

DOI: 10.5846/stxb202102060390

王梓晗, 王忠武, 吕世杰, 闫宝龙, 王占文, 门欣洋, 宝音贺西格. 载畜率对荒漠草原冷蒿植物种群密度及其空间分布的影响. 生态学报, 2022, 42(8): 3420-3428.

Wang Z H, Wang Z W, Lü S J, Yan B L, Wang Z W, Men X Y, Bao Y X G. Effects of stocking rate on population density and spatial distribution of *Artemisia frigida* in desert steppe. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3420-3428.

载畜率对荒漠草原冷蒿植物种群密度及其空间分布的影响

王梓晗¹, 王忠武^{1,*}, 吕世杰¹, 闫宝龙¹, 王占文¹, 门欣洋¹, 宝音贺西格²

¹ 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 呼和浩特 010018

² 内蒙古自治区农牧业科学院, 呼和浩特 010018

摘要: 载畜率是衡量草原生产能力的指标之一, 研究荒漠草原冷蒿 (*Artemisia frigida*) 植物种群在不同载畜率下的耐牧程度和空间分布特征, 对退化草原的恢复具有重要的指导意义。以短花针茅荒漠草原优势种冷蒿为研究对象, 在 4 个不同载畜率放牧试验设计 (对照区 CK (0 只/hm²)、轻度放牧区 LG (0.93 只/hm²)、中度放牧区 MG (1.82 只/hm²) 和重度放牧区 HG (2.71 只/hm²)) 小区中选择代表性样地 (面积为 40m×40m), 采用机械取样法进行取样, 记录冷蒿植物种群的密度, 使用 SAS 9.4 软件对其进行描述性统计和方差分析, 并用地统计学软件 GS+9.0 进行空间异质性统计分析。结果表明: 荒漠草原优势种冷蒿密度、出现频率和单位均值上的变异值随载畜率增大都明显下降, 其植物种群空间分布的决定性因素随载畜率增大由结构性因素转变为随机性因素。LG 和 HG 处理区的空间自相关距离较大, 但这两者表现结果的影响因素存在差异。在 CK 和 HG 区, 冷蒿空间分布斑块化较为明显, LG 区的冷蒿空间分布的特征表现为带状分布, MG 区冷蒿空间分布形成了一处大的条带和零星的几块斑块。基于上述研究结果可以得出, 随着载畜率增加, 荒漠草原冷蒿种群密度下降, 空间分布趋于单一化, 导致冷蒿的生产力下降, 进而影响草地的可持续利用。

关键词: 冷蒿; 载畜率; 荒漠草原; 半方差函数; 地统计学

Effects of stocking rate on population density and spatial distribution of *Artemisia frigida* in desert steppe

WANG Zihan¹, WANG Zhongwu^{1,*}, LÜ Shijie¹, YAN Baolong¹, WANG Zhanwen¹, MEN Xinyang¹, BAO Yinhexige²

¹ College of Grassland, Resources and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

² Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010018, China

Abstract: Stocking rate is one of the most important indicators to measure the productivity of grassland. Study on the grazing tolerance and spatial distribution characteristics of *Artemisia frigida* population under different stocking rates in desert steppe has significant effects for the restoration of the degraded grassland. The experiment design selected *Artemisia frigida*, a dominant species in *Stipa breviflora* desert steppe as the research object, which conducted with four different stocking rates (CK, 0 sheep unit hm⁻²; LG, 0.93 sheep unit hm⁻²; MG, 1.82 sheep unit hm⁻²; and HG, 2.71 sheep unit hm⁻²), and the representative sample plot (40 m×40 m) with the same terrain in each treatment was selected. The plant population density of *Artemisia frigida* is recorded by mechanical sampling method. Then, the descriptive statistics and variance

基金项目: 国家自然科学基金 (31760143); 内蒙古重大科技专项 (ZDZX2018020); 内蒙古自治区科技成果转化项目 (2020CG0013); 科技成果转化项目 (2019CG069)

收稿日期: 2021-02-26; 网络出版日期: 2021-12-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangzhongwu@imau.edu.cn

analysis were performed by SAS9.4 software, and the spatial heterogeneity was analyzed using statistical software GS+9.0. The results showed that the density, frequency of occurrence, and the variation of mean value of *Artemisia frigida* decreased significantly with the increase of stocking rate. The spatial distribution decisive factor of plant population changed from structural factor to random factor with the increase of stocking rate. The fractal dimension value D_0 was ranked from large to small under different stocking rates is CK>HG>MG>LG, under different grazing conditions, the values of fractal dimension were between 1.700 and 2.000, indicating that the spatial distribution of these four regions with different stocking rates was relatively uniform. The spatial auto-correlative distances in LG and HG treatments were relatively larger than other treatments, which caused by different impact factors, LG area was significantly affected by random factors, and HG area was significantly affected by structural factors. With the increase of stocking rate, the spatial correlation of *Artemisia frigida* gradually weakened. *Artemisia frigida* has different spatial states in different stocking rates, the spatial distribution of *Artemisia frigida* were patchy in CK and HG treatments, while it was characterized by banded distribution in LG treatment, and it formed a large strip and scattered patches in MG treatment, the density distributions of LG and MG were similar, but the uniformity of MG is greater than LG treatment. Based on the research results above mentioned, we can conclude that the population density of *Artemisia frigida* decreased and the spatial distribution tended to be simplified, resulted in the decrease of productivity of *Artemisia frigida* with the increase of stocking rate, which affected the sustainable utilization of grassland in the desert steppe.

