

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0056

李治国, 吕世杰, 闫宝龙, 韩国栋, 王忠武, 屈志强, 王静. 放牧强度对短花针茅植物种群空间分布的影响. 草业科学, 2021, 38(6): 1060-1068.

LI Z G, LYU S J, YAN B L, HAN G D, WANG Z W, QU Z Q, WANG J. Effects of grazing intensity on the spatial distribution of *Stipa breviflora* population. Pratacultural Science, 2021, 38(6): 1060-1068.

放牧强度对短花针茅植物种群空间分布的影响

李治国, 吕世杰, 闫宝龙, 韩国栋, 王忠武, 屈志强, 王 静

(内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010011)

摘要: 为探讨荒漠草原建群种短花针茅 (*Stipa breviflora*) 空间分布的多重分形特征及其在不同放牧强度下的响应规律, 本研究以内蒙古四子王旗短花针茅荒漠草原为研究对象, 设置对照 (CK)、轻度放牧 (LG)、中度放牧 (MG) 和重度放牧 (HG) 4 个放牧强度, 载畜率分别为每公顷每半年 0、0.93、1.82 和 2.71 个羊单位, 结合变异分析和多重分形研究方法, 结果表明: 在不同放牧强度下, 短花针茅植物种群空间分布存在多重分形特征; 伴随放牧强度的增大 (轻度放牧除外), 短花针茅植物种群空间分布的多重分形复杂性降低; 生态位宽度几乎没有变化, 空间分布由聚集状态转为均匀状态, 个体间的竞争强度增大; 轻度放牧下短花针茅植物种群空间分布多重分形特征最为复杂: 生态位宽度降低, 空间分布聚集特征最明显, 个体间的竞争强度最小。无论放牧强度如何变化, 短花针茅植物种群在植物群落中的主导地位没有改变, 空间分布的整体特征是以大概率子集空间分布为主。

关键词: 荒漠草原; 放牧强度; 短花针茅; 多重分形; 空间分布; 统计阶距; 奇异性指数

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2021)06-1060-09

Effects of grazing intensity on the spatial distribution of *Stipa breviflora* population

LI Zhiguo, LYU Shijie, YAN Baolong, HAN Guodong, WANG Zhongwu, QU Zhiqiang, WANG Jing

(College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, Inner Mongolia, China)

Abstract: In this study, the multi-fractal characteristics of the spatial distribution of *Stipa breviflora* in desert steppe with four grazing intensities are discussed. The four grazing treatments were control area of no grazing (CK), light grazing (LG), moderate grazing (MG), and heavy grazing (HG), with stocking rates of 0, 0.93, 1.82, and 2.71 AUM per hectare per half year, respectively. Based on the box plot and multifractal research methods, the following results indicate that under different grazing intensities, the spatial distribution of the *S. breviflora* population shows multifractal characteristics. With increasing grazing intensities (except for light grazing), the multifractal complexity of the spatial distribution of *S. breviflora* population decreases, the niche width almost did not change, the spatial distribution changes from an aggregation state to a uniform state, and the competition intensity among individuals increases. The multifractal characteristics of the spatial distribution of *S. breviflora* population are the most complex under light grazing: the niche width decreases, the spatial distribution aggregation characteristics are the most obvious, and the competition intensity among individuals is the lowest. Regardless of how the grazing intensity changes, the dominant position of the *S. breviflora* population in the plant community did not change, and the overall spatial distribution was dominated by the large probability subset.

收稿日期: 2021-01-25 接受日期: 2021-04-06

基金项目: 国家自然科学基金 (32060384); 内蒙古自然科学基金 (2018MS03017); 内蒙古自治区科技计划项目 (2020GG0100)

第一作者: 李治国 (1978-), 男, 内蒙古包头人, 副教授, 博士, 研究方向为草地生态与管理。E-mail: nmndlzg@163.com

通信作者: 吕世杰 (1978-), 男, 内蒙古赤峰人, 讲师, 博士, 研究方向为应用统计与数量生态。E-mail: lshj123@163.com

Keywords: desert steppe; grazing intensity; *Stipa breviflora*; multifractal; spatial distribution; statistical step; singular index

Corresponding author: LYU Shijie E-mail: lshj123@163.com

短花针茅 (*Stipa breviflora*) 荒漠草原具有地带过渡性、生态严酷性和脆弱性特征^[1-3], 对干扰的响应十分敏感^[4-5]。该草地环境中生化可演替成为克氏针茅 (*S. krylovii*) 典型草原; 草地环境旱生化则演替为小针茅 (*S. klemenzii*) 草原; 短花针茅荒漠草原生境向暖干条件转变, 则演替为短花针茅 + 无芒隐子草 (*Cleistogenes songorica*) + 碱韭 (*Allium polyrhizum*) 植物群落 (伴随土壤沙化过程), 相反生境的暖湿化, 则演替为短花针茅 + 无芒隐子草 + 达乌里胡枝子 (*Lespedeza daurica*) 植物群落^[6]。短花针茅植物种群作为建群种, 其控制着植物群落的结构和功能^[2-3], 掌握短花针茅变化情况有助于了解荒漠草原植物群落的发展动态。

