

DOI: 10.11686/cyxb2024428

http://cyxb.magtech.com.cn

孔繁晰, 唐邦洁, 阿力米日·阿力木江, 等. 黄土高原丘陵沟壑区退耕恢复草地植物空间分布格局研究. 草业学报, 2025, 34(9): 1-11.

KONG Fan-xi, TANG Bang-jie, ALIMUJIANG A-li-mi-ri, et al. Species spatial distribution patterns in grassland under restoration in 'hill and gully' regions of the Loess Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(9): 1-11.

黄土高原丘陵沟壑区退耕恢复草地 植物空间分布格局研究

孔繁晰, 唐邦洁, 阿力米日·阿力木江, 阿的各各, 袁茂国, 陈俊*

(西北农林科技大学草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为探究黄土高原退耕自然恢复草地植物的空间分布格局,选取陕西省吴起县退耕5、10和25年3个不同退耕恢复年限草地,利用植物齐地面刈割地上生物量测定法和点网格盖度测定法及其 γ 分布和 β 分布两种数理解析模型,计算群落整体以及组成群落的各植物种的空间异质性指数,探明各植物种在空间分布格局中所起的作用,为退耕恢复草地的科学管理与合理利用提供理论支撑。研究结果表明,不同退耕恢复年限的草地群落植物种的空间异质性指数均随平均地上生物量和盖度的增大极显著地降低($P < 0.01$);退耕10年的草地禾本科植物的地上生物量和盖度所占比例较退耕5年的草地高,其中退耕10年草地中针茅在总生物量和盖度中的占比分别达到23.0%和37.6%,而退耕25年的草地中退化指示植物种三叶委陵菜成为群落的第1优势种,说明退耕年限过长不利于维持群落中禾本科等优质植物的地上生物量及盖度比例;优势顺序靠前的植物种降低了群落整体的空间异质性,优势顺序靠后的植物种对群落空间分布格局作用很小。

关键词:黄土高原丘陵沟壑区;退耕恢复草地;地上生物量;盖度; γ 分布模型; β 分布模型;空间异质性

Species spatial distribution patterns in grassland under restoration in 'hill and gully' regions of the Loess Plateau

KONG Fan-xi, TANG Bang-jie, ALIMUJIANG A-li-mi-ri, ADE Ge-ge, YUAN Mao-guo, CHEN Jun*

College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: The aim of this work was to explore the spatial distribution pattern of plants in grasslands under natural restoration on the Loess Plateau. To this end, a field study was conducted at three grassland sites that had been under natural restoration for 5, 10, and 25 years in Wuqi County, Shaanxi Province. The spatial heterogeneity indexes of the whole community and each species in the community were calculated using the aboveground biomass measurement method and the point-grid coverage measurement method, the data were analyzed using two mathematical analytical models: γ -distribution and β -distribution models. Using these analyses, we were able to determine the role of each plant species in the spatial distribution pattern. The results show that the spatial heterogeneity index of grassland species decreased significantly with the increase in average aboveground biomass and coverage ($P < 0.01$); the proportion of aboveground biomass and coverage of grasses were higher in the 10-year grassland than in the 5-year grassland. Among all the plant species, *Stipa capillata* accounted for 23.0% and 37.6%

收稿日期: 2024-10-29; 改回日期: 2024-12-13

基金项目: 陕西省重点研发计划一般项目(2021NY-012)资助。

作者简介: 孔繁晰(2000—), 女, 回族, 河北河间人, 硕士。E-mail: 2080435759@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: chen_jun2008@nwsuaf.edu.cn

of the total biomass and coverage in the 10-year grassland, respectively. In the 25-year grassland, the degradation indicator plant species, *Potentilla freyniana*, was the dominant species in the community. This result indicates that a long fallow period is not conducive to maintaining the aboveground biomass and cover ratio of grasses and other high-quality plants in the community. The most dominant plant species reduced the spatial heterogeneity of the community as a whole, while the least dominant species had very little effect on the spatial distribution pattern of the community. Overall, the results of this study provide objective data to guide scientific management and rational use of grassland during restoration.

Key words: Loess Plateau hilly and gully area; fallow restoration grassland; aboveground biomass; coverage; γ -distribution model; β -distribution model; spatial heterogeneity

黄土高原的农耕文化历史悠久,源远流长,但随着耕地面积与人口压力之间的差距日益扩大,黄土高原作为相对独立的自然地理单元,日益缩小而破碎,原有稳固的耕地农业难以固守^[1]。草地农业具有改善土壤肥力、保持水土、节约化肥和水资源等多种优势,在如今已成为黄土高原农业更新更好的选择。

退耕还林的初衷是让生态承载力弱、不适宜耕种的耕地退下来植树种草,防治水土流失等自然灾害。在过去的20多年中,我国先后在25个省(自治区、直辖市)和新疆生产建设兵团,分别于1999和2014年实施了两轮退耕还林还草工程,退耕还草政策的实施不仅可以促进农村生产结构调整与草地资源保护,还可提高草业的知名度,促进草业发展^[2-3]。陕西省延安市吴起县于1999年一次性退耕 $1.04 \times 10^5 \text{ hm}^2$,被国家确定为全国退耕还林(草)试点示范县,截至2021年,该区域生态环境得到了很大的改善^[4]。

