

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.027

引用格式:杨龙, 颜安, 谢开云, 等. 施肥和镇压对免耕补播草地群落特征及多样性的影响[J]. 草地学报, 2026, 34(1):287—300

YANG Long, YAN An, XIE Kai-yun, et al. Effects of Fertilization and Compaction on the Community Characteristics and Diversity of No-till Reseeding Grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1):287—300

施肥和镇压对免耕补播草地群落特征及多样性的影响

杨 龙, 颜 安, 谢开云*, 刘 伟, 冯晶晶, 安 旗, 朱 震, 崔荷婷, 张丽娟
(新疆农业大学草业学院/新疆草地资源与生态重点实验室/西部干旱荒漠区草地资源与生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:免耕补播是退化草地修复的重要措施之一,而补播草种能否在原生植被群落中生长和定居是退化草地免耕补播成败的关键。为明确施肥和镇压措施对免耕补播草种生长、草地群落特征和生物多样性的影响,本研究设置了3种免耕补播模式、5种施肥组合和2种镇压处理。结果表明:与对照处理相比,氮磷施肥处理对3种补播模式草地群落特征具有显著影响,其中草地群落株高提高了23.91%~43.43%,盖度提高了7.07%~15.21%,密度及生物量分别提高了15.74%~51.94%和17.57%~36.78%;但对草地群落多样性无显著影响。与杂花苜蓿和无芒雀麦单一物种补播草地相比,同时补播杂花苜蓿和无芒雀麦草地植被的盖度和密度分别显著提高了3.01%~3.89%和6.45%~15.90%,草地Simpson优势度指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数等多样性指数分别显著提高了3.65%~9.70%,5.02%~9.38%和2.89%~8.97%;与不镇压处理相比,免耕补播后进行镇压的草地群落平均株高、盖度、密度及生物量分别提高了6.44%,0.76%,3.07%和11.37%;综合考虑,在退化草地中同时补播杂花苜蓿和无芒雀麦,并添加氮磷养分和进行镇压处理等措施能够提高草地生产力和恢复草地生态功能。

关键词:免耕补播;施肥;镇压;群落特征;生物多样性

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)01-0287-14

Effects of Fertilization and Compaction on the Community Characteristics and Diversity of No-till Reseeding Grassland

YANG Long, YAN An, XIE Kai-yun*, LIU Wei, FENG Jing-jing, AN Qi, ZHU Zhen, CUI He-ting, ZHANG Li-juan

(College of Prataculture, Xinjiang Agricultural University/Xinjiang Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology/Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology in Western Arid Desert Areas, Ministry of Education, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: No-till reseeded is one of the important measures for restoring degraded grassland, and whether the replanted grass species can grow and settle in the native vegetation community is the key to the success of no-till reseeded in degraded grassland. In order to clarify the effects of fertilization and compaction measures on the growth of no-tillage reseeded grasses, grass community characteristics and biodiversity, three no-tillage reseeded modes, five fertilizer combinations and two compaction treatments were set up in this study. The results showed that, compared with the control treatment, the nitrogen and phosphorus treatments had a significant effect on the characteristics of grass communities in the three replanting modes, in which the height of grass communities increased by 23.91%-43.43%, the cover increased by 7.07%-15.21%, and the density and biomass increased by 15.74%-51.94% and 17.57%-36.78%, respectively, but there was no significant effect on

收稿日期:2025-02-10;修回日期:2025-03-31

基金项目:新疆“三农”骨干人才培养项目(2022SNGGGCC019)资助

作者简介:杨龙(1999-),男,汉族,新疆沙湾人,硕士研究生,主要从事草地管理与牧草生产研究,E-mail:yanglong99123@163.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:xjndxky@xjau.edu.cn

the diversity of grass communities. Compared to the single-species supplemented grassland of alfalfa and awnless sparrow. The vegetation cover and density of the simultaneously supplemented grassland of alfalfa and awnless sparrow significantly increased by 3.01%-3.89%, 6.45%-15.90%, and the diversity indices of grassland, such as Simpson's index of dominance, Shannon-Wiener's index, and Pielou's index of evenness, increased by 3.65%-9.70%, 5.02%-9.38% and 2.89%-8.97%. The average plant height, cover, density and biomass of the grass community compaction after no-till reseeding increased by 6.44%, 0.76%, 3.07% and 11.37%, respectively, compared with that of the no-suppression treatment. Considering all the factors, the measures of replanting alfalfa and awnless triticale in degraded grassland, adding nitrogen and phosphorus nutrients, and suppressing treatment can improve the productivity and restore the ecological function of the grassland.

Key words: No-till replant; Fertiliser; Suppression; Community characteristics; Biodiversity

新疆作为我国重要牧区之一,天然草地面积 $5.7 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占全国可利用草地面积的14.5%^[1-2]。长期以来,由于粗放的、落后的、牺牲生态为代价的放牧管理方式,已使其成为一个不能自我维持的、不可持续发展的生态系统,主要表现为土壤养分过度流失、草地生产力下降、植被覆盖度降低、毒害草扩张等^[2],不仅制约了当地畜牧业的可持续发展,而且对干旱区脆弱的生态环境造成威胁。因此,提高草地生产力和物种多样性是退化草地恢复的主要目标。草地退化导致适口性好的优良牧草比例减少,而免耕补播是快速修复退化草地的有效途径^[3],是在不破坏或少破坏原有植被的前提下,补播一些适应性强、生态位宽、饲用价值高的优良牧草,以增加草地植物种类,提高草地植被覆盖度,从而提高草地生产力和牧草质量^[4]。特别是在以禾本科牧草为主的天然草地上补播豆科牧草,可以显著提高天然草地的生产力^[5],改善天然草地牧草品质^[6],增加土壤碳、氮固持能力^[7],以及可改善天然草地的群落结构和物种多样性^[8],同时,也成为美国、加拿大等发达国家退化草地恢复和更新的主要手段之一^[9]。

围绕着退化草地生态修复,国内外开展了大量的相关研究,主要集中在围栏封育^[10]、免耕补播^[11]和施肥改良^[12]等。大量的实践案例表明:草地退化越严重,免耕补播效果越好。免耕补播对轻度退化草地的影响不显著的主要原因是轻度退化草地原生植物与免耕补播物种之间存在强烈竞争关系,限制了补播物种的生长^[13-14]。在中/重度退化草地中免耕补播效果较明显,主要原因是中/重度退化草地的低竞争环境为免耕补播物种提供了更好的生存环境^[15]。但中/重度退化草地中的土壤养分供应不足也会导致免耕补播草种生长和定居失败。因此,选择合适的物种并为幼苗生长创造适宜的环境条件是补播成功的前提,而施肥不仅能够快速补充

土壤中的矿质养分^[16-18],能够提高幼苗的竞争力,还能改善草地群落结构。倪清睿等^[19]在内蒙典型草地进行的施肥试验表明,氮、磷配施可显著提高草地群落植被盖度和生物量,但对草地群落多样性无显著影响。段敏杰等^[20]在藏北高寒草地施肥试验中发现氮、磷合理配施可显著提高草地生物量,而降低物种多样性;但也有研究结果表明施肥可以增加植物群落地上生物量及物种多样性^[21]。播后镇压作为一种重要的田间管理措施,不仅有效促进种子与土壤的接触,也可减少土壤水分蒸发,为实现种子萌发和幼苗生长创造有利条件^[22-24]。目前国内关于镇压的研究主要集中于小麦和玉米等农作物^[25-26],而对退化草地免耕补播幼苗生长、草地植被群落特征及物种多样性的研究较少。因此,探明施肥和镇压措施对免耕补播幼苗生长和草地群落特征及多样性的影响机制,对于退化草地生态修复理论延伸和技术优化具有重要意义。本研究针对不同补播模式设置镇压和施肥处理,旨在明确补播、施肥和镇压互作对退化草地植被群落特征及多样性的影响,以期为半干旱地区的退化草地治理提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆伊犁哈萨克自治州昭苏县军马场(80° 97' 89.80"E, 43° 10' 55.46"N,海拔1798 m,图2),属温带大陆性气候,年均温2.7℃,年均降水量512 mm,降水集中于5—8月(图1),约占全年总降水量的68%;无霜期85~100 d,积雪期158 d,积雪厚度20~60 cm。试验地补播前属于重度退化草地,植被覆盖度仅为47%,植被物种组成有猫尾草(*Uraria crinita* L.)、草原糙苏(*Phlomis pratensis* Kar. & Kir.)、草甸老鹳草(*Geranium*

pratense L.)、百里香(*Thymus mongolicus* Ronn)等。土壤类型为黑钙土^[27],土壤有机质含量为62.06 g·kg⁻¹,全氮含量为2.027 g·kg⁻¹,全磷含量为0.835

g·kg⁻¹,全钾含量为1.580 g·kg⁻¹,碱解氮含量为88.323 mg·kg⁻¹,速效磷含量为23.248 mg·kg⁻¹,速效钾含量为221.658 mg·kg⁻¹。

