

网络出版时间:2019-11-27 15:19 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.06.002
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20191127.0922.004.html

放牧和刈割对大针茅草原羊草空间异质性的影响

郑佳华,张 峰,赵天启,赵萌莉

(内蒙古农业大学 草原与资源环境学院,内蒙古 呼和浩特 010010)

【摘 要】 【目的】分析不同利用方式下小尺度羊草种群的空间异质性及其分布,为草地的可持续利用提供参考。【方法】以大针茅典型草原优势种羊草为研究对象,基于地统计法,利用变异函数、空间自相关系数、分形维数以及克里格插值法,分析放牧、刈割和围封(对照)利用方式下羊草种群空间异质性的变化。【结果】放牧可显著提高羊草种群密度($P<0.05$),3 种利用方式下羊草种群密度均值表现为放牧($48.38 \text{ 株}/\text{m}^2$)>围封($12.53 \text{ 株}/\text{m}^2$)>刈割($7.51 \text{ 株}/\text{m}^2$)。不同利用方式下,羊草种群空间分布的最优模型均为球状模型,羊草种群空间异质性表现为围封>放牧>刈割,羊草种群的空间分布格局主要受结构性因素的影响。在围封样地中,羊草种群呈现出较小尺度内变异较大的带状分布;在放牧样地中,羊草种群呈现出较大尺度内变异较小的片状分布;在刈割样地中,羊草种群以变异性大的高密度点状斑块镶嵌于平坦的低密度斑块上,呈现点状分布。【结论】放牧和刈割对大针茅草原羊草种群密度和空间异质性均有影响。

【关键词】 羊草种群;草地利用;空间异质性;地统计学;克里格插值法

【中图分类号】 S812.8

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2020)06-0010-08

Effect of grazing and moving on spatial heterogeneity of *Leymus chinensis* in stipa grandis steppe

ZHENG Jiahua, ZHANG Feng, ZHAO Tianqi, ZHAO Mengli

(College of Grassland, Resource and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China)

Abstract: 【Objective】 This study analyzed the spatial heterogeneity and distribution of *Leymus chinensis* populations at small scales under different utilization regimes. 【Method】 The dominant species of *L. chinensis* in typical grassland of stipa grandis was taken as the research object. Based on statistical method, the spatial heterogeneity changes of leymus chinensis population under different utilization regimes of grazing (G), mowing (M) and enclosure (CK) were analyzed using variogram, spatial autocorrelation coefficient, fractal dimension and kriging interpolation method. 【Result】 Grazing significantly increased the density of *L. chinensis* population ($P<0.05$) and the density of *L. chinensis* population was in the order of grazing ($48.38 \text{ individuals}/\text{m}^2$)>enclosed ($12.53 \text{ individuals}/\text{m}^2$)>mowing ($7.51 \text{ individuals}/\text{m}^2$). The optimal spatial distribution model of *L. chinensis* populations under different utilization regimes was spherical model. The spatial heterogeneity of *L. chinensis* population was in the order of enclosed>grazing>mowing. The spatial distribution pattern of *L. chinensis* population was mainly affected by structural factors under three different utilization regimes. In the enclosed plot, *L. chinensis* populations showed a band-like distribution with large variation within small scales. In the grazing plot, *L. chinensis* populations showed a patchy distribution with less variation within larger scales. In the mowing plot, *L. chinensis* population showed a point-like distribution of high-density point-like patches with large variability embedded

【收稿日期】 2019-04-26

【基金项目】 国家自然科学基金项目(31861143001)

【作者简介】 郑佳华(1996—),男,山西晋中人,在读硕士,主要从事草地生态学研究。E-mail:943403657@qq.com

【通信作者】 赵萌莉(1963—),女,陕西华阴人,教授,博士生导师,主要从事草地生态学研究。E-mail:nmgmlzh@126.com

in flat low-density patches. 【Conclusion】 Grazing and moving had impacts on population density and spatial heterogeneity of *L. chinensis*.

Key words: *Leymus chinensis* populations; grassland use; spatial heterogeneity; geo-statistics; kriging interpolation

空间异质性是指某些生态学特征在空间分布的复杂性和不确定性,其与生态学过程以及时空格局之间具有相互影响的复杂关系^[1]。从1990年开始,空间异质性成为生态学研究的重点问题^[2],在一些有关生态系统功能和生态系统过程的研究中经常出现^[3-6]。Stowe等^[7]在1979年首次开展了有关小尺度空间分布格局的研究。此后,小尺度的种群和群落空间研究得以快速发展^[8-10],因为小尺度的种群空间分布格局与干扰过程以及周边环境的异质性有着密切关系^[11],其也是研究种内关系、种间关系和种群特性的有效方法^[12]。地统计学方法是研究空间格局和等级特征的有力工具,且被越来越多地应用到植物群落和种群的空间异质性研究上^[13-14]。变异函数是地统计学的核心,其以克里格(Kriging)插值法为手段,可以有效地描述各种属性生态学特征的空间异质性^[15]。近年来,该方法的研究对象主要集中在土壤各种属性的空间异质性上,如土壤酶活性^[16]、土壤有机质^[17]、土壤元素含量^[18]等,针对植被特征尤其是单一种群密度的研究相对较少。

