1.4 统计分析

基于 ArcGIS 9.3 软件进行空间叠加和统计分析,用于草原景观格局稳定性、像元生态敏感性和景观空间弹性分布统计、评价与制图。采用 Microsoft

Excel 2007 软件包进行不同功能区面积占比统计分析与制图。

2 结果与分析

2.1 草原景观格局稳定性

通过分析发现,在类型水平上草地景观格局稳定性最高,为 36.72,主要由于保护区内景观凝结度、最大斑块指数、散布与并列指数数值较高,林地景观格局稳定性次之,为 21.42,其他用地的最低,仅为 0.09,说明居民点、牧人之家等开发用地斑块空间分布较为分散、形状复杂(表 1)。从景观水平来看,保护区景观格局稳定性数值达到了 46.87,明显高于类型水平景观格局稳定性。说明景观格局稳定性取决于单一景观类型或组分作用,但结果远低于该指数理论最优值,这意味着相对于最优格局,区域整体和单一类型景观格局稳定性还处于较低水平,未来还需要加强草原生态保护,有针对性地提升景观稳定性较低的组分或指标。从分布来看,保护区内高度、极高度稳定区主要集中在中部地带,保护区各核心区内景观格局稳定性较高,但周边低稳定性区域较多(图 9)。

表 1 类型水平和景观水平上草原景观格局稳定性关键指标

Tab.1 Key indicators for stability of grassland landscape structure at landscape and class level

草原要素	景观组分	COHESION	LPI	IJI	FRAC_MN	LSS
草地	典型草原、草甸、杂草类、禾草类	99.94	31.06	77.25	1.09	36.72
林地	森林、疏林、灌木、半灌木	99.80	10.02	43.47	1.07	21.42
湿地	河流型草丛、草丛沼泽	99.64	1.08	50.31	1.24	1.73
耕地	坡耕地、旱地	99.31	2.24	31.46	1.07	6.61
其他用地	居民点、牧人之家	96.75	0.06	58.44	1.07	0.09
整体	草地、林地、湿地、耕地、其他用地	99.89	31.06	61.39	1.08	46.87



图 9 草原景观格局稳定性分布

Fig.9 Stability distribution of grassland landscape structure

2.2 草原景观空间生态敏感性

草原景观空间生态敏感性分析发现(表 2),保护区以中高度敏感性为主,面积占比均达到了 20%

以上,其中极高度敏感区达到 18.63%。从不同功能分区看,保护区核心区高度敏感区面积占比最高,为 28.48%,中度敏感性区次之,为 24.90%,与缓冲区、实验区相比,核心区的极高度敏感地区面积占比最低,为 10.38%,这说明保护区核心区景观生态敏感性处于一个高的水平;保护区缓冲区敏感性等级面积占比最高的是低度敏感区,其次为中度敏感区,面积占比分别为 23.38% 和 21.08%,但缓冲区内极高度敏感性区域比核心区高出近 5 个百分点,同时有 20.30% 的区域处于高度敏感状态,这说明缓冲区草原景观高度敏感性区存在扩大趋势;保护区实验区面积占保护区总面积的 82% 以上,由于区域面积较大,各敏感性等级在实验区内占比相对均衡,但与其他功能区比较,实验区内有占比 20.04% 的极高度敏感性区域,说明实验区内高风险、脆弱性较强的景观单元较多,受人类活动干扰影响的程度较严

重。这一结果与该地区相关研究^[14]基本一致,即区域内绝大部分区域属于脆弱和很脆弱水平。从生态敏感性空间分布可以印证(图10),保护区敏感性程度从西北向东南方向呈降低趋势,越靠近西北,敏感

性程度越强,一方面这与保护区西北地区盟所在地强人为干扰有关,另一方面与区域气候、水文等因素特殊性有关。

从不同草原保护类型功能分区景观空间生态敏

表2 不同功能区草原景观空间生态敏感性等级与面积占比

Tab.2 Spatial ecological sensitivity grade and area ratio of grassland landscape in different functional areas