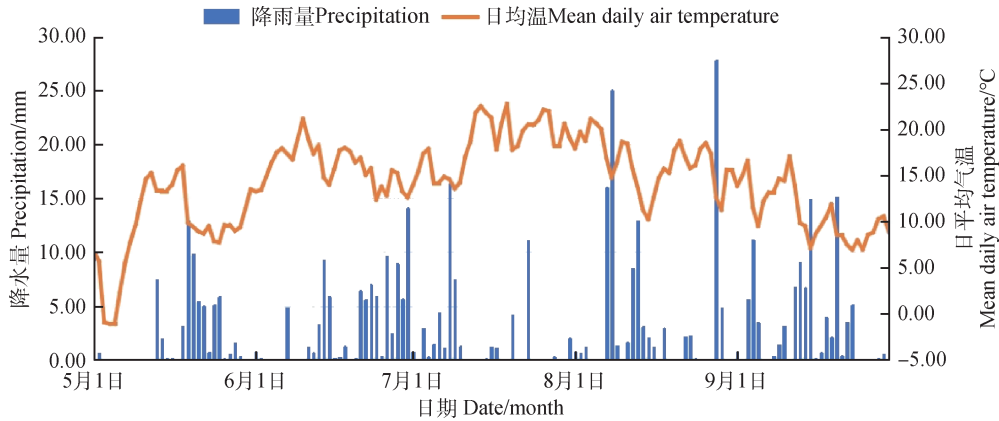


图 1 试验期间日平均气温和降水量

Fig. 1 Average daily temperature and precipitation during the test period

1.2 试验设计

采用三因素裂区试验设计,主处理设置3个免耕补播处理,即补播杂花苜蓿(*Medicago rivularis* Vassilcz., M),补播无芒雀麦(*Bromus inermis* Leyss., B),杂花苜蓿和无芒雀麦1:1混合补播(MB)。副处理设置

5个施肥处理,即不施肥(CK)、施氮肥(N)、施磷肥(P)、施氮肥+磷肥(N+P)、施有机肥(Y)。副副处理设置2种镇压处理,即镇压处理(C)和不镇压处理(NC),30个处理组合,重复3次,共计90个试验小区,试验小区面积为5 m×8 m=40 m²,相邻小区间隔2 m。

表 1 试验所用草种来源及播种量

Table 1 The source and seeding rate of grass seeds used in the experiment

物种名称 Species name	草种来源 Grass seed source	净度 Cleanliness/%	发芽率 Percentage of germination/%	播种量 Seeding rate/(kg·hm ⁻²)
杂花苜蓿 <i>Medicago rivularis</i>	内蒙古大学 Inner Mongolia University	89	92	20
无芒雀麦 <i>Bromus inermis</i>	新疆天博草业有限公司 Xinjiang Tianbo Grass land Industry Co., Ltd	94	93.5	30

2023年5月采用免耕补播机(美诺6124型)进行免耕条播,行距15 cm,无芒雀麦的播种量为30 kg·hm⁻²、杂花苜蓿的播种量为20 kg·hm⁻²(表1)。镇压处理采取机械镇压方式进行播后镇压;施肥处理中无机肥施肥量按照总量的30%,40%,30%分别于6月5日、7月4日、8月3日分三次施入,有机肥于播种前一次性施入,施肥方式为撒施;试验所用氮肥为尿素(总氮≥46%),施量为225 kg·hm⁻²;所施磷肥为重过磷酸钙(P₂O₅≥16%),施量为100.05 kg·hm⁻²;有机肥为商品有机肥(N、P、K总养分≥5%,有机质≥30%),施量为5000 kg·hm⁻²。换算为纯量养分,施肥量分别为N:103.5 kg·hm⁻²、P₂O₅:16.00 kg·hm⁻²。氮磷肥的施用量确定主要是根据补播前对试验地土壤测试结果,同时也参考了其他研究结果^[28-30]。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 草地群落特征测定 于2023年9月初采用样方法调查,每个小区随机设置3个1 m×1 m调查样方,分别记录样方内补播物种的株高(在样方内随机选取10株补播物种进行测定)、盖度和生物量(刈割在样方内所有补播物种),植被群落平均高度(对样方内所有物种分别随机选取10株测定其株高)、盖度(样方内总盖度和各物种分盖度采用针刺法测定)、密度(统计各样方内每个物种的株数)、地上生物量(分种齐地面刈割装入信封袋带回实验室置于65℃烘箱内烘至恒重,称取干重)。

1.3.2 草地群落多样性计算 Margalf丰富度指数(Ma):

$$Ma = \frac{S - 1}{\ln N} \quad (1)$$

Simpson优势度指数(D):

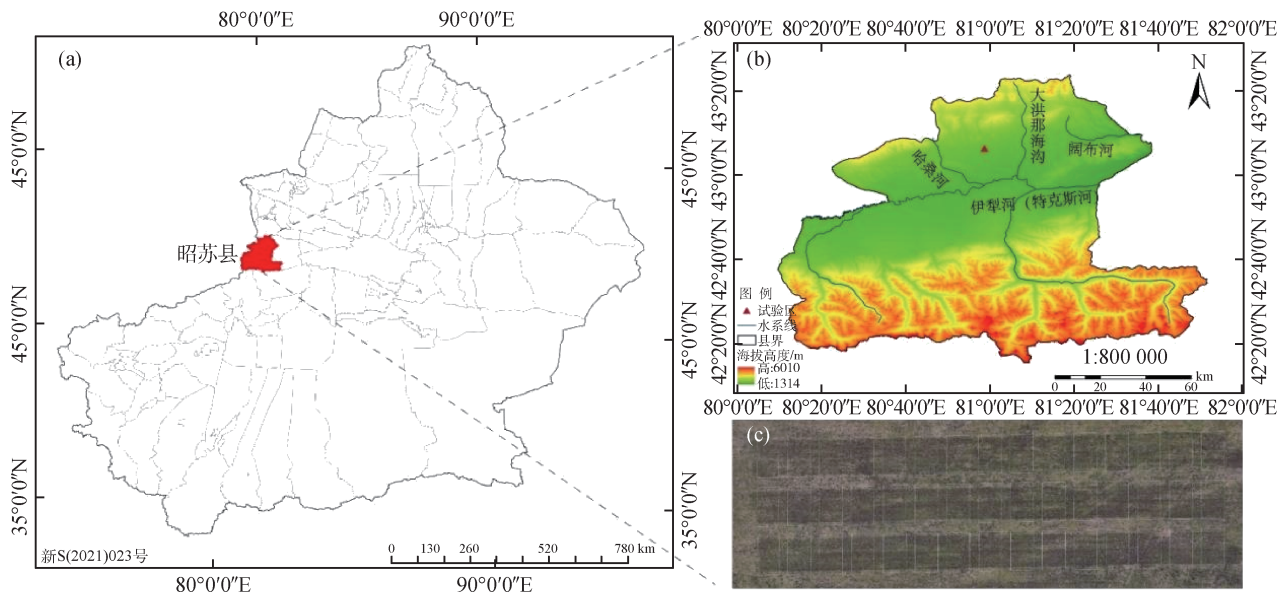


图2 研究区概况图

Fig. 2 Overview of the study area

注:该图由自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为新S(2021)023号标准地图制作,底图无修改