大针茅(*Stipa grandis*)草原作为内蒙古典型草原的典型代表,是亚洲中部特殊的丛生性禾草草原,也是欧亚大陆草原地区温带半干旱草原的两种主要群落类型之一^[19]。大针茅草原在较小的时空尺度上,其群落内部可能由于受到微地形及放牧、刈割等人为干扰或者化学元素循环等因素的共同作用,使其具有土壤化学元素分布、土壤养分分布、植被斑块格局等空间异质性,这些小尺度上的空间异质性现象很可能推动了大针茅草原群落的演替^[20]。羊草作为大针茅草原的优势种之一,具有营养价值高、适口性好、耐牧等优点,在畜牧业生产中具有很高的价值^[21]。目前,有学者已对羊草植被下土壤特征的空间异质性及空间分布进行了研究^[22-23],但针对羊草种群在不同处理下的空间异质性研究尚较少。本研究以刈割、自由放牧及围封3种利用方式下大针茅草原的优势种羊草种群为研究对象,基于地统计学,以围封样地为对照,利用GS⁺9.0对小尺度上的羊草种群进行空间分析,旨在探讨小尺度上刈割和放牧对羊草种群空间异质性的影响及其空间分布规律,为草地的可持续利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于内蒙古锡林浩特市毛登牧场(116.03°~116.50°E,44.80°~44.82°N)。该牧场建于1958年,总面积585 km²,海拔910~1 377 m。地带性土壤为栗钙土。该地区属温带大陆性气候,年平均温度0~1℃,最热月份为7月,平均气温为21.2℃,最冷月份为1月,平均气温为-19.4℃。年平均降水量300~360 mm,多集中在6~8月,无霜期90~115 d,同期全年日照2 800 h,光照、热、降水同期出现。植物主要以禾本科(Poaceae)、豆科(Leguminosae)、百合科(Liliaceae)、菊科(Asteraceae)、藜科(Chenopodiaceae)等为主。建群种为大针茅(*Stipa grandis*),优势种有羊草(*Leymus chinensis*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*),亦为牧场的主要牧草。常见的物种还有知母(*Anemarrhena asphodeloides*)、黄囊苔草(*Carex korshinskyi*)、黄花黄芪(*Astragalus luteolus*)、冰草(*Agropyron cristatum*)以及冷蒿(*Artemisia frigida*)等。

1.2 试验设计

设置放牧、刈割2种不同利用方式的草地样地,以围封不利用的草地作为对照。每个处理设置3个重复。其中放牧样地全年自由放牧,放牧年限超过50年,放牧利用率通过移动围笼测定约为35.6%,属于轻度放牧;对照样地自2005年开始围栏封育;刈割样地于每年8月底进行1次刈割,刈割年限已超过20年。试验样地于2014年设置并进行相应处理。

试验于2015年8月中旬的生物量高峰期进行,在不同处理中随机选择1块样地,再从中随机选取地形一致、平坦且能代表样地内植物生长状况的地区,设置1个10 m×10 m的大样方,将其划分为100个1 m×1 m的小样方,以大样方的西北角为坐标原点(1,1),水平向东,垂直向南延伸,东南角坐标为(10,10),记录每个小样方内的羊草株丛数。

1.3 数据分析

1.3.1 羊草种群密度 使用Microsoft Excel 2010对原始数据进行整理。使用SAS 9.0软件对羊草密度均值进行方差检验,显著水平 $\alpha=0.05$,处理间

多重比较使用 Duncan 检验。使用 SPSS 20.0 对数据进行正态检验,采用单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验,显著水平为 $\alpha=0.05$ 。即当 $P_{KS}>0.05$,则服从正态分布;若 $P_{KS}<0.05$,则不服从正态分布;需在数据转换后进行正态性检验,通过检验后再进行地统计学分析。由于本试验中刈割样地和放牧样地中的羊草种群密度未通过正态分布检验,对刈割样地中羊草种群密度进行 $\ln(X)$ 对数转换,对放牧样地中羊草种群密度进行 $\sqrt{x}$ 开方转换。

1.3.2 羊草种群空间分布格局 空间分布格局通常是几个因素共同作用的结果,会受到外部过程空间结构的响应,也会受到空间自相关的影响。空间自相关系数 Moran I 可以反映本身所具有的空间结构,其计算公式如下:

Moran I =

$$\left[\frac{1}{w(d)}\right]\frac{\sum_{i=1, i \neq j}^m \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij}(d)(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}$$

式中: $w(d)$ 为每个距离分级的取样位置对的数量, $w_{ij}(d)$ 为距离分级连接度矩阵, x_i, x_j 为变量 x 在 i 和 j 取样点的值。空间自相关系数为正值(0~1)表示正相关,负值(-1~0)表示负相关,近似为 0 时表示不存在空间自相关。使用 GS⁺9.0 软件进行羊草种群空间自相关系数的相关计算。

