

DOI: 10.5846/stxb202008222185

余轩, 王兴, 吴婷, 王启学, 马昀, 谢莉, 宋乃平. 荒漠草原植物多样性恢复与土壤生境的关系. 生态学报, 2021, 41(21): 8516-8524.

Yu X, Wang X, Wu T, Wang Q X, Ma Y, Xie L, Song N P. Relationship between restoration of plant diversity and soil habitat in desert steppe. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8516-8524.

荒漠草原植物多样性恢复与土壤生境的关系

余 轩^{1,2}, 王 兴^{1,2}, 吴 婷^{1,2}, 王启学^{1,2}, 马 昀^{1,2}, 谢 莉^{1,2}, 宋乃平^{1,2,*}

1 宁夏大学西北土地退化与生态系统恢复国家重点实验室培养基地, 银川 750021

2 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

摘要:为揭示荒漠草原围栏封育后植物多样性的恢复对土壤生境的响应机制,以围栏封育和适度放牧草地的灰钙土和风沙土生境植物群落为研究对象,采用方差分析和冗余分析(redundancy analysis RDA)方法,研究了围栏封育后植物多样性的变化及其与土壤生境物理和化学因子的关系。结果表明:(1)相对于适度放牧利用,围栏封育显著降低了灰钙土和风沙土生境植物多样性;随着封育年限的增加,植物多样性呈现显著,且封育的负效应随着封育年限的增加而增加;(2)两种土壤生境下植物多样性与生物量均表现为负相关。植物群落对灰钙土和风沙土两种土壤生境下表现出的不同点有:(1)灰钙土生境下,植物多样性与砂粒正相关,生物量与有机碳,全氮正相关;(2)风沙土生境下,植物多样性与有机碳,全氮正相关,生物量与电导率正相关。未来荒漠草原退化草地植物多样性恢复需要充分考虑不同土壤生境类型的影响,草地管理需要采取适度利用和封育保护相结合道路。

关键词:荒漠草原;多样性;生物量;土壤

Relationship between restoration of plant diversity and soil habitat in desert steppe

YU Xuan^{1,2}, WANG Xing^{1,2}, WU Ting^{1,2}, WANG Qixue^{1,2}, MA Yun^{1,2}, XIE Li^{1,2}, SONG Naiping^{1,2,*}

1 Key Laboratory of Land Degradation and Ecosystem Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Key Laboratory of Rehabilitation and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: In order to reveal the response mechanism of plant diversity restoration to soil habitat after fencing in desert steppe, the plant communities in sierozem soil and aeolian sandy soil habitats of fenced and moderately grazed grassland were selected as the research objects. The variance analysis and redundancy analysis (RDA) were used to study the changes of plant diversity after enclosure and its relationship with physical and chemical factors of soil habitat. The results showed that: (1) compared with moderate grazing, enclosure significantly reduced plant diversity in sierozem soil and aeolian sandy soil. With the increase of enclosure years, plant diversity was significant, and the negative effect of enclosure increased with the increase of enclosure years. (2) There was a negative correlation between plant diversity and biomass in both soil habitats. The differences of plant communities between sierozem soil and aeolian sandy soil were as follows: (1) In sierozem soil, plant diversity was positively correlated with sand, while biomass was positively correlated with organic carbon and total nitrogen. (2) In aeolian sandy soil, plant diversity was positively correlated with organic carbon and total nitrogen, as well as biomass was positively correlated with electrical conductivity. In conclusion, the effects of different soil habitat types should be fully considered in the restoration of plant diversity of the degraded grassland in desert steppe in the future.

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划(2019BFG02022);国家自然科学基金(31901367);宁夏自然科学基金(2019AAC03056);宁夏大学博士科研启动金

收稿日期:2020-08-22; 网络出版日期:2021-07-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Songnp@163.com

Key Words: desert steppe; diversity; biomass; soil

荒漠草原特定的干旱和半干旱气候决定其植物群落多样性低,植物群落结构简单,生态系统较为脆弱。21 世纪初,为遏制荒漠草原退化,大面积采用围栏封育措施,使得草地植被覆盖度、生物量得到显著提高,荒漠化趋势得到明显逆转。围栏封育提高植物群落多样性^[1],然而,也有研究发现^[2-4],围栏封育的群落中少数植物的优势度高,群落多样性并不高,反而是中度干扰的放牧区植物群落多样性最高^[5-6]。考虑到多样性的恢复直接影响草地植物群落生产力、稳定性等功能的形成和维持,因此,进一步明确和深入分析荒漠草原围栏封育后植物多样性恢复的作用机理,对于荒漠草原究竟采用彻底封育恢复还是采用封育与适度放牧相结合的方式恢复提供科学依据。

