围封对内蒙古希拉穆仁草地物种多样性的影响

王 健，张瑞强，阿比亚斯，高天明，岳征文，刘 虎
（水利部 牧区水利科学研究所，内蒙古 呼和浩特 010020）

摘 要：[目的] 探究围封对内蒙古希拉穆仁草地物种多样性的影响，为围封对草原物种多样性影响的过程研究提供科学依据。[方法] 通过调查、计算内蒙古希拉穆仁放牧草地与连续 11 a 围封草地的物种多样性，结合当地年降水量数据，分析放牧草地围封后物种多样性特征。[结果] 围封后，冷蒿、轮叶委陵菜、达乌里芯芭、二裂委陵菜、星毛委陵菜年际波动较大；围封降低了希拉穆仁草地物种多样性，降水量较少年份（年降水量＜200 mm 的 2014 年）Simpson，Shannon-Wiener 和 Pielous 指数则刚好相反；围封后物种丰富度与年降水量相关系数减小。[结论] 长期围封导致希拉穆仁草地物种多样性下降。在干旱气候环境下，围封能够一定程度地缓解气候变化对希拉穆仁草地物种多样性的影响。

关键词：围封；放牧；物种多样性；降水量；希拉穆仁草地
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)02-0062-06 **中图分类号**：S812.5

文献参数：王健，张瑞强，阿比亚斯，等. 围封对内蒙古希拉穆仁草地物种多样性的影响[J]. 水土保持通报，2019，39(2)：62-67. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.02.010；Wang Jian，Zhang Ruiqiang，Abi Yasi，et al. Effects of enclosure on species diversity in Xilamuren grassland，Inner Mongolia[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(2)：62-67.

Effects of Enclosure on Species Diversity in Xilamuren Grassland，Inner Mongolia

Wang Jian，Zhang Ruiqiang，Abi Yasi，Gao Tianming，Yue Zhengwen，Liu Hu
（*The Institute of Water Resources for Pastoral Areas，Ministry of Water Resources，Hohhot，Inner Mongolia* 010020，*China*）

Abstract：[Objective] The effects of enclosure on specie diversity of Xilamoren grassland in Inner Mongolia were studied in order to provide the scientific basis for the study of the grassland species diversity under the enclosure. [Medthods] This study analyzed the species diversity of enclosed grazing grassland based on the 11 years data of local annual precipitation in Inner Mongolia Autonomous Region. [Results] After enclosure，the interannual fluctuations of *Artemisia frigida*，*Potentilla verticillaris*，*Cymbaria dahurica*，*Potentilla bifurca* and *Potentilla acaulis* were larger. The diversity of the plants was reduced by the enclosure treatment. But Simpson ecological dominance index，Shannon-Wiener species diversity index and Pielous evenness index of the grassland plant in arid years were just the opposite in less precipitation years (2014 with annual precipitation less than 200 mm). Enclosure reduced the correlation coefficient between species richness and annual precipitation. [Conclusion] Enclosure treatment was not conducive to the plant diversity of Xilamuren grassland，but enclosure could alleviate the effects of climate change on species diversity under arid climate.

Keywords：**enclosure；grazing；species diversity；precipitation；Xilamuren grassland**

收稿日期：2018-08-10 **修回日期**：2018-10-16
资助项目：中国水科院科研专项“荒漠草地水土流失及其生态效应监测研究”(MK2017J05)，“基于元素‘指纹’识别的草地径流泥沙迁移规律研究”(MK2016J05)；内蒙古科技计划项目(201701024)；公路交通环境保护技术交通行业重点实验室开放课题(MK20180802；MK20180803；MK20180804)
第一作者：王健(1980—)，男(蒙古族)，内蒙古自治区赤峰市人，博士，高级工程师，主要从事草地生态和水土保持研究。E-mail：dhy8063@163.com。
通讯作者：高天明(1981—)，男(蒙古族)，内蒙古自治区赤峰市人，硕士，高级工程师，主要从事草地生态研究。E-mail：zaohuer@163.com。

草地生态系统是世界最大的生态系统之一,约占陆地面积 40.5%。我国草地资源丰富,其总面积约为 4.00×10^8 hm^2,约占国土总面积 41.7%[1]。然而,我国约有 90%草地处于不同程度的退化状态,其中严重退化草地占 60%以上[2]。研究表明,人类活动(长期过度放牧)是导致我国北方草地生态系统退化的最主要因素,不仅降低了草地植被覆盖度、初级生产力及生物多样性[3],还间接的降低了土壤养分和水分保持能力等生态系统功能[3-4]。由于成本低、见效快,草地围栏封育已成为退化草地恢复重建的有效措施之一,因此,本研究在中国北方草地希拉穆仁草原公共放牧草场设置了围栏,试图说明围封对草原物种多样性的影响过程。

