

文章编号:1000-1638(2025)02-0196-10

DOI:10.13484/j.nmgdxxbzk.20250210

围封年限对典型草原植物多样性和土壤养分空间异质性的影响^{*}

李浩¹, 郭肖¹, 李航宇¹, 李智勇¹, 武艳涛²,
姜珊¹, 彭江涛¹, 李星³, 杨泽宇⁴, 苗百岭⁵, 梁存柱¹

(1. 内蒙古大学生态与环境学院/蒙古高原生态学与资源利用教育部重点实验室/
内蒙古草地生态学重点实验室-省部共建草地生态学国家重点实验室培育基地, 呼和浩特 010021;
2. 内蒙古大学生命科学学院, 呼和浩特 010021; 3. 内蒙古自治区林业科学研究院, 呼和浩特 010010;
4. 侯马北铜铜业有限公司, 山西 临汾 043000; 5. 内蒙古自治区气象科学研究所, 呼和浩特 010051)

摘要:为探讨不同围封年限典型草原植物多样性和土壤养分含量的空间分布特点及差异,本研究以内蒙古锡林郭勒典型草原为研究对象,分析了围封37年和24年退化样地植物多样性指数和土壤养分含量的空间异质性。结果表明:1)与24年围封样地相比,37年样地的物种丰富度、Shannon-Wiener指数、Simpson指数、全碳、全氮、速效磷、速效钾和硝态氮含量均显著增大;植物多样性指数的变异系数均减小,土壤速效磷变异系数增大而其他指标变化较小。2)通过半方差函数模型拟合,植物多样性指数大多服从指数模型而土壤养分含量大多服从指数和球面模型,此外土壤速效氮的结构比随围封年限增加而增大,受结构因素影响的空间异质性比例增大。3)不同围封年限下植物群落和土壤养分空间结构发生变化,物种丰富度、Shannon-Wiener和Simpson指数的空间分布格局较简单,空间结构较好,空间异质性降低;土壤速效磷和速效钾的空间分布格局复杂,空间结构变差,空间异质性增大。围封封育可以提高典型草原群落物种多样性,使群落均质化从而降低群落的空间异质性;增加土壤养分含量,提升了土壤速效磷和速效钾的空间异质性。

关键词:典型草原; 植物多样性指数; 土壤养分; 空间异质性; 半方差函数; 空间结构

中图分类号:Q948.11 **文献标志码:**A

温带典型草原作为我国欧亚大陆草原中最具有代表性和典型性的草原类型之一^[1],不仅是我国主要的畜牧业基地,也是我国北方重要的生态安全屏障^[2]。近年来,超载过牧、鼠虫危害及全球气候变暖等人为和自然因素,使我国草地出现不同程度的退化现象^[3],成为对环境变化响应更为敏感的区域。围栏封育是退化草地生态恢复与重建的重要策略之一,其在一定时间尺度内可以提高物种丰富度^[4],增强资源利用能力^[5],促进植被空间格局发生变化^[6]。植物群落的演替过程增加了土壤资源的异质性,而土壤资源的异质性同样对物种分布格局和植物多样性的维持至关重要。

空间异质性指的是生态学变量在空间上的不均匀分布和复杂性^[7],是多个生态过程在时间和空

^{*} 收稿日期:2024-03-07; 修回日期:2024-07-01

基金项目:国家自然科学基金项目(32271656,31960261); 内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0092)

作者简介:李浩(1994-),男,河南信阳人,2022级博士研究生。主要研究方向为草地生态学。E-mail: lihao0191@163.com

通信作者:李智勇(1980-),男,内蒙古乌兰察布人,副教授,博士。主要研究方向为生物多样性与生态系统功能关系、草地土壤碳汇。E-mail:zylee007@imu.edu.cn

间上连续作用产生的结果。以往针对空间异质性的研究大多通过幂函数、随机森林模型等常规方法进行分析,而如今多借助地统计学分析不同尺度下自然生态系统的过程及其产生的格局。目前,国内外学者主要就放牧强度、不同放牧类型、草地利用方式,研究尺度和微地形对不同草地类型的植物群落、土壤水分和土壤养分的空间异质性的影响进行了不同层次的研究,结果表明:放牧降低了植被密度的空间异质性^[8];短花针茅种群空间异质性随载畜率的增大呈增大趋势^[9];载畜率对土壤水分的空间分布有明显的影响^[10];与围封相比,放牧增加了群落整体的空间分布异质性,而刈割则降低了这种变化^[11];微地形引起各非生物要素在空间上的重新分配,显著影响植物群落多样性的空间异质性^[12];重牧明显增加了土壤铵态氮和硝态氮的空间异质性^[8];食草动物放牧和植物多样性会共同改善土壤空间异质性^[13];然而却少有学者对比不同围封年限植物多样性指数和土壤养分含量空间异质性的差异性。