敏感性等级	核心区		缓冲区		实验区		保护区全区	
	面积/km ²	面积占比/%						
极低度敏感	81.25	13.99	110.24	19.88	933.69	20.02	1 125.19	19.39
低度敏感	129.13	22.24	129.66	23.38	943.99	20.24	1 202.78	20.74
中度敏感	144.57	24.90	116.95	21.08	903.10	19.36	1 164.62	20.08
高度敏感	165.36	28.48	112.58	20.30	949.18	20.35	1 227.12	21.16
极高度敏感	60.28	10.38	85.20	15.36	934.81	20.04	1 080.29	18.63

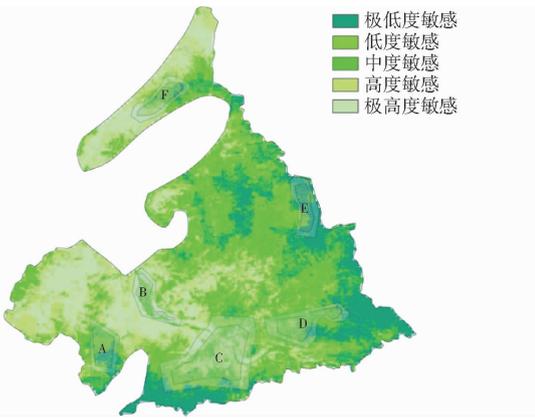


图10 景观空间生态敏感性分布

Fig.10 Ecological sensitivity distribution of grassland landscape

感性面积占比来看(图11,图中横坐标A~F为核心区,A1~F1为A~F的缓冲区,G为实验区,下同),希尔塔拉河流湿地核心区(B)全区均处于中高度敏感程度,其中,极高敏感区域面积占比最高,达到所在功能区面积的32.48%,中度和高度敏感面积总计达到了67.53%。伊和乌拉典型草原核心区(C)极高度敏感区域占比为14.02%,高度敏感面积占到43.17%,达到了相同等级中的最高占比。海流特典型草原核心区(E)大部分区域为低敏感分布区,极低度敏感面积占比达到了69.05%,低度敏感面积占比为30.09%,其次为平顶山山地草原核心区(A),低度、极低度敏感范围面积域总占比达到79.35%。希尔塔拉河流湿地缓冲区(B1)和伊和乌拉典型草原缓冲区(C1)与其核心区敏感性表现相似,均处于较高水平,而海流特典型草原缓冲区(E1)77.69%的区域为极低度敏感,不存在极高度敏感区域,说明该功能区内草原生态保护处于全保护区较高水平。整体来看,研究区不同类型保护区景观空间敏感性程度空间差异较大,绝大部分核心区和缓冲区草原景观空间处于中高度敏感性水平,

以西北-东南走廊为高生态敏感性空间集中分布区域,主要保护对象为河流湿地-草甸和典型草原,全区景观空间敏感性程度以此为轴线向西南、东北两侧递减。

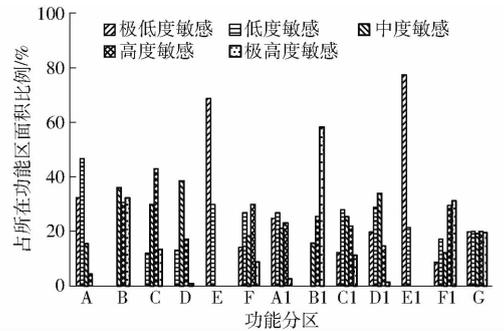


图11 不同保护类型功能分区景观生态敏感性面积占比

Fig.11 Ratio of landscape eco-sensitive areas in functional zones of different conservation types

2.3 草原景观空间弹性与植被恢复分区

自然保护区草原景观空间敏感性不仅与自然环境本底脆弱性有关,同时与强人类活动分布有关。综合考虑各因素影响作用,对不同功能区草原景观空间弹性分析发现(图12、表3),自然保护区核心