Note: This map was produced from the standard map with review number Xin S(2021)023 downloaded from the website of the Standard Map Service of the Ministry of Natural Resources, with no modifications to the base map

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (2)$$

Shannon-Wiener指数(H'):

$$H' = -\sum P_i \ln P_i \quad (3)$$

Pielou均匀度指数(J):

$$J = \frac{(-\sum P_i \ln P_i)}{\ln S} \quad (4)$$

$$P_i = \frac{N_i}{N} \quad (5)$$

(1)~(5)式中: S 为样方中的总物种数, N 为样方中的总个体数, N_i 为第*i*种植物的个体数, P_i 为*i*种植物个体数占总体数比例^[31]。

1.4 数据处理

用Excel 2019完成数据统计,用SPSS 25.0对各指标进行方差分析,图、表中的各数据为平均值±标准误(Mean±SE),用GraphPad Prism 8对数据进行绘图。

2 结果与分析

2.1 施肥和镇压对补播草种生长特性的影响

在补播杂花苜蓿草地中,N+P处理下苜蓿株高和生物量最高,分别为11.39 cm和12.27 g·m⁻²,

显著高于CK处理(图3a-c, $P < 0.05$),较CK处理分别提高了59.67%和19.47%;苜蓿盖度在N处理下显著高于其他施肥处理(图3b, $P < 0.05$)。

在补播无芒雀麦草地中,无芒雀麦株高在Y处理下显著高于CK处理(图3d, $P < 0.05$),较CK处理提高了63.64%,在N处理下无芒雀麦盖度显著高于其他施肥处理(图3e, $P < 0.05$),生物量在各处理之间无显著差异。

补播杂花苜蓿和无芒雀麦草地中的苜蓿株高、盖度和生物量均在N+P处理下显著高于CK处理(图3, $P < 0.05$),较CK处理分别提高了69.27%,32.33%和63.63%。无芒雀麦株高在Y处理下显著高于CK处理(图3d, $P < 0.05$),较CK处理提高29.91%,无芒雀麦盖度和生物量均在施N肥处理下显著高于CK处理(图3e-f, $P < 0.05$),较CK处理分别提高了33.36%和24.30%。

杂花苜蓿株高、盖度和生物量均在镇压处理显著高于不镇压处理(图4,杂花苜蓿株高: $|t|=2.725$, $P=0.009$;盖度: $|t|=5.574$, $P < 0.001$;生物量: $|t|=3.166$, $P=0.003$);同样,无芒雀麦株高、盖度和生物量均在镇压处理下显著高于不镇压处理(图4,无芒雀麦株高: $|t|=8.135$, $P < 0.001$;盖度: $|t|=4.751$, $P < 0.001$;生物量: $|t|=3.664$, $P < 0.001$)。

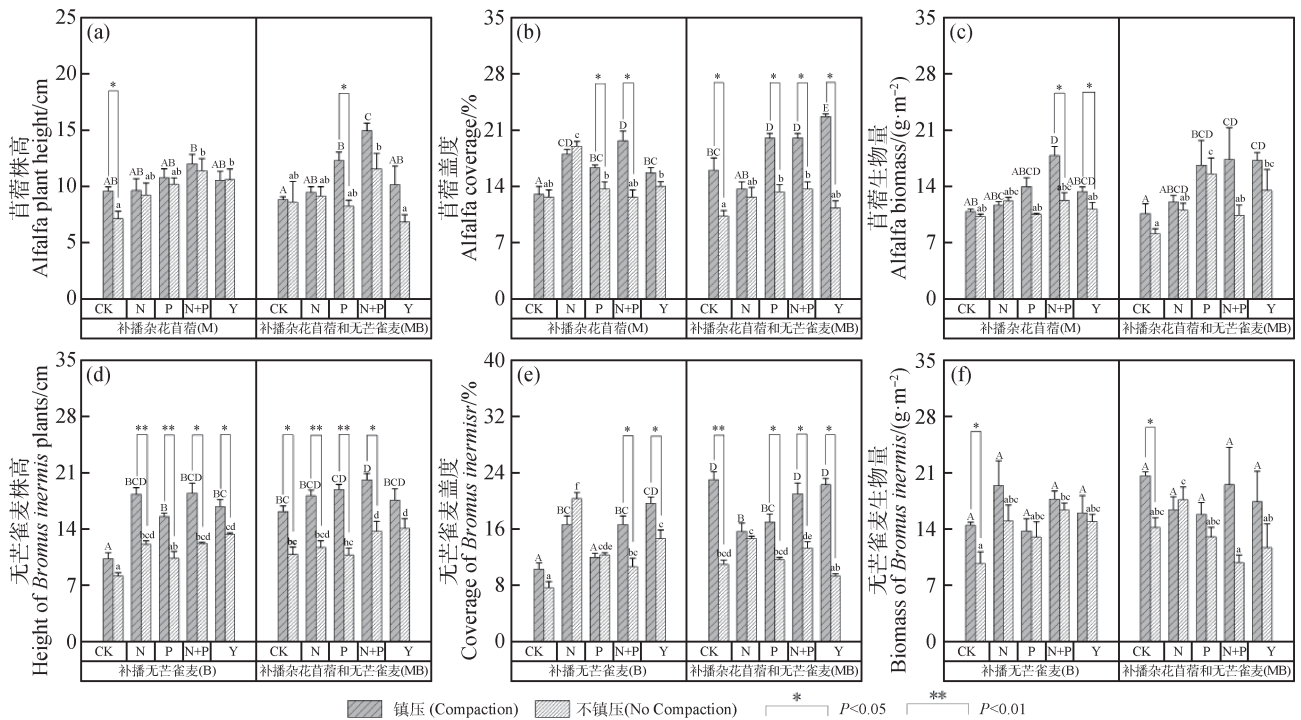


图 3 不同处理下补播草种的生长特性

Fig. 3 Growth characteristics of replanted grass seeds under different treatments

注:图柱上不同大写字母表示在镇压处理下同一补播草地中不同施肥水平之间的显著性($P<0.05$);不同小写字母表示在不镇压处理下同一补播草地中不同施肥水平之间的显著性($P<0.05$);C,镇压 Compaction;NC,不镇压 No Compaction。下同

Note: Different capital letters on the graph column indicate the significance between different fertilization levels in the same supplementary grass under repression treatment ($P<0.05$); different lowercase letters indicate the significance between different fertilization levels in the same supplementary grass under repression treatment ($P<0.05$); C, Compaction; NC, No Compaction. The same as below

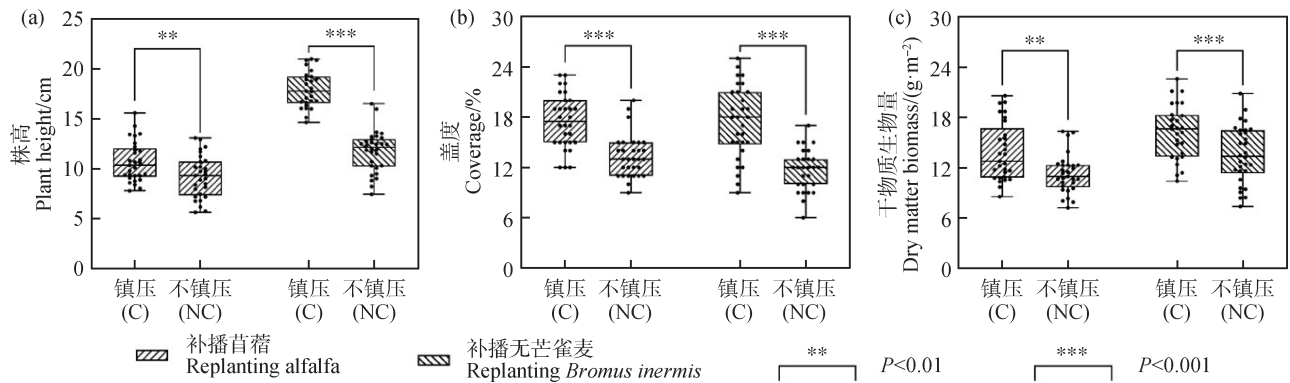


图 4 镇压处理对补播草种的生长特性影响

Fig. 4 Effects of compaction treatments on growth characteristics of reseeded grass species