本研究以内蒙古锡林郭勒典型草原为研究对象,设置不同围封年限的围封样地,调查植物群落和土壤养分含量的特征,采用地统计学和经典统计学相结合的方法,分析植物多样性指数和土壤养分含量的空间异质性,探讨二者的相关关系,并揭示围封条件下退化草地物种多样性和土壤养分含量的空间异质性形成机制,旨在为典型草原生物多样性保护和可持续管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

实验样地位于中国科学院白音锡勒草原生态系统定位研究站设置的围栏内,地理坐标为:43°33′12″—43°33′35″N,116°42′26″—116°42′31″E。该区域海拔高度为 1200 m;年平均降水量为 346 mm (1982—2014 年),降水量年内和年际间变异较大,60%~80%的降水发生在生长季的 5—9 月;年平均气温 0.3℃;区域地带性土壤属暗栗钙土;植物群落的优势植物包括:羊草(*Leymus chinensis*)、大针茅(*Stipa grandis*)、冰草(*Agropyron cristatum*)和糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)等^[14-15]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

本研究分别于 1983 年和 1996 年在研究区设置围栏并开展围封实验,于 2019 年 9 月进行植物群落调查和土壤样品采集。

1983 年围封样地:该样地围封时为严重退化状态的冷蒿(*Artemisia frigida*) + 糙隐子草群落,由羊草 + 大针茅群落严重退化形成,面积为 600 m × 400 m,距采样时间已围封 37 年。

1996 年围封样地:该样地是在 1983 年围封样地的南端向南延伸 50 m 围封而成,与 1983 年围封样地的原生群落和生境一致,面积为 50 m × 400 m,距采样时间已围封 24 年。

1.2.2 植物群落调查和土壤样品采集

本研究于 2019 年 9 月进行植物群落调查和土壤样品采集,在每一块围封样地的正中间设置一条 120 m 样线,每隔 2 m 设置一个取样点。每个取样点取表层 0~10 cm 土样;并做一个 20 cm × 20 cm 的小样方调查群落物种组成,记录植株平均高度、株丛数和丛幅等群落信息;共计采集土壤样品 240 份,调查草本群落样方 240 个。

1.2.3 物种多样性指数计算和土壤指标测定

(1) 物种多样性指数计算

本研究使用相对盖度、相对高度和相对密度计算重要值,并选取 4 种最具代表性的物种多样性指数,物种丰富度指数(S)、Shannon-Wiener 指数(H)、Simpson 指数(D)、Pielou 均匀度指数(E)。计算公式如下:

$$P_i = (RC + RH + RD) / 3,$$

$$S = N,$$

$$H = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i,$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2,$$

$$E = H/\ln S.$$

式中, P_i 为样方内的物种 i 的相对重要值; RC 为相对盖度; RH 为相对高度; RD 为相对密度; N 为样方内物种数量。

(2) 土壤养分指标测定

土壤全碳和全氮含量使用元素分析仪(Vario MACRO cube, Elementar, Germany)测定; 土壤速效氮(铵态氮和硝态氮)使用流动分析仪(AA3, SEAL Analytical, Germany)测定; 土壤速效磷(AP)和速效钾(AK)用碳酸氢铵、二乙烯三胺五乙酸及氯化钙组成的混合溶液提取, 使用电感耦合等离子体发射光谱仪(Optima ICP-OES8000, Perkin Elmer, America)测定。

1.2.4 空间异质性分析

采用变异系数(CV)和半方差函数对植被和土壤空间异质性进行定量分析。变异系数是衡量变量变异程度的经典指标, 通常以 $CV \leq 10\%$ 为弱变异, $10\% < CV < 100\%$ 为中等变异, 而 $CV \geq 100\%$ 为强变异。半方差函数通过模型拟合以最大决定系数确定最优模型, 对块金值(C_0)、基台值($C_0 + C$)等进行评估, 以反映变量的变异强度。块金值(C_0)反映变量受随机性因素影响的变异程度, 结构方差(C)反映变量受非随机性因素影响的变异程度, 结构比 $C/(C_0 + C)$ 反映变量的空间自相关性或空间异质性强弱。本研究中结构比表示的是植物多样性指数和土壤养分含量的空间自相关程度, 当结构比大于 0.75 时, 空间自相关性很强; 当结构比在 0.25~0.75 时, 空间自相关性处于中等水平, 当结构比小于 0.25, 空间自相关性较弱。当描述与量化其空间结构时, 通常运用分形维数方法进行分析, 分形维数越高, 表明空间分布格局越简单, 空间依赖性越强, 空间结构性则越好, 分形维数能表示出变异函数曲线的曲率大小, 当该值越接近 2 时, 表明草地越同质。半方差变异函数公式如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2,$$

式中, $\gamma(h)$ 为半方差函数; h 为分隔距离; $Z(x_i + h)$ 和 $Z(x_i)$ 分别为变量 $Z(x)$ 在空间位置 $x_i + h$ 和 x_i 上的实测值 [$i = 1, 2, \dots, N(h)$]; $N(h)$ 为间距为 h 的样本对的数目。