变异函数可以用来对空间格局的随机性和结构性进行分析,其计算公式如下:

$$r(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i+h)-Z(x_i)]^2。$$

式中: h 表示步长; $N(h)$ 表示间距为 h 的样本对的数目; $Z(x_i+h)$ 和 $Z(x_i)$ 分别表示变量 $Z(x)$ 在空间位置 x_i+h 和 x_i 上的实测值, $i=1,2,\cdots,N(h)$ 。

变异函数主要包括以下几个参数:块金值(C_0)、基台值(C_0+C)及变程(A)。块金值(C_0)是原点上

大于 0 的截距,表示由于随机效应或测定误差造成的空间异质性。基台值(C_0+C)包括块金值(C_0)和空间结构值(C),用于表示样品总空间异质性的 大小,其中空间结构值(C)表示的是空间结构因素造成的空间异质性。另外,还常用结构比 $C/(C_0+C)$ 表示空间结构因素造成的空间异质性占总体空间异质性变异的大小。变程(A)表示空间自相关的最大距离,当取样点的距离大于该值时就不会对数据的空间结构产生影响。

使用 GS⁺9.0 软件进行半方差函数分析,得到羊草种群空间分布的最优模型以及分形维数,使用克里格插值法绘制 2D 平面图和 3D 立体图,进而分析羊草种群的空间分布格局。

2 结果与分析

2.1 羊草种群的数量特征

对不同利用方式下的羊草种群进行描述性统计,结果(表 1)表明,不同利用方式对羊草种群密度存在显著影响,与对照样地和刈割样地相比,放牧样地中的羊草种群密度显著增加($P<0.05$)。不同利用方式下羊草种群密度具体表现为:放牧(48.38 株/ m^2)>围封(12.53 株/ m^2)>刈割(7.51 株/ m^2)。结合变异系数和羊草种群密度可以发现,刈割样地中虽然羊草密度最小,但变异系数达到了 98.22%,表明刈割样地中羊草种群密度很小且空间分布不均匀,空间变异程度高;放牧样地中羊草种群密度最大但变异系数相对较小,表明其空间分布较为均匀,空间变异程度较低;围封样地中羊草种群密度中等且变异系数最低,表明其空间分布均匀,空间变异程度很低。结合羊草种群密度变化幅度及方差可以发现,放牧样地中羊草种群密度变化幅度最大,为 138 株/ m^2 ;刈割样地次之,为 30 株/ m^2 ;围封样地最小,为 27 株/ m^2 。

表 1 羊草种群密度的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics for population density of *Leymus chinensis*

样地处理 Treatment	密度均值/(株·m ⁻²) Mean	标准误差 SE	标准差 SD	变异系数/% CV	方差 variance	最小值/(株·m ⁻²) Minimum	最大值/(株·m ⁻²) Maximum
围封 Enclosed	12.53 b	0.74	7.19	57.38	51.65	1	28
放牧 Grazing	48.38 a	3.11	30.95	63.97	958.09	3	141
刈割 Moving	7.51 b	0.89	7.37	98.22	54.37	1	31

注:同列数据后标不同字母表示处理间存在显著差异($P<0.05$)。下同。
Note: Different letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