Key Words: *Artemisia frigida*; stocking rate; desert steppe; semi-variance function; geo-statistics

内蒙古高原荒漠草原地处草原与荒漠两大陆地生态系统的交错带^[1-2],这种草原植物群落的种类组成、群落类型及其结构和功能的独特性显示出了该生态系统的脆弱性^[3]。加之人类不合理的活动行为,导致草地发生退化甚至促进草原荒漠化的进程。伴随着全球变暖等环境问题发生,草地保护研究和草原可持续发展的探讨仍是学者们关注的重点。

冷蒿(*Artemisia frigida*)是菊科的一种小半灌木,兼性克隆植物,耐干旱、耐践踏、耐土壤侵蚀,生根萌蘖的再生生长能力很强^[4-6]。冷蒿作为荒漠草原优势种之一,对群落的结构和功能也有着十分重要的影响,甚至决定着植物群落的稳定性。Zhang 等的研究表明,冷蒿在退化草地中的优势地位排放的化感作用机制影响其他植物的恢复,尤其是在过度放牧的严重干扰下^[7]。

短花针茅荒漠草原具有特殊的地理位置和脆弱的生态系统。殷国梅等发现放牧强度对短花针茅种群密度的影响最小,而对冷蒿种群密度的影响最大^[8]。单玉梅等结果表明冷蒿种群总密度在放牧区均高于对照区,在放牧期间(6—9月)的冷蒿枝条总密度的峰值均出现在 HG(或 MG)区^[9]。

关于放牧对植物群落空间异质性的研究已有文献报道。Zuo 等的研究发现,内蒙古荒漠草原中灌丛的入侵在多尺度上简化了群落组成,放大了草本植被的空间异质性,并且荒漠草原草本植被空间异质性的尺度效应主要依赖于以灌木或草为主的植物群落^[10]。刘红梅等发现短花针茅密度均值和分布的空间异质性最大变异程度都在自由放牧区^[11]。殷国梅等的结果表明,随着载畜率的增大,短花针茅荒漠草原群落空间异质性虽有增加的变化趋势,但植物空间分布仍具有特异性^[12]。研究者们对短花针茅荒漠草原建群种的关注度较高的原因是其控制植物群落的结构和功能。然而,前期试验研究发现^[13],荒漠草原冷蒿伴随载畜率增加密度急剧下降,耐牧性和抗性与前人研究结果存在较大的差异。

本研究以内蒙古乌兰察布市四子王旗短花针茅荒漠草原优势种冷蒿为研究对象,探究了冷蒿植物种群在不同载畜率下的密度和空间分布特点,进一步研究冷蒿在放牧胁迫下的密度变化趋势和空间分布状态^[14-16],研究结果有利于明确放牧干扰对冷蒿生态分布格局的影响程度,并对冷蒿植物种群空间消长过程进行初步阐释,为进一步深入研究荒漠草原冷蒿植物种群耐牧性和抗性提供基础,也为荒漠草原生态系统的保护和防止荒漠草原退化给予一定的试验和理论指导。

1 试验研究内容与方法

1.1 试验地概况

试验地位于内蒙古自治区四子王旗王府一队,地理位置为 $41^{\circ}47'17''\text{N}$, $111^{\circ}53'46''\text{E}$,海拔的平均高度为 1450m,地处中温带大陆性季风气候,气候特点是春温骤升、秋温巨降,无霜期短,平均无霜期约为 108d。近 10 年平均降水量在 220mm。土壤为淡栗钙土。草地类型为短花针茅 (*Stipa breviflora*) + 冷蒿 (*Artemisia frigida*) + 无芒隐子草 (*Cleistogenes songorica*) 荒漠草原。植被稀疏,植物种类组成比较简单,草层盖度较低。

1.2 试验设计

放牧试验区建于 2004 年,采用随机区组设计,如图 1 所示,3 个区组,每个区组又包含 4 个不同的载畜率,即对照区 CK (0 只/hm²)、轻度放牧区 LG (0.93 只/hm²)、中度放牧区 MG (1.82 只/hm²) 和重度放牧区 HG (2.71 只/hm²),各处理区随机排列^[17]。放牧绵羊品种为蒙古羊。每日放牧时间为 6:00 时放牧,18:00 时归牧。放牧时段为每年 6—11 月底,放牧时间为 6 个月。



图 1 试验小区和区组示意图

Fig.1 Schematic diagram for experimental plot and block

CK:对照 Control check; LG:轻度放牧 Light grazing; MG:中度放牧 Moderate grazing; HG:重度放牧 Heavy grazing; 图中标记颜色的小区为固定样地取样区

1.3 研究方法

为研究荒漠草原冷蒿种群密度及其空间分布特征,本试验从每个载畜率相同的 3 个重复区中选定 4 个载畜率不同的代表性重复区进行试验。在每个不同载畜率处理样地内,各选择一块地形一致、与小区门口距离接近的代表性样地(面积为 40m×40m)。采用机械取样法进行取样试验,将样地边界中的西南交汇处定为取样坐标原点(0,0),每 10m 设置一个 0.5m×0.5m 的样方,距离原点处最远的坐标为 (16,16),并按照偶数行取 5 个样方,奇数行取 4 个样方的方法进行取样,因此每个样方地的样方数为 77 个(样点分布见图 2,图中每一黑色方块代表一个 50cm×50cm 样方),于 2017—2019 年 8 月 15 日左右测定每个样方中冷蒿植物种群的密度。