植物个体之间以及植物种间对土壤资源的竞争,是影响植物群落物种组成以及演替的重要因子^[7]。因此,一定时空范围内,土壤环境的质量影响甚至决定着该区域的植物多样性。有研究表明^[7],土壤空间环境异质性是维持植物物种丰富度的基本因素,土壤空间异质性与植物物种的多样性之间存在正相关关系。目前,许多学者关于围栏封育对于植物多样性的影响已经开展了大量研究,主要的内容多集中在围栏封育对植物生物多样性和土壤养分等方面以及围栏封育后土壤养分对植物多样性的影响^[8-9],跟踪监测发现,经过 18 a 的围栏封育,荒漠草原植物群落结构已经趋于稳定,这一阶段主要依靠去除干扰恢复植被和植物多样性,进一步的多样性恢复可能依靠土壤生境。体现在土壤空间异质性对多样性的影响和土壤恢复对植物多样性的促进两个方面。本文即是针对这个假设开展研究,群落多样性恢复除了与围栏封育年限,植物群落类型差异有关外,还需要考虑土壤生境的变化,但是结合不同土壤生境下围栏封育和适度放牧对植物多样性影响的研究尚不多见。

荒漠草原区域,原始灰钙土生境具有较好的团粒结构,植被和土壤关系较为稳定,此生境一般以典型的短花针茅群落为主,因此,灰钙土生境植物群落结构及其与土壤关系可作为荒漠草原区域退化草地植被恢复的参考系统^[10]。灰钙土生境在经历人为破坏后,土壤生境呈现出沙化特征,植物群落逐渐转变为一年生或多年生毒害草群落^[11]。由于荒漠草原不同土壤生境和植物群落类型在空间上呈现的镶嵌分布特征,这种群落尺度上的镶嵌特征可能与草地景观尺度的长期稳定密切相关,因此,本文以封育和放牧草地的灰钙土和风沙土生境植物群落为研究对象,探究不同土壤类型下植物群落物种组成、群落多样性和生物量的变化及其对土壤因子的响应,可为后续宁夏荒漠草原草地植被可持续恢复和管理提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

盐池县位于宁夏回族自治区东部^[12](106°30'—107°47'E, 37°04'—38°10'N),研究区年均气温 8.1℃,属于典型的中温带大陆气候,年均降水在 250—350 mm,具有自南向北,自东南向西递减的特征。无霜期 150 d,主要的气候特点为风大沙多、干旱少雨、蒸发强烈。研究区的主要土壤类型为地带性的灰钙土和非地带性的风沙土,主要植物种类包括短花针茅(*Stipa breviflora*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、赖草(*Leymus secalinus*)、中亚白草(*Pennisetum centrasiaticum*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、披针叶黄华(*Thermopsis lanceolata*)、老瓜头(*Cynanchum komarovii*)、猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)、猪毛菜(*Salsola collina*)等。

1.2 试验设计

在宁夏盐池县皖记沟村、四墩子村、马儿庄村和杨寨子村选取植被类型连续、土壤质地相同的 4 个成对的围栏封育和放牧实验样地。于 2018 年 8 月,以地势地貌相同为原则,在 4 个试验样地各选取一对围栏封育区和其相邻的放牧区,4 个实验样地相距 20 km 以上。其中围栏封育不放牧,禁止人类一切活动,围栏放牧都属于常年适度放牧(0.50—0.70 只羊/hm²)^[13]。

皖记沟村设置 2 条风沙土样带和 2 条灰钙土样带, 四墩子村设置 1 条风沙土样带和 2 条灰钙土样带, 马儿庄村设置 3 条灰钙土样带, 杨寨子村设置 4 条风沙土样带, 总共 14 条样带, 分为 7 条灰钙土和 7 条风沙土样带, 相邻样带间隔 50 m 以上, 每条样带长 100 m 且贯穿围栏封育区和适度放牧区, 每条样带以共有围栏为中心, 为了克服边缘效应对结果的影响, 在围栏分界的两侧各空出 10 m, 在每条样带上每隔 10 m 设置一个 1 m×1 m 的样方, 所以每条样带 10 个样方, 试验区总共设置 140 个样方。

在每个样方内部调查每个物种的高度、盖度、密度。同时, 在每个样方内按照“品”字形分 0—5 cm, 5—10 cm, 10—20 cm 采集土样。

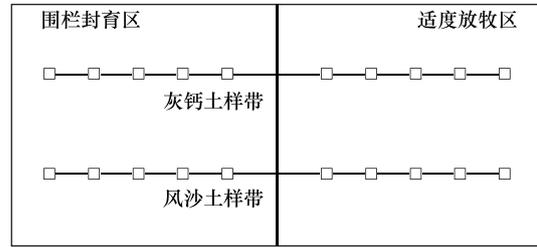


图 1 样线设置示意图

Fig.1 Sample line of the study area

表 1 研究区样地基本概况

Table 1 Basic situation of the study area

样地 Plot	围封年限 Fence year/a	样线数 Number of lines	土壤类型 Soil type	样地 Plot	围封年限 Fence year/a	样线数 Number of lines	土壤类型 Soil type
马儿庄	10	3	灰钙土	四墩子	6	3	风沙土+灰钙土
皖记沟	15	4	风沙土+灰钙土	杨寨子	5	4	风沙土