2.2 羊草种群密度的空间自相关系数

对羊草种群密度的空间自相关系数 Moran I 进行分析,结果见图 1。由图 1 可以看出,围封样地和

放牧样地的空间自相关系数均随着分隔距离的增大而减小,并从正值逐渐变为负值。表明在小尺度上,随着尺度增大围封和放牧样地中羊草种群密度的空

间自相关性均逐渐减弱,直到成为负值而不再有自相关关系。而在刈割样地中,羊草种群密度的空间自相关系数随着尺度的增大先减小后增大,有从负

值增长为正值的趋势,表明在该样地中存在一个明显的较大的斑块。

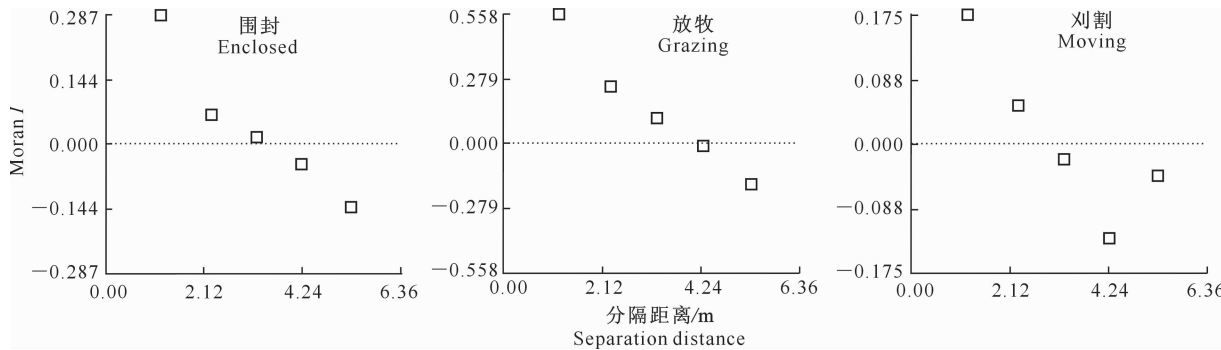


图1 不同利用方式下羊草空间自相关系数 Moran I 的分析

Fig.1 Moran I analysis of *Leymus chinensis* under different utilization regimes

2.3 羊草种群密度的变异函数

对不同利用方式下羊草种群密度的变异函数参数进行分析,并绘制变异函数半方差图,根据分析结果(表2和图2)可知,对照、放牧、刈割3块样地中的最优拟合模型均为球状模型(spherical model),且3个模型的决定系数 R^2 分别为0.971,0.986和

0.960,模型拟合程度均很高,可以准确、有效地反映羊草种群密度的空间分布格局。从变异函数半方差图(图2)可以看出,不同利用方式下变异函数的变化规律相同,表现为小尺度上的变异函数较小,随着尺度增大,变异函数也随之增大,之后逐渐趋于平稳。

表2 羊草空间分布的变异函数参数

Table 2 Variation function parameters of *Leymus chinensis* spatial distribution

处理 Treatment	最优模型 Best model	块金值 Nugget	基台值 Sill	结构比 Nugget/Sill	变程 Range	残差平方和 RSS	决定系数 R^2
围封 Enclosed	球状模型 Spherical	9.20	58.99	0.844	4.29	8.040	0.971
放牧 Grazing	球状模型 Spherical	0.46	6.93	0.934	9.57	0.222	0.986
刈割 Moving	球状模型 Spherical	0.11	0.92	0.879	2.97	1.703	0.960

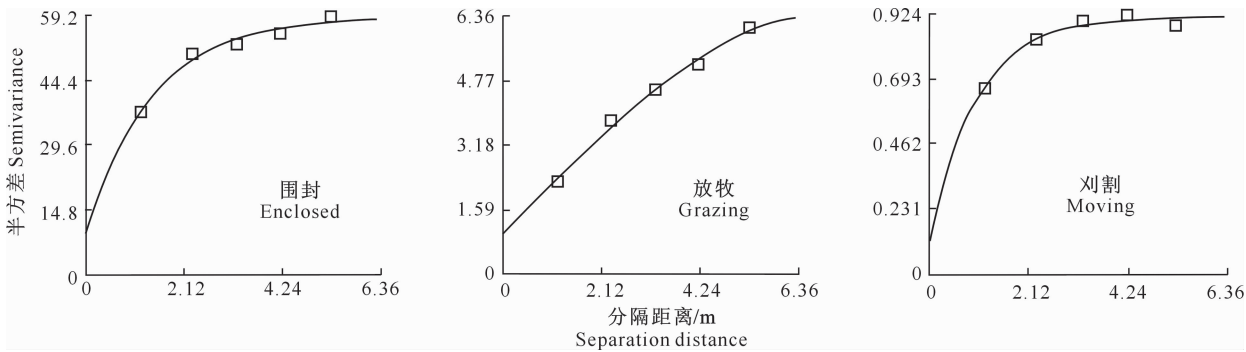


图2 不同利用方式下羊草种群变异函数的半方差图

Fig.2 Semi-variogram of *Leymus chinensis* under different utilization regimes

由表2可以看出,对对照样地羊草种群密度的变异程度最大,基台值($C_0 + C$)为58.99;放牧样地次之,为6.93;刈割样地最小,仅有0.92。对对照样地羊草种群密度的空间分布受随机因素影响最大,块金值(C_0)为9.20;放牧样地次之,为0.46;刈割样地最小,为0.11。对对照样地空间自相关性最强,而结构比($C/(C_0 + C)$)最小,说明结构性因素是导致其空间异质性的主要原因;而放牧和刈割样地的空间自

相关性相对较弱,说明结构性因素和随机因素共同导致其空间异质性。

由表2可知,3种样地的变程(A)表现为:放牧>对照(围封)>刈割。即在较大尺度内,放牧样地羊草种群密度具有一定的空间自相关性,对对照样地次之,刈割样地最小。结合空间自相关系数可知,刈割样地的变程与其空间自相关系数从正值减小到0的表现相一致,表明变程可以反映羊草种群密度空

间自相关性的大小。

2.4 羊草种群密度的分形维数

分形维数可以反映羊草种群密度在空间分布的复杂情况。本试验中,3 种利用方式下羊草种群密度的分形维数表现为刈割(1.899)>对照(1.852)>放牧(1.676),其分形维数都比较大,表明 3 种利用方式下的半方差函数曲线均比较平滑,空间分布格局的变异主要体现在小尺度上,而且空间分布格局都较为简单。但相对而言,放牧样地的分形维数较小,说明其空间结构性较差。