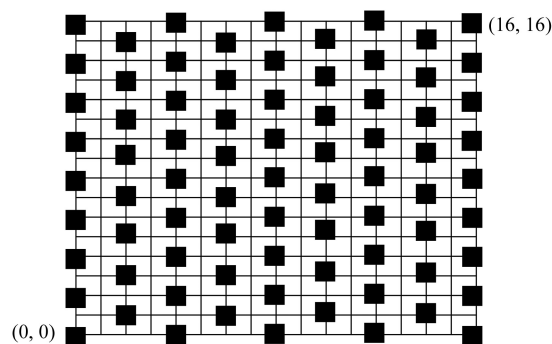


图 2 固定样地取样样点分布情况

Fig.2 Distribution of sampling points in fixed sites

本次试验结果采用 SAS 9.4 软件对 2017—2019 年 8 月冷蒿密度进行描述性统计和方差分析,并用地统计学软件 GS+9.0 进行空间异质性统计分析(首先构建最优拟合模型,并通过半方差函数和分形维数等方法分析其植物群落空间分布特点),箱线图和多重比较结果采用 Sigmaplot 12.5 进行图形绘制^[18-19]。其中描述性统计调用 MEANS 过程,方差分析调用 GLM 过程。

2 结果与分析

2.1 冷蒿种群密度对载畜率的响应

在不考虑样本空间位置及其样本间的间隔距离的条件下,不同年份下,冷蒿密度随着载畜率增加而下降(图 3)。

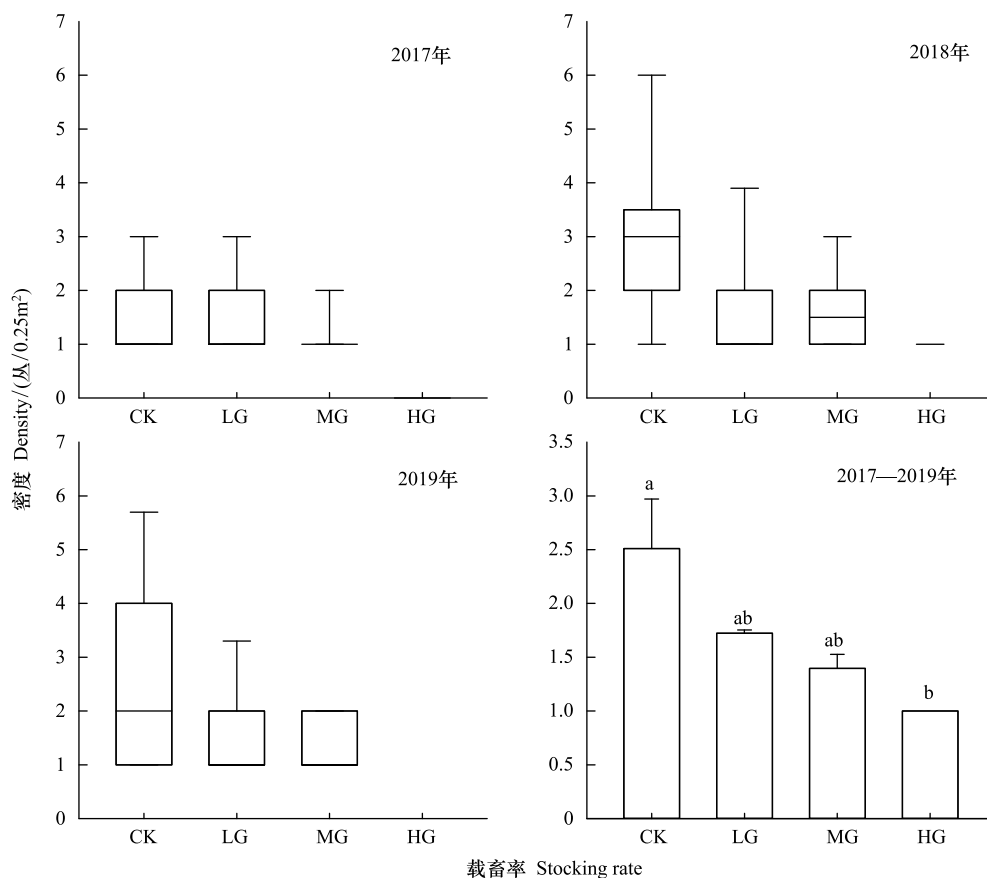


图3 冷蒿在不同载畜率下种群密度的变化图

Fig.3 The variation of population density of *Artemisia frigida* under different stocking rates

柱形图中字母不同表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 字母相同表示差异不显著 ($P > 0.05$)