表 2 研究区样地土壤情况

Table 2 Soil conditions of sample plots in the study area

土壤类型 Soil type	样地 Plot	全氮 Soil total nitrogen/%	有机碳 Soil organic carbon/%	黏粒 (<0.002mm)/% Clay	粉粒 (0.002<0.05mm)/% Silt	砂粒 (0.05<1mm)/% Sand
灰钙土	皖记沟	0.07±0.01a	1.39±0.40a	37.68±8.53a	27.29±1.87c	35.03±7.29d
Sierozem soil	四墩子	0.05±0.01b	0.91±0.32bc	14.23±7.08cd	30.82±3.36ab	54.95±8.59e
	马儿庄	0.06±0.01a	1.17±0.23ab	26.35±3.69b	32.98±1.41a	40.67±2.59d
风沙土 Aeolian sandy	皖记沟	0.04±0.01b	0.89±0.32bc	17.66±11.67c	26.38±2.50cd	55.95±12.38bc
	四墩子	0.04±0.01b	0.87±0.12c	6.26±4.88cd	28.51±6.03bc	65.23±9.48ab
	杨寨子	0.03±0.01c	0.63±0.30c	10.77±10.62cd	23.27±5.16d	65.96±13.34a

不同小写字母表示样地间差异显著(P<0.05)

1.3 测定项目与方法

植被调查采用样方法, 调查每个样方中所有植被的高度, 盖度, 密度, 生物量, 同一样方中的数据汇总合并, 计算物种的重要值, 优势度指数-Simpson 指数, 香浓维纳指数, 均匀度指数, Margalef 丰富度指数。各个指标计算公式如下:

$$\text{种的重要值}(P_i) = (\text{相对盖度} + \text{相对密度} + \text{相对高度} + \text{相对生物量}) / 4$$

$$\text{Shannon-Wiener 指数多样性指数: } H = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, s)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数: } J = \left(- \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \right) / \ln S$$

$$\text{Margalef 丰富度指数: } R = (S - 1) / \ln N$$

$$\text{Simpson 群落优势度指数: } DS = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2$$

$$P_i = N_i / N$$

式中, S 为群落中的总物种数; N 为群落中全部种的总个体数; N_i 为种 i 的个体数。

土壤理化性质测定:在样方内按照“品”字形分 0—5、5—10、10—20 cm 3 层采集土样。一部分土壤样品装入塑料袋,带回实验室,自然风干后用 10 目筛预处理,采用马尔文公司 Mastersizer 3000 激光粒度仪测定其粒径;土壤 pH 采用 pH 计(雷磁 PHS-3G)测定;土壤电导率采用电导率仪(雷磁 DDSJ-308F)测定;预处理土壤样品研磨过 60 目筛,采用重铬酸钾—硫酸法外加加热测定土壤有机碳(soil organic carbon, SOC, %),半微量凯氏定氮法^[14]测量土壤全氮(soil total nitrogen, TN, %)。另一部分土壤样品现场采用铝盒采样,带回实验室用烘箱 105℃ 烘干至恒重测定土壤水分。

1.4 数据处理与分析

基础数据处理使用 Excel 2016 软件,运用 SPSS 进行配对 T 检验,Canoco 5.0 对植物物种多样性、生物量和土壤指标进行冗余分析。

2 结果与分析

2.1 不同土壤类型下植物群落组成及其数量特征

基于围栏封育和适度放牧灰钙土和风沙土植物群落物种重要值、植物生活型等信息综合分析,结果表明:围栏封育后,风沙土生境植物群落出现的植物共 34 种,分属 12 科 27 属。适度放牧利用草地,风沙土生境出现的植物共 33 种,分属 10 科 29 属。围栏封育后,灰钙土生境植物群落出现的植物共 34 种,分属 13 科 29 属。适度放牧利用草地,灰钙土生境出现的植物共 34 种,分属 14 科 29 属。通过不同土壤类型下植物群落数量特征占比(图 2)可以看出在两种土壤生境下,一年生和一、二年生、菊科在适度放牧处理下高于围栏封育处理,而多年生、多年生半灌木以及禾本科都是围栏封育处理高于适度放牧。