2.5 羊草种群密度的空间分布平面图

为了更清晰地了解羊草种群的空间分布格局,利用克里格插值法绘制 3 种不同利用方式下羊草种群密度的空间分布平面图,结果见图 3。

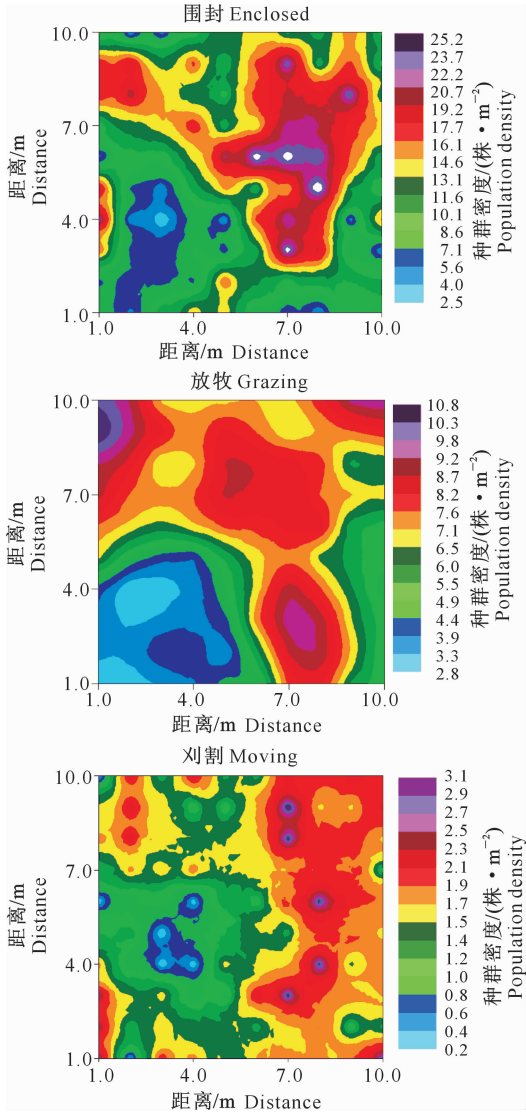


图 3 不同利用方式下羊草空间分布的 2D 平面图
Fig. 3 2D view of *Leymus chinensis* spatial distribution under different utilization regimes

由图 3 可见,对照样地中形成了 2 处明显的大斑块,其中高密度斑块是羊草种群密度高的区域,低密度斑块是羊草种群密度低的区域,高密度斑块位于东北部,低密度斑块位于西南部,呈现出由高密度斑块向四周扩散的趋势。放牧样地在西南部形成了 1 个明显的低密度斑块,在四周形成了 4 个高密度斑块,且 4 个斑块间连通性较好。刈割样地中部形成 1 个明显的低密度大斑块,在东部形成了南北向排列的几处高密度斑块,西北角与东南角也有高密度的小斑块形成。

2.6 羊草种群密度的空间分布立体图

利用克里格插值法绘制 3 种不同利用方式下羊草种群密度的空间分布立体图如图 4 所示,图中峰值的尖锐程度表示小范围内羊草密度变化的速率,起伏程度表示空间异质性的 大小。

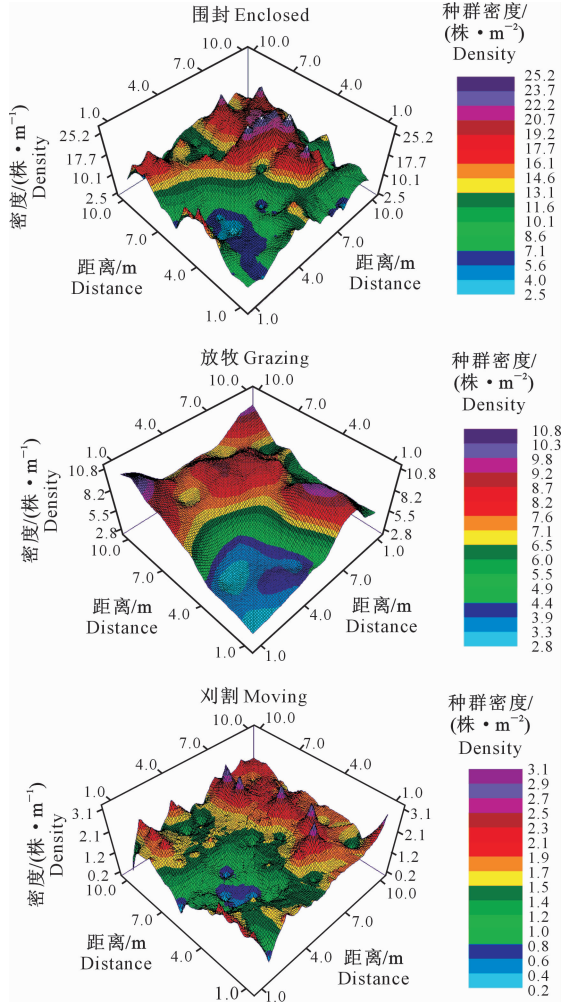


图 4 不同利用方式下羊草空间分布的 3D 立体图
Fig. 4 3D view of *Leymus chinensis* spatial distribution under different utilization regimes