从年份上看,2017年冷蒿植物种群密度CK和LG区的冷蒿密度最大值(箱式图的上侧箱线)和上四分位数(箱体上侧的边缘)之间无差别,说明CK和LG区冷蒿密度的变动范围相近,MG和HG区的显示结果是由于冷蒿在MG和HG处理区分布较少(77个样点出现的频次较少)造成的结果;2018年,CK区冷蒿密度的最大值和最小值(箱式图的下侧箱线)之差即冷蒿样点间的变动幅度差别最大,说明冷蒿植物种群密度在该处理区分布较大,LG和MG处理区最大值有差异;2019年,CK和LG区的冷蒿密度分布较为分散,但CK区的密度变化程度均明显大于其他3个处理区,随着载畜率的增大,箱式图的箱体(中间矩形区域)逐渐减少,表明放牧强度增大导致冷蒿植物种群密度的集中程度增加,也就是其密度值落在上下四分位数之间的变化范围在减少,意味着家畜的选择性采食和践踏强度增加导致种群空间分布均匀程度降低,结合箱体和中位数可以看出,冷蒿密度空间分布随着载畜率的增加,其密度空间分布在降低。因此,2017—2019年这3年中随着载畜率增大,冷蒿的密度呈现出下降的变化趋势($P < 0.05$)。

将2017—2019年的不同载畜率下的冷蒿植物种群密度加权平均后进行方差分析,CK与HG处理区的差异性显著($P < 0.05$),HG区表现最低,CK区表现最高;在不同载畜率下,冷蒿植物的种群密度由大到小依次为CK>LG>MG>HG。同时,我们也发现,尽管冷蒿植物种群密度在MG处理区小于LG处理区,但是MG处理区年份之间的冷蒿密度的波动程度较LG处理区大。

2.2 冷蒿植物种群密度在不同载畜率下的变异

冷蒿在40m×40m样地范围内的变异分析如图4所示。从变异系数的角度来看(样本容量 $n = 231$),CK、LG和MG区的CV值分别为62.68%、55.19%、34.36%,HG区由于冷蒿数量急剧下降,无法计算变异系数

(na)。因此,伴随载畜率增大冷蒿植物种群密度单位均值上的变异程度在下降。从冷蒿在样地出现的频率角度分析,冷蒿植物种群在 CK 区出现频率(P 值)最大,在 HG 区出现的频率最小。由此可见,冷蒿种群出现的频率也在急剧下降。图 4 中的冷蒿密度的均值(虚线)也是随着载畜率的增大呈现出下降趋势。综合来看,载畜率增大导致冷蒿植物种群密度下降,单位均值上的变异程度下降,出现的频率下降。

2.3 冷蒿空间分布的地统计分析

对不同载畜率下各样点处的冷蒿密度进行变异函数分析,发现不同载畜率下冷蒿的变异函数值均呈现出理论模型的变化趋势。结果显示(表 1),冷蒿在 CK 区中的变异函数值呈现指数理论模型的变化趋势;LG 和 MG 区为球状理论模型;HG 区为线性理论模型。如图 5 所示,半方差函数的数值随着空间取样分隔距离的增加而逐渐增大,但当达到某一特定分隔距离时,函数值逐渐趋于稳定状态。

从半方差函数中的数值来看,块金值 C_0 表示随机因素而导致的空间变异, LG 和 MG 处理区的块金值较大, CK 和 HG 区的块金值较小,说明冷蒿在 LG 和 MG 区中受随机因素的影响较大,在 CK 和 HG 区中受结构性因素影响较大。基台值 C_0+C 是样地范围内最大的空间变异值,冷蒿密度分布的空间变异程度由大到小的顺序为 $LG>CK>MG>HG$ 。结构比 $C/(C_0+C)$ 按放牧强度由小到大依次为 0.935、0.712、0.530 和 0.000,这说明随着载畜率增加,冷蒿的空间相关性逐渐减弱。

在半方差函数分析的基础上,进一步对斑块参数进行研究。空间自相关距离因模型不同而存在计算差异,指数模型主轴变程和亚轴变程为表 1 中 A_0 数值的 3 倍,球形和线性模型空间自相关距离在数值上即为表 1 中 A_0 的数值^[20]。由此可以看出, LG 区的冷蒿密度的自相关范围最大,为 164.8m; 次之是 HG 和 MG 区,分别为 106.2m 和 87.8m;冷蒿密度的自相关范围最小的是 CK 区,值为 28.5m。分形维数 D_0 表示结构空间分布因子在最大空间变异中的比例,在不同放牧情况下,分形维数的数值都是位于 1.700 和 2.000 之间,说明这 4 个不同载畜率的区域,其空间分布都是较为均匀的。

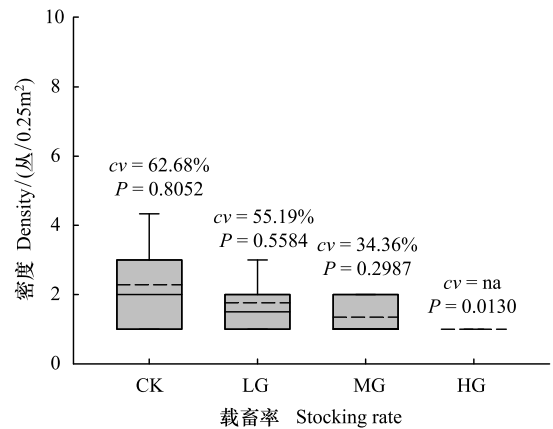


图 4 冷蒿空间分布的变异分析图

Fig.4 Variation analysis diagram of spatial distribution of *Artemisia frigida*

表 1 冷蒿空间分布的地统计分析表

Table 1 Statistical analysis table of spatial distribution of *Artemisia frigida*