经长期研究显示, 以放牧利用为主的短花针茅荒漠草原, 其建群种在植物群落中仍占主导地位和作用^[7-14]; 尽管受放牧强度或放牧制度影响, 其空间分布状态发生改变, 但结构性因素仍是其空间分布的主控因素^[15-16]; 空间多重分形特征存在, 且空间自相关程度较高^[17-18]。这些空间分布特征的呈现与建群种短花针茅对放牧的响应特征直接相关。有研究表明, 短花针茅属密丛型禾草, 放牧导致短花针茅株丛发生破碎化, 进而使得单位面积密度增加^[7, 9, 13]。以密度指标为基础的短花针茅空间分布研究, 缺少放牧强度导致株丛破碎化的考虑, 基于高度、盖度和密度综合指标的全面分析, 能够整体揭示短花针茅在不同放牧强度下的空间分布状态以及变化规律。

综上, 本研究以荒漠草原短花针茅为对象, 采用机械取样法测定其高度、盖度和密度, 并计算重要值指数, 结合变异分析和多重分形分析, 明确以下几个问题: 首先, 短花针茅植物种群空间分布在不同放牧强度下是否存在多重分形特征; 其次, 如果多重分形特征存在, 短花针茅植物种群空间分布的复杂程度或变化程度如何; 最后, 导致不同放牧强度下短花针茅空间分布发生转变的原因是什么。相关问题的解决可以为草地植物群落稳定性以及家畜对建群种影响的相互关系提供数据支持和理论支撑。

1 试验地概况与研究方法

1.1 试验地概况

试验地位于内蒙古四子王旗短花针茅荒漠草原, 并于 2004 年建立了长期放牧强度试验基地, 地处 111°88'00" E、41°78'00" N, 平均海拔 1 440 m。草地建群种为短花针茅, 优势种为冷蒿 (*Artemisia frigida*)、无芒隐子草, 构成了短花针茅 + 冷蒿 + 无芒隐子草荒漠草原类型。气候属于中温带半干旱大陆性季风气候。土壤为淡栗钙土。

1.2 试验设计

试验区面积为 51.9 hm², 自西向东划分成相等的 12 个样地, 即每个样地面积 4.33 hm²。采用随机区组试验设计, 设 3 个区组, 每一区组包含 4 个载畜率, 分别是不放牧的对照区 (CK)、轻度放牧区 (LG)、中度放牧区 (MG) 和重度放牧区 (HG)。

LG、MG、HG 放牧区载畜率分别为每公顷每半年 0.93、1.82、2.71 个羊单位, 对照区载畜率为 0。自 2004 年开始放牧试验, 夏、秋季为放牧季节, 冬、春季为休牧季节。每天将家畜赶入放牧区, 让其自由采食 (赶入放牧区之前提供饮水), 傍晚赶回畜圈 (饮水, 补盐), 放牧时间自 05:30 至 17:30, 放牧区无饮水设施。

1.3 取样设计

于 2016 年 8 月在放牧区内选择 40 m × 40 m 代表性样地 (样地植物群落物种组成相近、地形相近, 距围栏门口距离相等), 以正西南方为坐标原点建立平面直角坐标系, 采用 50 m 的测绳两根 (精确刻度 10 cm), 垂直于相对坐标系的横纵坐标, 逐一确定取样点的相对坐标 (x_i, y_i), 然后将记录下来的相对坐标, 按照 5 cm 间隔尺度设置取样点并记录相对坐标, 图中每一小方格为 2.5 m × 2.5 m (图 1)。取样点设置样方 50 cm × 50 cm (样点位置位于样方中心), 分种记录植物种群的高度 (cm)、盖度 (%) 和密度 (每 0.25 m² 株数或丛数)。

1.4 数据整理与分析

将得到的坐标点数据进行补全, 首先寻找与待

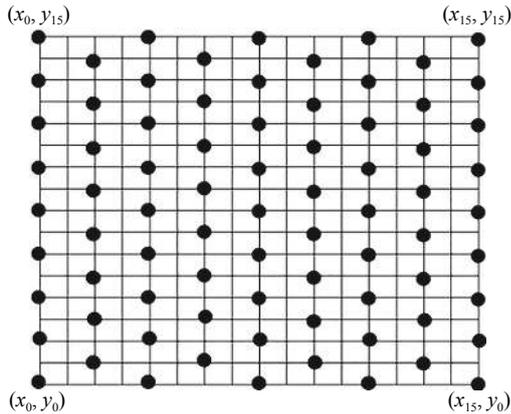


图 1 空间取样的样点分布图

Figure 1 Spatial sampling point distribution

补数据点最近的 3 个点进行均值插补, 如与 (x_1, y_1) 距离最近的 3 个点分别为 (x_0, y_0) 、 (x_0, y_2) 和 (x_2, y_1) , 然后再依次计算相应的待补坐标点数据, 分别利用最近的 3 个点和最近的 4 个点进行均值插补 (高度、盖度和密度分别进行插补)。然后计算短花针茅植物种群相对高度 (H)、相对盖度 (C) 和相对密度 (D), 将三者平均再乘以 100% 得到短花针茅植物种群在各个样点的相对重要指数 (important value index, IVI), 每一处理区得到数据个数为 289 个的数据集。计算公式如下:

$$IVI = \frac{H+C+D}{3} \times 100\%。$$

根据多重分形理论及其对数据集的要求 (面积取样样点满足 2^{2n} 个), 将坐标点含有 x_{17} 和 y_{17} 的数据去掉, 形成 16×16 的空间数据点集, 然后在 Excel 2010 内进行 VBA 编程, 计算多重分形的相关参数^[19-22]。