牲畜的选择性采食导致过度放牧区劣质牧草增多,凋落物品质变差、分解速率降低,抑制微生物活性,进入土壤的有机质和营养元素进一步减少[5]。大多数牛羊在晚间归宿,伴随着牲畜排泄物在圈舍的累积和畜产品的产出,各种营养元素被带离生态系统,导致土壤中营养元素流失[6]。牲畜的践踏破坏了土壤物理结构,导致土壤紧实度增大,透气性、渗透力和蓄水能力降低[7];生产力的下降导致凋落物的归还减少,致使土壤中的有机质和氮含量减少[7-9],伴随着有机质的减少,土壤团聚体和地表结皮破坏[10],土壤黏粒减少,砂粒增多,进而导致植物—土壤界面无法保持平衡,造成草地沙化[8],致使重度放牧草地不再拥有适宜的群落微生境,不仅不利于现有植物的生长发育[7],而且也不适宜机会物种的定居和拓殖,引发放牧草地生物多样性的下降。草地围封通过隔离放牧家畜,排除了家畜的采食、践踏和排便等综合干扰,使原有退化严重的草地植物群落得以休养生息,对幼苗的生长有积极作用,理论上是一种较为理想的草地恢复措施。然而,围封对物种多样性的影响却未曾得出一致结论,争议主要分为以下 3 种[11]:围封能够增加物种多样性,家畜高强度的采食会导致适口性较好的牧草减少或消失,而围封则有效地避免了这一种情况,从而增加了物种多样性;围封降低物种多样性,围封排除了大型草食动物的干扰,使生境趋于均一化而导致生物多样性的降低;围封对物种多样性影响很小或无影响,干旱区草地恢复是一个缓慢的过程,且群落演替跃迁需要特殊的降雨事件。事实上,围封在排除家畜干扰的同时,也会引发无家畜干扰下草地生态系统内多界面、多营养级间反馈调节的一系列级联效应,且草地植物易受气候因素的影响,尤其是极端气候。因此,本研究以内蒙古希拉穆仁长期公共放牧草地为研究对象,通过研究 2007—2017 年 11 a 围封草地物种多样性的年动态变化,以期揭示以下问题:①长期放牧的退化草地围封处理后,草地植物物种如何变化;②相比放牧草地,围封后物种多样性如何变化;③年降水量与物种多样性的潜在联系。

1　材料与方法

1.1　研究地概况

研究地位于内蒙古自治区包头市达尔罕茂明安联合旗希拉穆仁草地(111°12′E,41°21′N)。该地区属于阴山山地向内蒙古高原的过渡带,丘陵地貌,由于长期受风蚀作用,丘陵多呈浑圆波状,地形平缓开阔,平均海拔 1 468 m。土壤类型为栗钙土,土壤质地为沙壤土,腐殖质层厚 5—10 cm。2007—2017 年平均年降水量 271.0 mm,60%～80%的降水集中在植物生长季(5—10 月),蒸发量 2 526.4 mm。2007—2017 年月平均气温接近,年平均气温 4.2 ℃,极端最高气温 38.0 ℃,极端最低气温－39.4 ℃。多年平均日照时数 3 100 h,无霜期 83 d,多年平均风速 4.5 m/s。以克氏针茅(*Stipa krylovii*)为建群种,优势种为糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、羊草(*Leymus chinensis*),试验期间发现的物种详见表 1。

1.2　试验地设置与取样方法

本研究于 2007 年 5 月初设置了 3 个 40 hm^2 的围封样地,在样地选择时充分考虑了坡度、坡向等自然生境,尽量选取地形地貌一致的公共放牧草地,因此草地物种多样性的差异均由草地利用模式的不同而引起。公共放牧草地为全年放牧,围封样地在围封期间无大型家畜进入,也不进行刈割等人为干扰。样方调查在荒漠草地植物生长最高峰期的 8 月份进行,在每个围封样地内随机调查 10 个 1 m ×1 m 样方,每个围封样地外随机调查 10 个 1 m ×1 m 样方。每个样方主要调查指标为物种数、密度(丛生型植物为分株数,非丛生型禾草植物为个体数;对于克隆植物而言,把每个无性系分株看作一个个体)。每年共调查 60 个样方,本研究的数据取自 2007—2017 年,共 660 个样方。