载畜率 Stocking rate	模型参数 Model parameters			半方差函数 Semi-variance function			斑块参数 Plaque parameters		
	模型 Model	残差 Residual sum of squares RSS	决定系数 R^2	块金值 Nugget C_0	基台值 Sill C_0+C	结构比 Proportion/% $C/(C_0+C)$	变程 Range A/m	空间自 相关距离 A_0	分形维数 D_0
CK	Exponential	1.74×10^{-3}	0.420	0.0310	0.4790	0.935	2.85	0.95	1.960
LG	Spherical	1.79×10^{-4}	0.996	0.1930	0.6700	0.712	16.48	16.48	1.766
MG	Spherical	4.59×10^{-5}	0.994	0.1593	0.3386	0.530	8.78	8.78	1.870
HG	Linear	2.36×10^{-5}	0.229	0.0144	0.0144	0.000	10.62	10.62	1.917

CK:对照区 Control check; LG:轻度放牧区 Light grazing; MG:中度放牧区 Moderate grazing; HG:重度放牧区 Heavy grazing

2.4 冷蒿在不同载畜率下的空间分布状态

研究冷蒿空间分布状态采用克里格(Kriging)插值法。由图 6 可以看出, CK 区呈现明显的 2 种斑块状的地理分布,上方斑块分布密度较小,下方斑块分布密度较大,这 2 类斑块镶嵌排列,其空间分布状态表现为网

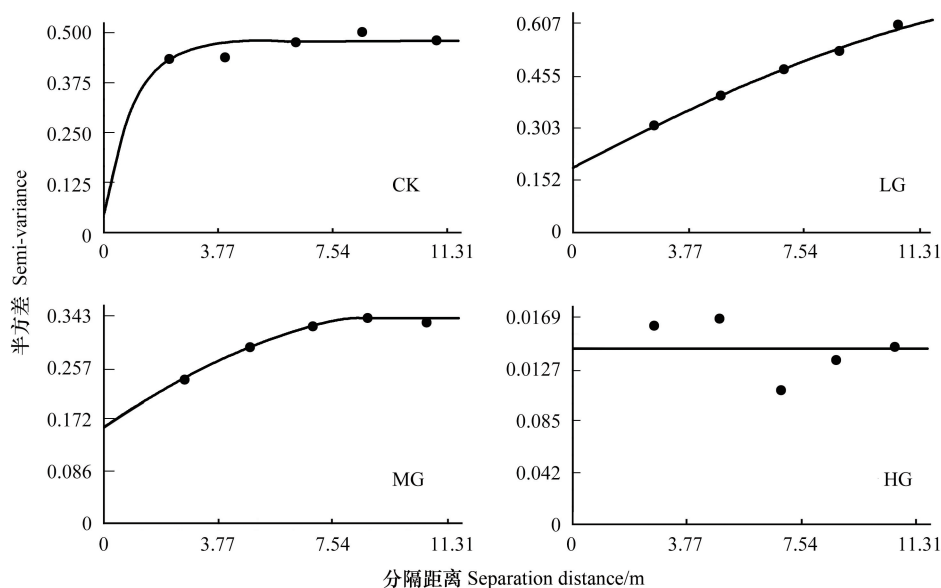


图5 冷蒿空间格局的变异函数

Fig.5 The variogram of spatial pattern of *Artemisia frigida*

状结构。LG 处理区出现 2 种带状分布,上边的带状分布是密度由内向外依次呈现出逐渐递减的规律,下边的带状分布是密度由内向外依次呈现出逐渐递增的趋势。MG 区的上部分的冷蒿分布的密度由内向外呈现出逐渐递减的趋势,下部分则呈现出 2 处大斑块的分布,并以大斑块向四周递减。相比较而言,LG 和 MG 区的密度分布相似,但 MG 区的均匀性要大于 LG 区。HG 处理区分布比较单一,只在西北角有部分分布,其他地方几乎没有冷蒿分布的现象,这是由于过度放牧导致冷蒿密度急剧下降造成的。

3 讨论

3.1 冷蒿密度对载畜率的响应

草原植物群落特征与载畜率紧密联系,冷蒿作为植物群落的优势种也不例外,在大气候一致时,放牧强度会成为主导因子,控制和影响着植物群落的特征^[21-23]。杜利霞等人研究了不同放牧条件下冷蒿的种子繁殖和营养繁殖特性后,认为冷蒿在轻牧区和封育区单位面积种子产量较高,其营养繁殖的各构件在轻牧区表现最好,能促进冷蒿的营养繁殖更新^[24]。本研究也认为轻度放牧不会改变其在植物群落中的地位和作用,这可能是有性繁殖补充了因放牧导致的种群数量衰减程度。Ye 等的研究表明,短花针茅荒漠草原的植物对放牧干扰的抗性和恢复力主要依赖于降水条件,适度干扰有利于其生长^[25]。冷蒿在荒漠草原具有一定的耐牧性,从方差分析可看出,CK 与 LG 区的密度之间差别较 MG 与 HG 区的密度之间差别大,说明冷蒿适应了其放牧强度,因为冷蒿有为躲避家畜采食而调整的适应策略,并且作为多年生的草本植物,其枝条性别化是有性生殖的基础,可以直接影响到植株的数量,这不仅受其自身遗传特性的控制,也受环境条件的制约^[26]。杜宇凡研究放牧强度对短花针茅荒漠草原群落特征的影响后,发现冷蒿在不同放牧强度下没有出现消失的迹象,但冷蒿出现的频率有降低的趋势。此研究与本研究结果一致,这说明荒漠草原的这种格局经过漫长时间形成后相对稳定^[27]。臧晓琳的研究认为冷蒿可以改善土壤微环境,增加其根际土壤微生物群落功能多样性,促进地上植株生长,增强其抵抗放牧胁迫的能力^[28],这可能是冷蒿植物种群适应轻度放牧或围封条件的地下适应过程。有学者认为,随着载畜率的增加,冷蒿通过增加根系的生物量来保证吸收足够的养分和水分供给地上部分的生长,使得其更加适应环境,促进扩散^[29]。在有环境胁迫下,冷蒿具有极强的抗旱性、较高的物质生产量和节约用水的能力,其自身积累的大量脯氨酸、可溶性糖等有用物质,使得冷蒿不断有新枝萌发出来,第二年