变异分析: 在 Excel 2010 中绘制箱式图 (也称箱线图), 其中线的左右两端分别代表最小值和最大值, 即数据的变化范围, 箱体由下四分位数和上四分位数构成, 表征的是位于上下四分位数之间的数据集中情况, 箱体中间的分界线是中位数。

多重分形: 针对多重分形, 主要从以下 3 个角度分析。1) 判断多重分形是否存在, 在不同放牧强度下, 分别计算不同统计阶距 q 的取样尺度 ε 的对数 $\log(\varepsilon)$, 同时计算重要指数密度配分函数 $\chi_q(\varepsilon)$ 的对数 $\log[\chi_q(\varepsilon)]$, 然后在 Excel 2010 中绘制折线图。如果折线图在统计阶距 $-10 \leq q \leq 10$ 的范围内, 双对数曲线均趋于直线且斜率由负值转为正值, 则认为短花针茅空间分布存在多重分形特征^[18-19]。2) 广义维数

谱。根据统计阶距和统计阶距下计算的分形维数绘制曲线, 形成广义维数谱。其中当统计阶距分别为 0、1 和 2 时, 对应的分形维数分别为计盒维数、信息维数和关联维数^[21-22]。3) 多重分形奇异谱。根据统计阶距的变化区间, 分别计算奇异性指数 $\alpha(q)$ 和多重分形谱函数值 $f[\alpha(q)]$, 然后绘制曲线图, 根据曲线宽度以及长短形态判断短花针茅空间分布的复杂性和集中区域^[18, 22]。相关计算式如下:

$$\text{概率计算: } p_i(\varepsilon) = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i};$$

$$\text{配分函数: } \chi_q(\varepsilon) = \sum_{i=1}^n p_i^q(\varepsilon);$$

$$\text{奇异性指数: } \alpha(q) = d\tau(q)/dq;$$

$$\text{多重分形谱函数值: } f[\alpha(q)] = q\alpha(q) - \tau(q)。$$

式中: d 代表求导, q 代表统计阶距, M_i 代表取样尺度下第 i 个样点短花针茅重要指数占比, n 为取样样点数, $\tau(q)$ 为 Legendre 变换曲线。

2 结果与分析

2.1 短花针茅在不同放牧强度下的变异分析

短花针茅植物种群在 CK 和 LG 处理区内, 其重要指数最小值均为 0 (箱线左端); 随着放牧强度的增加, 短花针茅重要指数最大值呈逐渐增加的变化趋势, 分别为 67.02%、75.50%、87.80% 和 100% (箱线右端) (图 2)。箱线最左、最右端的距离, 代表重要指数的变动范围, 随放牧强度增加, 其变动范围没有表现出一定的规律性。箱体反映的是数据集中情况, 除 CK 处理区外, 随着放牧强度的增加, 短花针茅重要指数的集中程度随之增加。相对于 CK 处理区, LG 处理区的箱体左端较小, 而右端较大, 其中位数 (箱体中线) 靠左且接近, 说明 CK 和 LG 处理区的平均重要指数比较接近, 经计算其重要指数分别为 32.71% 和 32.55%。由此可见, 伴随放牧强度的增加, 短花针茅在群落中的重要指数有增大的变化趋势。

2.2 短花针茅植物种群在不同放牧强度下的多重分形判断

在不同放牧强度下, 分别计算短花针茅取样尺度及其重要指数密度配分函数的双对数曲线关系, 即 ε 和 $\chi_q(\varepsilon)$ 的 $\log(\varepsilon) - \log[\chi_q(\varepsilon)]$ 关系, 结果显示 (图 3),

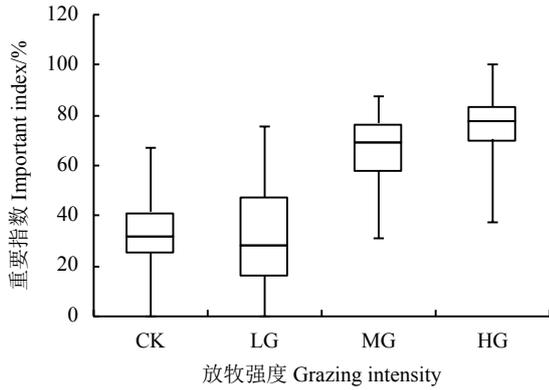


图 2 不同放牧强度下短花针茅的重要指数

Figure 2 Important indexes of *Stipa breviflora* under different grazing intensities

CK、LG、MG 和 HG 分别代表对照、轻度放牧、中度放牧和重度放牧处理; 下同。

CK, LG, MG, and HG represent the blank control of no grazing, light grazing, moderate grazing, and heavy grazing, respectively; this is applicable for the following figures and tables as well.