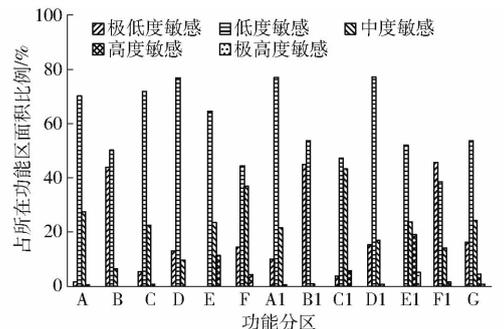


图12 不同保护类型功能分区景观空间弹性面积占比

Fig.12 Ratio of landscape spatial resistance in functional areas of different protection types

区、缓冲区、实验区 3 个功能区中大部分区域草原景观处于中、低度弹性,其中核心区内低度弹性范围最大,面积占比达到 66.92%,其余功能区低度弹性区域均达到 50% 以上,整个自然保护区低弹性面积超

70%,这与保护区景观格局稳定性低、生态脆弱区大、草原人类活动干扰强有关。从分布图可以看出,高、极高弹性区域主要分布于西南伊和乌拉典型草原和东北部区域海流特典型草原区。

表 3 不同功能区草原景观空间弹性等级与面积占比

Tab.3 Spatial resistance grade and area ratio of grassland landscape in different functional areas

弹性等级	核心区		缓冲区		实验区		保护区全区	
	面积/km ²	面积占比/%						
极低度弹性	58.75	10.12	77.87	14.04	770.14	16.51	906.76	15.63
低度弹性	388.55	66.92	285.56	51.49	2 518.09	53.98	3 192.20	55.04
中度弹性	123.24	21.23	160.78	28.99	1 145.93	24.57	1 429.94	24.65
高度弹性	9.67	1.66	27.24	4.91	212.24	4.55	249.15	4.30
极高度弹性	0.38	0.07	3.19	0.57	18.37	0.39	21.95	0.38

从不同保护类型功能分区角度分析发现(图 12),保护区各核心区、缓冲区一半以上区域处于中、低度弹性水平,其中,阿布都尔图沙地云杉林-山杨白桦林核心区(D)低度弹性区域面积占比达到了 76.93%,平顶山山地草原(A)和伊和乌拉典型草原核心区(C)低度弹性区域面积占比均超过了 70%,希尔塔拉河流湿地(B)、阿布都尔图沙地云杉林-山杨白桦林核心区(D)、海流特典型草原核心区(F)3 个功能区极度低弹性空间范围较大,从核心区到缓冲区,极低敏感面积比例处于增大趋势,说明在保护区西北部地区,以林地、湿地和典型草原为保护对象的自然保护功能区景观空间弹性不断降低,且随空间范围增大呈不断扩大的发展格局(图 13)。

型草原核心区(F)与其缓冲区(F1)和保护区实验区中的部分区域,该区域耕种、放牧、旅游等人类开发活动较多,人为干扰影响较大,造成草原景观空间弹性较低,是植被恢复的重点区域;一般恢复区面积最大,约占保护区面积的 44.75%,主要分布于盟所在地西北部和南部地区,是联通各重点植被恢复区并向保护区过渡的关键区域;一般保护区面积为全保护区的 29.23%,主要分布于南部伊和乌拉典型草原和东部海流特典型草原;重点保护区面积较小,占全区的 10.53%,主要分布于阿布都尔图沙地云杉林-山杨白桦林核心区(D)和海流特典型草原核心区(F)中间交汇地区、海流特典型草原核心区(F)西北部地区、伊和乌拉典型草原核心区(C)东部地区,该区域人类活动干扰影响小,生态敏感性程度较低,草地景观格局相对稳定,景观弹性较高,是自然保护区重点保护地区,可作为未来功能区调整优化的方向(图 14)。