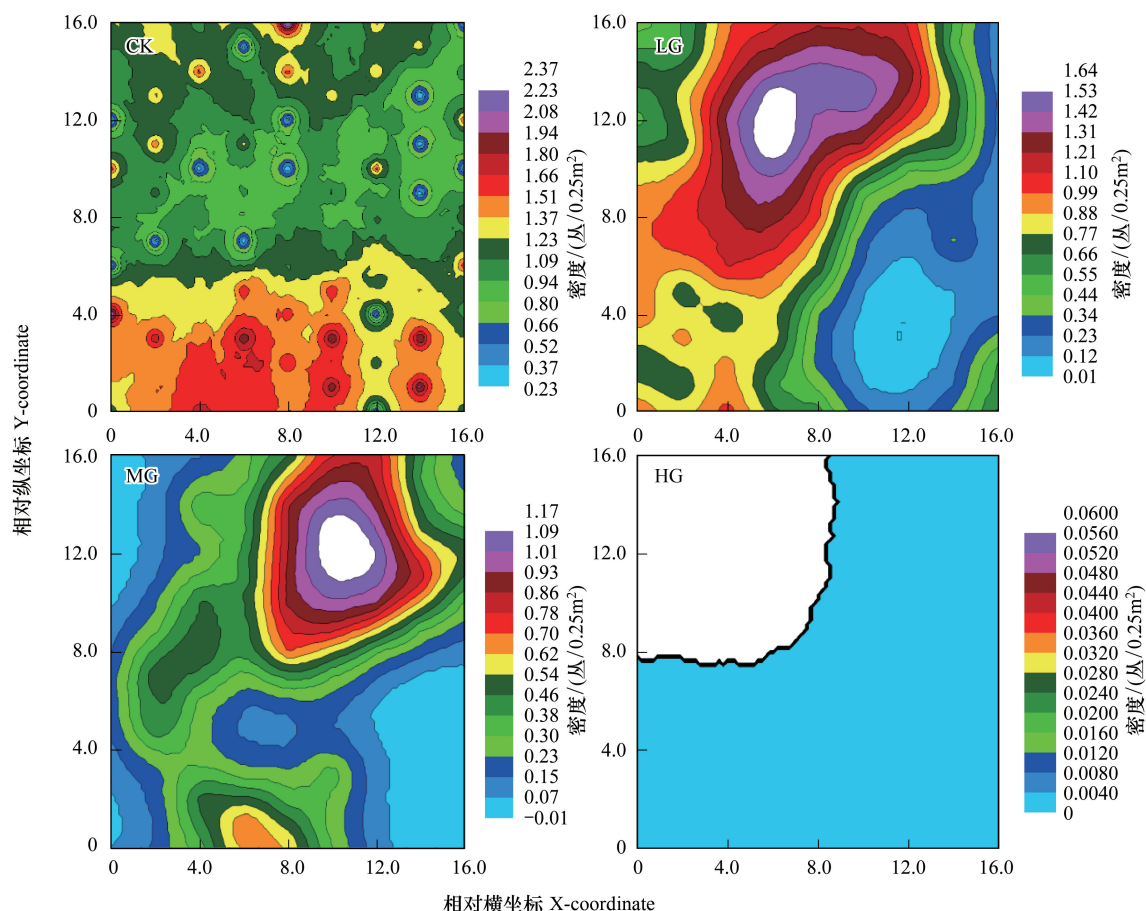


图6 冷蒿空间分布格局平面图

Fig.6 Spatial distribution plan of *Artemisia frigida*

春仍能旺盛生长^[30]。但在试验区,中度放牧和重度放牧导致冷蒿密度急剧下降,进而导致草地裸露面积增大,使得土壤风蚀程度增加^[31],难以使植株匍匐枝产生不定根,无性繁殖受限导致其株丛扩展能力下降。这是冷蒿植物种群不能适应中度放牧和重度放牧的无性繁殖基础,也是影响有性繁殖的重要原因之一。