1.3 数据分析

在 SPSS 22.0 软件中对植物多样性指数和土壤养分含量的均值、变异系数、最值等进行统计分析, 对不同围封年限的植物多样性指数和土壤养分含量进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)并进行 Duncan 检验比较, 不同尺度间进行 t 检验 ($\alpha = 0.05$)。采用单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验进行正态性检验, 即当 $K-S > 0.05$ 时服从正态分布, 否则需要进行正态化转换。符合正态分布后使用地统计学软件 GS+9.0 对植物多样性指数和土壤养分含量进行模型拟合分析及分形维数的确定。上述指标和方法可以有效地揭示属性变量在空间上的变异和分布特征。

2 结果与分析

2.1 植物多样性和土壤养分含量特征

随围封年限增加, 物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数显著增大 ($P < 0.05$), 而 Simpson 和 Pielou 均匀度指数无明显变化 ($P > 0.05$), 四个物种多样性指标变异系数均略微减小。不同围封年限下, 物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数均属于中等变异, 而 Simpson 和 Pielou 均匀度指数属于弱变异(表 1)。土壤全碳、全氮、速效磷、速效钾和硝态氮含量均随围封年限增加显著增大 ($P < 0.05$), 而土壤铵态氮含量无显著变化 ($P > 0.05$)。不同围封年限下, 土壤养分变异系数均属于中等变异; 其

中土壤全碳、全氮、速效钾和硝态氮的变异系数略微减小,而速效磷和铵态氮略微增大(表 2)。

表 1 物种多样性指数特征

Table 1 Species diversity index characteristics

统计指标	物种丰富度		Shannon-Wiener		Simpson		Pielou 均匀度	
	围封	围封	围封	围封	围封	围封	围封	围封
	24 年	37 年	24 年	37 年	24 年	37 年	24 年	37 年
最大值	10	8	2.07	1.93	0.91	0.9	1.05	0.97
最小值	2	3	0.64	1.05	0.6	0.75	0.85	0.83
均值	4.57±	5.02±	1.35±	1.45±	0.81±	0.83±	0.93±	0.92±
	0.20b	0.16a	0.04b	0.03a	0.01a	0.00a	0.005a	0.003a
变异系数/%	33.7	24.1	22.22	14.48	7.41	4.82	4.3	3.26

注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

表 2 土壤养分含量特征

Table 2 Characteristics of soil nutrient content

统计指标	全碳/(mg/g)		全氮/(mg/g)		速效磷/(mg/kg)	
	围封 24 年	围封 37 年	围封 24 年	围封 37 年	围封 24 年	围封 37 年
最大值	31.57	35.66	3.48	3.78	4.88	24.75
最小值	14.22	18.85	1.57	2.00	1.04	4.50
均值	21.00±0.44b	24.39±0.39a	2.27±0.05b	2.62±0.04a	2.87±0.13b	14.19±0.97a
变异系数/%	16.24	12.51	16.30	13.36	34.84	52.92
统计指标	速效钾/(mg/kg)		铵态氮/(mg/kg)		硝态氮/(mg/kg)	
	围封 24 年	围封 37 年	围封 24 年	围封 37 年	围封 24 年	围封 37 年
最大值	435.80	533.50	2.70	2.58	14.09	15.43
最小值	136.30	197.35	0.65	0.71	1.39	4.43
均值	239.87±7.50b	366.34±11.09a	1.44±0.05a	1.41±0.06a	7.13±0.31b	8.35±0.29a
变异系数/%	24.22	23.44	29.86	30.50	33.80	26.59

注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

2.2 植物多样性和土壤养分含量的半变异函数

由表 3 可知,不同围封年限下物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数、24 年样地的 Pielou 均匀度指数和 37 年样地 Simpson 指数最优模型均为指数模型,24 年样地的 Simpson 指数最优模型为高斯模型,37 年样地 Pielou 均匀度指数最优模型属于线性模型即铵态氮在该研究尺度上不存在斑块化的空间分布格局。随围封年限的增加,物种丰富度、Pielou 均匀度、Shannon-Wiener 和 Simpson 指数块金值 C_0 和基台值 $C_0 + C$ 均减小;物种丰富度、Shannon-Wiener 和 Simpson 结构比 $C/(C_0 + C)$ 差异较小且均受结构性因素的影响,并表现出强的空间自相关性;物种丰富度、Shannon-Wiener 和 Pielou 均匀度指数的空间相关尺度 A_0 增大而 Simpson 指数在减小。

由表 4 可知,24 年样地多数土壤指标的最优模型均为指数模型,仅铵态氮为线性模型;37 年样地土壤全碳、全氮为指数模型,速效磷、速效钾和硝态氮为球面模型,而铵态氮为高斯模型。随围封年增加,土壤全碳、全氮和速效钾的块金值 C_0 增大,而速效磷、铵态氮和硝态氮减小;全碳和硝态氮的