空间异质性是草地生态系统的一个普遍特性和衡量草地植物群落特征的重要指标,是指生态学变量在空间上的不均匀性和复杂性,表现为生态系统的缀块性和环境的梯度变化^[5]。空间异质性越高,意味着允许更多的物种共存。空间异质性随着所研究的系统特征不同而变化,许多生物因子(如牲畜啃食践踏、放牧家畜排泄,人为采伐,植物演替等)和非生物因子(地形因子、土壤环境因子等)的共同作用导致了植被分布的空间异质性,了解决定植物物种和群落空间格局的过程有助于认识草地退化和物种多样性的机制^[6],因此空间异质性在许多生态学理论中起中心作用。国内外学者对草地空间异质性与放牧强度、放牧方式、气候环境、物种组成之间的关系进行了大量的研究报道^[7-9],但对黄土高原丘陵沟壑区退耕草地空间分布格局随退耕年限变化的研究尚且较少^[10-11]。在过去的研究中,小尺度植被调查和分析方法被证明在半干旱植被调查中有效,可以揭示草地植物群落内部空间分布和种间作用^[12]。地上生物量及植被盖度是衡量草地系统状态的重要指标,因此,本研究以陕西省延安市吴起县不同退耕年限草地上生物量和盖度的调查数据为基础,在前人利用地上生物量和盖度研究小尺度下草地群落空间分布格局的基础上^[13-16],结合 γ 分布模型和 β 分布模型的数理解析方法探究退耕草地植物空间分布的异质性规律,以及不同退耕年限草地中,组成群落的各植物种对空间分布格局起着怎样的作用,随退耕年限的变化草地群落之间空间异质性具有怎样的差异,为退耕恢复草地的科学管理与合理利用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 调查区概况

本研究调查地位于陕西省延安市西北部的吴起县,地处东经 $107^{\circ}38'57''-108^{\circ}32'49''$,北纬 $36^{\circ}33'33''-37^{\circ}24'27''$,为温带大陆性季风气候,年平均降水量483.4 mm,地处典型黄土高原丘陵沟壑区,生态环境脆弱^[17]。吴起县作为“全国退耕还林试点示范县”,土地广阔且退耕草地面积大,拥有巨大的林牧业发展潜力,故本研究选取吴起县2019年(退耕5 a)、2014年(退耕10 a)、1999年(退耕25 a)的自然恢复草地为对象,该地区退耕前种植的农作物有糜子(*Panicum miliaceum*)、谷子(*Setaria italica*)、玉米(*Zea mays*)、荞麦(*Fagopyrum esculentum*)、豆类等,通常进行倒茬轮作种植。调查地概况如表1所示。

表 1 调查地概况

Table 1 Basic condition of the investigating sites

样地 Site	退耕年限 Years of fallow land	地点 Position	地形 Landform	气候类型 Climate types	经纬度 Longitude and latitude	海拔 Altitude (m)	调查时间 Investigation time (年-月-日 year-month-day)
1	退耕 5 a Res-toration years of 5 (2019)	吴起县中台村老虎沟 Wuqi County, Zhongtai Village, Tiger Ditch	坡地 Slope	半干旱温带大陆性季风气候 Semi-arid temperate continental monsoon climate	36°54'28" N, 108°04'05" E	1417.3	2023-07-17—2023-07-18
2	退耕 10 a Res-toration years of 10 (2014)	吴起县中台村老虎沟 Wuqi County, Zhongtai Village, Tiger Ditch	坡地 Slope	半干旱温带大陆性季风气候 Semi-arid temperate continental monsoon climate	36°54'34" N, 108°04'09" E	1364.1	2023-07-13—2023-07-14
3	退耕 25 a Res-toration years of 25 (1999)	吴起县中台村老虎沟 Wuqi County, Zhongtai Village, Tiger Ditch	坡地 Slope	半干旱温带大陆性季风气候 Semi-arid temperate continental monsoon climate	36°54'39" N, 108°04'11" E	1357.2	2023-07-15—2023-07-16

1.2 调查方法

利用汪丽平等^[18]和 Chen 等^[19]提出的植物齐地面刈割地上生物量测定法和点网格盖度测定法测定地上生物量与盖度,具体测定方法是在上述不同退耕年限的恢复草地内分别选取有代表性的地段,布设 50 m 长样线,沿样线每隔 50 cm 连续摆放 0.5 m × 0.5 m 样方^[20-21],共 50 个样方,样方的横纵方向各拉 10 条相隔 5 cm 的网格线(图 1),使其交叉得到 100 个点(10 × 10),观测并记录各植物种所对应的点数,计算其点数的百分比,得到各植物种的盖度数据。之后,将样方内的所有植物齐地面刈割,带回室内后将每个样方中的植物以物种为单位进行分类,装入纸袋,于 65 °C 恒温干燥箱干燥 48 h 至恒重,称量得到每个样方中每种植物种地上生物量数据。

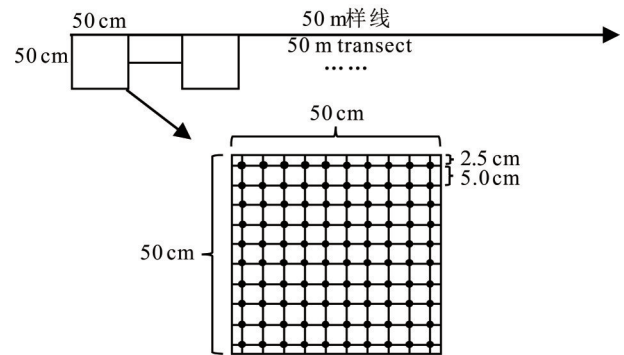


图 1 盖度测量方法

Fig. 1 Coverage measurement method

1.3 数据解析方法

1.3.1 利用 γ 分布模型分析地上生物量数据 如果用 x_i 表示单位面积(50 cm × 50 cm)内的某植物种地上生物量,则地上生物量的空间分布符合 γ 分布模型。 γ 分布模型可用下式表示^[13]:

$$f(x_i, \alpha, \mu) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \left(\frac{\alpha}{\mu}\right)^\alpha x_i^{\alpha-1} e^{-\frac{\alpha x_i}{\mu}}$$