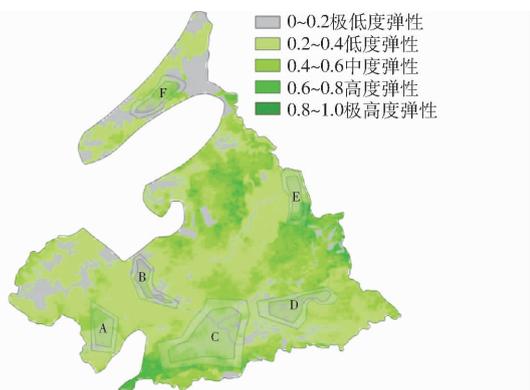


图 13 草原景观空间弹性分布

Fig. 13 Spatial resistance distribution of grassland landscape

草原景观空间弹性作为衡量草原景观系统自适应能力和受干扰后抵抗能力的重要指标,是草原植被恢复建设的指导依据。对自然保护区景观空间弹性评价及其不同保护类型功能分区差异进行分析,进而确定草原植被恢复与保护分区:重点恢复区域面积占全保护区的 15.49%,分布于保护区西部、北部地区和靠近锡林浩特市区的中部地区,包括希尔塔拉河流湿地核心区(B)、缓冲区(B1)、海流特典

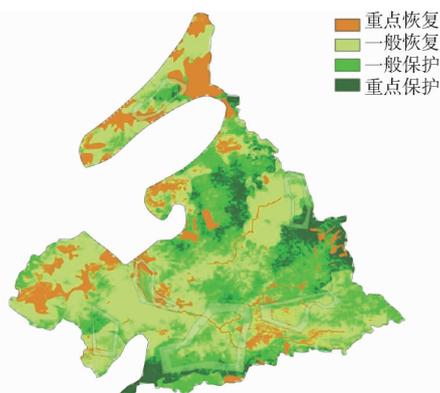


图 14 草原植被恢复与保护分区

Fig. 14 Regionalization of grassland vegetation restoration and ecological protection

3 结论

(1)以锡林郭勒草原国家级自然保护区景观类型为要素,从景观连通度、破碎度、分维数和核心区

指标选取景观指数,构建景观格局稳定性评价模型,分析发现,保护区内草地和林草地优势分布的核心区景观稳定性较高,道路等建设用地景观稳定性较低,但相比于模型的理论最优值,保护区内单一类型和整体景观格局稳定性水平均处于较低水平。

(2)保护区近60%的区域敏感水平达到中度敏感,由于自然和人为活动双重作用,生态敏感性等级和面积比在不同功能分区差别较大。核心区内高度敏感区占比最高,达到28.48%,高敏感区在缓冲区呈扩大趋势。绝大多数核心区及其缓冲区处于中高度敏感水平,特别是希尔塔拉河流湿地核心区(B)和缓冲区(B1)、伊和乌拉典型草原核心区(C)和缓冲区(C1)较为明显,高度敏感性单元主要分布于西北-东南走廊地带,强度向两侧递减。

(3)整个自然保护区中度以下的低弹性区域范围超70%以上,从核心区到实验区,随着保护严格程度的降低,极低度弹性区面积不断增大,保护区西北部、中部地区林地类、湿地类和典型草原类保护功能区景观弹性不断降低,并呈现扩大态势。根据景观空间弹性表现,保护区内60%以上的区域应加强植被恢复,其中15.49%的区域需重点恢复,44.75%的区域需一般恢复,全区重点保护区域面积相对小,占总面积的10.53%,主要为保护功能区C区东部、E区西北部和D、E两区交汇地带。研究表明,概念化景观空间弹性框架模型能够从景观稳定性、生态敏感性角度很好地揭示景观空间弹性的强弱及其分布特征,这对评价草原类自然保护区景观系统保护状况、制定植被恢复格局、优化自然保护区功能分区具有积极意义。