基台值 $C_0 + C$ 也减小,而全氮、速效磷、速效钾和铵态氮基台值 $C_0 + C$ 在增大;全碳和全氮结构比 $C/(C_0 + C)$ 略微减小,而速效磷、速效钾、铵态氮和硝态氮均增大。不同围封年限全碳、全氮和速效磷均受结构性因素的影响,并表现出强的空间自相关性,速效钾属中等程度空间自相关性。37 年围封样地的速效氮为强空间自相关性,24 年围封的硝态氮属中等程度空间自相关性,24 年围封铵态氮结构比为零(表示铵态氮在该研究尺度上不存在斑块化的空间分布格局)。随围封年限增加,全碳和全氮空间相关尺度 A_0 差异较小,速效磷增幅较大,速效钾和速效氮均降幅很大。

表 3 物种多样性指数变异函数理论模型及相关参数

Table 3 Theoretical model of variation function of species diversity index and related parameters

多样性 指数	围封 年限/a	模型 [$y(h)$]	块金值 (C_0)	基台值 ($C_0 + C$)	结构比 [$C/(C_0 + C)$]	变程 (A_0)	残平方和 (RSS)	决定系数 (R^2)
物种丰富度	24	指数	0.35100	2.38100	0.85	0.70	7.320E-1	0.012
	37	指数	0.15400	1.41500	0.89	0.90	2.590E-1	0.050
Shannon- Wiener	24	指数	0.01400	0.09000	0.85	0.50	1.305E-03	0.002
	37	指数	0.00600	0.04300	0.87	1.60	3.093E-04	0.196
Simpson	24	高斯	0.00020	0.00352	0.94	2.20	1.995E-06	0.001
	37	指数	0.00013	0.00124	0.90	1.90	2.825E-07	0.295
Pielou 均匀度	24	指数	0.00077	0.00154	0.50	12.60	4.704E-07	0.456
	37	线性	0.00040	0.00040	0.00	56.98	1.606E-08	0.060

表 4 土壤养分含量变异函数理论模型及相关参数

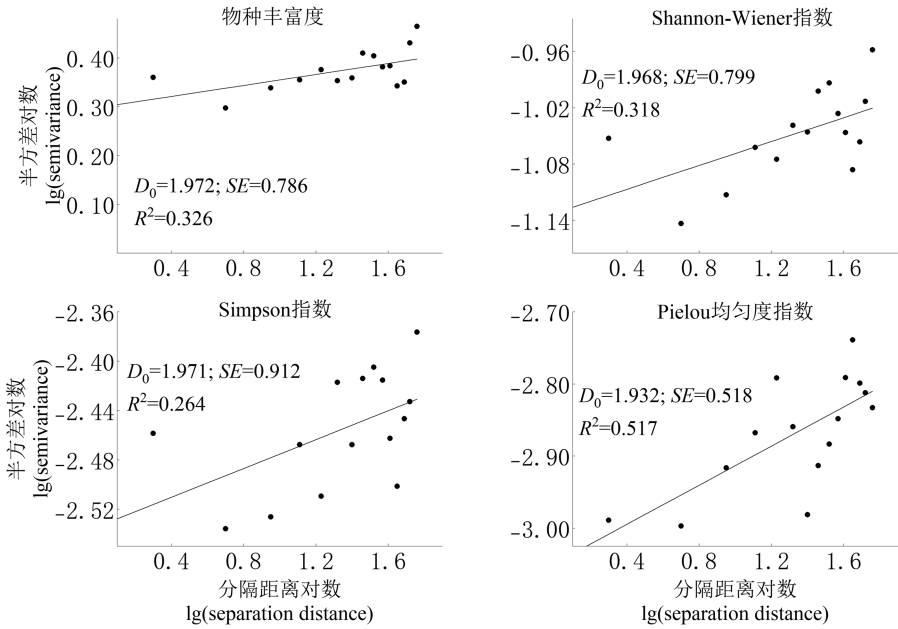
Table 4 Theoretical model of variation function of soil nutrient content and related parameters

土壤 指标	围封 年限/a	模型 [$y(h)$]	块金值 (C_0)	基台值 ($C_0 + C$)	结构比 [$C/(C_0 + C)$]	变程 (A_0)	残平方和 (RSS)	决定系数 (R^2)
全碳	24	指数	1.040	10.170	0.90	2.40	3.700E1	0.120
	37	指数	1.350	9.280	0.86	2.20	1.300E1	0.242
全氮	24	指数	0.012	0.116	0.89	2.50	5.021E-03	0.119
	37	指数	0.014	0.119	0.88	1.90	2.173E-03	0.188
速效磷	24	指数	0.177	1.004	0.82	1.20	1.400E-1	0.106
	37	球面	0.100	93.280	1.00	62.60	5.300E1	0.996
速效钾	24	指数	2510.000	5332.000	0.53	89.90	3.406E5	0.874
	37	球面	3850.000	8232.000	0.53	56.30	3.482E6	0.892
铵态氮	24	线性	0.176	0.176	0.00	56.98	5.054E-03	0.186
	37	高斯	0.040	0.198	0.80	2.40	9.339E-03	0.389
硝态氮	24	指数	3.550	7.101	0.50	15.70	4.36	0.730
	37	球面	0.530	5.138	0.90	3.70	7.23	0.158