由图 4 可以看出,对照样地形成了从西北到东

南的2条带状斑块分布,其中高密度带状斑块起伏较为剧烈,连贯性较好,峰值较尖锐;放牧样地整体空间分布平坦,但形成了4个明显的高密度斑块,起伏变化较小,峰值较为平缓;刈割样地在东部和西部分别形成了南北向的1个高密度带状斑块和1个低密度带状斑块,二者的过渡部分起伏剧烈,峰值较为尖锐。

3 讨论

3.1 利用方式对羊草种群密度的影响

放牧和刈割是大针茅草原最主要的利用方式,均会对草原的生态学特征产生一定影响^[20],其中最直观的影响体现在草原植被的种群密度上。本试验发现,不同利用方式会对羊草种群密度产生显著影响。与围封样地和刈割样地相比,轻度放牧显著增加了羊草种群密度,这与王仁忠等^[24]“适度放牧下羊草种群占群落的绝对优势地位”的研究结果基本一致。杨殿林等^[25]发现,适度放牧下羊草生产力最高,随着放牧强度增大,羊草种群数量急剧下降。放牧作为天然草原最主要的人为干扰因素,会对草原生态系统产生显著影响,在低强度放牧下,家畜啃食会在一定程度上刺激羊草的补偿性生长作用和无性繁殖,家畜的践踏也能在一定程度上促进羊草根茎的生长和繁殖,此外家畜的排泄物也会对土壤营养元素起到补充作用,导致适度放牧处理下羊草种群密度显著增大^[26]。与围封样地相比,刈割能降低羊草种群密度,但二者差异未达到显著水平,这与前人的研究结果^[27-28]基本一致。可能是由于连年刈割条件下,大量营养物质被移除,导致草地营养元素减少,使种群处于一种收支不平衡的状态,羊草种群密度也随之降低。

3.2 利用方式对羊草种群密度空间分布格局的影响

利用地统计学方法可以很好地分析植物种群的空间分布格局。本试验表明,不同利用方式下羊草种群密度的空间异质性表现为围封>放牧>刈割。前期研究发现,刈割样地的大针茅种群密度的空间异质性最大,放牧样地次之,围封样地最小^[29],与本研究中羊草种群的空间分布格局不同,这可能是由于围封样地中的大针茅种群空间分布均匀,作为建群种的大针茅在种间竞争中处于优势地位,使得羊草种群的分布更加密集,竞争能力增强,因此空间异质性较大。前人研究认为,适度放牧会提高植物种群的空间异质性^[12,30],与本研究结果不同,这可能

与选取的植物种群以及样地间土壤组成不同有关。黄琛等^[9]研究发现,只有少部分植物种群的空间异质性会随着放牧强度的增大而提高,意味着放牧对不同植物种群空间异质性的影响并不相同。如希吉日塔娜等^[31]研究发现,放牧降低了荒漠草原短花针茅种群的空间异质性及其空间分布格局的复杂性。

结构性因素,如土壤营养元素的空间分布异质性决定了植被空间分布的异质性^[32],除此之外,植被异质性与地形、草地利用方式等结构性因素有关^[12,33]。本试验中,3种利用方式下羊草种群密度的结构比均较大,均在0.75以上,表示空间自相关性较强,受家畜采食和践踏作用等随机因素的干扰较小,受结构性因素影响较大。本试验选取的是地形平坦、一致的样地,基本排除了地形的影响。结合3D图分析发现,围封样地中,羊草种群空间异质性仅受土壤资源的影响,形成了带状分布;而在放牧样地中,羊草作为家畜喜食的优良牧草,受到放牧家畜采食的影响,特别是高密度斑块羊草在家畜采食和践踏下呈现破碎化,分布更加平均,形成了均匀的片状分布;在刈割样地中,刈割处理导致一二年生植物数量增加,物种多样性增强,羊草优势地位下降^[34],在这种竞争条件下,羊草的生长更加密集,空间分布为点状斑块分布。

4 结论

在大针茅草原上,放牧可以显著提高羊草的种群密度。不同利用方式下,羊草种群的空间异质性表现为围封>放牧>刈割。在围封样地内,羊草种群呈现出较小尺度内变异较大的带状分布;在放牧样地中,羊草种群呈现出较大尺度内变异较小的片状分布;在刈割样地内,羊草种群以变异性大的高密度点状斑块镶嵌于平坦的低密度斑块上,总体上呈现出点状分布格局。

【参考文献】

- [1] Li H, Reynolds J F. On definition and quantification of heterogeneity [J]. *Oikos*, 1995, 73(2): 280-284.
- [2] Kareiva P. Special feature: space; the final frontier for ecological theory [J]. *Ecology*, 1994, 75(1): 1.
- [3] Kolasa J, Pickett S T, Allen T F H. *Ecological heterogeneity* [M]. New York: Springer-Verlag, 1991.
- [4] Risser P G. Landscape ecology: directions and approaches [J]. *Ecology*, 2013, 28(3): 367-369.
- [5] Turner M G. Landscape heterogeneity and disturbance [J]. *Ecology*, 1987, 70(1): 292-293.
- [6] Turner M G, Gardner R H. *Quantitative methods in landscape*