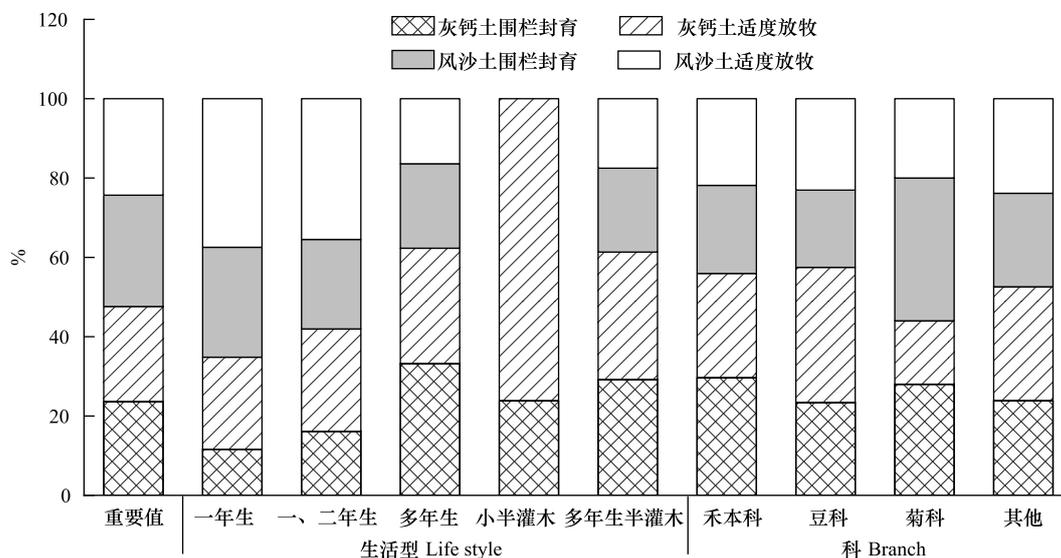


图 2 不同土壤类型下植物群落数量特征

Fig.2 Quantitative characteristics of plant communities under different soil types

2.2 植物群落多样性与土壤环境因子与关系

冗余分析模型很好的解释了围栏封育后植物多样性变化及其与不同土壤生境因子的关系(表 3、图 3) ($P < 0.05$)。灰钙土生境下,所有土壤因子可解释植物多样性变化的 54.53% 信息,沿 RDA 第一轴从左到右,反映了适度放牧利用(圆点)到围栏封育(方块),植物群落物种多样性呈现显著下降趋势,且与植物群落生物量负相关;随着封育年限的增加(黑色方块-白色方块-灰色方块)植物多样性基本呈现出(封育 6 a) > 马儿庄(封育 10 a) > 皖记沟(封育 15 a)的变化规律;土壤因子可解释 53% 的植物群落多样性变异信息(图 3)。进一步

的前向选择分析结果表明:10—20 cm 的 TN、pH、TOC、砂粒是灰钙土生境植物多样性变化的主要控制因子 ($P < 0.05$) (表 4), 其中, 植物群落多样性分别与土壤砂粒正相关, 与土壤有机碳、全氮含量、pH 负相关(图 3)。

风沙土生境下, 所有土壤因子可解释植物多样性变化的 49.92% 信息, 沿 RDA 第一轴从左到右, 反映了适度利用(圆点)到围栏封育(方块), 植物群落物种多样性呈现显著下降趋势, 且与植物群落生物量负相关; 随着封育年限的增加(白色方块-黑色方块-灰色方块), 植物多样性基本呈现出四墩子(封育 6 a) > 杨寨子(封育 5 a) > 皖记沟(封育 15 a); 进一步的前向选择分析结果表明:0—5 cm 的 TOC、EC 和 5—10 cm 的 TN 是风沙土生境植物多样性变化的主要控制因子 ($P < 0.05$) (表 4), 其中, 植物群落多样性与土壤有机碳、全氮正相关, 与电导率负相关(图 3)。

表 3 物种组成与土壤因子的 RDA 分析

Table 3 RDA analysis of species composition and soil factors

土壤类型 Soil type	RDA 模型 RDA model	比例解释量 Proportion explained/%	累积解释量 Cumulative proportion/%	模型整体解释量 Overall interpretation of the model/%	蒙特卡洛检验 Summary of monte carlo test	
					<i>F</i>	<i>P</i>
灰钙土 Aeolian sandy	RDA1	52.52	52.52	56.18	1.99	0.02
	RDA2	2.01	54.53			
风沙土 Sierozem soil	RDA1	47.78	47.78	50.95	1.62	0.04
	RDA2	2.14	49.92			

RDA: 冗余分析 Redundancy analysis

表 4 土壤因子与物种多样性前向选择结果

Table 4 Results of forward selection of soil factors and species diversity

土壤类型 Soil type	土壤因子 Soil factors	R^2	<i>F</i>	<i>P</i>
灰钙土 Sierozem soil	TN 10—20 cm	0.23	19.81	0.00
	pH 10—20 cm	0.06	5.25	0.03
	TOC 10—20 cm	0.04	3.98	0.05
	砂粒 10—20 cm	0.05	5.59	0.01
风沙土 Aeolian sandy	TOC 0—5 cm	0.07	5.40	0.02
	EC 0—5 cm	0.13	10.74	0.00
	TN 5—10 cm	0.04	3.71	0.05

TN: 全氮 Total nitrogen; TOC: 有机碳 Organic carbon; EC: 电导率 Electrical conductivity

3 讨论

3.1 两种土壤生境下植物多样性和生物量对放牧和封育的响应

植物多样性就是指生物群落在组成、结构、功能和动态方面表现的丰富多彩的差异^[15], 是表征植物群落的重要指标。围栏封育被广泛认为是恢复退化草原的有效措施之一^[16], 很多学者研究表明, 围栏封育的时长是影响其效果的关键因素, 贾晓妮等^[17]对云雾山干草原区本氏针茅草地群落进行长期定位监测研究发现, 围栏封育 10 a 的样地群落具有最高的多样性指数, 围栏封育 15 a 的样地具有最高的丰富度指数。苗仁辉等^[1]对科尔沁沙地乌兰敖都地区沙质草地进行研究, 发现围栏封育使植物群落的丰富度指数, 群落优势种显著增高。也有研究表明, 短期围栏封育可以增加植物群落多样性^[18]。本研究结果表明, 在两种土壤生境下, 适度放牧提高植物多样性, 围栏封育对于植物多样性的负效应随着封育年限的增加而增加。蒋德明等^[19]对科尔沁沙地的研究表明, 封育 6 a 以内的样地植物多样性低于封育 11 a 的样地, 这与本研究的结果一致, 相对于适度放牧, 围栏封育降低植物多样性且随着围栏封育年限的增加, 围栏封育对于植物多样性的负效应增加。本研究中可以看出, 两种土壤生境下, 都是围栏封育改变了植物群落组成结构, 一年生或多年生毒害草优势地位