式中: μ 为单位面积内的该植物种平均地上生物量; α 表示 γ 分布模型的参数。参数 α 按下式计算:

$$\alpha = \frac{\mu^2}{\nu}$$

式中: ν 是 N 个地上生物量数据的方差,本调查中 $N=50$ 。

满足 γ 分布各个植物种的空间异质性指数(I_i)用下式计算^[14]:

$$I_i = \frac{1}{\alpha} = \frac{\nu}{\mu^2}$$

式中:当 $\alpha=1$ 时, $\mu^2=\nu$, $I_i=1$, 表示组成植物群落的植物种呈现随机分布。 $\alpha \rightarrow \infty$ 时, $I_i \rightarrow 0$, 即 N 个生物量数据的方差 ν 趋近于 0, 说明此时群落内的植物种呈现均匀分布状态; $\alpha \rightarrow 0$ 时, $I_i \rightarrow \infty$, 说明群落内的植物种空间异质性很强。 I_i 值越大, 空间异质性程度越强。

为表示群落整体空间异质性程度,群落整体的空间异质性(I_c)由构成群落的每种植物的异质性与它们的地上生物量大小加权计算后得出。计算公式如下:

$$I_c = \frac{\sum_{i=1}^s x_i I_i}{\sum_{i=1}^s x_i}$$

式中: s 为群落中出现的植物种数。

1.3.2 利用 β 分布模型分析盖度数据 如果用 y_i 表示单位面积(50 cm×50 cm)内某植物种的盖度,则盖度的空间分布符合 β 分布模型。 β 分布模型可用下式表示^[15]:

$$f(y_i, \alpha, \beta) = \frac{y_i^{\alpha-1} (1-y_i)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)}$$

式中: α 和 β 为 β 分布模型的参数,其计算公式为:

$$\alpha = \frac{\mu^2(1-\mu) - \mu\nu}{\nu}$$

$$\beta = \frac{(1-\mu)^2\mu - (1-\mu)\nu}{\nu}$$

式中: μ 为单位面积内的平均盖度; ν 为盖度方差。满足 β 分布的各个植物种的空间异质性指数(I_i)可用下式计算:

$$I_i = \frac{\nu}{\mu^2} = \frac{\beta}{\alpha(\alpha + \beta + 1)}$$

式中:当 $I_i=1/3$ 时, $\alpha=\beta=1$,群落内的植物种呈现随机分布;当 $I_i \rightarrow 0$ 时,群落内的植物种群在草地上均匀分布;当 $I_i \rightarrow \infty$ 时,群落内的植物种群空间异质性很强。 I_i 值越大,空间异质性程度越强。

群落整体的空间异质性(I_c)由每种植物的异质性(I_i)与盖度大小(y_i)加权计算后得出,公式为:

$$I_c = \frac{\sum_{i=1}^s y_i I_i}{\sum_{i=1}^s y_i}$$

1.3.3 空间异质性指数差值 本研究创新性地提出空间异质性指数差值的概念,用来表示某植物种在该群落空间分布格局中所起作用的大小,该值由群落整体的空间异质性指数与某一植物种不存在时群落的空间异质性指数数值相减得到,计算过程用公式表示为:

$$\delta_{ci} = I_c - \frac{\sum_{i=1}^{s-1} x_i I_i}{\sum_{i=1}^{s-1} x_i} \text{ 或 } \delta_{ci} = I_c - \frac{\sum_{i=1}^{s-1} y_i I_i}{\sum_{i=1}^{s-1} y_i}$$

式中: δ_{ci} 为群落中某物种空间异质性指数差值; x_i 、 y_i 分别表示单位面积内某植物种的地上生物量及盖度。若 δ_{ci} 为正值,说明该植物种的存在增大了群落空间异质性,且数值越大,作用越强;若为负值,则说明该植物种的存在会降低群落的空间异质性,其绝对值越大,作用越强。

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 软件对原始植被数据进行整理汇总、作图,并利用 SPSS(27.0)软件进行相关性分析与差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同退耕年限草地植物群落的特征

群落地上生物量随着恢复年限的增加总体呈上升的趋势,且退耕 25 a 达到最大,极显著高于退耕 10 和 5 a 的草地($P < 0.01$),而退耕 10 和 5 a 的草地之间无显著差异($P = 0.659$)。群落盖度随着恢复年限的增加同样呈上升

趋势,且退耕 5、10 和 25 a 的草地之间均存在极显著差异($P < 0.01$)。地上生物量计算得到的群落整体空间异质性指数随着恢复年限的增加呈先上升而后下降的趋势,其数值均大于 1,因此都具有比随机分布更强的空间异质性。盖度计算得到的群落整体空间异质性指数随着恢复年限的增加呈下降的趋势,其数值均大于 1/3,因此都具有比随机分布更强的空间异质性(表 2)。

表 2 植物群落总体特征

Table 2 General characteristics of plant community

项目 Item	年限 Year (a)		
	5	10	25
平均地上生物量 Average aboveground biomass ($g \cdot 0.25 m^{-2}$)	14.87 ± 5.46b	14.45 ± 3.76b	19.44 ± 4.64a
平均盖度 Average coverage (%)	44.28 ± 18.40c	55.96 ± 24.52b	76.70 ± 16.58a
地上生物量的空间异质性指数 Spatial heterogeneity index of aboveground biomass	2.25	3.08	1.16
盖度的空间异质性指数 Spatial heterogeneity index of coverage	2.85	2.66	0.85

不同字母表示 0.01 水平差异极显著。Different letters indicate extremely significant differences in 0.01 levels.