2.2 施肥和镇压对不同补播草地群落特征的影响

在补播杂花苜蓿草地中,施 N+P 处理下草地群落植被高度、盖度和密度显著高于 CK 处理($P<0.05$),较 CK 处理分别提高了 43.43%, 8.21% 和 39.60%,草地群落地上生物量在各施肥处理间无显著差异(表 2)。补播草地群落植被高度、盖度和密度在镇压与不镇压处理间无显著差异(株高: $|t|=0.808$, $P=0.426$; 盖度: $|t|=0.359$, $P=0.722$; 密度: $|t|=0.569$, $P=0.574$);但草地群落地上生物量

在镇压处理下显著高于不镇压处理(图 5,生物量: $|t|=3.335$, $P=0.002$)。

在补播无芒雀麦草地中,施 N+P 肥处理下的草地群落植被高度、盖度、密度及生物量最高,并且显著高于 CK 处理($P<0.05$),较 CK 处理分别提高了 23.91%, 15.21%, 51.94% 和 36.78%(表 2)。补播草地群落植被高度、盖度、密度和生物量在镇压与不镇压处理间无显著差异(图 5,株高: $|t|=1.178$, $P=0.249$; 盖度: $|t|=0.599$, $P=0.554$; 密度: $|t|=1.003$,

$P=0.325$; 生物量: $|t|=0.761, P=0.453$ 。

在补播杂花苜蓿和无芒雀麦草地中, 施 N+P 肥处理下的草地群落植被高度、盖度、密度及生物量最高, 并且显著高于 CK 处理 ($P<0.05$), 较 CK 处理分别提高了 28.63%, 7.07%, 15.74% 和

32.23% (表 2)。补播草地群落植被高度、盖度、密度和生物量在镇压与不镇压处理间无显著差异 (图 5, 株高: $|t|=0.148, P=0.884$; 盖度: $|t|=0.548, P=0.588$; 密度: $|t|=0.774, P=0.446$; 生物量: $|t|=0.632, P=0.532$)。

表 2 施肥对不同补播草地群落特征的影响

Table 2 Effects of fertilization on community characteristics of different replanted grasslands

处理 Treatment		草地群落特征 Community diversity index			
		高度 High/cm	盖度 Coverage/%	密度 Density/(plant·m ⁻²)	生物量 Biomass/(g·m ⁻²)
补播杂花苜蓿 Replanting alfalfa	CK	19.62±0.27 ^A	79.17±1.90 ^A	91.33±5.35 ^A	121.00±6.74 ^A
	N	27.62±0.76 ^C	85.17±2.74 ^{AB}	114.83±3.66 ^B	127.61±5.22 ^A
	P	23.22±1.00 ^B	82.83±1.25 ^{AB}	115.50±4.71 ^B	126.58±12.28 ^A
	N+P	28.14±1.27 ^C	85.67±0.99 ^B	127.50±5.08 ^B	142.26±10.60 ^A
	Y	25.73±0.59 ^C	82.50±2.28 ^{AB}	119.33±4.12 ^B	125.24±18.02 ^A
补播无芒雀麦 Replanting <i>Bromus inermis</i>	CK	24.26±0.55 ^A	76.67±2.19 ^A	81.83±2.39 ^A	102.82±2.84 ^A
	N	27.89±0.50 ^B	83.67±3.23 ^B	92.50±3.87 ^A	127.82±6.76 ^{BC}
	P	27.69±0.56 ^B	75.67±3.15 ^A	112.33±7.26 ^B	133.58±4.72 ^{BC}
	N+P	30.06±1.00 ^C	88.33±0.71 ^B	124.33±5.74 ^B	140.64±5.91 ^C
	Y	29.21±0.49 ^{BC}	87.50±1.06 ^B	111.17±3.96 ^B	123.61±4.00 ^B
补播杂花苜蓿和无芒雀麦 Replanting alfalfa and <i>Bromus inermis</i>	CK	24.38±0.43 ^A	82.50±2.79 ^A	114.33±5.19 ^A	117.63±5.62 ^A
	N	26.65±0.53 ^B	86.00±1.00 ^{AB}	120.17±4.57 ^{AB}	122.65±11.87 ^A
	P	29.11±0.55 ^C	85.50±1.31 ^{AB}	120.33±4.48 ^{AB}	127.04±5.31 ^A
	N+P	31.36±0.70 ^D	88.33±1.31 ^B	132.33±5.19 ^B	155.54±5.82 ^B
	Y	27.55±0.87 ^{BC}	85.50±1.43 ^{AB}	118.00±2.57 ^B	109.50±4.68 ^A

注: 不同大写字母表示同一补播草地中不同施肥水平之间的显著性 ($P<0.05$)。下同

Note: Different uppercase letters indicate the significance between different fertilization levels in the same replanted grassland ($P<0.05$). The same as below

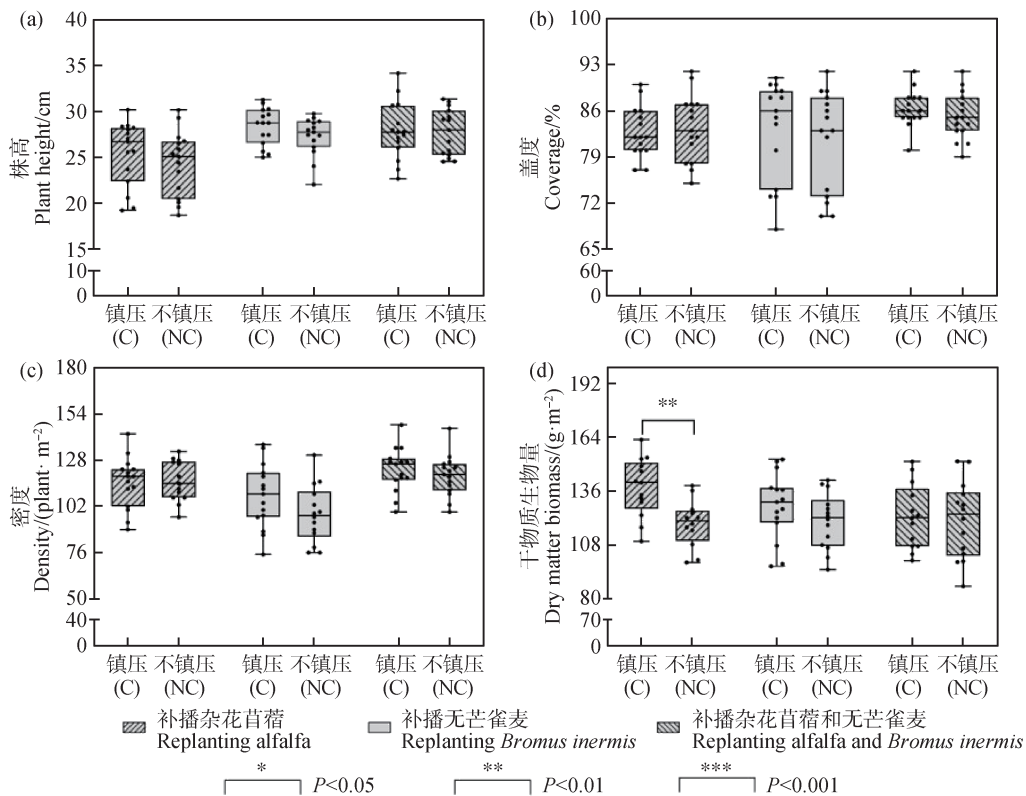


图 5 镇压处理对草地群落特征的影响

Fig. 5 Effects of compaction treatments on grassland community characteristics

草地群落植被高度、盖度和密度在MB草地中显著高于M草地($P<0.05$,图6);草地群落植被盖度和密度在MB草地中显著高于B草地($P<0.05$);草地群落植被高度在B草地中显著高于M草地($P<0.05$);草地群落植被密度在M地中显著高于B草地($P<0.05$);草地群落地上生物量在3种补播草地之间无显著差异。