- ecology [M]. New York: Springer-Verlag, 1991.
- [7] Stowe L G, Wade M J. The detection of small-scale patterns in vegetation [J]. Journal of Ecology, 1979, 67(3): 1047.
- [8] 卫智军, 张 爽, 吕世杰, 等. 春季休牧后放牧强度变化对短花针茅荒漠草原主要植物种群空间分布的影响 [J]. 生态环境学报, 2016, 25(5): 729-736.
- Wei Z J, Zhang S, Lü S J, et al. Effect of grazing intensity after spring banning grazing on spatial distribution of dominant population in *Stipa breviflora* desert steppe [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(5): 729-736.
- [9] 黄 琛, 张 宇, 王 静, 等. 不同放牧强度下短花针茅荒漠草原植被的空间异质性 [J]. 植物生态学报, 2014, 38(11): 1184-1193.
- Huang C, Zhang Y, Wang J, et al. Spatial heterogeneity of vegetation under different grazing intensities in a *Stipa breviflora* desert steppe [J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2014, 38(11): 1184-1193.
- [10] 刘红梅, 卫智军, 杨 静, 等. 不同放牧制度对荒漠草原短花针茅空间异质性的影响 [J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(8): 138-143.
- Liu H M, Wei Z J, Yang J, et al. Effect of different grazing systems on spatial heterogeneity of *Stipa breviflora* desert steppe [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(8): 138-143.
- [11] 徐化成, 范兆飞, 王 胜. 兴安落叶松原始林林木空间格局的研究 [J]. 生态学报, 1994, 14(2): 155-160.
- Xu H C, Fan Z F, Wang S. A study in spatial pattern of trees in virgin *Larix gmelini* forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 1994, 14(2): 155-160.
- [12] 王本洋, 余世孝. 种群分布格局的多尺度分析 [J]. 植物生态学报, 2005, 92(2): 235-241.
- Wang B Y, Yu S X. Multi-scale analysis of population distribution pattern [J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2005, 92(2): 235-241.
- [13] 王 猛, 汪 季, 蒙仲举. 巴丹吉林沙漠东缘天然梭梭种群空间分布异质性 [J]. 生态学报, 2016, 36(13): 1-9.
- Wang M, Wang J, Meng Z J. Spatial heterogeneity of natural *Haloxylon ammodendron* populations at Ta-MuSu, Badain Jaran Desert, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(13): 1-9.
- [14] Xie Y, Qiu K, Xu D, et al. Spatial heterogeneity of soil and vegetation characteristics and soil-vegetation relationships along an ecotone in Southern Mu Us Sandy Land, China [J]. Journal of Soils & Sediments, 2015, 15(7): 1584-1601.
- [15] 颜 亮, 周广胜, 张 峰, 等. 内蒙古荒漠草原植被盖度的空间异质性动态分析 [J]. 生态学报, 2012, 32(13): 4017-4024.
- Yan L, Zhou G S, Zhang F, et al. Spatial heterogeneity of vegetation coverage and its temporal dynamics in desert steppe, Inner Mongolia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4017-4024.
- [16] 刘 烁, 王秋兵, 史文娇, 等. 喀斯特典型集水区土壤水解酶活性空间异质性及其影响因素 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2615-2623.
- Liu S, Wang Q B, Shi W J, et al. Spatial heterogeneity of soil hydrolase activities and their influencing factors in a typical Karst catchment of Guizhou province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(8): 2615-2623.
- [17] 景 莎, 田 静, Luke M, 等. 长白山原始阔叶红松林土壤有机质组分小尺度空间异质性 [J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6445-6456.
- Jing S, Tian J, Luke M, et al. Small-scale spatial heterogeneity of soil organic matter fractions within an original broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20): 6445-6456.
- [18] 陈海生, 刘大双, 刘国顺. 河南襄城植烟区土壤中量元素含量的空间异质性 [J]. 土壤通报, 2010, 41(3): 582-589.
- Chen H S, Liu D S, Liu G S. Spatial variability of soil available calcium, available magnesium and available sulphur in Xiangcheng tobacco planting fields, Henan province [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(3): 582-589.
- [19] 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古植被 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- Inner Mongolia Ningxia comprehensive expedition team, Chinese academy of sciences. Inner Mongolia vegetation [M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [20] 宁 发, 徐 柱, 单贵莲. 干扰方式对典型草原土壤理化性质的影响 [J]. 中国草地学报, 2008, 30(4): 46-50, 82.
- Ning F, Xu Z, Shan G L. Effects of disturbance ways on soil physical and chemical properties [J]. Chinese Journal of Grassland, 2008, 30(4): 46-50, 82.
- [21] 刘公社, 齐冬梅. 羊草生物学研究进展 [J]. 草业学报, 2004, 13(5): 6-11.
- Liu G S, Qi D M. Research progress on the biology of *Leymus chinensis* [J]. Acta Pratacultural Science, 2004, 13(5): 6-11.
- [22] 杨合龙, 戎郁萍, 穆 蓁. 不同放牧强度下羊草+大针茅草地植被与土壤氮素的空间异质性分析 [J]. 草业科学, 2016, 33(6): 1035-1043.
- Yang H L, Rong Y P, Mu Z. Analysis of spatial heterogeneity of *Leymus chinensis* and *Stipa grandis* vegetation and soil nitrogen under different grazing intensities [J]. Pratacultural Science, 2016, 33(6): 1035-1043.
- [23] 胡艳宇, 乌云娜, 霍光伟, 等. 不同放牧强度下羊草草原群落斑块植被-土壤特征 [J]. 生态学杂志, 2018, 37(1): 9-16.
- Hu Y Y, Wu Y N, Huo G W, et al. Vegetation and soil characteristics of plant community micro-patches under different grazing intensities [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(1): 9-16.
- [24] 王仁忠, 李建东. 放牧对松嫩平原羊草草地植物种群分布的影响 [J]. 草业科学, 1993, 10(3): 27-30, 34.
- Wang R Z, Li J D. Effects of grazing on distribution of plant population of *Aneurolepidium chinense* grasslands on Songlong plain [J]. Pratacultural Science, 1993, 10(3): 27-30, 34.
- [25] 杨殿林, 韩国栋, 胡跃高, 等. 放牧对贝加尔针茅草原群落植物多样性和生产力的影响 [J]. 生态学杂志, 2006, 25(12): 1470-