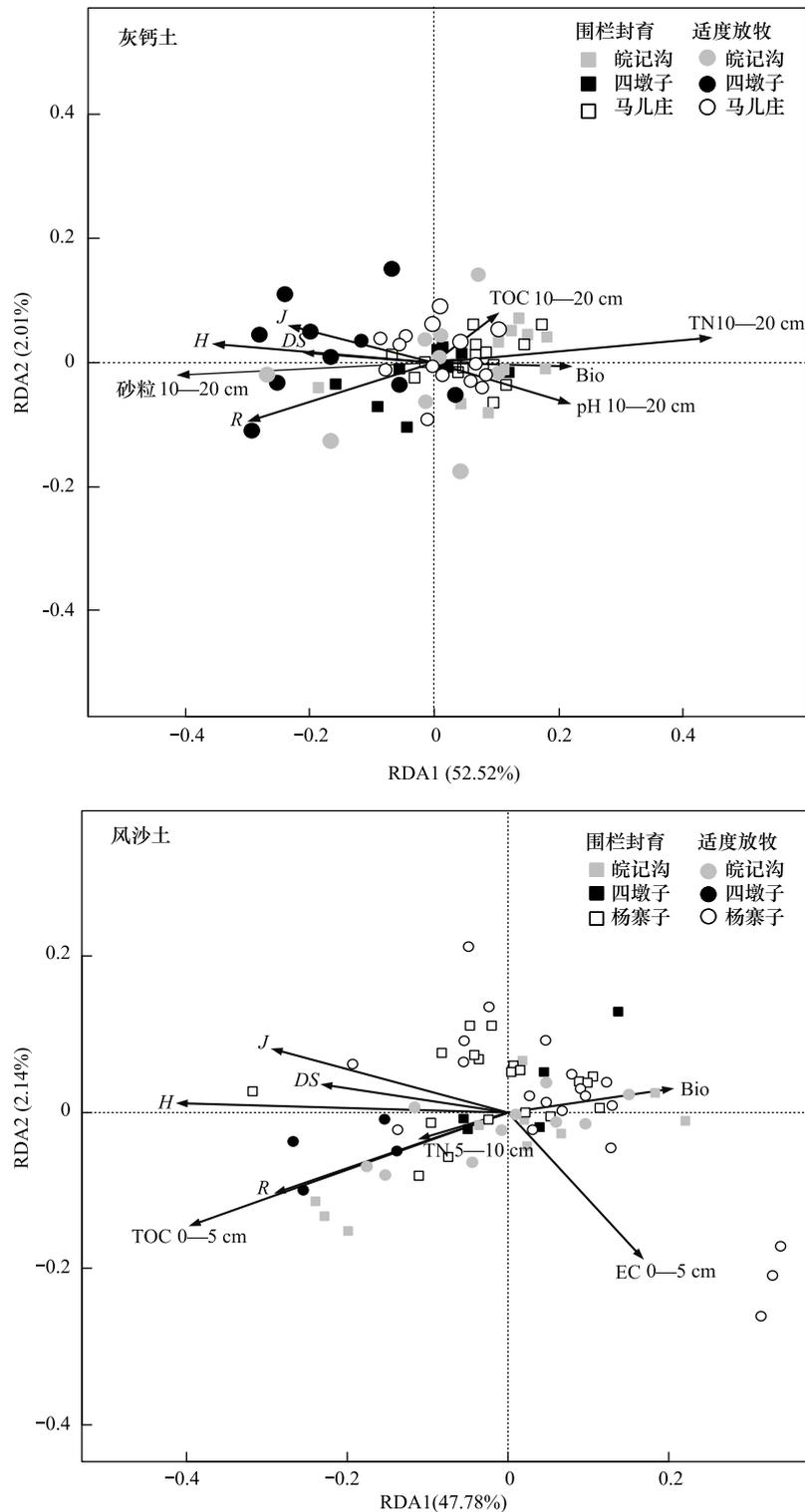


图 3 植物群落多样性指数与土壤环境因子 RDA 排序图

Fig.3 Plant community diversity index and RDA ordination map of soil environmental factors

R: 丰富度指数 Patrick index; H: Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener; DS: Simpson 指数 Simpson index; J: 均匀度指数 Pielou index; Bio: 生物量 Biomass; TN: 全氮 Total nitrogen; TOC: 有机碳 Organic carbon; EC: 电导率 Electrical conductivity; RDA: 冗余分析 Redundancy analysis