2.2 地上生物量及其空间异质性

2.2.1 不同退耕年限草地群落中各植物种地上生物量及其空间异质性

为探索地上生物量与其空间异质性指数间的关系,以不同退耕年限草地中各植物种地上生物量的平均值为横坐标,以各植物种的空间异质性指数(I_i)为纵坐标,作散点图(图 2)。随着地上生物量的增大,空间异质性指数均呈极显著的降低趋势($P < 0.001$)。而不同退耕年限草地群落每种植物的地上生物量结果表明,草地退耕 5 a 后,由于没有人为干扰,白莲蒿在这一时期得到了较快发展,生物量占比达 48.4%,呈现比随机分布更低的空间异质性($I_i = 0.59$)。针茅等多年生草本植物已经出现,但在地上总生物量中占比较低(9.0%,图 2a)。退耕 10 a 相比退耕 5 a 的草地地上生物量水平略低,但针茅生物量比例提高了一倍以上(23.0%),呈现比随机分布更低的空间异质性($I_i = 0.75$),同时白莲蒿生物量占比大大降低(7.3%),标志着草地质量有了明显的改善(图 2b)。而在退耕 25 a 的草地中,生物量水平总体提高,但三叶委陵菜、二裂委陵菜等退化草地指示植物种逐渐占据绝对优势,且均呈现比随机分布更低的空间异质性($I_i = 0.16, I_i = 0.79$),其中三叶委陵菜生物量占比达 66.2%,二裂委陵菜占比达 12.7%,高于优势顺序第 3 位针茅的占比(10.2%,图 2c)。由此可以得出,退耕恢复 10 a 草地优质植物种占比较高、质量较好,退耕恢复年限过长优质植物种针茅地上生物量占比反而降低、草质变劣。

2.2.2 组成群落的各植物种在地上生物量空间分布格局中的作用

以地上生物量大小排序的植物种的优势顺序作为横坐标,以空间异质性指数差值作为纵坐标作散点图(图 3)。优势顺序靠前的植物种空间异质性指数差值多为负值,它们降低了群落整体的空间异质性。优势顺序靠后的植物种空间异质性指数差值多为正值,且对群落空间分布格局作用很小。其中,退耕 5 a 草地中白莲蒿、退耕 25 a 草地中三叶委陵菜在群落中优势顺序为第 1 位,它们均对群落整体空间异质性有较大的降低作用,差值分别为 -1.55、-1.96;而退耕 10 a 草地中针茅、茼蒿、胡枝子对群落整体空间异质性作用分别为 -0.70、-0.46、-0.45,三者共同使群落整体的空间异质性保持在较低水平。另外,退耕 5 a 草地中的茼蒿、二裂委陵菜,退耕 10 a 草地中的砂珍棘豆、细叶菊对群落整体空间异质性正作用较强,差值分别为 0.21、0.23、0.34、0.39,而退耕 25 a 草地中,与三叶委陵菜相比,其余植物种对群落整体异质性影响均较小,即使是对群落起正异质性作用较强的翻白委陵菜、火绒草,其空间异质性指数差值也只分别为 0.14、0.16,说明该草地群落中三叶委陵菜对群落空间异质性起主导作用。

2.3 盖度及其空间异质性

2.3.1 不同退耕年限草地群落中各植物种平均盖度及其空间异质性

以退耕恢复草地各植物种平均盖度为

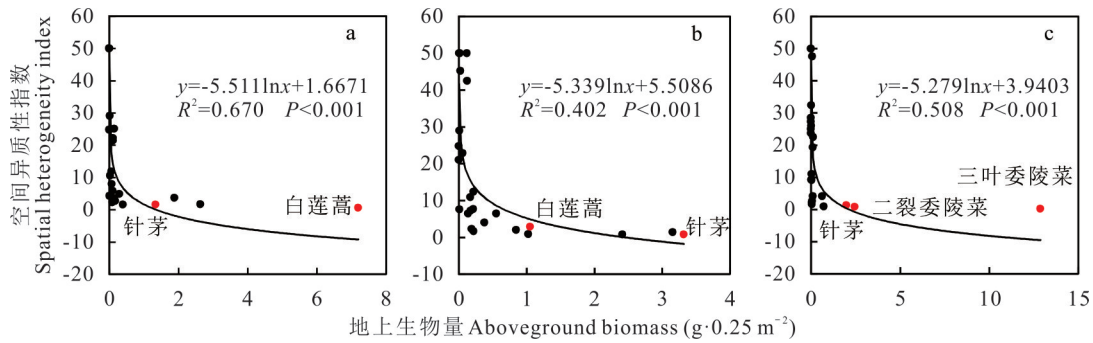


图2 不同退耕年限草地群落中每种植物的地上生物量与其空间异质指数(I_i)之间的关系

Fig. 2 Relationship between aboveground biomass of each plant and its spatial heterogeneity index (I_i) in grassland communities with different years of restoration

针茅: *Stipa capillata*; 白莲蒿: *Artemisia sacrorum*; 二裂委陵菜: *Potentilla bifurca*; 三叶委陵菜: *Potentilla freyniana*. a、b、c 分别表示退耕 5、10、25 a 的草地。图中每个点表示一种植物,下同。a, b and c respectively represent the grasslands of restoration 5, 10 and 25 years. Each point in the diagram represents a plant, the same below.

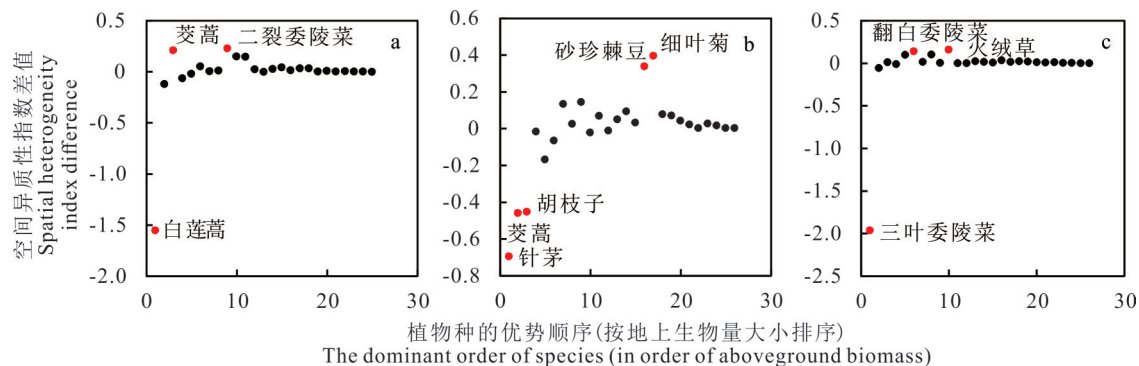


图3 利用 γ 分布模型计算不同退耕年限草地每种植物种的空间异质性作用

Fig. 3 The effects of each plant species with different restoration years on spatial heterogeneity were calculated by using γ distribution model

芨蒿: *Artemisia giraldii*; 胡枝子: *Lespedeza bicolor*; 砂珍棘豆: *Oxytropis racemose*; 细叶菊: *Chrysanthemum maximowiczii*; 翻白委陵菜: *Potentilla discolor*; 火绒草: *Leontopodium leontopodioides*. 下同 The same below.