补播处理极显著影响草地群落植被高度和密

度(表4, $P<0.01$);施肥处理极显著影响草地群落植被高度、盖度、密度及生物量($P<0.01$);镇压处理显著影响草地群落植被高度($P<0.05$),镇压处理极显著影响草地群落植被生物量($P<0.01$);补播 $\times$ 施肥交互作用极显著影响草地群落植被高度($P<0.01$);补播 $\times$ 镇压交互作用显著影响草地群落植被生物量($P<0.05$);施肥 $\times$ 镇压交互作用显著影响草地群落植被高度($P<0.05$)。

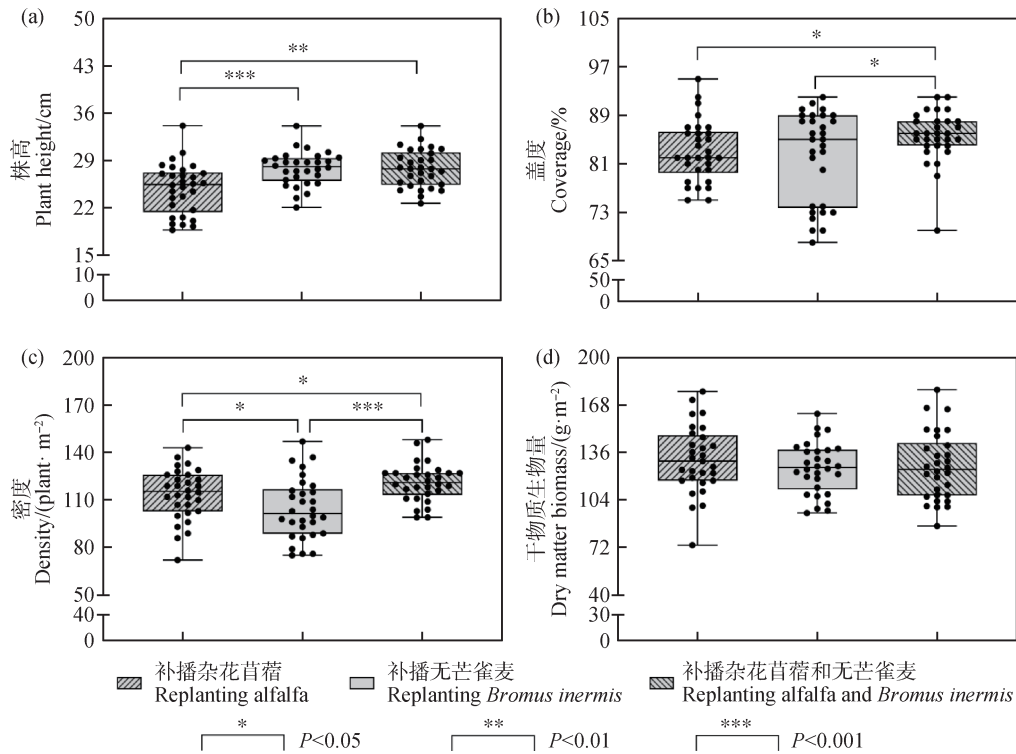


图6 补播处理对草地群落特征的影响

Fig. 6 Effects of replanting treatments on grassland community characteristics

2.3 施肥和镇压对不同补播草地群落多样性的影响

补播处理极显著影响草地植被群落的Simpson优势度指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数(表4, $P<0.01$);施肥处理极显著影响草地植被群落的Pielou均匀度指数($P<0.01$);镇压处理显著影响草地植被群落的Simpson优势度指数($P<0.05$);补播 $\times$ 施肥交互作用显著影响草地植被群落的Pielou均匀度指数($P<0.05$);补播 $\times$ 镇压交互作用极显著影响草地植被群落的Simpson优势度指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数($P<0.01$)。

在补播杂花苜蓿草地中, Simpson优势度指数和Pielou均匀度指数均在CK处理下显著高于Y处理($P<0.05$), 较Y处理分别提高了20.31%和23.68%;而Shannon-Wiener指数和Margalef丰富

度指数在各施肥处理之间无显著差异(表3)。草地群落Simpson优势度指数、Shannon-Wiener指数及Pielou均匀度指数在镇压处理下显著高于不镇压处理(图7, Simpson优势度指数: $|t|=3.205$, $P=0.003$; Shannon-Wiener指数: $|t|=3.039$, $P=0.005$; Pielou均匀度指数: $|t|=3.083$, $P=0.005$);而草地群落Margalef丰富度指数在镇压与不镇压处理之间无显著差异(图7, $|t|=0.992$, $P=0.330$)。

补播无芒雀麦草地中, Simpson优势度指数在Y处理下最高, Shannon-Wiener指数和Margalef丰富度指数均在N+P处理下最高, 但各施肥处理之间无显著差异(表3)。草地群落Simpson优势度指数、Shannon-Wiener指数、Margalef丰富度指数及Pielou均匀度指数在镇压与不镇压处理之间无显著差异(图7, Simpson优势度指数: $|t|=0.273$, $P=0.787$; Shannon-Wiener指数: $|t|=0.028$, $P=0.978$;

Margalef 丰富度指数: $|t|=0.194, P=0.848$; Pielou 均匀度指数: $|t|=0.540, P=0.593$ 。

补播杂花苜蓿和无芒雀麦草地中, Pielou 均匀度指数在 CK、P、N+P 处理下显著高于 Y 处理 ($P<0.05$), 较 Y 处理分别提高了 6.82%, 6.82% 和 5.68%, 而 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 指数和 Margalef 丰富度指数在各施肥处理之间无显著差

异(表3)。草地群落 Shannon-Wiener 指数在镇压处理下显著高于不镇压处理 (Shannon-Wiener 指数: $|t|=2.073, P=0.048$); 而草地群落 Simpson 指数、Margalef 丰富度指数及 Pielou 均匀度指数在镇压与不镇压处理之间无显著差异(图7, Simpson 优势度指数: $|t|=1.923, P=0.065$; Margalef 丰富度指数: $|t|=1.679, P=0.104$; Pielou 均匀度指数: $|t|=1.513, P=0.146$)。

表3 施肥对不同补播草地群落多样性的影响

Table 3 Effects of fertilization on community diversity of different replanted grasslands

处理 Treatment		群落多样性指数 Community diversity index			
		优势度指数 Simpson index	香农-威纳指数 Shannon-Wiener index	丰富度指数 Margalef index	均匀度指数 Pielou index
补播杂花苜蓿 Replanting alfalfa	CK	0.77 ± 0.01^B	1.56 ± 0.06^A	0.96 ± 0.06^A	0.94 ± 0.01^B
	N	0.74 ± 0.03^{AB}	1.55 ± 0.09^A	1.06 ± 0.08^A	0.86 ± 0.03^{AB}
	P	0.71 ± 0.02^{AB}	1.47 ± 0.05^A	1.02 ± 0.07^A	0.84 ± 0.03^{AB}
	N+P	0.72 ± 0.04^{AB}	1.52 ± 0.08^A	1.07 ± 0.06^A	0.84 ± 0.04^{AB}
	Y	0.64 ± 0.06^A	1.34 ± 0.14^A	1.01 ± 0.10^A	0.76 ± 0.06^A
补播无芒雀麦 Replanting <i>Bromus inermis</i>	CK	0.74 ± 0.03^A	1.49 ± 0.08^A	0.99 ± 0.05^A	0.89 ± 0.04^A
	N	0.74 ± 0.02^A	1.49 ± 0.07^A	0.99 ± 0.07^A	0.88 ± 0.03^A
	P	0.77 ± 0.01^A	1.56 ± 0.04^A	0.96 ± 0.05^A	0.92 ± 0.02^A
	N+P	0.76 ± 0.01^A	1.62 ± 0.05^A	1.11 ± 0.06^A	0.88 ± 0.01^A
	Y	0.77 ± 0.02^A	1.57 ± 0.07^A	0.99 ± 0.07^A	0.91 ± 0.02^A
补播杂花苜蓿和无芒雀麦 Replanting alfalfa and <i>Bromus inermis</i>	CK	0.80 ± 0.01^A	1.69 ± 0.04^A	1.05 ± 0.05^A	0.94 ± 0.02^B
	N	0.79 ± 0.01^A	1.64 ± 0.03^A	1.04 ± 0.05^A	0.92 ± 0.01^{AB}
	P	0.79 ± 0.01^A	1.62 ± 0.05^A	0.97 ± 0.04^A	0.94 ± 0.01^B
	N+P	0.77 ± 0.02^A	1.59 ± 0.08^A	0.95 ± 0.10^A	0.93 ± 0.01^B
	Y	0.77 ± 0.02^A	1.58 ± 0.06^A	1.05 ± 0.06^A	0.88 ± 0.02^A