伴随分隔距离对数的增大, 重要指数密度配分函数值趋近于 0, 且在统计阶距 $-10 \leq q \leq 10$ 的范围内, 双对数曲线均趋于直线且斜率由负值转为正值, 这说明短花针茅植物种群在不同放牧强度下存在空间多重分形特征, 可以进行多重分形分析。

2.3 短花针茅植物种群的广义维数谱分析

短花针茅植物种群广义维数谱分析结果 (图 4) 显示, 在统计阶距为 0 时, CK、LG、MG 和 HG 处理区的广义维数谱具有交点, 此点代表的是短花针茅植物种群重要指数的计盒分形维数, 表征了短花针茅植物种群重要指数空间分布的复杂性和不均匀性, 说明在 CK、LG、MG 和 HG 处理区短花针茅植物种群重要指数空间分布的复杂性和不均匀性比较接近; 其计盒维数接近 2 (表 1), 所以短花针茅植物种群空间分布主要由结构性因素控制, 且空间自相关程度较高, 空间分布比较均匀。

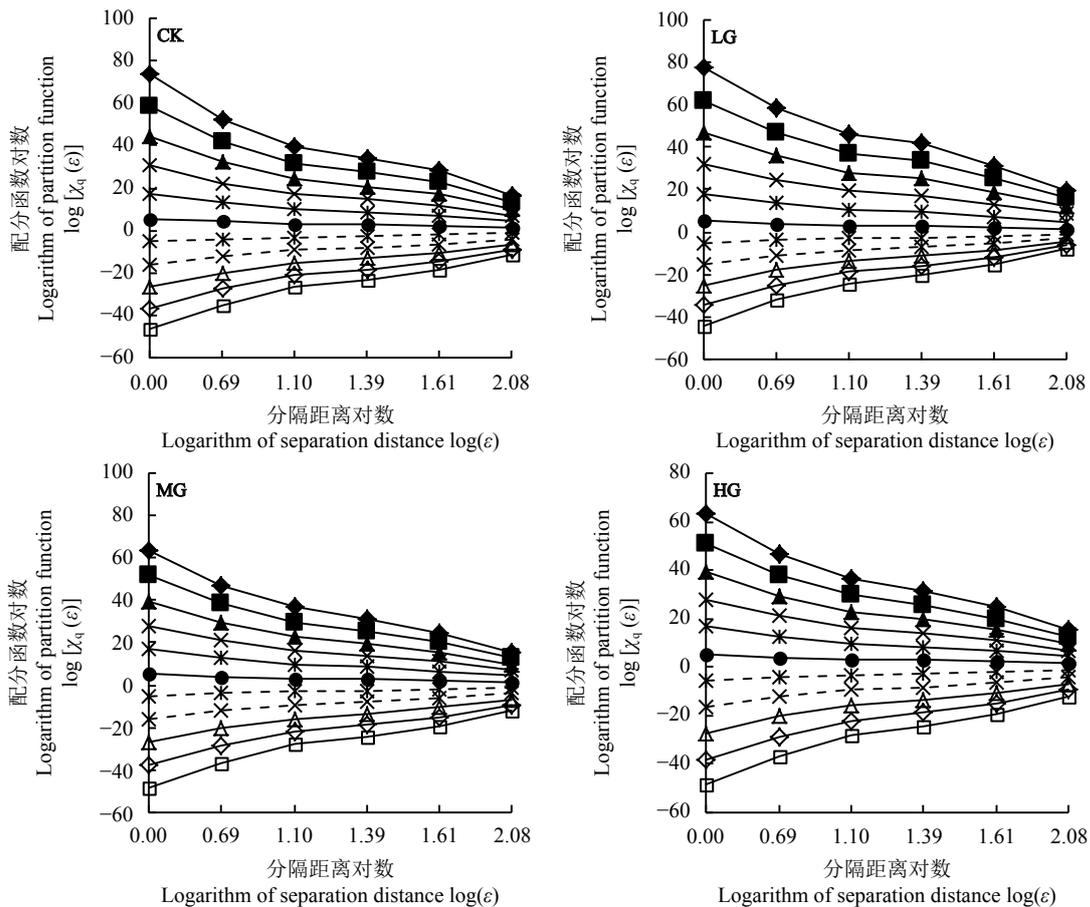


图 3 短花针茅重要指数在不同放牧强度下的 $\log(\epsilon) - \log[Z_q(\epsilon)]$ 关系

Figure 3 $\log(\epsilon) - \log[Z_q(\epsilon)]$ relationship of important indexes of *Stipa breviflora* under different grazing intensities

图中曲线由上到下统计阶距 q 分别为 $-10, -8, -6, -4, -2, 0, 2, 4, 6, 8, 10$ 。

The statistical steps q of the curve from top to bottom in the figure are $-10, -8, -6, -4, -2, 0, 2, 4, 6, 8, 10$.

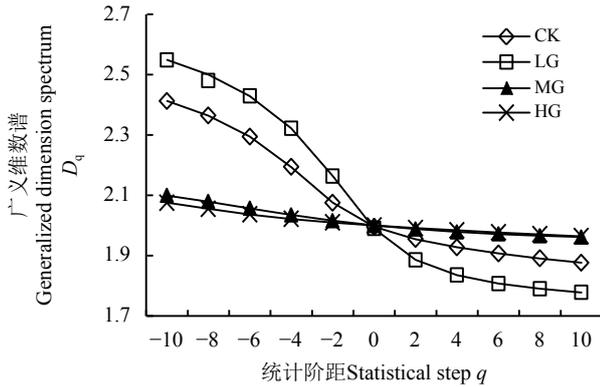


图 4 短花针茅植物种群重要指数在不同放牧强度下的广义维数谱曲线

Figure 4 Generalized dimensional spectrum curve of the important index of *Stipa breviflora* population under different grazing intensities

表 1 短花针茅在不同放牧强度下的分形维数和多重分形度

Table 1 Fractal dimension and multifractal degree of *Stipa breviflora* under different grazing intensities