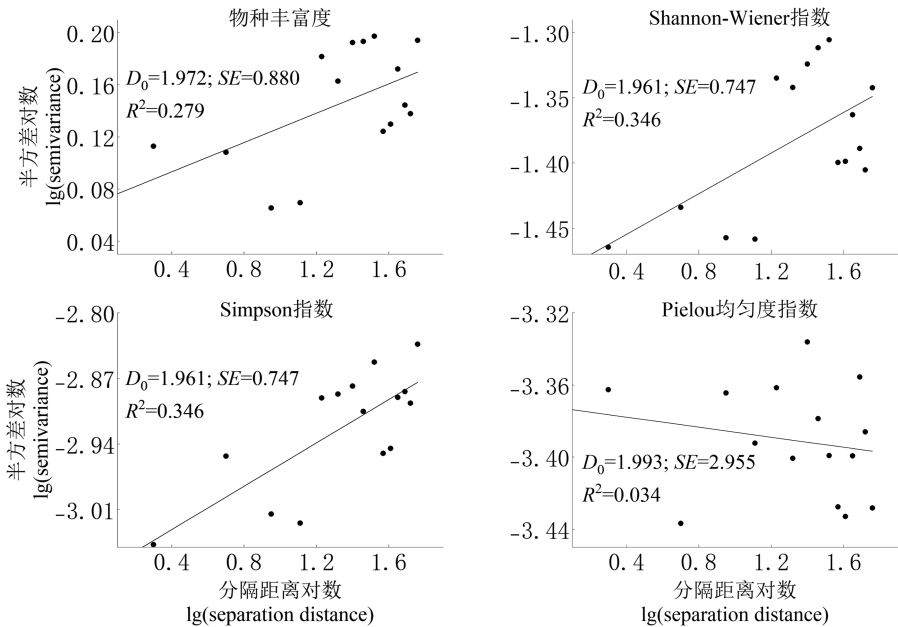
2.3 植物多样性和土壤养分含量的分形维数

不同围封年限下植物多样性空间分布的分形维数均很大且接近 2,说明植物多样性指数的空间

分布格局简单,空间依赖性强。随着围封年限的增加,土壤速效磷和速效钾的分形维数减小,全碳、全氮、铵态氮和硝态氮无明显变化,其中围封 24 年样地所有土壤养分指标空间分布格局均较简单且空间依赖性较强;围封 37 年样地全碳、全氮、铵态氮和硝态氮空间分布格局均较简单且空间依赖性较强,速效磷和速效钾空间依赖性相对较弱(图 1 和图 2)。