逐渐被多年生禾本科替代。围栏封育多以中亚白草, 蒙古冰草, 猪毛蒿为优势种, 适度放牧多以一年生棉蓬和多年生半灌木老瓜头为优势种。适度放牧以一年生或多年生毒害草为优势种, 主要因为禾本科和豆科牧草具

有较高的饲用价值,适度放牧条件下,适口性较好的禾本科首先被采食,为适口性较差的植物群落提供了较好的微环境,加速其生长^[20]。围栏封育一方面阻止了放牧家畜后采食和践踏对禾本科、豆科等优良牧草的去除^[21],另一方面,围栏封育后植物枯落物在地表累积,土壤养分增加^[9],对植物群落生物量的累计发挥积极作用,尤其是禾本科生物量显著增加。

综上,适度的干扰会稀释一年生和多年生物种间的竞争,牲畜采食适度降低多年生物种对资源的竞争,允许次优势种存在,有利于物种共存和多样性的增加。其次,研究表明^[22],毒害草植物老瓜头,猫头刺微斑块有利于增加物种多样性。

3.2 两种土壤生境下植物多样性的和生物量的影响因素

土壤-植物是一个相互作用,相互影响的有机整体,一方面,植物的生长需要通过根系从土壤中吸取养分和水分,并需要土壤作为基础支撑。另一方面,地上部分植物生长及其覆盖也在不断改变着土壤理化性状及土壤微生态环境。所以土壤养分作为自然生态系统生产力的主导因素,其状况的好坏对于植物的生长起着至关重要的作用,直接影响植被的群落组成,结构和生产力水平^[23]。王长庭等^[24]研究也表明,土壤养分含量的高低直接影响群落生产力的高低,但是植物群落多样性的变化与土壤养分含量的高低不一致。土壤的化学性质对植被的发育和微生物的活动以及腐殖质的积累和分解有很大影响^[25]。本研究结果显示不同土壤生境下植物多样性和生物量的影响因素不同,灰钙土生境下植物多样性与砂粒正相关,生物量与有机碳,全氮正相关;风沙土生境下植物多样性与有机碳,全氮正相关,生物量与电导率正相关。这与杜忠毓等^[26]人的研究结果一致,N添加提高50%,禾草类植物的生物量显著增加,而对杂草生物量没有显著影响,杨倩等^[27]也得出相似的结论,加上灰钙土上的全氮含量和有机碳含量显著高于风沙土上的全氮和有机碳含量(表2),这也就解释了在灰钙土生境上全氮和有机碳含量与生物量正相关。而在风沙土生境下,群落多样性与土壤有机碳呈正相关关系,这与白永飞等^[28]的研究结果部分一致,即都是物种多样性与土壤有机碳含量呈现正相关关系。可能的原因是,风沙土生境下多年生丛生禾草类植物等优势的群落具有聚集土壤有机碳和其他养分的作用^[29],周围土壤养分含量高,抑制了原生群落的优势种以及伴生种,在夏雨过后,土壤养分释放,风沙土上一年生植物快速生长,群落多样性增加。

3.3 两种土壤生境下植物多样性与生物量的关系

植物多样性和生物量反映群落结构和功能的基本属性,是反映生态系统健康与否的重要指标。许多研究表明,物种多样性和生产力之间的关系主要为正相关^[30]、负相关^[31-32]、无显著相关性^[33]以及驼峰曲线关系^[34]。本研究结果显示,在两种土壤生境下,植物多样性与生物量都呈现负相关关系。普遍认为,群落生物量的减少伴随着放牧时间和强度的增加^[35-36],适度放牧条件下,一年生和一、二年生矮小的植物增加,而多年生的禾本科由于家畜的喜爱被采食,导致植物总光合面积减少,造成植物有机物积累效率降低^[37],最终放牧降低植物群落生物量。根据光限制假说^[38],认为动物的采食行为促进光资源在垂直空间上的穿透性,使光资源得到有效利用,非优势种以及家畜不喜食的杂草类增加,增加了群落结构的复杂性,使得群落多样性有一定的增加。另外一个观点认为,高生产力环境中资源空间异质性下降,环境中竞争排除增加^[39],群落多样性降低。除此之外,植物多样性和生产力的关系受到温度^[40]、降雨^[41]等的影响。

4 结论

荒漠草原植物群落对灰钙土和风沙土两种土壤生境下表现出的相同点有:(1)相对于围栏封育,适度放牧提高物种多样性,且封育的负效应随着封育年限的增加而增加;(2)两种土壤生境下都是植物多样性与生物量负相关。不同点是两种土壤生境下,植物多样性和生物量的影响因素不同:(1)灰钙土生境下,植物多样性与砂粒正相关,生物量与有机碳,全氮正相关;(2)风沙土生境下,植物多样性与有机碳,全氮正相关,生物量与电导率正相关。考虑到不同土壤生境下植物多样性和生物量的影响因素不同,因此,草地管理者在未来恢复荒漠草原不同土壤生境植物群落时,需要采取适度利用和封育恢复相结合的道路。

参考文献 (References):