放牧强度 Grazing intensity	计盒维数 Box counting dimension D_0	信息维数 Information dimension D_1	关联维数 Correlation dimension D_2	多重分形度 Multifractal degree D_1/D_0
CK	2.00	1.97	1.95	0.988 2
LG	1.99	1.93	1.89	0.969 1
MG	2.00	1.99	1.99	0.996 8
HG	2.00	2.00	1.99	0.997 8

在统计阶距 $-10 \leq q \leq 10$ 内, CK 和 LG 处理区的短花针茅植物种群广义维数谱变化比较强烈, 且变动范围在 CK 处理区小于 LG 处理区 (图 4), 说明轻度放牧下短花针茅植物种群多重分形特征更为明显, 而 CK 处理区的短花针茅植物种群多重分形特征较弱。因此, 相对来讲, LG 处理区具有更为复杂的空间分布形式。在 MG 和 HG 处理区短花针茅植物种群重要指数空间分布的复杂性和不均匀性十分接近, 尽管统计阶距不同, 但二者的广义维数谱比较相似, 当统计阶距 $q < 0$ 时二者广义维数均小于 CK 处理区。综合来看, 在 CK 和 LG 处理区, 短花针茅植物种群在群落中的重要性空间变化复杂; 反之, 在 MG 和 HG 处理区, 短花针茅植物种群在群落中的重要性空间变化简单。

在广义维数谱中, 当统计阶距 q 分别为 0、1 和 2 时, 对应的分形维数分别为计盒维数、信息维数和关联维数。尽管放牧强度不同, 但是 3 个维数在放

牧强度间的大小差异规律比较一致, 即在 LG 处理区小于 CK、MG 和 HG 处理区 (表 1), 表明轻度放牧下短花针茅植物种群空间分布的复杂性和不均匀性较高, 这主要是因为存在相对随机因素的影响, 这一随机因素就是放牧家畜在 LG 处理区的高度选择性牧食行为。

尽管不同放牧强度下短花针茅植物种群重要指数的各分形维数存在差异, 但是 D_1/D_0 值接近于 1 (表 1)。说明尽管放牧强度不同, 但是短花针茅植物种群重要指数在群落中均以高值出现, 即作为建群种的短花针茅在群落中的主导和控制作用没有发生改变。

2.4 短花针茅植物种群在不同放牧强度下的多重分形奇异谱

由奇异性指数 $\alpha(q)$ 和多重分形谱 $f[\alpha(q)]$ 曲线特征 (图 5) 可知, 无论放牧强度如何, 短花针茅重要指数的多重分形奇异谱均呈“左钩状”, 表明短花针茅重要指数在群落中均比较高, 其与计盒维数及广义分形谱表征结果一致。尽管短花针茅植物种群在群落中的地位 and 作用比较重要, 且起到主导和控制作用, 但是这种作用的大小单从计盒维数等分形维数角度难以细致的刻画, 有必要进行进一步的数量分析。

奇异性指数极差 $\Delta\alpha$ 反映的是多重分形谱的宽度, CK、LG、MG 和 HG 处理短花针茅重要指数的多重分形谱宽度分别为 0.819、1.043、0.263 和 0.251, 说明轻度放牧下短花针茅植物种群重要指数的空间分布不均匀且复杂程度最高, 其次是 CK 处理, 而

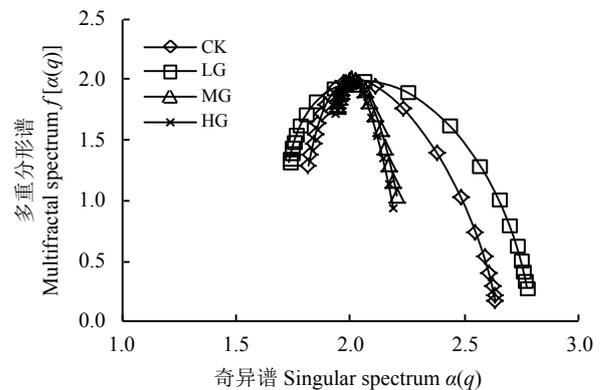


图 5 短花针茅重要指数在不同放牧强度下的多重分形奇异谱曲线

Figure 5 Multifractal singular spectrum curves of important indexes of *Stipa breviflora* under different grazing intensities

MG 和 HG 处理短花针茅重要指数的空间分布比较均匀,二者相差不大,但均小于 CK 处理(表 2)。

表 2 短花针茅植物种群重要指数在不同放牧强度下的多重奇异谱参数

Table 2 Multiple singular spectrum parameters of important index of *Stipa breviflora* population under different grazing intensities

放牧处理 Grazing treatment	奇异谱及函数值 Singular spectrum and function value $\alpha-f(\alpha)$	最小值 Minimum	最大值 Maximum	差值 Difference value Δf
CK	$\alpha(q)$	1.818	2.637	0.819
	$f[\alpha(q)]$	1.288	0.166	1.123
LG	$\alpha(q)$	1.732	2.775	1.043
	$f[\alpha(q)]$	1.316	0.283	1.033
MG	$\alpha(q)$	1.943	2.205	0.263
	$f[\alpha(q)]$	1.774	1.041	0.733
HG	$\alpha(q)$	1.939	2.190	0.251
	$f[\alpha(q)]$	1.709	0.934	0.775