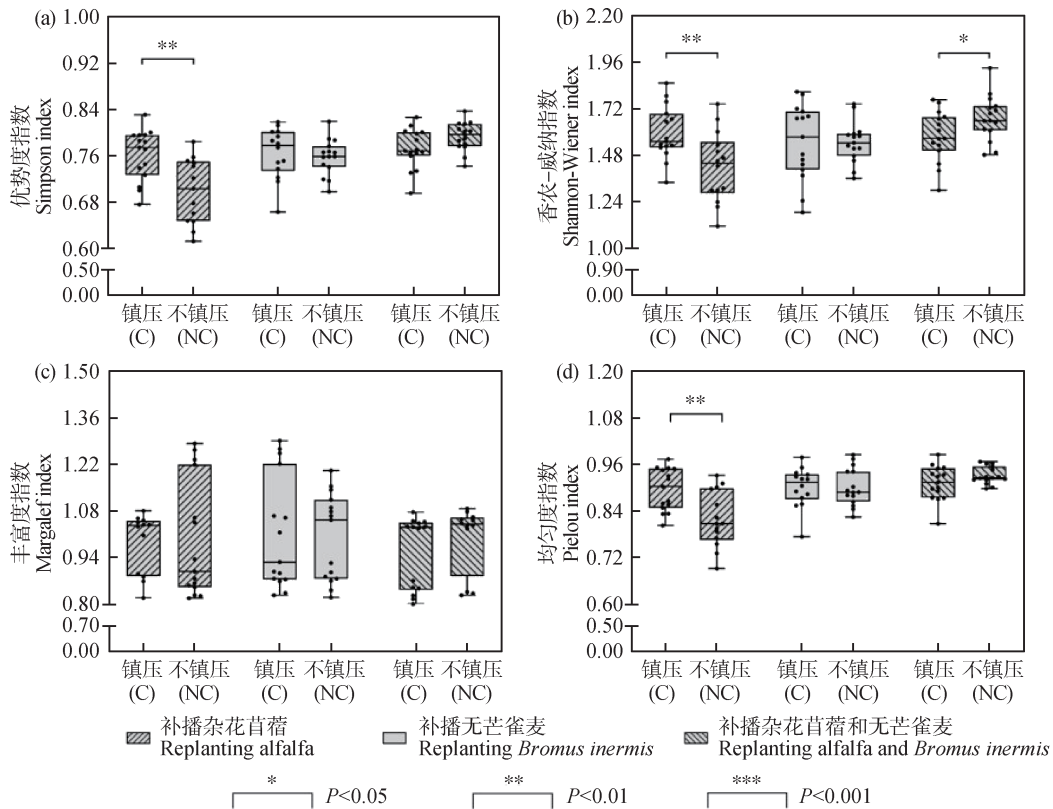


图7 镇压处理对草地植被群落多样性的影响

Fig. 7 Effects of compaction treatment on grassland vegetation community diversity

草地群落 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数在 MB 草地中均显著高于 M 草地和 B 草地(图 8, $P<0.05$);Simpson 优势度指

数和 Pielou 指数均在 B 草地下显著高于 M 草地 ($P<0.05$);Margalef 指数在 3 种补播草地之间无显著差异。

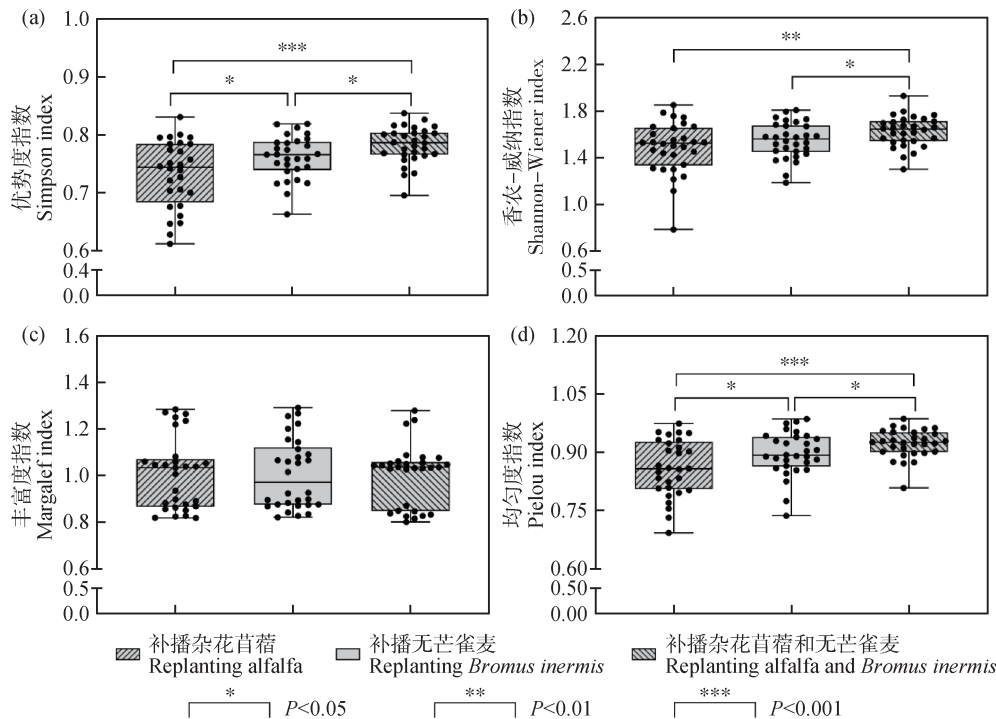


图 8 补播处理对草地植被群落多样性的影响

Fig. 8 Effects of replanting treatments on grassland vegetation community diversity

表 4 不同处理下草地植被群落方差分析

Table 4 Analysis of variance of grassland vegetation community under different treatments

项目 Item	自由 度 df	高度 Height/cm		盖度 Coverage/%		密度 Densit/(plant·m ⁻²)		生物量 Biomass/ (g·m ⁻²)		Simpson 优势度指数 Simpson index		Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index		Margalef 丰富度指数 Margalef index		Pielou 均匀度指数 Pielou index	
		F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值
区组 Block	2	0.077	0.782	4.076	0.048	1.108	0.297	0.668	0.417	0.199	0.657	0.274	0.603	0.193	0.662	0.003	0.955
补播 Repl (R)	2	34.009	<0.001	3.011	0.057	14.054	<0.001	0.172	0.842	11.980	<0.001	5.456	0.007	0.074	0.928	13.002	<0.001
施肥 Fertilize (F)	4	46.585	<0.001	6.611	<0.001	16.919	<0.001	7.202	<0.001	1.713	0.159	0.765	0.552	0.398	0.809	3.831	0.008
镇压 Compact (C)	1	5.292	0.025	0.309	0.580	3.223	0.078	9.907	0.003	4.096	0.047	1.461	0.231	0.020	0.887	3.308	0.074
补播×施肥 (R×F)	8	4.899	<0.001	1.616	0.139	2.034	0.057	0.990	0.453	2.038	0.507	1.085	0.386	0.670	0.716	2.448	0.023
补播×镇压 (R×C)	2	0.855	0.430	0.374	0.690	0.219	0.804	3.630	0.032	10.055	<0.001	7.147	0.002	1.755	0.182	9.480	<0.001
施肥×镇压 (F×C)	4	2.916	0.029	0.140	0.967	0.030	0.998	0.785	0.540	0.951	0.441	0.765	0.552	1.265	0.294	0.218	0.928
补播×施肥×镇压 (R×F×C)	8	1.509	0.173	0.259	0.977	0.421	0.904	0.359	0.938	0.885	0.534	0.906	0.518	1.295	0.263	0.473	0.870