- 1475.
- Yang D L, Han G D, Hu Y G, et al. Effects of grazing intensity on plant diversity and aboveground biomass of *Stipa baicalensis* grassland [J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25 (12): 1470-1475.
- [26] 王玉辉,何兴元,周广胜. 放牧强度对羊草草原的影响 [J]. 草地学报, 2002, 10(1): 45-49.
- Wang Y H, He X Y, Zhou G S. Study on the responses of *Leymus chinensis* steppe to grazing in Songnen plain [J]. Acta Agrestia Sinica, 2002, 10(1): 45-49.
- [27] 仲延凯,孙 维,包青海. 刈割对典型草原地带羊草(*Leymus chinensis*)的影响 [J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 1998, 29(2): 56-67.
- Zhong Y K, Sun W, Bao Q H. Effect of moving on *Leymus chinensis* in the typical steppe region [J]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition), 1998, 29(2): 56-67.
- [28] 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草原生态系统研究(第 3 集) [M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- Inner Mongolia grassland ecological positioning station, Chinese academy of sciences. Grassland ecosystem research (Episode 3) [M]. Beijing: Science Press, 1988.
- [29] 陈万杰,薛文杰,古 琛,等. 草地利用方式对典型草原大针茅种群空间异质性的影响 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(10): 2569-2574.
- Chen W J, Xue W J, Gu C, et al. Effect of grassland utilization pattern on spatial heterogeneity of *Stipa grandis* population in a typical steppe [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35 (10): 2569-2574.
- [30] 霍光伟,乌云娜,维文涛,等. 围栏封育和自由放牧对克氏针茅草原植被空间异质性的影响 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(1): 66-73.
- Huo G W, Wu Y N, Luo W T, et al. Effects of enclosure and uncontrolled grazing on spatial heterogeneity of *Stipa krylovii* steppe vegetation [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31 (1): 66-73.
- [31] 希吉日塔娜,吕世杰,卫智军,等. 不同放牧制度下短花针茅草原主要植物种群的空间变异 [J]. 中国草地学报, 2013, 35 (2): 76-82.
- Xi J R T N, Lü S J, Wei Z J, et al. Analysis of the spatial variability of the main plant populations on *Stipa breviflora* desert steppe under different grazing systems [J]. Chinese Journal of Grassland, 2013, 35(2): 76-82.
- [32] Westoby M, Walker B H, Noymer I. Opportunistic management for rangelands not at equilibrium [J]. Journal of Range Management, 1989, 42(4): 266-274.
- [33] 殷国梅,吕世杰,丁海君,等. 不同载畜率对短花针茅荒漠草原建群种空间异质性的影响 [J]. 草地学报, 2017, 25(3): 486-491.
- Yin G M, Lü S J, Ding H J, et al. Effects of different stocking rates on spatial heterogeneity of constructive species in *Stipa breviflora* desert steppe [J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25 (3): 486-491.
- [34] 王国良,李向林,何 峰,等. 刈牧强度对羊草草地植被数量特征影响的研究 [J]. 中国草地学报, 2007, 29(3): 10-16.
- Wang G L, Li X L, He F, et al. Study on the effects of defoliation rate on vegetation quantitative characters in *Leymus chinensis* grassland [J]. Chinese Journal of Grassland, 2007, 29(3): 10-16.