多重分形谱函数值的极差 Δf 反映的是短花针茅重要指数的概率子集分布情况,若 Δf 大于 0, 表征短花针茅重要指数空间分布以大概率子集占主导地位,相反,则表征短花针茅重要指数空间分布以小概率子集占主导地位;结果显示(表 2), Δf 均大于 0, 说明大概率子集是短花针茅重要指数空间分布的主要特征,即短花针茅植物种群在群落中占主导地位和作用。

3 讨论

3.1 短花针茅植物种群的多重分形特征

关于短花针茅植物种群的多重分形特征,卫智军等^[17]和吕世杰等^[18]均进行过相关研究,但是二者得出的结论是短花针茅的空间分布主要以低密度形式分布,这可能是因为短花针茅属于丛生性禾草,其株丛基径变化范围较大,以密度进行空间分形分析,尽管也得到了结构性因素占主导地位 and 空间自相关程度较高的结论,但却得到了低密度分布属于短花针茅的普遍分布形式这一结论。本研究采用重要值指数,不仅反映了短花针茅的空间占有能力(高度和盖度),也反映了其在单位面积上的有效繁殖能力(密度)。但也有研究者认为,放牧导致短花针茅植物种群株丛发生破碎化(且越大的株丛越

容易发生破碎化),从而使得到的密度值偏高,不能够真实反映其繁殖能力^[7]。本研究认为,短花针茅本身是多年生丛生禾草,其繁殖包含有性繁殖和无性繁殖,其株丛破碎化是对放牧的积极响应,其有可能在后续发展成相对独立的植株,作为密度统计会表现较高,但也反映其适应策略和未来株丛密度的变化趋势。所以采用重要指数表征短花针茅在群落中的地位和作用比较合理,也在一定程度上反映其受放牧影响的适应和繁殖策略。因此,采用重要指数进行空间分布的探讨,不仅依然证明短花针茅植物种群空间分布存在多重分形特征,且更能够反映短花针茅植物种群在群落中的地位和作用。

在统计阶距 q 分别为 0、1 和 2 时,广义维数谱取值分别为计盒维数(容量维数, D_0)、信息维数(D_1)和关联维数(D_2)^[23],分别表征植物种群的空间占有能力、空间分布格局强度以及个体空间关联的尺度变化^[24-25]。因此,从空间占有能力来看,轻度放牧可使短花针茅植物种群的空间占有能力小幅下降,但中度放牧和重度放牧不会改变短花针茅植物种群的空间占有能力。从格局强度来看,轻度放牧使得短花针茅植物种群空间分布聚集性增加($D_1 = 1.93$),伴随放牧强度的增大,短花针茅植物种群空间分布由聚集性向均匀性转变(D_1 值逐渐增大,轻度放牧除外)。从关联维数来看,短花针茅植物种群空间分布的自相关强度在轻度放牧处理区最低,表征其个体间的竞争压力最小,伴随放牧强度的增加,短花针茅植物种群个体空间的竞争强度随之增加(轻度放牧除外)。因 D_1/D_0 越接近于 1,表征短花针茅植物种群空间分布越集中于密集区域^[18],而本研究结果显示各放牧强度下短花针茅植物种群的 D_1/D_0 值均大于 0.95,接近于 1,所以尽管放牧强度不同,短花针茅植物种群空间分布整体上均集中于密集区域。这与图 5 和表 2 的研究结果一致。

3.2 短花针茅植物种群空间分形与其在群落中地位和作用的关系

由于短花针茅是试验区荒漠草原的建群种,其在群落中的地位和作用及其对群落结构和功能的影响得到许多研究者的一致认可^[8-10]。本研究结果显示,多重分形可以明确短花针茅植物种群空间分布的不均匀性,能够阐释究竟是大概率子集还是小概率子集在空间分布上占主导地位,但是难以反映

不同放牧强度之间短花针茅植物种群在群落中的作用大小及其与复杂度和多重分形谱的关系。经过比对发现(除CK外),随着放牧强度的增加,短花针茅在群落中的地位和作用增强,同时其空间分布复杂程度降低,但与其空间分布的高概率子集并没有明显的相关关系。由于无论放牧强度如何,短花针茅空间分布均以高概率子集分布占主导地位,同时短花针茅是建群种,对群落结构和功能起主导作用,且伴随放牧强度的增加,其在群落中的地位和作用进一步加强。因此,放牧导致建群种短花针茅植物种群在群落中的主导作用增强,其在高强度放牧下维持群落稳定及决定群落结构和功能方面具有决定性作用,这一点可以从前人研究的生物量方面得到佐证^[2,26]。

由于计盒维数、信息维数和关联维数的生态学意义不同^[18,24],在不同放牧强度下,尽管短花针茅植物种群在植物群落中的主导作用依然存在,但是均有自己的变化特点。首先,轻度放牧导致短花针茅植物种群计盒维数降低,表征其空间占有能力下降,也意味着其生态位宽度在下降;此时短花针茅空间分布的聚集性增加,个体间的竞争强度减弱。

其次,伴随放牧强度的增大(轻度放牧除外),短花针茅植物种群的生态位宽度几乎没有变化,空间分布由聚集性向均匀性转变,个体间的竞争强度随之增大。这一变化规律显示重度放牧区需要调整生态适应策略,以维持其种群延续及其在植物群落中的主导地位;通过对短花针茅植物种群的数量特征分析,株丛破碎化与其重牧条件下的适应策略直接相关^[27-28]。