1.3　多样性指标的计算

评估区域生境内的多样性时,通常以群落内物种数及其相对多度为基础,来反映生境内物种间长期竞争而形成的多物种共存关系。其多样性指数是将丰富度与种的多度(本研究中取样面积为 1 m^2,因此所

获取的植物密度在数据数值上等同于多度)结合起来的函数。具体公式[12]为:

物种丰富度:$R=S$

Simpson 生态优势度指数:

$$D=-\ln\left[\sum_{i=1}^{S}\left(\frac{N_i}{N}\right)^2\right]$$

Shannon-Wiener 多样性指数:

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

Pielous 均匀度指数:

$$J_p=1-\sum_{i=1}^{S}\frac{N_i(N_i-1)}{N(N-1)}$$

式中:S——物种数;N——所有物种的多度;N_i——第 i 个物种的多度;$P_i=N_i/N$。

表 1 研究地出现的植物种

物种	拉丁名	代码	物种	拉丁名	代码
克氏针茅	*Stipa krylovii*	1	细叶鸢尾	*Iris tenuifolin*	31
糙隐子草	*Cleistogenes squarrosa*	2	三裂地蔷薇	*Chamaerhodos trifida*	32
扁穗冰草	*Agropyron cristatum*	3	瓣蕊唐松草	*Thalictrum petaloideum*	33
小花蒿草	*Koeleria cristata*	4	砂韭	*Allium bidentatum*	34
无芒隐子草	*Cleistogenes songorica*	5	远志	*Polygala tenuifolia*	35
短花针茅	*Stipa breviflora*	6	马蔺	*Iris lactea*	36
羊草	*Leymus chinensis*	7	北芸香	*Haplophyllum dauricum*	37
木地肤	*Kochia prostrata*	8	山泡泡	*Oxytropis leptophylla*	38
燥原荠	*Ptilotricum canescens*	9	寸草	*Carex duriuscula*	39
百里香	*Thymus mongolicus*	10	刺儿菜	*Cirsium setosum*	40
狭叶锦鸡儿	*Caragana stenophylla*	11	乳白黄耆	*Astragalus galactites*	41
冷蒿	*Artemisia frigida*	12	蒲公英	*Taraxacum mongolicum*	42
阿尔泰狗娃花	*Heteropappus altaicus*	13	野韭	*Alium ramosum*	43
蒙古韭	*Allium mongolicum*	14	赖草	*Leymus secalinus*	44
短翼岩黄耆	*Hedysarum brachypterum*	15	鸦葱	*Scorzonera austriacs*	45
银灰旋花	*Convolvulus ammannii*	16	尖齿糙苏	*Phlomis dentosa*	46
狼毒	*Stellera chamaejasme*	17	鹤虱	*Lappula myosotis*	47
艾	*Artemisia argyi*	18	平车前	*Plantago depressa*	48
红柴胡	*Bupleurum scorzonerifolium*	19	刺藜	*Dysphania aristata*	49
老牛筋	*Arenaria juncea*	20	画眉草	*Eragrostis pilosa*	50
轮叶委陵菜	*Potentilla verticillaris*	21	碱蒿	*Artemisia anethifolia*	51
达乌里芯芭	*Cymbaria dahurica*	22	绳虫实	*Corispermum declinatum*	52
二裂委陵菜	*Potentilla bifurca*	23	栉叶蒿	*Neopallasia pectinata*	53
达乌里龙胆	*Gentiana dahurica*	24	小白藜	*Chenopodium iljinii*	54
白花点地梅	*Androsace incana*	25	瓦松	*Orostachys fimbriata*	55
星毛委陵菜	*Potentilla acaulis*	26	地锦	*Euphorbia humifusa*	56
菊叶委陵菜	*Potentilla tanacetifolia*	27	独行菜	*Lepidium apetalum*	57
扁蓿豆	*Melissilus ruthenicus*	28	猪毛菜	*Salsola collina*	58
白花枝子花	*Dracocephalum heterophyllum*	29	灰绿藜	*Chenopodium glaucum*	59
伏毛山莓草	*Sibbaldia adpressa*	30			

1.4 统计分析

本研究对研究区围封处理和放牧处理下的植物物种丰富度、Simpson 生态优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielous 均匀度指数进行独立样本 T 检验。