横坐标,以 β 分布模型计算出的空间异质指数(I_i)为纵坐标作散点图(图4),空间异质指数随盖度平均值增大呈极显著的降低趋势($P < 0.001$),与退耕草地植物种地上生物量及其空间异质指数值之间的关系一致。3个退耕年限草地中空间异质指数(I_i)最小且优势顺序处于第1位的植物种仍分别为白莲蒿、针茅和三叶委陵菜,其中白莲蒿、针茅均趋向集群分布($I_i = 0.66$ 、 $I_i = 0.86$),三叶委陵菜呈现比随机分布更低的空间异质性($I_i = 0.13$)。

退耕 5 a 草地群落盖度最低,且其中盖度占比最高为白莲蒿,达 37.3%。退耕 10 a 草地相比退耕 5 a 草地群落盖度提高,且针茅等禾本科优质植物种盖度比例较高(37.6%),而退耕 25 a 草地群落盖度最高,但退化草地指示植物种三叶委陵菜占据了绝对优势,占比达 68.3%,优势顺序第 2 位的针茅占比仅有 7.7%,与地上生物量计算得到的结论一致(图 4)。综上,退耕恢复 10 a 草地优质植物种占比较高、质量较好,退耕恢复年限过长优质植物种针茅盖度反而降低、草质变劣。

2.3.2 组成群落的各植物种在盖度空间分布格局中的作用 把组成群落各植物种的平均盖度按照其大小排序,作为横坐标,以它们各自的空间异质指数差值作为纵坐标作散点图(图 5)。优势顺序靠前的植物种极大地降低了群落整体的空间异质性,优势顺序靠后的植物种对群落空间分布格局作用很小。其中,退耕 5 a 草地中白莲蒿、退耕 10 a 草地中针茅和退耕 25 a 草地中三叶委陵菜在群落中优势顺序为第 1 位,且对群落整体空间异质性

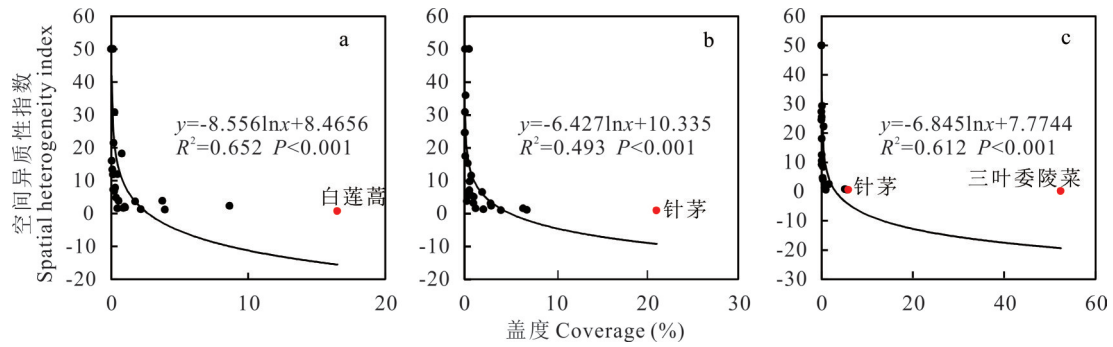


图 4 不同退耕年限草地群落中每种植物盖度与其空间异质性指数 (I_i) 之间的关系

Fig. 4 Relationship between the coverage of each plant and its spatial heterogeneity index (I_i) in grassland communities with different years of restoration

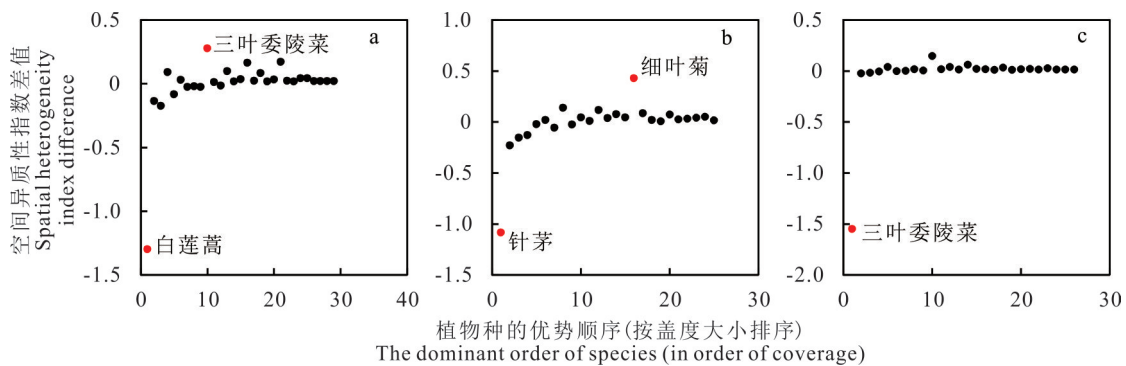


图 5 利用 β 分布模型计算不同退耕年限草地每种植物种对空间异质性的作用

Fig. 5 The effects of each plant species with different restoration years on spatial heterogeneity were calculated by using β distribution model

的降低作用最大, 差值分别为 -1.30 、 -1.09 和 -1.55 , 它们均对群落空间异质性起主导作用, 使群落的空间分布格局维持在较低水平。另外, 退耕 5、10 a 草地中对群落整体空间异质性正作用最强的分别为三叶委陵菜、细叶菊, 其空间异质性指数差值分别为 0.28 、 0.43 。退耕 25 a 草地中, 与三叶委陵菜相比, 其余植物种对群落空间分布格局作用影响均较小, 说明该草地群落中三叶委陵菜对群落空间分布格局起主导作用。