参 考 文 献

- [1] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(6): 1-23.
- [2] HOLLING C S. Engineering resilience versus ecological resilience[M]. Washington DC: National Academy Press, 1996:31-44.
- [3] 李湘梅,肖人彬,王慧丽,等. 社会-生态系统弹性概念分析及评价综述[J]. *生态与农村环境学报*, 2014,30(3): 681-687.
LI Xiangmei, XIAO Renbin, WANG Huili, et al. Resilience concept analysis and evaluation of socio-ecological systems: an overview[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014,30(3): 681-687. (in Chinese)
- [4] WALKER B, HOLLING C S, CARPENTER S R, et al. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems[J]. *Ecology and Society*, 2004, 9(2): 5.
- [5] DERISSEN S, QUAAS M F, BAUMAGARTNER S. The relationship between resilience and sustainability of ecological-economic systems[J]. *Ecological Economics*, 2011, 70(6):1121-1128.
- [6] 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.
WANG Wenjie, GE Dabing, ZHOU Shuang, et al. Quantitative evaluation of ecological elasticity in Pingjiang County[J]. *Environmental Science and Management*, 2015,40(3): 130-134. (in Chinese)
- [7] ADGER W N. Building resilience to promote sustainability[M]. IHDP Update, 2003:1-3.
- [8] EVANS J P. Resilience, ecology and adaptation in the experimental city [J]. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 2011, 36(2):223-237.
- [9] GOTHAM K F, CAMPANELLA R. Coupled vulnerability and resilience: the dynamics of cross-scale interactions in Post-Katrina New Orleans[J]. *Ecology and Society*, 2011, 16(3):12.
- [10] LI Y, SHI Y, QURESHI S, et al. Applying the concept of spatial resilience to socio-ecological systems in the urban wetland interface[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 42(7):135-146.
- [11] 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.
LIU Xiaoping, LI Peng, REN Zongping, et al. Evaluation of ecosystem resilience in Yulin, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7479-7491. (in Chinese)
- [12] RESCIA A J, WILLAARTS B A, SCHMITZ M, et al. Changes in land uses and management in two Nature Reserves in Spain: evaluating the social-ecological resilience of cultural landscapes[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 98(1):26-35.
- [13] CUMMING G S. Spatial resilience: integrating landscape ecology, resilience, and sustainability[J]. *Landscape Ecology*, 2011, 26(7): 899-909.
- [14] 张圣微,张睿,刘廷玺,等. 锡林郭勒草原植被覆盖度时空动态与影响因素分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(3):253-260.
ZHANG Shengwei, ZHANG Rui, LIU Tingxi, et al. Dynamics of fractional vegetation cover and its influence factors in Xilingol Steppe[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017,48(3):253-260. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170332&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.032. (in Chinese)
- [15] 林玉英,胡喜生,邱荣祖,等. 基于 Landsat 影像的 NDVI 对植被与影响因子交互耦合的响应[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(10):212-219.
LIN Yuying, HU Xisheng, QIU Rongzu, et al. Responses of Landsat-based NDVI to interaction of vegetation and influencing factors[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(10):212-219. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181024&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.024. (in Chinese)

- [16] 张宇,朱立志.关于我国草原类国家公园建设的思考[J].草业科学,2016,33(2):201-209.
ZHANG Yu, ZHU Lizhi. Perspectives on establishment of grassland national parks in China[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(2): 201-209. (in Chinese)
- [17] 刘硕,李品,冯兆忠.京津冀防风固沙植被生态修复研究进展与对策[J].生态学杂志,2019,38(1):267-274.
LIU Shuo, LI Pin, FENG Zhaozhong. Eco-restoration research progress and strategy about wind-break and sand-fixation forest in Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(1): 267-274. (in Chinese)
- [18] 祝萍,黄麟,肖桐,等.中国典型自然保护区生境状况时空变化特征[J].地理学报,2018,73(1):92-103.
ZHU Ping, HUANG Lin, XIAO Tong, et al. Dynamic changes of habitats in China's typical nature reserves on spatial and temporal scales[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(1): 92-103. (in Chinese)
- [19] 徐秋阳,王巍巍,莫罹.京津冀地区景观稳定性评价[J].生态学报,2018,38(12):4226-4233.
XU Qiuyang, WANG Weiwei, MO Li. Evaluation of landscape stability in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4226-4233. (in Chinese)
- [20] 邬建国.景观生态学:格局、过程、尺度与等级[M].2版.北京:高等教育出版社,2007.
- [21] 孟超,王计平,支晓蓉,等.基于GIS的县域森林景观空间格局等级特征研究[J/OL].农业机械学报,2018,49(10):187-194,204.
MENG Chao, WANG Jiping, ZHI Xiaorong, et al. Spatial characteristics of forest landscape in county level based on GIS[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10):187-194,204. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181021&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.021. (in Chinese)
- [22] 冯志新,陈颖彪,千庆兰,等.东莞市人工景观格局与连接度的协整性及因果关系[J].生态学报,2015,35(14):4920-4930.
FENG Zhixin, CHEN Yingbiao, QIAN Qinglan, et al. Research on the cointegration and causality between urban artificial landscape structure change and landscape connectivity in Dongguan City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4920-4930. (in Chinese)
- [23] 王海梅,李政海,韩国栋,等.锡林郭勒盟气候干燥度的时空变化规律[J].生态学报,2010,30(23):6538-6545.
WANG Haimei, LI Zhenghai, HAN Guodong, et al. The analysis on the spital-temporal change of climate aridity in Xilinguole Steppe[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010,30(23):6538-6545. (in Chinese)
- [24] 张亚男,王旭,甄莹.利用“修改型”植被盖度反演模型提取辽西北沙化土地信息[J].测绘通报,2018(5):93-96.
ZHANG Ya'nan, WANG Xu, ZHEN Ying. Extraction of desertification land information in the northwest area of Liaoning Province using modified vegetation coverage inversion model[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(5): 93-96. (in Chinese)