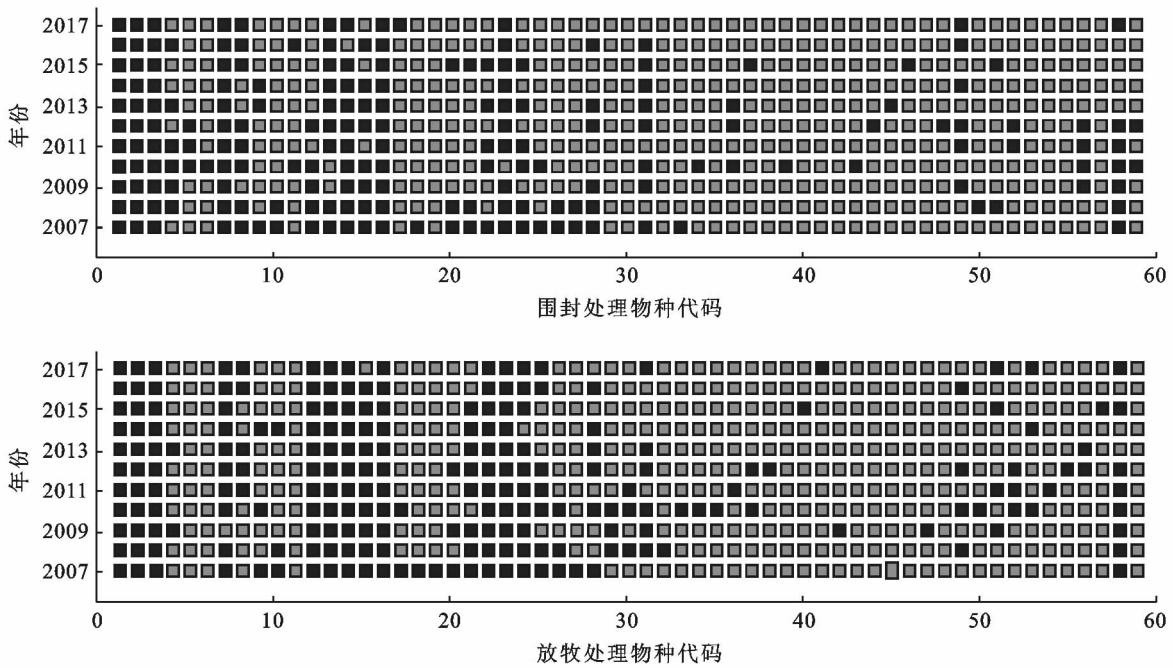
采用 Pearson 相关分析年降水量与物种丰富度、Simpson 生态优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielous 均匀度指数的相关性,在 0.05 和 0.01 水平进行显著性检验。

以上统计分析均在 SPSS 20.0 完成。

2　结果与分析

2.1　围封对草地植物种数量的影响

从物种角度分析,在 11 a 野外观测中共发现 59 种植物,其中围封处理发现 49 种植物,放牧处理发现 55 种植物。克氏针茅、糙隐子草、冰草、银灰旋花是围封处理和放牧处理的共有种(图 1)。相比放牧草地,围封处理后,冷蒿、轮叶委陵菜、达乌里芯芭、二裂委陵菜、星毛委陵菜年际波动较大,且呈现逐年减少的规律。