3 讨论

3.1 空间异质性测量方法

地上生物量是认识生态系统功能的基础, 是反映草地植物生产力特征以及揭示生态系统群落结构和功能的关键指标^[22]。在众多的草地植被调查方法中地上生物量调查的方法虽然最为精准, 但存在着植物一次性被刈割后不能立即进行下次调查以及调查过程会对草地造成破坏的缺点。植被盖度可用于科学评估干旱和半干旱地区植被恢复成效^[23], 且盖度测量克服了地上生物量测量的缺点, 不会对草地造成破坏性影响, 不需要花费更多的劳力与时间。本研究利用 γ 分布模型对地上生物量进行解析以及利用 β 分布模型对盖度进行解析是两种探究草地植物种空间异质性的常用方法^[15-16]。利用地上生物量和盖度两种测量指标分别计算不同退耕恢复年限草地植物种的空间分布格局, 得到的结果基本一致, 即草地植物群落空间异质性指数与其地上生物量和盖度呈负相关关系, 植物群落的平均地上生物量和盖度总体随退耕恢复年限增长而增加, 优势顺序靠前的植物种降低群落空间异质性。

3.2 不同退耕年限草地的恢复状况

许多研究表明, 短期退耕或封育有利于草地生态系统的恢复^[24-25], 且退耕年限越长, 草地生物量与植被盖度水平随之越大^[26-27], 本研究结论与其一致。但是, 本研究中退耕 10 年草地地上生物量水平略低于退耕 5 年草

地,这可能由于群落新增植物种生物量低于丢失植物种的生物量,且退耕5年草地中第1优势植物种白莲蒿的个体生物量水平较高,致使该年份群落整体生物量水平明显提高。尽管延长退耕年限可提高草地地上生物量与盖度水平,但退耕年限过长不利于草地的繁殖更新与再生,且不利于维持植物群落稳定性^[28-30]。郑翠玲等^[31]发现,对沙化草地围栏封育后,封育7年的草地比封育4、1年的草地退化指示植物占比降低。陈茂等^[32]发现封育10年后伊犁河谷地区有害毒草优势度上升。闫成才等^[33]发现草地围栏封育13年后植物群落结构和土壤理化性质不再改善。本研究退耕10年草地禾本科植物种的比例较高,分布较为均匀,退耕25年草地中反而三叶委陵菜、二裂委陵菜等多年生退化草地指示植物比例较高。尽管三叶委陵菜生物量和盖度水平较高,呈匍匐状,对黄土高原水土保持有一定作用,但从饲用价值考虑其可利用性较低,且不利于提高植物群落稳定性。这可能由于其以无性繁殖方式来完成种群的扩展,而无性繁殖所延伸的空间范围小,常形成小尺度范围的斑块状分布,不利于种群的大范围繁殖与更新,要想不断更新与演替,需要通过人为干扰的方法改变种群分布的空间异质性,且程积民等^[34]认为长期撂荒后群落的生长与结构特征受地面枯草层和生长环境影响,不利于草地的自然更新。因此,认为退耕恢复不应是无限期的,长期撂荒不利于黄土高原地区退耕地的保护,应当视草地恢复状况及时对退耕草地进行再利用。

3.3 不同退耕年限草地群落的空间分布格局

草地植物群落空间格局通常由生物和环境因素共同作用,是环境中各种物理、化学和生物因素综合影响与组成物种之间相互作用的结果,许多研究表明,草地利用方式是影响草地植物分布格局的重要因素^[9,35]。本研究中,不同退耕年限草地植物种群都表现出比随机分布更强的空间异质性,这与何晴波等^[36]、刘振国等^[37]的研究结论一致,即草原植物群落内种群的空间分布格局几乎都是偏离随机分布的。比较不同退耕恢复年限间群落空间异质性指数,发现随着退耕恢复年限延长,草地群落空间异质性指数呈降低趋势,地上生物量与盖度空间分布趋向均匀,这与蒋德明等^[38]的研究结论相似。本研究创新性地采用了空间异质性指数差值指标,用来表示某植物种在群落空间分布格局中所起的作用,结果表明优势顺序靠前的植物种对群落空间异质性作用较大,且多为负作用,而优势顺序靠后的植物种对群落空间分布格局作用很小,原因可能是地上生物量与盖度较大的植物种增加了群落的种间竞争,抑制了其他植物种的生长,且它们空间异质性指数低,在草地上分布均匀,从而极大地降低了群落的空间异质性。比较不同退耕恢复年限间植物种对群落整体空间分布格局的作用,发现退耕5和25 a的草地,即退耕年限过短或过长的草地,第1优势种白莲蒿和三叶委陵菜分别在群落中占绝对优势,对群落空间异质性起到主导作用,不利于提高草地稳定性,而退耕10 a草地由优势物种针茅、茭蒿、胡枝子共同作用,草地群落更为健康稳定。

4 结论

1)随着退耕恢复年限延长,草地植物群落的平均地上生物量和盖度总体呈增加趋势,而空间异质性指数呈降低趋势。

2)3个不同退耕恢复年限的草地群落空间异质性指数均随地上生物量和盖度平均值的增大呈现极显著的降低趋势。

3)退耕10年的草地与退耕5年的草地相比,针茅等禾本科植物种地上生物量及盖度比例较高,而在退耕25年的草地中,三叶委陵菜、二裂委陵菜等退化草地指示植物种逐渐占据绝对优势。退耕年限过长不利于禾本科等品质优良的植物种地上生物量及盖度的维持。

4)优势顺序靠前的植物种空间异质性指数差值多为负值,它们降低了群落整体的空间异质性,优势顺序靠后的植物种对群落空间分布格局作用很小。

参考文献 References:

- [1] Ren J Z, Xu G. The difficulties and opportunities for traditional agrarian culture on the Loess Plateau. *Pratacultural Science*, 2010, 27(3): 3-8.