3.2 冷蒿空间分布对载畜率的响应

冷蒿的空间分布格局可以反映其在载畜率胁迫下退化演替阶段。根据克里格插值法对不同放牧区的冷蒿空间分布进行绘制,得到了空间分布图,可呈现出冷蒿空间分布的异质性和复杂性,显示出其斑块性、梯度性和镶嵌性的分布特点^[32]。熊梅在短花针茅荒漠草原主要植物与土壤空间格局对载畜率的响应中发现,随着载畜率增加,冷蒿的聚集强度提高,生态位变窄,并且冷蒿在 CK 区空间分布呈斑块状分布,其空间自相关性增强^[33]。这与本研究结果一致,在 CK 区不仅呈现斑块分布,而且其分形维数的数值最大,说明冷蒿植物种群空间分布更加均匀,空间自相关性更好。随着载畜率的增加,冷蒿植物的种群空间分布变得复杂,放牧家畜的采食、游走、践踏等随机性牧食行为都会导致冷蒿空间分布的随机性增强,到了重度放牧区,被放牧牲畜采食后的冷蒿所剩无几,才会出现在 HG 区分形维数的数值大于 LG 和 MG 处理区的结果,并且在放牧胁迫下,冷蒿在资源竞争中处于劣势地位,为适应放牧而采取了主动防御措施,并且以聚集分布的形式抵抗外界干扰以维持自身的稳定性。刘先华等以内蒙古温带典型草原的物种为研究对象,探究载畜率对内蒙古典型草原物种分布空间异质性的影响,其研究表明,随着载畜率增大,冷蒿的空间分布随机性和自相关尺度逐渐增大,但载畜率超过一定水平后,冷蒿空间分布的自相关尺度开始下降^[34]。本研究结果与之存在较大差异。首先,从随机因素引起的空间变异程度来看,符合刘先华等研究结果变化趋势,但本研究的指标是块金方差(随

机因素影响程度);其次,从结构比来看,结构比反映了结构部分空间异质性(由地形、土壤母质、气候等结构性因素引起的空间变异)占总空间异质性的程度^[35],结构因素对冷蒿植物种群空间分布的影响伴随载畜率增大而减小,取而代之的是家畜随机性牧食行为对其影响程度的增加,即随机性因素决定着冷蒿植物种群在中度和重度放牧区的空间分布特点;最后,空间自相关距离反映的是试验区冷蒿植物种群空间分布的斑块大小,自相关距离越大,表明冷蒿植物种群空间分布斑块越大,因此 LG 和 HG 处理区斑块性较大。但这并不代表冷蒿植物种群空间分布的斑块都比较大, LG 属于放牧增加冷蒿空间分布斑块尺度(可以从分形维数和结构比看到),但 HG 却表征的是空地面积(可以从分形维数和密度数据可以看到);所以尽管分析的是冷蒿植物种群空间分布状态,但需要结合多个统计参数和冷蒿实际密度情况进行综合判断。

4 结论

研究结果表明,随着载畜率的增大,荒漠草原优势植物冷蒿的密度下降,分布范围减小。冷蒿植物种群空间变异的比重和空间自相关随载畜率增大而逐渐减弱。在不同的载畜率下,冷蒿存在着独特的空间分布斑块特征,围封区呈现斑块状分布,轻度放牧区呈现带状分布,中度放牧区呈现斑块状和带状混合分布,而在重度放牧区分布较单一。为进一步了解和揭示冷蒿种群在荒漠草原的分布机理,今后还需通过长期的野外观测,深入探讨影响冷蒿分布的其他相关生理指标,为荒漠草原的可持续管理提供理论支撑。

参考文献(References):

- [1] 刘红梅, 卫智军, 杨静, 吕世杰, 吴艳玲, 刘荣, 运向军. 不同放牧制度对荒漠草原短花针茅空间异质性的影响. 干旱区资源与环境, 2011, 25(8): 138-143.
- [2] 吕世杰, 聂雨芊, 桑雪颖, 苏金梅, 吴艳玲, 卫智军, 胡生荣, 刘红梅. 不同放牧制度对荒漠草原优势种无芒隐子草空间异质性的影响. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2014, 35(6): 171-176.
- [3] 赛胜宝, 李德新. 荒漠草原生态系统研究. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1995: 1-7.
- [4] Yang C, Bao Y T G T, Li L. Variation of module of *Artemisia frigida* population under different grazing intensities. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(3): 405-408.
- [5] 刘菊红, 王忠武, 韩国栋. 重度放牧对荒漠草原主要植物种间关系及群落稳定性的影响. 生态学杂志, 2019, 38(9): 2595-2602.
- [6] 王鑫朝. 放牧对冷蒿根际土壤微生物生物量及土壤细菌、真菌群落的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2017.
- [7] Zhang R M, Zuo Z J, Gao P J, Hou P, Wen G S, Gao Y. Allelopathic effects of VOCs of *Artemisia frigida* Willd. on the regeneration of pasture grasses in Inner Mongolia. Journal of Arid Environments, 2012, 87: 212-218.
- [8] 殷国梅, 丁海君, 田彦军, 薛艳林, 斯琴, 额尔德尼毕力格, 刘永志. 放牧强度与主要植物种群及群落密度的对应分析. 黑龙江畜牧兽医, 2016, (9): 132-135, 139-139.
- [9] 单玉梅, 温超, 陈海军, 张璞进, 晔蕾罕, 木兰, 常虹, 孙海莲. 不同放牧强度下植物种群密度的季节性变化. 生态科学, 2017, 36(6): 125-129.
- [10] Zuo X A, Mao W, Qu H, Chen M, Zhao S L, Liu L X, Wang S K, Yue P, Ma X J, Zhao X Y, Medina-Roldán E, Allington G R H. Scale effects on spatial heterogeneity of herbaceous vegetation in desert steppe depend on plant community type. Ecological Indicators, 2021, 127: 107769.
- [11] 刘红梅. 短花针茅草原群落特征与草地空间异质性对不同放牧制度的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
- [12] 殷国梅, 吕世杰, 丁海君, 薛艳林, 白春利, 刘永志. 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. 草地学报, 2017, 25(3): 486-491.
- [13] 秦洁, 韩国栋, 韩梦琪, 靳宇曦. 内蒙古不同草地类型中冷蒿地上生物量对放牧强度的响应//2017 中国草学会年会论文集. 广州: 中国草学会, 2017: 335-335.
- [14] 李江文. 长期不同载畜率下短花针茅荒漠草原植物功能性状与功能多样性的关系[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [15] 梁秀华. 内蒙古草原退化与恢复演替机理的探讨. 中国畜牧兽医文摘, 2018, 34(6): 31-31, 50-50.
- [16] Levin S A. The problem of pattern and scale in ecology: the Robert H. MacArthur award lecture. Ecology, 1992, 73(6): 1943-1967.
- [17] 焦树英, 韩国栋, 赵萌莉, 刘清泉, 杨文斌. 荒漠草原地区不同载畜率对功能群特征及其多样性的影响. 干旱区资源与环境, 2006, 20(1): 161-165.
- [18] 张爽, 吕世杰, 丁莉君, 卫智军, 海松. 荒漠草原主要植物种群数量特征对群落数量特征的影响. 草原与草业, 2019, 31(3): 38-46.