注:黑色方框表示有相应物种,灰色方框表示无相应物种。

图 1　围封与放牧处理下植物年际变化

2.2　围封对物种多样性的影响

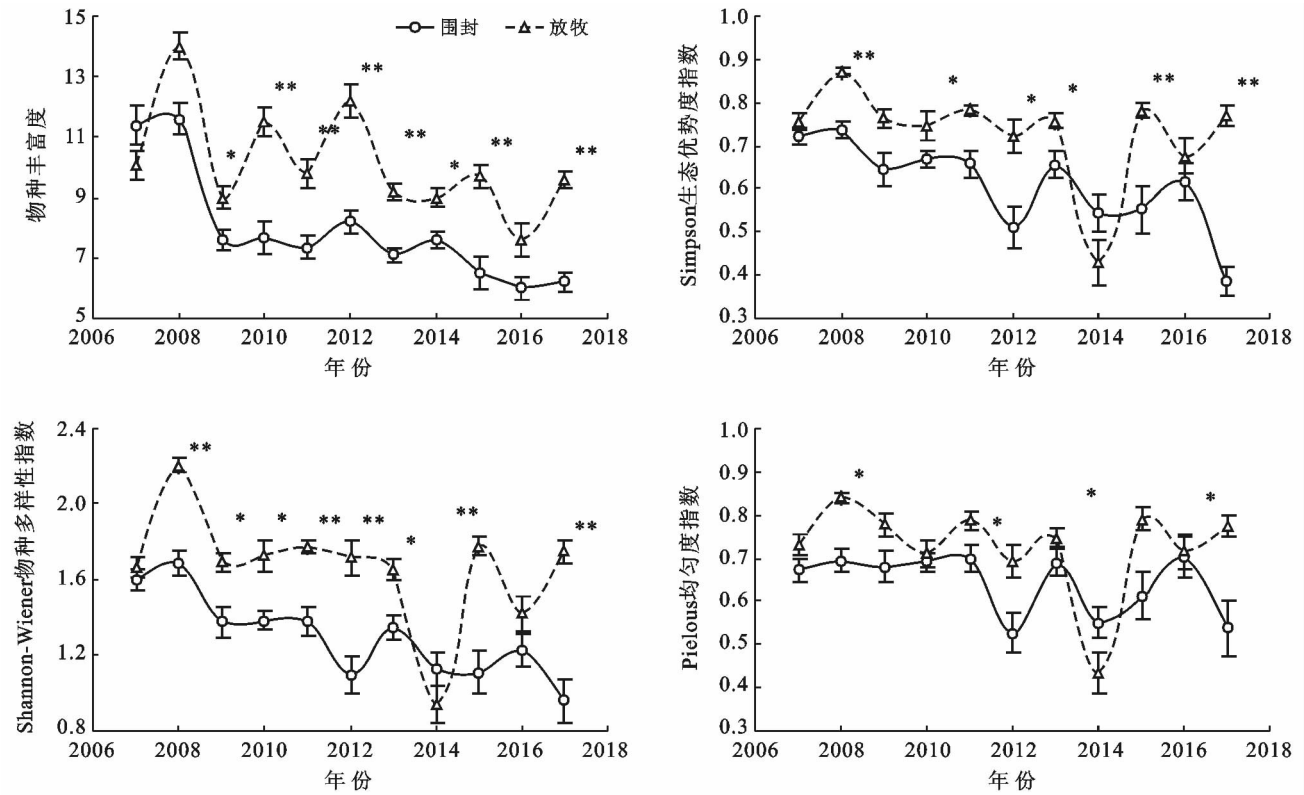
通过分析 2007—2017 年希拉穆仁放牧草地与围封草地物种多样性,发现围封后的物种多样性参数总体低于放牧处理。物种丰富度、Simpson 生态优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数基本呈现逐年递减的趋势,Simpson 生态优势度指数、Shannon-Wiener多样性指数、Pielous 均匀度指数于 2012 年(年降水量>400 mm)、2014 年(年降水量<200 mm)出现下降的趋势。

2.2.1　*围封对物种丰富度的影响*　围封处理后,2017 年荒漠草地植物物种丰富度比 2007 年下降了 45.61%;而放牧草地植物物种丰富度 2017 年比 2007 年下降了 4.64%(图 2)。相比放牧处理,围封处理物种丰富度年际间波动相对平缓。独立样本 T 检验结果显示,2007 年、2008 年物种丰富度围封处理与放牧处理无显著性差异,从 2009 年开始(第 3 a)围封处理物种丰富度显著小于放牧处理($p<0.05$)。

2.2.2　*围封对 Simpson 生态优势度指数的影响*　围封处理后,Simpson 生态优势度指数呈现逐渐下降的趋势,且于 2017 年达最低值,相比 2007 年,2017 年 Simpson 生态优势度指数下降了 46.72%;而放牧处理 Simpson 生态优势度指数年际间波动相对平缓,仅 2014 年达最低值 0.43±0.05(图 2)。此外,本研究发现,2014 年之前围封处理与放牧处理 Simpson 生态优势度指数基本呈现相同的变化规律,2014 年之后则出现趋异的变化规律。

2.2.3　*围封对 Shannon-Wiener 物种多样性指数的影响*　Shannon-Wiener 多样性指数是反映群落内物种多样性和异质性程度的参数。本研究结果显示,围封处理后,Shannon-Wiener 多样性指数呈现小幅波动逐年递减的趋势,而放牧处理 Shannon-Wiener 多样性指数年际波动较大,尤其 2014 年达到最低值(0.94±0.10)(图 2)。