(上接第51页)

- [15] 朱思洪,徐刚,袁加奇,等.农具质量对拖拉机悬挂农具系统振动特性的影响[J].农业工程学报,2014,30(24):30-37.
ZHU Sihong, XU Gang, YUAN Jiaqi, et al. Influence of implement's mass on vibration characteristics of tractor-implement system[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 30-37. (in Chinese)
- [16] 邱白晶,杨祖华.旋耕机整机试验模态分析[J].农业机械学报,1994,25(2):24-29.
QIU Baijing, YANG Zuhua. Experimental modal analysis on the rotary tiller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1994, 25(2): 24-29. (in Chinese)
- [17] 王大成,杨德斌.悬挂式旋耕机机组振动问题研究[J].湖南农学院学报,1992,18(3):613-621.
WANG Dacheng, YANG Debin. A study of the vibration problem in the lift-up rotary tiller [J]. Journal of Hunan Agricultural College, 1992, 18(3): 613-621. (in Chinese)
- [18] 吴子岳,高焕文,张晋国.玉米秸秆切断速度和切断功耗的试验研究[J].农业机械学报,2001,32(2):38-41.
WU Ziyue, GAO Huanwen, ZHANG Jinguo. Study on cutting velocity and power requirement in a maize stalk chopping process [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(2): 38-41. (in Chinese)
- [19] 顾庆.非道路用柴油机燃油消耗率分析及预测[J].内燃机工程,2010,30(24):7-10.
GU Qing. Analysis and prediction of fuel consumption rate for non-road diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 30(24): 7-10. (in Chinese)
- [20] 尹彦鑫,郑永军,成智华,等.少免耕播种机牵引阻力远程监测系统[J].农业工程学报,2014,30(6):1-8.
YIN Yanxin, ZHENG Yongjun, CHENG Zhihua, et al. Tractive resistance remote monitor system for no-tillage seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(6): 1-8. (in Chinese)
- [21] 张居敏,贺小伟,夏俊芳,等.高茬秸秆还田耕整机功耗检测系统设计与试验[J].农业工程学报,2014,30(18):38-46.
ZHANG Jumin, HE Xiaowei, XIA Junfang, et al. Design and field experiment of power consumption measurement system for high stubble returning and tillage machine [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 38-46. (in Chinese)
- [22] 胡少兴,马旭,马成林,等.根茬粉碎还田机除茬刀滚功耗模型的建立[J].农业机械学报,2000,31(3):35-38.
HU Shaoxing, MA Xu, MA Chenglin, et al. A rotary power dissipation model of the machine for chopping and returning stubble into soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(3): 35-38. (in Chinese)