3 讨论

放牧家畜的选择性采食导致适口性好的优良牧草比例降低或在草地群落中消失,而补播优良牧草是退化草地快速恢复的有效途径^[32]。补播草种在退化草地中能否萌发或萌发后幼苗能否存活是目前退化草地补播修复面临的技术瓶颈之一,因此选择合适的物种并创造幼苗生长的环境条件是补

播成功的关键。本研究区位于新疆伊犁昭苏县山地草原上,研究区草地植被群落相对单一,以中生禾草和杂类草为主,豆科牧草极少,阔叶杂类草相对较多,草地整体处于中度退化状态,部分区域达到重度退化程度,主要表现为:草层低矮,盖度不足 50%,平均干草产量不足 750 kg·ha⁻¹,不可食牧草和毒害草生物量占 42% 以上^[27]。另外,通过查阅相关的文献和进行补播预实验,确定了杂花苜蓿和无

芒雀麦作为补播研究对象,且二者在根系构型(直根系与须根系)和养分吸收(固氮与非固氮)上具有互补性^[33-36],可协同提升退化草地的恢复潜力。

本研究中,与单一补播苜蓿草地和单一补播无芒雀麦草地相比,同时补播杂花苜蓿和无芒雀麦草地中草地群落植被盖度和密度显著提高,其中补播苜蓿和无芒雀麦生物量分别提高了6.86%和3.81%,与吴晓娟等^[37]研究结果一致。其他研究也证实,在退化草地同时补播豆禾牧草相较于单一补播豆科牧草,草地生产力提高了14.00%~43.20%^[38],而且有效提高了对土壤养分的吸收效率^[39-40]。这是因为单播草地群落内各物种的差异较小,且各物种的生态位接近,对于光照和养分等资源的竞争就越激烈,容易造成生态位的重叠和空缺,同时也更容易遭受低矮杂类草的入侵^[41-42],而补播多种牧草使其群落内各物种的生态位具有差异,而生态位的分化能够有效抑制低矮杂类草的入侵^[41-42],使草地群落达到一定的稳定状态,同时补播多物种使草地群落内各物种在形态和资源利用方面存在相互补充而非竞争的关系^[43],促进了草地植被群落特征指标的提高^[44-45],使有限的资源在不同的时空实现最大化的利用。

在补播草地中,豆科牧草(直根系)与禾本科牧草(须根系)根系构型具有差异性^[35-36]。豆科牧草根系发达,可深入土壤深层吸收水分和养分;而禾草根系则集中分布于土壤表层^[46]。这种生态位分化减少了物种间对同一土壤层次的资源竞争,使群落内资源利用效率提高,从而为更多植物共存提供了基础^[47]。本研究发现,在补播杂花苜蓿与无芒雀麦的草地中,草地群落Simpson优势度指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数分别较单一补播杂花苜蓿草地显著提高了9.70%,9.38%和8.97%,较单一补播无芒雀麦草地显著提高3.65%,5.02%和2.89%,这一结果与祁军等^[48]的研究结论一致,其同样指出豆禾混播可通过资源互补性提升群落物种多样性。此外,Smith等^[49]从全球尺度分析表明,混播系统中豆科与禾草的协同效应普遍存在,杂花苜蓿的共生固氮作用可以转化大气中的氮供给植物直接吸收利用,充足的氮素供应为其他植物(如菊科、莎草科物种)的生长提供了养分基础^[50],进而增加群落物种丰富度。光资源利用的垂直互补性也是关键因素,无芒雀麦等高大禾草形成冠层上层,高效利用直射光,而杂花苜蓿分布于下层,主

要依赖散射光,这种分层结构使群落光能利用率相较于单播草地群落提高了12%~18%^[51],生态位分化进一步为多物种共存创造空间。综上,豆禾补播草地通过根系垂直分化、共生固氮和光能互补的三重效应,降低了种间竞争强度,优化资源分配,最终实现群落多样性的显著提升。

本研究对镇压处理的生态效应进行了初步探讨。与不镇压处理相比,镇压显著提高了补播苜蓿和无芒雀麦的株高、盖度和生物量($P<0.05$),同时使草地群落整体植被高度、盖度、密度和生物量分别增加2.95%,0.74%,4.15%和10.69%,一方面由于镇压通过提高土壤容重和降低土壤孔隙度,有效改善了土壤保水性能,并且为补播牧草萌发和生长提供了更稳定的水分条件^[52];另一方面镇压导致的微地形变化增强了种子与土壤接触的紧密度^[53],这可能通过改善种子萌发微环境促进幼苗建成,但该研究仅为补播第一年的观测数据,长期效应仍需验证。在群落多样性方面,镇压处理使补播杂花苜蓿草地的Simpson优势度指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数分别提高14.51%,15.83%和12.34%,这种变化可能是由镇压引起的土壤紧实度增加,抑制浅根性杂草的竞争优势^[54],而镇压形成的局部微地形变化(<5 cm高差)则为不同生态位植物提供了差异化生境^[55]。值得注意的是,本研究仅观测到补播当年群落的短期响应,镇压处理对土壤结构的长期影响(如可能导致的通气性下降)及其生态效应仍需持续监测。

施肥能够显著改变草地植被群落的结构特征,其中氮、磷配施的作用尤为突出^[56]。氮、磷养分的添加会打破土壤原有养分平衡,进而引发物种间对资源的重新分配,通过改变植物间的竞争关系进而影响群落组成^[57-58]。本研究发现,施肥处理不仅使补播苜蓿的生物量显著提升了63.63%,还使整体群落地上生物量提高32.23%,这与李强等^[59]和龙会英等^[60]关于氮、磷配施促进豆科植物生长的研究结论一致,并且本研究3种补播草地中,氮、磷配施较对照处理均能显著提高草地群落植被高度、盖度、密度及生物量。因为进行氮、磷配施时,两种养分形成协同效应:磷素通过促进根系发育增强植物对氮素的吸收效率,而氮素供给又能提高植物对磷素的利用能力,这种养分耦合作用不仅改善了土壤养分平衡,还解决了单一施肥导致的土壤养分不均衡问题^[61-62],最终通过促进不同功能群植物的协同

生长,实现群落结构特征的全面提升。

施肥通常导致草地群落多样性降低^[63-64]。Stanley等^[65]和杨路存等^[66]的研究发现,施肥使草地群落物种丰富度、Simpson优势度指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数显著降低。但在本研究中施肥处理对草地群落Simpson优势度指数、Pielou均匀度指数和Margalef丰富度指数无显著影响,而在不施肥处理下表现较高的物种多样性,可能是因为在未受人为干扰的草地生态系统中,植物群落通过长期演替形成了稳定的资源分配机制,但由于建群种和优势种对外源养分的添加具有更强的资源捕获能力^[67],使其竞争优势被进一步放大,导致竞争力较弱的物种在竞争中居于劣势^[68],降低了草地群落的均匀度,但此过程需要较长的时间,而本研究施肥周期较短,不足以引发物种水平上的排除,但是竞争会引起各物种的个体数量发生变化^[69],说明生态系统对施肥干扰的响应可能需要更长的观测周期才能显现。本研究区域为新疆昭苏县山地草甸,年降雨量可达到500 mm以上,具备草地补播良好的自然条件,但单一研究区域和理想的补播环境对其他区域或其他草地类型补播修复的指导性有限。另外,本研究结果基于短期试验的数据观测和人工措施的辅助下草地植被群落和多样性变化的分析,但后期补播物种如何适应变化的环境条件,及如何在复杂的草地群落竞争中达到种群稳定需要对草地进行长期的监测。另外,微生物在草地群落植物生长和养分吸收中扮演着重要角色,下一步将重点开展和关注微生物在退化草地植被恢复中发挥的作用。