2.2.4　*围封对 Pielous 均匀度指数的影响*　围封处理后,2007—2011 年 Pielous 均匀度指数较为平稳,但于 2012,2014 和 2017 年出现 3 次下降。独立样本 T 检验结果显示,仅 2008,2012,2015 和 2017 年放牧样地 Pielous 均匀度指数显著高于围封处理 Pielous 均匀度指数($p<0.05$),其他年份则无显著性差异(图 2)。



注：相同年份 * 表示放牧处理与放牧处理间存在显著差异，$p<0.05$，相同年份 * * 表示放牧处理与放牧处理间存在极显著差异，$p<0.01$。下同。

图 2 围封和放牧处理下物种多样性指数年际变化特征

2.3 草地物种多样性与降水量的相关分析

Pearson 相关分析结果显示，放牧处理下，物种丰富度、Simpson 生态优势度指数、Shannon-Wiener 物种多样性指数与降水量成正相关，其中物种丰富度、Shannon-Wiener 物种多样性指数与降水量显著正相关（$p<0.05$）（表 2）。相比放牧处理，围封处理下 Simpson 生态优势度指数、Shannon-Wiener 物种多样性指数、Pielous 均匀度指数与降水量呈负相关，其中 Pielous 均匀度指数与降水量显著负相关（$p<0.05$）。

表 2 物种多样性与降水量的 Pearson 相关分析结果

多样性指数	围封处理	放牧处理
物种丰富度	0.30*	0.70**
Simpson 生态优势度指数	−0.03	0.04
Shannon-Wiener 物种多样性指数	−0.003	0.22*
Pielous 均匀度指数	−0.32*	−0.08

3 讨论与结论

生物多样性是甄别退化草地生态系统恢复进程的重要指标之一。本研究结果显示，围封处理降低了草地植物物种丰富度。这可能是以下几方面因素共同导致：①优势种方面，家畜干扰的群落内优势种竞争优势的衰减，从而增加了其非耐牧种、稀有种等（如冷蒿、轮叶委陵菜、达乌里芯芭、二裂委陵菜、星毛委陵菜）生存机会，导致放牧条件下草地植物物种丰富度高于围封处理物种丰富度；②生境均一化，家畜干扰致使草地产生多种生境斑块从而使不同演替阶段的植物种共存，排除了大型家畜干扰的围封处理使得生境趋于均一化而导致生物多样性的降低；③物种迁移，放牧条件下植物种子在风媒、昆虫和大型草食动物等的帮助下能够进行种群的有效扩散，而在围封处理下，植物的传播扩散仅能通过风媒或昆虫来进行，这极大程度的限制物种的扩散。研究发现，种子有限的空间散布（小尺度的扩散）能够引起种群强烈的空间聚集，有限空间传播引起的植物聚集可使种群呈现斑块化分布[13]；而生境相对恶劣的条件下发生小尺度植物聚集，可能会导致植物竞争和自疏现象的发生[14]，甚至引起年幼植物的死亡，进而导致围封处理草地植物物种丰富度低于放牧处理物种丰富度。

尽管物种丰富度体现了群落内物种数量特征，可以很好地认识群落的物种组成、变化和发展，但却忽略了每个物种（如优势种、稀有种等）对多样性贡献大小的差异[12]，且易受野外取样面积的影响。研究结果显示围封处理草地植物 Simpson 生态优势度指数、

Shannon-Wiener 多样性指数、Pielous 均匀度指数基本均低于放牧处理。这进一步验证了在希拉穆仁草地,放牧处理物种多样性高于围封处理物种多样性这一结果;但在 2014 年这一结果却刚好相反,即放牧处理物种多样性数值上低于围封处理物种多样性,结合研究区历年降水量数据,发现 2014 年降水量是研究地历年降水量最低值,说明围栏封育能够提高植物对干旱气候的抵御能力,暗示了围封能够提高草地植被的稳定性。

Simpson 生态优势度指数越大,说明群落内物种数量分布越不均匀,优势种的地位越突出;而 Shannon-Wiener 多样性指数是群落内物种多样性和异质性程度的参数,综合反映群落物种丰富度和均匀度。这说明长期围封整体降低了草地植物的分布与数量,尤其是草地优势物种,且诸多研究结果均出现这一论点,例如 Loeser 等[15]对美国亚利桑那州附近的高海拔、半干旱草地进行围封研究表明,围封处理物种丰富度低于中度放牧处理;刘凤婵[16]以内蒙古正镶白旗退化典型草地封育区内不同封育年限(2,4,6,8,10,12 a)草地样地为研究对象,发现植被群落多样性指数总体呈减小趋势,变化呈现较为明显的阶段性特征;范月君[17]在三江源地区高山嵩草草甸发现长期围栏封育降低了系统内群落物种丰富度、均匀度和多样性,改变了植被群落结构并使其且呈现简单化。均匀度指数进一步验证了这一研究结果,显示年际变化相对平稳。