4 结论

在不同放牧强度下,短花针茅植物种群空间分布存在多重分形特征;伴随放牧强度的增大(轻度放牧除外),短花针茅植物种群空间分布的多重分形复杂性降低:生态位宽度几乎没有变化,空间分布由聚集状态转为均匀状态,个体间的竞争强度增大;轻度放牧下短花针茅植物种群空间分布多重分形特征最为复杂:生态位宽度降低,空间分布聚集特征最明显,个体间的竞争强度最小。无论放牧强度如何变化,短花针茅植物种群在植物群落中的主导地位没有改变,空间分布的整体特征是以大概率子集空间分布为主。

参考文献 References:

- [1] 赵萌莉, 许志信. 短花针茅荒漠草原主要牧草再生特性及其影响因素的研究. *草地学报*, 1994, 2(2): 33-42.
ZHAO M L, XU Z X. Regrowth dynamics and factors affecting the regrowth of range herbage in *Stipa breviflora* desert steppe. *Journal of Grassland*, 1994, 2(2): 33-42.
- [2] 吕世杰, 刘红梅, 吴艳玲, 卫智军, 聂雨倩. 放牧对短花针茅荒漠草原建群种与优势种空间分布关系影响. *应用生态学报*, 2014, 25(12): 3469-3474.
LYU S J, LIU H M, WU Y L, WEI Z J, NIE Y Q. Effects of grazing on spatial distribution relationships between constructive and dominant species in *Stipa breviflora* desert steppe. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(12): 3469-3474.
- [3] 张爽, 卫智军, 吕世杰, 刘红梅, 王天乐, 孙世贤. 放牧对短花针茅荒漠草原主要植物种群及群落地上现存量稳定性的影响. *中国草地学报*, 2017, 39(6): 26-32.
ZHANG S, WEI Z J, LYU S J, LIU H M, WANG T L, SUN S X. Study on aboveground biomass and vegetation stability of main plant populations and community in *Stipa breviflora* desert steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, 39(6): 26-32.
- [4] 刘钦普, 林振山. 气候变暖与荒漠-草原过渡带植物动态响应灰色分析: 以美国新墨西哥州 Sevilleta 生态过渡带为例. *生态学杂志*, 2005, 24(7): 756-762.
LIU Q P, LIN Z S. Gray analysis on responses of desert/grassland biome transition zone to global warming: A case of the desert/grassland biome transition zone in New Mexico. *Journal of Ecology*, 2005, 24(7): 756-762.
- [5] 谢腾腾. 荒漠草原带土地利用的土壤环境效应研究: 以盐池县马儿庄村为例. 银川: 宁夏大学硕士学位论文, 2013.
XIE T T. Research on soil environmental effects of land use in desert steppe region: A case on Ma'erzhuang village in Yanchi county in Ningxia Province. Master Thesis. Yinchuan: Ningxia University, 2013.

- [6] 卫智军, 韩国栋, 赵钢, 李德新. 中国荒漠草原生态系统研究. 北京: 科学出版社, 2011.
WEI Z J, HAN G D, ZHAO G, LI D X. The Study of Desert Grassland Ecosystem in China. Beijing: Science Press, 2011.
- [7] 卫智军, 常秉文, 孙启忠, 韩建国, 杨尚明. 荒漠草原群落及主要植物种群特征对放牧制度的响应. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(3): 188-191.
WEI Z J, CHANG B W, SUN Q Z, HAN J G, YANG S M. The response of community and population characteristics to the grazing system in desert steppe. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(3): 188-191.
- [8] 卫智军, 牛富宝, 刘红梅, 吕世杰, 刘文亭. 短花针茅荒漠草原植物种群生态位对放牧的响应. *中国草地学报*, 2015, 37(5): 24-32.
WEI Z J, NIU F B, LIU H M, LYU S J, LIU W T. Study on response of niche of *Stipa breviflora* desert steppe plant populations to grazing. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, 37(5): 24-32.
- [9] 卫智军, 刘文亭, 吕世杰, 张爽, 王天乐, 丁莉君. 荒漠草地短花针茅种群年龄对放牧调控的响应机制. *生态环境学报*, 2016, 25(12): 1922-1928.
WEI Z J, LIU W T, LYU S J, ZHANG S, WANG T L, DING L J. The response of community and population characteristics to the grazing systems in desert steppe. *Journal of Ecology Environment*, 2016, 25(12): 1922-1928.
- [10] 韩国栋, 李博, 卫智军, 杨静, 吕雄, 李宏. 短花针茅草原放牧系统植物补偿性生长的研究 I. 植物净生长量. *草地学报*, 1999, 7(1): 1-7.
HAN G D, LI B, WEI Z J, YANG J, LYU X, LI H. Plant compensatory growth in the grazing system of *Stipa breviflora* desert steppe-Plant net productivity. *Journal of Grassland*, 1999, 7(1): 1-7.
- [11] 韩国栋, 焦树英, 毕力格图, 敖登高娃. 短花针茅草原不同载畜率对植物多样性和草地生产力的影响. *生态学报*, 2007, 27(1): 182-188.
HAN G D, JIAO S Y, Biligetu, Aodenggaowa. Effects of plant species diversity and productivity under different stocking rates in the *Stipa breviflora* desert steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 182-188.
- [12] 赵萌萌, 韩冰, 张红梅, 万雪龙, 张刚. 针茅属植物 RAPD 条件优化. *干旱区资源与环境*, 2003, 17(1): 96-99.
ZHAO M L, HAN B, ZHANG H M, WAN X L, ZHANG G. Optimal of RAPD amplification on *Stipa breviflora*. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2003, 17(1): 96-99.
- [13] 希吉日塔娜, 吕世杰, 卫智军, 刘红梅, 孙世贤, 吴艳玲. 不同放牧制度下短花针茅荒漠草原植物种群作用和种间关系分析. *生态环境学报*, 2013, 22(6): 976-982.
Xijiritana, LYU S J, WEI Z J, LIU H M, SUN S X, WU Y L. Analysis of the role of *Stipa breviflora* desert grassland plant populations and the interspecific relationships under different grazing systems. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(6): 976-982.
- [14] 刘菊红, 郝敦元, 韩国栋, 王忠武, 钱进. 短花针茅荒漠草原植物的群落组织力及其对重牧的响应. *生态环境学报*, 2017, 26(7): 1093-1099.
LIU J H, HAO D Y, HAN G D, WANG Z W, QIAN J. Plant community organization in a *Stipa breviflora* desert steppe and its response to heavy grazing. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(7): 1093-1099.
- [15] 贾利娟, 桑雪颖, 李慧娟, 吕世杰, 苏金梅, 乌兰, 刘红梅. 短花针茅荒漠草原物种数空间变化特点及其与取样方法的关系. *草原与草业*, 2014, 26(4): 30-34.
JIA L J, SANG X Y, LI H J, LYU S J, SU J M, WU L, LIU H M. The spatial variation of the species and its relation to the sampling method in *Stipa breviflora* desert steppe. *Grassland and Prataculture*, 2014, 26(4): 30-34.
- [16] 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.
LIU H M, WEI Z J, YANG J, LYU S J, WU Y L, LIU R, YUN X J. Effect of different grazing systems on spatial heterogeneity of *Stipa breviflora* desert steppe. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(8): 138-143.
- [17] 卫智军, 张爽, 吕世杰, 解云, 刘文亭, 刘红梅, 吴艳玲. 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. *生态环境学报*, 2016, 25(5): 729-736.