- 任继周, 胥刚. 传统农耕文化在黄土高原上的困境与机遇. 草业科学, 2010, 27(3): 3—8.
- [2] Gong M. Effect of returning farmland to forest and grassland project on sustainable development of grassland industry in Shanxi Province. *Forestry of Shanxi*, 2024(2): 12—13.
龚梅. 山西省退耕还林还草工程对草业可持续发展影响. 山西林业, 2024(2): 12—13.
- [3] Liu Y W, Deng N, Yan J J, *et al.* Evaluation of the ecological effect of returning farmland to forest and grassland in the former concentrated contiguous impoverished area of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(11): 4719—4732.
刘亦文, 邓楠, 颜建军, 等. 中国原集中连片特困区退耕还林还草的生态效应评估. 生态学报, 2024, 44(11): 4719—4732.
- [4] Zou Y D, Zhang X P, He L, *et al.* Coupling development situation of agricultural eco-economic system in loess hilly and gully areas as farmland is returned to forest (grass) land—a case study at Wuqi County, Shanxi Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(3): 217—224.
邹亚东, 张晓萍, 何亮, 等. 退耕还林(草)背景下黄土丘陵沟壑区农业生态经济系统耦合发展态势——以陕西省吴起县为例. 水土保持通报, 2022, 42(3): 217—224.
- [5] Chen Y F, Dong M. Spatial heterogeneity in ecological systems. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(2): 346—352.
陈玉福, 董鸣. 生态学系统的空间异质性. 生态学报, 2003, 23(2): 346—352.
- [6] Eppinga M B, Haber E A, Sweeney L, *et al.* *Antigonon leptopus* invasion is associated with plant community disassembly in a Caribbean island ecosystem. *Biological Invasions*, 2022, 24(2): 353—371.
- [7] Qiu K, Li Z, Xie Y, *et al.* Desertification reversal promotes the complexity of plant community by increasing plant species diversity of each plant functional type. *Agronomy*, 2024, 14(1): 96.
- [8] Bai Y, Liu C, Huang Y, *et al.* Response of spatial heterogeneity of plant community height to different herbivore assemblages in Horqin sandy grassland. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022, 46(4): 394—404.
白悦, 刘晨, 黄月, 等. 科尔沁沙质草地植物群落高度空间异质性对不同放牧方式的响应. 植物生态学报, 2022, 46(4): 394—404.
- [9] Zhang X, Liu Y Q, Zhang C H, *et al.* Response of spatial heterogeneity of biomass to different long-term grazing intensity in desert steppe. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(4): 1243—1251.
张霞, 刘仰乔, 张灿浩, 等. 荒漠草原生物量空间异质性对长期不同放牧强度的响应. 草地学报, 2024, 32(4): 1243—1251.
- [10] Zhao A Z, Zhang A B, Liu H X, *et al.* Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of grain for green project in the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(3): 449—460.
赵安周, 张安兵, 刘海新, 等. 退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析. 自然资源学报, 2017, 32(3): 449—460.
- [11] Liu Y B, Liu B Y, Cheng C, *et al.* Spatio-temporal changes and influencing factors of vegetation coverage in Yulin City during the past 20 years since the implementation of the “Grain For Green” program. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 197—208, 218.
刘逸滨, 刘宝元, 成城, 等. 退耕还林草20年来榆林市植被覆盖度时空变化及影响因素分析. 水土保持学报, 2022, 36(2): 197—208, 218.
- [12] Yamamura Y, Cheng J M, Yasuda T, *et al.* Livestock-exclusion duration required for restoring grassland in semiarid, loess region in China: Estimate based on species composition measured from small-scale vegetation patterns. *Ecological Research*, 2021, 36(1): 161—176.
- [13] Shiyomi M, Okada M, Takahashi S, *et al.* Spatial pattern changes in aboveground plant biomass in a grazing pasture. *Ecological Research*, 1998, 13(3): 313—322.
- [14] Chen J. Statistical ecological studies of spatial variation of grass-soil ecosystems. Mito-shi: Ibaraki University, 2007.
- [15] Chen J, Shiyomi M, Yamamura Y. Distribution model and spatial variation of cover in grassland vegetation. *Grassland Science*, 2006, 52(4): 167—173.
- [16] Chen J, Hori Y, Yamamura Y, *et al.* Spatial heterogeneity and diversity analysis of macrovegetation in the Xilingol region, Inner Mongolia, China, using the beta distribution. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(6): 1110—1119.
- [17] Li W Z, Xie Y S, Li X, *et al.* Product management and grain supply and demand after the grain for green project in Wuqi County. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(4): 209—213.
李文卓, 谢永生, 李晓, 等. 吴起县退耕后农户生产经营与粮食供需状况. 水土保持通报, 2010, 30(4): 209—213.
- [18] Wang L P, Wei Z C, Liang W W, *et al.* Vegetation spatial distribution of in Shaanxi Province. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2015, 36(7): 63—68.