为进一步了解降水量与草地植物群落的潜在关系,本研究利用的 11 a 降水量与物种多样性进行 Pearson 相关分析,发现相比放牧处理,Pielous 均匀度指数与降水量显著负相关,这说明围封条件下希拉穆仁草地优势物种水分利用效率更高,间接说明了围封处理下优势物种在群落中处于资源利用的优先级。此外,围封处理削弱了年降水量与物种丰富度之间的相关性,这说明放牧草地植物对降水具有明显地依赖性,随降水量变化而波动,体现了围封能够一定程度地增加群落对不良环境的抵抗力。在连续围封 11 a 间,2014 年降水量为历年最低(表 1),表现草地植物群落 Simpson 生态优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielous 均匀度指数数值均较低。此外,本研究还发现 2014 年之前围封处理与放牧处理 Simpson 生态优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielous 均匀度指数基本呈现相同的变化趋势,而在经历了降水量较少年份后(2014 年),草地物种多样性则出现趋异的变化规律。这进一步说明了干旱气候事件能够显著改变草地物种多样性[18],可能是因为在干旱条件下,微生物数量减少,活性变弱,土壤碳、氮的矿化率与通量均明显下降[19],进而影响草地植物的生长、发育、繁殖[20],改变了草地物种多样性。这些均暗示了年降水量(水分条件)是决定草地植物生长、发育及群落演替的重要因素[21-23]。

综上所述,通过样方调查 2007—2017 年希拉穆仁草地放牧草地与围封草地物种多样性。研究发现,围封处理降低了希拉穆仁草地植物的多样性,但在降水量较少的年份,围封草地的 Simpson 生态优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielous 均匀度指数却高于放牧处理,暗示了在恶劣气候环境下,围封能够一定程度地缓解气候变化对希拉穆仁草地物种多样性的影响。

[参 考 文 献]

[1] Nan Z. The grassl and farming system and sustainable agricultural development in China[J]. Grassland Science, 2005,51(1):15-19.

[2] 白永飞,黄建辉,郑淑霞,等. 草地和荒漠生态系统服务功能的形成与调控机制[J]. 植物生态学报,2014,38(2):93-102.

[3] Li Chunli, Hao Xiying, Zhao Mengli, et al. Influence of historic sheep grazing on vegetation and soil properties of a desert steppe in Inner Mongolia[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2008,128(1):109-116.

[4] Reszkowska A, Krümmelbein J, Peth S, et al. Influence of grazing on hydraulic and mechanical properties of semiarid steppe soils under different vegetation type in Inner Mongolia, China[J]. Plant and Soil, 2011,340(1/2):59-72.

[5] 王忆慧,龚吉蕊,刘敏,等. 草地利用方式对土壤呼吸和凋落物分解的影响[J]. 植物生态学报,2015,39(3):239-248.

[6] 牛得草,江世高,秦燕,等. 围封与放牧对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 草业科学,2013,30(4):528-534.

[7] 王玉辉,何兴元,周广胜. 放牧强度对羊草草原的影响. 草地学报,2002,10(1):45-49.

[8] 王明君,韩国栋,赵萌莉,等. 草甸草原不同放牧强度对土壤有机碳含量的影响[J]. 草业科学,2007,24(10):6-10.

[9] Pei Shifang, Fu Hua, Wan Changgui. Changes in soil properties and vegetation following exclosure and grazing in degraded Alxa desert steppe of Inner Mongolia, China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2008,124(1/2):33-39.

[10] 王向涛,张世虎,陈懂懂,等. 不同放牧强度下高寒草甸植被特征和土壤养分变化研究[J]. 草地学报,2010,18(4):510-516.

(下转第 75 页)

(3):257-264.

[10] Philip J R. Theory of infiltration[J]. Advances in Hydroscience, 1969,5(5):215-296.

[11] Warrick A W, Broadbridge P. Sorptivity and macroscopic capillary length relationships[J]. Water Resources Research, 1992,28(2):427-431.