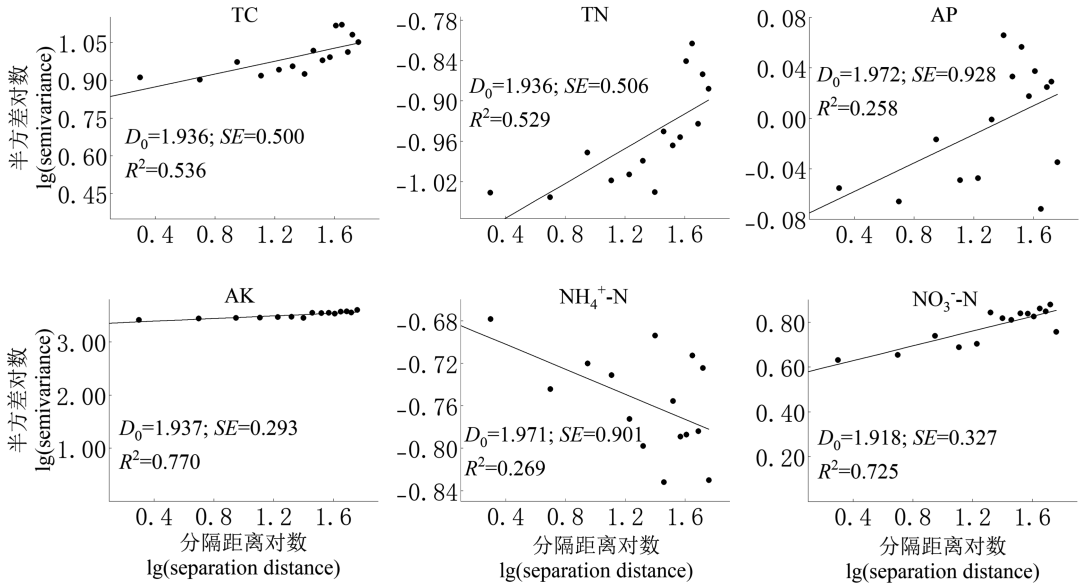
(a) 围封 24 年样地



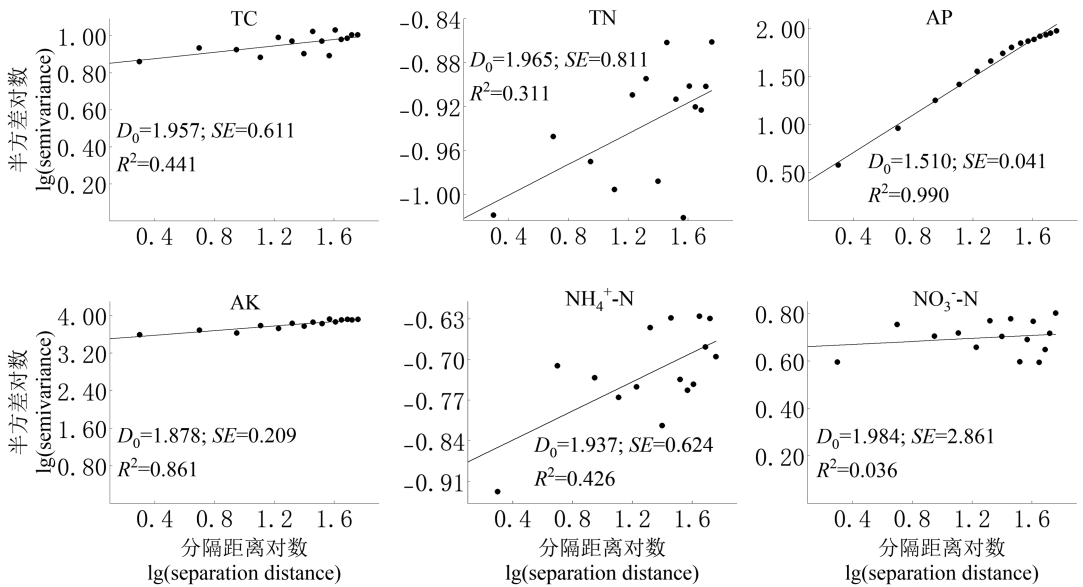
(b) 围封 37 年样地

图 1 物种多样性指数空间分布的分形维数

Fig. 1 Fractal dimension of spatial distribution of species diversity indice



(a) 围封 24 年样地



(b) 围封 37 年样地

TC 代表全碳; TN 代表全氮; AP 代表速效磷; AK 代表速效钾; NH₄⁺-N 代表铵态氮; NO₃⁻-N 代表硝态氮。

图 2 土壤养分含量空间分布的分形维数

Fig. 2 Fractal dimension of spatial distribution of soil nutrient contents

3 讨论

3.1 植物群落空间异质性与生物多样性

围栏作为放牧干扰的有效屏障,减少了牲畜的采食与践踏,是退化草地生态系统恢复的常用措施^[16]。本研究中相比于 24 年围封样地,37 年样地的物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数均显著提高 ($P < 0.05$),这与 Pei 等^[17]在荒漠草原物种多样性指数随着围封年限的增加而增大的观点一致。聂莹莹等^[4]研究发现围栏封育增加草甸草原植物群落物种多样性。本研究中均匀度指数随围封年限增加而略微降低但不显著 ($P > 0.05$),这可能是围栏内凋落物覆盖时间的负效应^[18],既抑制了种子迁移

与定植也削弱了群落底层光照强度,导致光竞争力较弱和喜光植物被淘汰。均匀度指数的降低说明典型草原不适宜长期的围封。

本研究中物种丰富度、Shannon-Wiener、Simpson 和 Pielou 均匀度指数的变异系数均随着围封年限的增加而减小,这主要由于围封条件下所有物种均可自由生长,种间竞争较大,从而增加植物群落的均质性即增加了植物群落的密集性分布^[7],最终使得物种多样性指数的变异程度降低。此外,本研究中物种丰富度、Shannon-Wiener 和 Simpson 指数在空间分布上的最大变异程度均随着围封年限的增加而减小,其空间异质性主要由地形、土壤结构和气候等结构性因素引起,空间分布格局简单,空间依赖性强,空间异质性降低。这可能是由于长期围封改变了土壤结构和养分含量从而使植物多样性指数的空间异质性降低且主要受结构性因素影响^[19]。围封条件下退化草地开始向群落状况良好的草原类型演替,物种多样性增加,群落异质性降低^[7]。这与左小安等^[20]在科尔沁沙地的研究结果相反,可能是典型草原相比于沙地土壤保水能力更强。随着围封年限的增加,均匀度指数的最大变异程度降低,由结构性因素引起的空间异质性降低,空间分布格局更加简单。