- 汪丽平, 魏志成, 梁卫卫, 等. 陕西省植被类型的空间分布. 家畜生态学报, 2015, 36(7): 63—68.
- [19] Chen J, Shiyomi M, Bonham C D, *et al.* Plant cover estimation based on the beta distribution in grassland vegetation. *Ecological Research*, 2008, 23(5): 813—819.
- [20] Chen J, Shiyomi M. Spatial pattern model of herbaceous plant mass at species level. *Ecological Informatics*, 2014, 24(6): 124—131.
- [21] Gao N N, Chen J, Zhang P L, *et al.* Effects of grazing intensity on the spatial distribution of aboveground biomass of alpine *Kobresia* meadow in Tibetan. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22(2): 255—260.
高宁宁, 陈俊, 张鹏莉, 等. 放牧对西藏高寒嵩草草甸地上生物量空间分布的影响. 草地学报, 2014, 22(2): 255—260.
- [22] Liu T X, Zhao X Y, Duan L M, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of aboveground biomass in typical grassland ecosystem in Xilin River Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2024, 54(2): 604—618.
刘廷玺, 赵心毓, 段利民, 等. 锡林河流域草原生态系统地上生物量时空分布特征及其影响因素. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(2): 604—618.
- [23] Zhang S L, Yang D W, Yang Y T, *et al.* Excessive afforestation and soil drying on China's Loess Plateau. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2018, 123(3): 923—935.
- [24] Song Y, Wang Y Q, Jin L, *et al.* Quantitative contribution of the Grain for Green Program to vegetation greening and its spatiotemporal variation across the Chinese Loess Plateau. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(11): 1878—1891.
- [25] Hao H M, Liu Y, Wang D, *et al.* Influence of restoration on community plant diversity and spatial structure of typical grasslands. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(4): 754—759.
郝红敏, 刘玉, 王冬, 等. 典型草原开垦弃耕后不同年限群落植物多样性和空间结构特征. 草地学报, 2016, 24(4): 754—759.
- [26] Dong L B, Hai X Y, Wang X Z, *et al.* Effects of plant community dynamics on ecosystem carbon stocks since returning farmlands to grasslands on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(23): 8559—8569.
董凌勃, 海旭莹, 汪晓珍, 等. 黄土高原退耕还草地植物群落动态对生态系统碳储量的影响. 生态学报, 2020, 40(23): 8559—8569.
- [27] Liu C, Ye Q R, Li J W, *et al.* Influences of the uncultivation duration of arable lands and slope aspect on the biomass of shrub and subshrub life-form and species richness on lands in Loess Hilly Region. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(9): 2826—2833.
刘冲, 野起瑞, 李江文, 等. 黄土丘陵区撂荒年限和坡向对灌丛生物量及丰富度的影响. 草地学报, 2023, 31(9): 2826—2833.
- [28] Cheng J M, Zou H Y. The rational utilization of grassland and successional course of grassland vegetation in the Loess Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 1995, 4(4): 17—22.
程积民, 邹厚远. 黄土高原草地合理利用与草地植被演替过程的试验研究. 草业学报, 1995, 4(4): 17—22.
- [29] Feng X, Liu B J, Liu J K, *et al.* Study on the dynamics of artificial fenced grassland vegetation, Ningxia Yanchi County, semi-arid regions of China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(10): 1961—1970.
冯湘, 刘宝军, 刘建康, 等. 半干旱区人工封育草地植被动态研究——以宁夏盐池县为例. 生态环境学报, 2020, 29(10): 1961—1970.
- [30] Song D C, Wang L D, Wu H, *et al.* A study of change in soil characteristics with recovery time in degraded grassland in Minqin. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(2): 59—68.
宋达成, 王理德, 吴昊, 等. 民勤退耕区次生草地土壤特性研究. 草业学报, 2021, 30(2): 59—68.
- [31] Zheng C L, Cao Z L, Wang X, *et al.* Effects of enclosure on vegetations recovery in desertified grassland in Hulunbeir. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(3): 78—81.
郑翠玲, 曹子龙, 王贤, 等. 围栏封育在呼伦贝尔沙化草地植被恢复中的作用. 中国水土保持科学, 2005, 3(3): 78—81.
- [32] Chen M, Ma X L, Chen L Y, *et al.* The response of community characteristics and plant diversity to enclosure years in the Nalati Mountain Meadow. *Journal of Xinjiang Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2024, 43(1): 57—66.
陈茂, 马晓林, 陈路瑶, 等. 伊犁河谷山地草甸群落特征和植物多样性对封育年限的响应. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2024, 43(1): 57—66.
- [33] Yan C C, Wang Y, Yang Z F, *et al.* Effects of long-term enclosure on plant diversity and soil physicochemical properties of meadow grassland on the south slope of Tianshan Mountains. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2021(13): 91—96.
闫成才, 王域, 杨志峰, 等. 围栏封育对天山南坡中段草甸草原植物多样性和土壤理化性质的影响. 黑龙江畜牧兽医, 2021(13): 91—96.

- [34] Cheng J M, Jing Z B, Jin J W, *et al.* Restoration and utilization mechanism of degraded grassland in the semi-arid region of Loess Plateau. *Scientia Sinica (Vitae)*, 2014, 44(3): 267–279.
程积民, 井赵斌, 金晶炜, 等. 黄土高原半干旱区退化草地恢复与利用过程研究. *中国科学: 生命科学*, 2014, 44(3): 267–279.
- [35] Ren H Y, Han G D, Ohm M, *et al.* Do sheep grazing patterns affect ecosystem functioning in steppe grassland ecosystems in Inner Mongolia? *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 213(15): 1–10.
- [36] He Q B, Zhao L P, Tan S T, *et al.* Response of spatial heterogeneity of grassland communities to different disturbance regimes in typical steppe of Yunwu Mountain. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2018, 46(9): 9–17.
何晴波, 赵凌平, 谭世图, 等. 云雾山典型草原群落空间异质性和不同干扰方式的响应. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(9): 9–17.
- [37] Liu Z G, Li Z Q, Fu L K, *et al.* Small-scale spatial pattern of *Potentilla acaulis* population under different grazing intensities. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2006, 11(3): 308–312.
刘振国, 李镇清, 富兰克, 等. 不同放牧强度下星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)种群小尺度空间格局. *应用与环境生物学报*, 2006, 11(3): 308–312.
- [38] Jiang D M, Li M, Ya T M X, *et al.* Effects of enclosure on vegetation characteristics and spatial heterogeneity of *Caragana microphylla* community in Horqin Sandy Land. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(11): 2159–2164.
蒋德明, 李明, 押田敏雄, 等. 封育对科尔沁沙地小叶锦鸡儿群落植被特征及空间异质性的影响. *生态学杂志*, 2009, 28(11): 2159–2164.