- WEI Z J, ZHANG S, LYU S J, XIE Y, LIU W T, LIU H M, WU Y L. Effect of grazing intensity after spring banning grazing on spatial distribution of dominant population in *Stipa breviflora* desert steppe. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(5): 729-736.
- [18] 吕世杰, 张爽, 刘红梅, 卫智军, 刘文昌, 吴艳玲, 解云. 短花针茅荒漠草原建群种空间分布的多重分形研究. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(4): 106-112.
LYU S J, ZHANG S, LIU H M, WEI Z J, LIU W T, WU Y L, XIE Y. Multifractal spatial distribution of main plant populations of *Stipa breviflora* desert steppe. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(4): 106-112.
- [19] SCHEURING I, RIEDI R H. Application of multifractal to the analysis of vegetation pattern. *Swedish Journal of Vegetable Science*, 1994, 5(4): 489-496.
- [20] PERFECT E, GENTRY R W, SUKOP M C, LAWSON J E. Multifractal Sierpinski carpets: Theory and application to upscaling effective saturated hydraulic conductivity. *Netherlandish Geoderma*, 2006, 134(3/4): 240-252.
- [21] WANG D, FU B J, ZHAO W W, HU H F, WANG Y F. Multifractal characteristics of soil particle size distribution under different land-use types on the Loess Plateau, China. *German Catena*, 2008, 72(1): 29-36.
- [22] 管孝艳, 王少丽, 吕焯, 付小军. 土壤水盐空间变异性及其尺度效应的多重分形分析. *水利学报*, 2013, 44(Z1): 8-14.
GUAN X Y, WANG S L, LYU Y, FU X J. Analysis on spatial variability of soil water and salt and it's scale effect based on multifractal. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(Z1): 8-14.
- [23] 贺燕, 魏霞, 魏宁, 于文竹, 崔霞, 赵恒策. 祁连山区主要下垫面土壤粒径分布特征. *水土保持研究*, 2020, 27(2): 42-47, 54.
HE Y, WEI X, WEI N, YU W Z, CUI X, ZHAO H C. Characteristics of soil particle size distribution of main land surfaces in Qilian mountains. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(2): 42-47, 54.
- [24] 田玉强, 李新, 江明喜. 后河自然保护区珍稀濒危植物种群分布格局的分形特征: 计盒维数. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 681-684.
TIAN Y Q, LI X, JIANG M X. Fractal properties of the spatial pattern of rare and endangered plant populations in Houhe Nature Reserve in Hubei: Box-counting dimension. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5): 681-684.
- [25] 徐冰, 赵淑银, 郭克贞, 佟长福. 草地开发与保护过程中土壤颗粒分形特征. *草业科学*, 2009, 26(7): 143-146.
XU B, ZHAO S Y, GUO K Z, TONG C F. Fractal dimension characteristic of soil particles during the grassland reclamation and protection. *Pratacultural Science*, 2009, 26(7): 143-146.
- [26] 卫智军, 杨静, 杨尚明. 荒漠草原不同放牧制度群落稳定性研究. *水土保持学报*, 2003, 17(6): 121-124.
WEI Z J, YANG J, YANG S M. Studies on community under different grazing systems on desert steppe. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(6): 121-124.
- [27] LYU 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.
- [28] LYU 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.

(责任编辑 魏晓燕)

如有印装质量问题, 请将原杂志寄回本刊编辑部, 由本部负责调换。