- [1] 苗仁辉, 蒋德明, 王永翠. 科尔沁沙质草地封育过程中的植被变化及其机制. 干旱区研究, 2013, 30(2): 264-270.
- [2] 王顺霞. 放牧方式对围栏草地植被和土壤环境质量影响的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [3] 闫玉春, 唐海萍. 围栏禁牧对内蒙古典型草原群落特征的影响. 西北植物学报, 2007, 27(6): 1225-1232.
- [4] 买寅生. 围栏封育对巴音布鲁克高寒草原植被群落特征的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- [5] 柴清琳. 不同管理措施对典型草原群落结构和生态功能的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [6] 张玉萍, 宋乃平, 王兴, 随金明. 不同放牧制度对荒漠草原植物多样性及土壤理化性状的影响. 北方园艺, 2018, (19): 109-115.
- [7] Crick J C, Grime J P. Morphological plasticity and mineral nutrient capture in two herbaceous species of contrasted ecology. *New Phytologist*, 1987, 107(2): 403-414.
- [8] 王兴, 宋乃平, 杨新国, 杨明秀, 肖绪培. 放牧扰动下草地植物多样性对土壤因子的响应. 草业学报, 2013, 22(5): 27-36.
- [9] 刘铁军, 杨劼, 郭建英, 李锦荣, 王丽霞, 董智. 围封对荒漠草原植物群落与土壤养分变化的影响. 中国草地学报, 2019, 41(5): 86-93.
- [10] 宋乃平, 王兴, 陈林, 薛毅, 陈娟, 随金明, 王磊, 杨新国. 荒漠草原“土岛”生境群落物种共存机制. 生物多样性, 2018, 26(7): 667-677.
- [11] 陈林, 辛佳宁, 苏莹, 李月飞, 宋乃平, 王磊, 杨新国, 卞莹莹, 田娜. 异质生境对荒漠草原植物群落组成和种群生态位的影响. 生态学报, 2019, 39(17): 6187-6205.
- [12] 吴婷, 宋乃平, 陈晓莹, 李敏岚, 陈娟. 围栏封育和放牧对盐池荒漠草原植物群落特征的影响. 草地学报, 2019, 27(3): 651-660.
- [13] 谢莉, 宋乃平, 孟晨, 吴婷, 陈晓莹, 李敏岚, 岳健敏. 不同封育年限对宁夏荒漠草原土壤粒径及碳氮储量的影响. 草业学报, 2020, 29(2): 1-10.
- [14] 叶红玲, 刘冬, 任文涛. 半微量凯氏定氮法快速测定复混肥料中总氮含量的研究. 安徽农业科学, 2015, 43(31): 28-29.
- [15] 杨力军, 李希来, 石德军, 洒文君. 青南高海拔地区高寒草甸植物群落多样性的研究. 草原与草坪, 2000, (2): 32-35.
- [16] 赵如梦. 围栏封育对内蒙古草原生态系统化学计量特征的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [17] 贾晓妮, 程积民, 万惠娥. 云雾山本氏针茅草地群落恢复演替过程中的物种多样性变化动态. 草业学报, 2008, 17(4): 12-18.
- [18] Hao L, Sun G, Liu Y Q, Gao Z Q, He J J, Shi T T, Wu B J. Effects of precipitation on grassland ecosystem restoration under grazing exclusion in Inner Mongolia, China. *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1657-1673.
- [19] 蒋德明, 苗仁辉, 押田敏雄, 周全来. 封育对科尔沁沙地植被恢复和土壤特性的影响. 生态环境学报, 2013, 22(1): 40-46.
- [20] 刘玉, 刘振恒, 邓蕾, 武高林. 季节性放牧对草地植物多样性与功能群特征的影响. 草业科学, 2016, 33(7): 1403-1409.
- [21] 杨利民, 韩梅, 李建东. 中国东北样带草地群落放牧干扰植物多样性的变化. 植物生态学报, 2001, 25(1): 110-114.
- [22] 王兴. 荒漠草原局域短花针茅群落构建机制[D]. 银川: 宁夏大学, 2018.
- [23] 罗亚勇, 张宇, 张静辉, 卡召加, 尚伦宇, 王少影. 不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征. 生态学杂志, 2012, 31(2): 254-260.
- [24] 王长庭, 龙瑞军, 王启基, 景增春, 尚占环, 丁路明. 高寒草甸不同海拔梯度土壤有机质氮磷的分布和生产力变化及其与环境因子的关系. 草业学报, 2005, 14(4): 15-20.
- [25] 郁梦德, 白锦泉. 两广地区不同植被类型与土壤性质的关系. 土壤学报, 1962, 10(1): 29-43.
- [26] 杜忠毓, 安慧, 王波, 文志林, 张雅柔, 吴秀芝, 李巧玲. 养分添加和降水变化对荒漠草原植物群落物种多样性和生物量的影响. 草地学报, 2020, 28(4): 1100-1110.
- [27] 杨倩, 王妮, 曾辉. 氮添加对内蒙古退化草地植物群落多样性和生物量的影响. 植物生态学报, 2018, 42(4): 430-441.
- [28] 白永飞, 李凌浩, 王其兵, 张丽霞, 张焱, 陈佐忠. 锡林河流域草原群落植物多样性和初级生产力沿水热梯度变化的样带研究. 植物生态学报, 2000, 24(6): 667-673.
- [29] 石椿珺, 李艳龙, 程建伟, 张桐瑞, 郭颖, 李永宏. 内蒙古典型草原群落内部植物和土壤空间异质性. 草业科学, 2019, 36(6): 1498-1507.
- [30] Tilman D, Reich P B, Knops J, Wedin D, Mielke T, Lehman C. Diversity and productivity in a long-term grassland experiment. *Science*, 2001, 294(5543): 843-845.
- [31] Sandau N, Naisbit R E, Fabian Y, Bruggisser O, Kehrl P, Aebi A, Rohr R P, Bersier L F. Understanding negative biodiversity-ecosystem functioning relationship in semi-natural wildflower strips. *Oecologia*, 2019, 189(1): 185-197.
- [32] Soliveres S, van der Plas F, Manning P, Prati D, Gossner M M, Renner S C, Alt F, Arndt H, Baumgartner V, Binkenstein J, Birkhofer K, Blaser S, Blüthgen N, Boch B, Böhm S, Börschig C, Buscot F, Diekötter T, Heinze J, Hölzel N, Jung K, Klaus V H, Kleinebecker T, Klemmer S, Krauss J, Lange M, Morris E K, Müller J, Oelmann Y, Overmann J, Pašalić E, Rillig M C, Schaefer H M, Schloter M, Schmitt B, Schöning I, Schrupp M, Sikorski J, Socher S A, Solly E F, Sonnemann I, Sorkau E, Steckel J, Steffan-Dewenter I, Stempfhuber B, Tschapka M, Türke