- [19] Lv S J, Yan B L, Wang Z W, Wang Z W, Song X H, Zhao M, Kang S, Willms W, Han G D. Dominant species' dominant role and spatial stability are enhanced with increasing stocking rate. *Science of the Total Environment*, 2020, 730: 138900.
- [20] 闫宝龙, 吕世杰, 王舒新, 王忠武, 李治国, 布仁朝古拉, 韩国栋. 放牧强度对无芒隐子草小尺度空间分布特征的影响. *中国草地学报*, 2018, 40(4): 95-101.
- [21] 慕宗杰, 蒙荣, 韩国栋, 锡林塔娜. 短花针茅荒漠草原不同载畜率植物群落优势种群空间分布格局的研究. *畜牧与饲料科学*, 2010, 31(6/7): 339-342.
- [22] 李永宏. 内蒙古锡林河流域羊草草原和大针茅草原在放牧影响下的分异和趋同. *植物生态学与地植物学学报*, 1988, 12(3): 189-196.
- [23] 希吉日塔娜, 吕世杰, 卫智军, 刘红梅, 孙士贤, 吴艳玲. 不同放牧制度下短花针茅草原主要植物种群的空间变异. *中国草地学报*, 2013, 35(2): 76-82.
- [24] 杜利霞, 李青丰, 董宽虎. 放牧强度对短花针茅草原冷蒿繁殖特性的影响. *草地学报*, 2007, 15(4): 367-370.
- [25] Ye R H, Liu G F, Chang H, Shan Y M, Mu L, Wen C, Te R, Wu N T, Shi L, Liu Y H, Wang H M, Yun X J, Liu G X, Li F. Response of plant traits of *Stipa breviflora* to grazing intensity and fluctuation in annual precipitation in a desert steppe, northern China. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 24: e01237.
- [26] 王静, 杨持, 王铁娟. 冷蒿(*Atemisia frigida*)种群在放牧干扰下构件的变化. *生态学报*, 2006, 26(3): 960-965.
- [27] 杜宇凡. 放牧强度对短花针茅荒漠草原群落特征及空间分布的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- [28] 臧晓琳, 张洪芹, 王鑫朝, 马元丹, 宝音陶格涛, 高岩, 张汝民. 放牧对冷蒿根际土壤微生物数量和群落功能多样性的影响. *浙江农林大学学报*, 2017, 34(1): 86-95.
- [29] 殷国梅, 边继武, 张园园, 刘思博, 薛艳林, 李敬忠, 张克威, 张英, 布仁朝古拉, 孙林, 贾建宇, 张建中. 不同放牧率下冷蒿生物量对蒸散的影响. *畜牧与饲料科学*, 2018, 39(1): 29-32, 42-42.
- [30] 周海燕, 赵爱芬. 科尔沁草原主要牧草冷蒿和差不嘎蒿的生理生态学特性与竞争机制. *生态学报*, 2002, 22(6): 894-900.
- [31] 李文. 不同放牧管理模式对高寒草甸植被、土壤和碳氮储量特征的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- [32] 高宁宁, 陈俊, 张鹏莉, 刘书娟, 许岳飞, 呼天明. 放牧对西藏高寒高草草甸地上生物量空间分布的影响. *草地学报*, 2014, 22(2): 255-260.
- [33] 熊梅. 短花针茅荒漠草原主要植物与土壤空间格局对载畜率的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- [34] 刘先华, 韩苑鸿, 李凌浩. 放牧率对内蒙古典型草原物种分布空间异质性的影响. *草地学报*, 1998, 6(4): 293-298.
- [35] Lü S J, Yan B L, Wang Z W, Han G D, Kang S. Grazing intensity enhances spatial aggregation of dominant species in a desert steppe. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(10): 6138-6147.