3.2 土壤养分空间异质性与含量特征

植物影响土壤大量养分的一个机制可能是凋落物的输入,且植物吸收的大部分养分会以落叶的形式返回土壤^[21]。本研究中 37 年围封样地相比于 24 年样地的土壤全碳、全氮、速效磷、速效钾和硝态氮含量均显著提高($P < 0.05$)。这是凋落物的累积与分解导致土壤养分含量逐渐增加,因为土壤养分供应和养分循环的正反馈作用是通过凋落物的累积而加强。Wu 等^[22]对青藏高原嵩草草甸的研究同样发现围封对速效氮和速效磷有显著的正向影响。乌力吉等^[23]研究表明,围栏禁牧阻止了家畜采食,减少了能量和养分从生态系统的输出,增加了土壤的 P 含量。

土壤限制性资源的空间异质性是维持生物多样性和生态系统功能的重要因素之一^[24]。本研究中土壤速效磷的变异系数随着围封年限的增加而增大,而硝态氮变异系数随着围封年限的增加而减小。在禁牧状态下,群落具有较高的植被高度和盖度,增加了地表的粗糙度,这不仅可以有效地减少风蚀引起土壤侵蚀,而且能够截获风沙中高养分含量的土壤细砂。土壤 P 的输入和输出同时受植被覆盖度和地形的影响。周建勤等^[25]同样得出围封会降低土壤速效氮变异系数的结论。本研究发现土壤速效磷在空间分布上最大变异程度随着围封年限的增加而增大,且由结构性因素引起的空间异质性比例增大,速效磷分布格局结构变差,空间异质性增大。速效钾最大变异程度同样随围封年限增加而增大,分布格局结构变差,空间异质性增大;这可能是由于钾元素以原生矿物形态分布在土壤粗粒中,长期围封改善土壤粗粒组成,促进了钾元素的分解,增大了速效钾的空间异质性。本研究中铵态氮和硝态氮结构比均随着围封年限的增加而增大,空间自相关性增强,但不同围封年限下分形维数均较大(接近 2),空间分布格局简单。

4 结论

- 1) 长期围封增大物种丰富度、Shannon-Wiener 和 Simpson 指数,并显著提高土壤全碳、全氮、速效磷、速效钾和硝态氮等养分含量。
- 2) 长期围封降低了物种多样性的变异程度,使物种多样性指数的空间异质性降低。
- 3) 围封年限对土壤全碳和全氮空间异质性影响较小。长期围封增大了土壤速效磷和速效钾的最大变异程度,使其空间异质性增大,提升了铵态氮和硝态氮受结构性因素引起的空间异质性。

参考文献:

- [1] 郝彦宾,张雷明,孙晓敏,等. 2003—2010 年内蒙古锡林浩特典型草原碳水通量观测数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版),2021,6(1):80-86.
- [2] 王德利,王岭. 草地管理概念的新释义[J]. 科学通报,2019,64(11):1106-1113.
- [3] 刘明,张莉,王军邦,等. 草地退化及恢复治理的文献计量学分析[J]. 中国草地学报,2020,42(6):91-100.