[12] Philip J R. Effect of root water extraction on wetted regions from continuous irrigation sources[J]. Irrigation Science, 1997,17(3):127-135.

[13] Šimunek J, van Genuchten M T, Šejna M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages[J]. Vadose Zone Journal, 2016,15(7):1-25.

[14] Grinevskiy S O, Pozdniakov S P. The Use of HYDRUS-1D for Groundwater Recharge Estimation in Boreal Environments[C]// International Conference "Hydrus Software Applications To Subsurface Flow and Contaminant Transport Problems", 2013.

[15] Cheviron B, Coquet Y. Sensitivity analysis of transient-MIM HYDRUS-1D: Case study related to pesticide fate in soils[J]. Vadose Zone Journal, 2009,8(4):1064-1079.

[16] 张建山,仵彦卿,李哲.陕北沙漠滩区降水入渗与凝结水补给机理试验研究[J].水土保持学报,2005,19(5):124-126.

[17] Šimunek J, Th M, Martinus T, et al. HYDRUS: Model use, calibration, and validation[J]. Transactions of the Asabe, 2012, 55(4):1561-1574.

[18] 中国气象局. GB/T28592-2012 降雨量等级[S]. 北京:中国标准出版社,2012.

[19] Qi Peng, Zhang Guangxin, Xu Yijun, et al. Assessing the influence of precipitation on shallow groundwater table response using a combination of singular value decomposition and cross-wavelet approaches[J]. Water, 2018,10(5):598.

[20] Scanlon B R, Reedy R C, Stonestrom D A, et al. Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US[J]. Global Change Biology, 2010,11(10):1577-1593.

[21] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.

[22] Huang Jinting, Zhou Yangxiao, Hou Rongze, et al. Simulation of water use dynamics by salix bush in a semiarid shallow groundwater area of the Chinese Erdos Plateau[J]. Water, 2015,7(12):6999-7021.

[23] Liang W L, Kosugi K I, Mizuyama T. A three-dimensional model of the effect of stemflow on soil water dynamics around a tree on a hillslope[J]. Journal of Hydrology, 2009,366(1/4):62-75.

(上接第 67 页)

[11] 张娜,王蕾.围封对地上植被的影响的研究进展[J].上海畜牧兽医通讯,2015(6):24-25.

[12] 刘文亭,卫智军,吕世杰,等.荒漠草地植物多样性对草食动物采食的响应机制[J].植物生态学报,2016,40(6):564-573.

[13] Webb C O, Peart D R. Habitat Associations of Trees and Seedlings in a Bornean Rain Forest[J]. Journal of Ecology, 2000,88(3):464-478.

[14] Harper J L. Population Biology of Plants[M]. London: Academic Press, 1977.

[15] Loeser M R R, Sisk T D, Crews T E. Impact of grazing intensity during drought in an Arizona grassland [J]. Conservation Biology the Journal of the Society for Conservation Biology, 2007,21(1):87-97.

[16] 刘凤婵.内蒙古正镶白旗退化典型草原封育效应[D].山东 泰安:山东农业大学,2013.

[17] 范月君.围栏与放牧对三江源区高山嵩草草甸植物形态、群落特征及碳平衡的影响[D].甘肃 兰州:甘肃农业大学,2013.

[18] 张彬,朱建军,刘华民,等.极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响[J].植物生态学报,2014,38(9):1008-1018.

[19] Bloor J M, Bardgett R D. Stability of above-ground and below-ground processes to extreme drought in model grassland ecosystems: interactions with plant species diversity and soil nitrogen availability[J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2012,14(3):193-204.

[20] Mcdowell N G. Mechanisms linking drought, hydraulics, carbon metabolism, and vegetation mortality[J]. Plant Physiology, 2011,155(3):1051-1059.

[21] Davis S D, Ewers F W, Sperry J S, et al. Shoot dieback during prolonged drought in Ceanothus (*Rhamnaceae*) chaparral of California: A possible case of hydraulic failure[J]. American Journal of Botany, 2002, 89(5):820-828.

[22] Bai Yongfei, Han Xingguo, Wu Jianguo, et al. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland[J]. Nature, 2004,431(7005):181-184.

[23] Bai Yongfei, Wu Jianguo, Clark C M, et al. Grazing alters ecosystem functioning and C∶N∶P stoichiometry of grasslands along a regional precipitation gradient[J]. Journal of Applied Ecology, 2012,49(6):1204-1215.