- M, Venter P C, Weiner C N, Weisser W W, Werner M, Westphal C, Wilcke W, Wolters V, Wubet T, Wurst S, Fischer M, Allan E. Biodiversity at multiple trophic levels is needed for ecosystem multifunctionality. *Nature*, 2016, 536(7617): 456-459.
- [33] 袁自强, 魏盼盼, 高本强, 张荣. 取样尺度对亚高寒草甸物种多样性与生产力关系的影响. *植物生态学报*, 2012, 36(12): 1248-1255.
- [34] Mittelbach G G, Steiner C F, Scheiner S M, Gross K L, Reynolds H L, Waide R B, Willig M R, Dodson S I, Gough L. What is the observed relationship between species richness and productivity? *Ecology*, 2001, 82(9): 2381-2396.
- [35] 李永宏, 汪诗平. 放牧对草原植物的影响. *中国草地*, 1999, (3): 11-19.
- [36] 刘钟龄, 王炜, 郝敦元, 梁存柱. 内蒙古草原退化与恢复演替机理的探讨. *干旱区资源与环境*, 2002, 16(1): 84-91.
- [37] 张宇, 阿斯娅·曼力克, 辛晓平, 张荟荟, 热娜·阿布都克力木, 闫瑞瑞, 郭美兰. 禁牧与放牧对新疆温性草原群落结构、生物量及牧草品质的影响. *草地学报*, 2020, 28(3): 815-821.
- [38] Borer E T, Seabloom E W, Gruner D S, Harpole W S, Hillebrand H, Lind E M, Adler P B, Alberti J, Anderson T M I, Bakker J D, Biederman L, Blumenthal D, Brown C S, Brudvig L A, Buckley Y M, Cadotte M, Chu C J, Cleland E E, Crawley M J, Daleo P, Damschen E I, Davies K F, DeCraepeo N M, Du G Z, Firn J, Hautier Y, Heckman R W, Hector A, HilleRisLambers J, Iribarne O, Klein J A, Knops J M H, Pierre K J L, Leakey A D B, Li W, MacDougall A S, McCulley R L, Melbourne B A, Mitchell C E, Moore J L, Mortensen B, O'Halloran L R, Orrock J L, Pascual J, Prober S M, Pyke D A, Risch A C, Schuetz M, Smith M D, Stevens C J, Sullivan L L, Williams R J, Wragg P D, Wright J P, Yang L H. Herbivores and nutrients control grassland plant diversity via light limitation. *Nature*, 2014, 508(7497): 517-520.
- [39] 张继义, 赵哈林, 张铜会, 赵学勇. 科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态. *植物生态学报*, 2004, 28(1): 86-92.
- [40] Costanza R, Fisher B, Mulder K, Liu S, Christopher T. Biodiversity and ecosystem services: a multi-scale empirical study of the relationship between species richness and net primary production. *Ecological Economics*, 2007, 61(2/3): 478-491.
- [41] Chen S P, Wang W T, Xu W T, Wang Y, Wan H W, Chen D M, Tang Z Y, Tang X L, Zhou G Y, Xie Z Q, Zhou D W, Shangguan Z P, Huang J H, He J S, Wang Y F, Sheng J D, Tang L S, Li X R, Dong M, Wu Y, Wang Q F, Wang Z H, Wu J G, Chapin 3rd F S, Bai Y F. Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4027-4032.