- [4] 聂莹莹,徐丽君,辛晓平,等. 围栏封育对温性草甸草原植物群落构成及生态位特征的影响[J]. 草业学报,2020,29(11):11-22.
- [5] 井光花,程积民,苏纪师,等. 黄土区长期封育草地优势物种生态位宽度与生态位重叠对不同干扰的响应特征[J]. 草业学报,2015,24(9):43-52.
- [6] ARMAS C,PUGNAIRE F I. Plant interactions govern population dynamics in a semi-arid plant community[J]. *Journal of Ecology*,2005,93(5):978-989.
- [7] 霍光伟,乌云娜,雒文涛,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.
- [8] 杨合龙,戎郁萍,穆慕. 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.
- [9] 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.
- [10] 王亚婷,张宇,杜宇凡,等. 不同载畜率下短花针茅草原土壤水分空间异质性的分析[J]. 草业科学,2017,34(6):1159-1167.
- [11] 杨阳,贾丽欣,张峰,等. 草地利用方式对草甸草原植被空间异质性的影响[J]. 生态学杂志,2019,38(7):2015-2022.
- [12] 王兴,宋乃平,杨新国,等. 荒漠草原植物多样性分布格局对微地形尺度环境变化的响应[J]. 水土保持学报,2016,30(4):274-280.
- [13] LIU C,SONG X X,WANG L,et al. Effects of grazing on soil nitrogen spatial heterogeneity depend on herbivore assemblage and pre-grazing plant diversity[J]. *Journal of Applied Ecology*,2016,53(1):242-250.
- [14] 李建军,刘恋,陈迪马,等. 底座入土深度和面积对典型草原土壤呼吸测定结果的影响[J]. 植物生态学报,2019,43(2):152-164.
- [15] LEI D,YING Z,VEGARD M,et al. Effect of grazing exclusion and rotational grazing on soil aggregate stability in typical grasslands in Inner Mongolia,China[J]. *Frontiers in Environmental Science*,2022,10:844151.
- [16] 李润富,牛海山,孔倩,等. 围栏封育对高寒草原植被-土壤养分含量的影响[J]. 草业科学,2021,38(3):399-409.
- [17] PEI S F,FU H,WAN C G. Changes in soil properties and vegetation following exclosure and grazing in degraded Alxa desert steppe of Inner Mongolia,China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*,2008,124(1/2):33-39.
- [18] 李强,周道玮,陈笑莹. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J]. 生态学报,2014,34(14):3807-3819.
- [19] HELBACH J,FREY J,MESSIER C,et al. Light heterogeneity affects understory plant species richness in temperate forests supporting the heterogeneity-diversity hypothesis[J]. *Ecology and Evolution*,2022,12(2):e8534.
- [20] 左小安,赵学勇,赵哈林,等. 沙地退化植被恢复过程中植被的空间异质性[J]. 生态环境学报,2010,19(7):1513-1518.
- [21] 连子文,杜虎,谷俊锟,等. 喀斯特常绿落叶阔叶林土壤有效中微量元素空间异质性[J]. 应用生态学报,2023,34(4):955-961.
- [22] WU G L,DU G Z,LIU Z H,et al. Effect of fencing and grazing on a Kobresia-dominated meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Plant and Soil*,2009,319(1/2):115-126.
- [23] 乌力吉,李响,赵萌莉,等. 放牧对草地生态系统磷循环调控机制的研究进展与展望[J]. 科学通报,2020,65(23):2469-2482.
- [24] ANON. Effects of herbivore assemblage on the spatial heterogeneity of soil nitrogen in eastern Eurasian steppe[J]. *Journal of Applied Ecology*,2020,57(8):13655.
- [25] 周建勤,贾宏涛. 围栏封育对亚高山草原土壤碱解氮、速效钾空间异质性的影响[J]. 西南农业学报,2016,29(7):1729-1734.

Effects of Enclosure Duration on Plant Diversity and Spatial Heterogeneity of Soil Nutrients in Typical Steppe

LI Hao¹, GUO Xiao¹, LI Hangyu¹, LI Zhiyong¹, WU Yantao², JIANG Shan¹,
PENG Jiangtao¹, LI Xing³, YANG Zeyu⁴, MIAO Bailing⁵, LIANG Cunzhu¹

- (1. *School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University/Key Laboratory of Mongolian Plateau Ecology and Resource Utilization of Ministry of Education/Inner Mongolia Key Laboratory of Grassland Ecology and the Candidate State Key Laboratory of Ministry of Science and Technology, Hohhot 010021, China;*
2. *College of Life Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China;*
3. *Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot 010010, China;*
4. *Houma North Copper and Copper Industry Co., Ltd., Linfen 043000, China;*
5. *Inner Mongolia Meteorological Institute, Hohhot 010051, China*)

Abstract: In order to explore the spatial distribution characteristics and differences in plant diversity and soil nutrient content on typical steppe of different enclosure years, we took typical steppe of Xilin Gol League, Inner Mongolia as an example. We analyzed the spatial heterogeneity of plant diversity indices (species richness, Shannon-Wiener, Simpson, and Pielou homogeneity indices) and soil nutrient content in degraded sample plots of 37 and 24 years enclosure. The results showed that: 1) Species richness, Shannon-Wiener, Simpson, total carbon, total nitrogen, quick-acting phosphorus, quick-acting potassium and nitrate-nitrogen contents increased significantly in the 37-year sample compared to the 24-year one. The coefficients of variation of all plant diversity indices decreased, and the coefficients of variation of soil quick-acting phosphorus increased while other indicators were relatively steady. 2) We found that most plant diversity indices followed the exponential model, and most soil nutrient contents followed the exponential and spherical models according to semi-variance function. In addition, the structural ratio of soil quick-acting nitrogen increased along with enclosure years, and the structural ratio of soil quick-acting nitrogen was also affected by the proportion of spatial heterogeneity which was influenced by structural factors. 3) The spatial structure of plant communities and soil nutrients varied under different enclosure years. The spatial distribution patterns of species richness, Shannon-Wiener and Simpson indices were simple with low spatial heterogeneity. The spatial distribution pattern of soil quick-acting phosphorus and quick-acting potassium was complex with high spatial heterogeneity. Fencing can increase the species diversity of typical steppe communities, homogenize communities and thus reduce the spatial heterogeneity of communities; it increases soil nutrient content and enhances the spatial heterogeneity of soil quick-acting phosphorus and quick-acting potassium.

Key words: typical steppe; plant diversity index; soil nutrient; spatial heterogeneity; semi-variance function; spatial structure