4 结论

与补播单一杂花苜蓿和无芒雀麦草地相比,同时补播杂花苜蓿和无芒雀麦草地的植被盖度和密度均显著增加,分别提高了3.01%~3.89%和6.45%~15.90%。另外,与对照相比,在补播草地中添加氮磷肥显著提高了草地的植被高度、盖度、密度和生物量,分别提高了28.63%,7.07%,15.74%和32.23%;与不镇压相比,在草地补播后进行镇压处理提高了草地的植被高度、盖度、密度和生物量,分别提高了6.44%,0.76%,3.07%和11.37%。综合考虑,在退化草地中补播杂花苜蓿和无芒雀麦优良牧草,同时添加氮、磷养分和进行

镇压处理等措施能够提高草地生产力和恢复草地生态功能。

参考文献

- [1] 刘黎明,谢花林,赵英伟. 我国草地资源可持续利用评价指标体系的研究[J]. 中国土地科学,2001,15(4):43-46,42
LIU L M, XIE H L, ZHAO Y W. Study on evaluation index system of sustainable utilization of grassland resources in China [J]. China Land Science, 2001, 15(4): 43-46, 42
- [2] 付国臣,杨韞,宋振宏. 我国草地现状及其退化的主要原因[J]. 内蒙古环境科学,2009,21(4):32-35
FU G Z, YANG Y, SONG Z H. Preliminary discussion on current situation of meadows and main reasons of degradation of chins [J]. Inner Mongolia Agricultural Sciences, 2009, 21(4): 32-35
- [3] 郭美琪,刘琳,荆晶莹,等. 基于植物-土壤反馈原理的退化草原免耕补播修复物种选择研究[J]. 草业学报,2023,32(12):14-23
GUO M Q, LIU L, JING J Y, et al. Species selection for no-tillage reseeding in grassland restoration based on plant-soil feedback [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(12): 14-23
- [4] 田伟涛,李超锋. 补播对退化草地植物群落特征和土壤养分影响的研究进展[J]. 草食家畜,2021(5):50-54
TIAN W T, LI C F. Research progress of effects of supplementary sowing on plant community characteristics and soil nutrients in degraded grassland [J]. Grass-Feeding Livestock, 2021 (5): 50-54
- [5] 张英俊,周冀琼,杨高文,等. 退化草原植被免耕补播修复理论与实践[J]. 科学通报,2020,65(16):1546-1555
ZHANG Y J, ZHOU J Q, YANG G W, et al. Theory and application of no-tillage reseeding in degraded grasslands [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(16): 1546-1555
- [6] WEGGLER K, ELSÄBER M. The influence of nitrogen applications and low rainfall conditions on yield of mixed grass-legume grassland for 2 years [J]. Nitrogen, 2023, 4(2): 194-208
- [7] 季波,何建龙,杜建明,等. 不同补播配置模式对宁夏荒漠草原土壤有机碳和全氮储量的影响[J]. 中国草地学报,2021,43(3):60-66
JI B, HE J L, DU J M, et al. Effects of different reseeding modes on soil organic carbon and nitrogen reserves in Ningxia desert steppe [J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(3): 60-66
- [8] 周冀琼. 补播苜蓿对退化草地生产力和多样性的影响[D]. 北京:中国农业大学,2017:18-50
ZHOU J Q. Effects of alfalfa reseeding on the productivity and diversity of degraded grassland [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017: 18-50
- [9] KIEHL K, KIRMER A, Donath T W, et al. Species introduction in restoration projects-Evaluation of different techniques for the establishment of semi-natural grasslands in Central and Northwestern Europe [J]. Basic and Applied Ecology, 2010, 11(4): 285-299

- [10] 井光花, 陈智坤, 路强强, 等. 半干旱黄土区不同管理措施下草地群落结构对短期氮、水添加的响应[J]. 生态学报, 2021, 41(20): 8192-8201
JING G H, CHEN Z K, LU Q Q, et al. Response of grassland community structure to short-term nitrogen addition and water addition with different management practices in the semi-arid loess region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(20): 8192-8201
- [11] 李强, 周道玮. 草地管理对土壤碳截获的影响[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(23): 1-5, 8
LI Q, ZHOU D W. Effect of grassland management on soil carbon sequestration[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(23): 1-5, 8
- [12] 石锋, 李玉娥, 高清竹, 等. 管理措施对我国草地土壤有机碳的影响[J]. 草业科学, 2009, 26(3): 9-15
SHI F, LI Y E, GAO Q Z, et al. Effects of managements on soil organic carbon of grassland in China[J]. *Pratacultural Science*, 2009, 26(3): 9-15
- [13] HASSAN N, WANG Z W. Paralleled grazing and mowing differentially affected plant community diversity and productivity in a semi-arid grassland[J]. *Ecological Processes*, 2024, 13(1): 62-62
- [14] WANG L, LUAN L M, HOU F J, et al. Nexus of grazing management with plant and soil properties in northern China grasslands[J]. *Scientific data*, 2020, 7(1): 39
- [15] GUO N, SANG C, Huang M, et al. Long-term active restoration of degraded grasslands enhances vegetation resilience by altering the soil seed bank[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2023, 43(1): 6
- [16] ZHOU J Q, ZHANG Y J, WILSON G W T, et al. Small vegetation gaps increase reseeded yellow-flowered alfalfa performance and production in native grasslands[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2017(24): 41-52
- [17] 张杰琦, 李奇, 任正炜, 等. 氮素添加对青藏高原高寒草甸植物群落物种丰富度及其与地上生产力关系的影响[J]. 植物生态学报, 2010, 34(10): 1125-1131
ZHANG J Q, LI Q, REN Z W, et al. Effects of nitrogen addition on species richness and relationship between species richness and aboveground productivity of alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(10): 1125-1131
- [18] 何玉惠, 刘新平, 谢忠奎. 氮素添加对黄土高原荒漠草原草本植物物种多样性和生产力的影响[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 66-71
HE Y H, LIU X P, XIE Z K. Effect of nitrogen addition on species diversity and plant productivity of herbaceous plants in desert grassland of the Loess Plateau[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(1): 66-71
- [19] 倪清睿, 杨兆平, 呼格吉勒图, 等. 施肥和刈割对内蒙古典型草原群落特征的影响[J]. 中国草地学报, 2024, 46(7): 81-89
NI Q R, YANG Z P, HU G J L T, et al. Effects of fertilization and mowing on plant community characteristics in typical steppe of inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(7): 81-89
- [20] 段敏杰, 干珠扎布, 郭佳, 等. 施肥对藏北高寒草地植物多样性及生产力的影响[J]. 西北农业学报, 2016, 25(11): 1696-1703
DUAN M J, GAN Z, GUO J, et al. Effects of fertilization on plant diversity and productivity of alpine meadow in northern Tibet[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2016, 25(11): 1696-1703
- [21] 杨阳, 贾丽欣, 乔芳璐, 等. 施肥和打孔对大针茅草群落特征及多样性的影响[J]. 中国草地学报, 2019, 41(5): 111-119
YANG Y, JIA L X, QIAO J R, et al. Effects of fertilization and perforation on community characteristics and diversity of *Stipa grandis* steppe[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(5): 111-119
- [22] BOUWMAN L A, ARTS W B M. Effects of soil compaction on the relationships between nematodes, grass production and soil physical properties[J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 14(3): 213-222
- [23] ARVIDSSON J. Nutrient uptake and growth of barley as affected by soil compaction[J]. *Plant and Soil*, 1999, 208(1): 9-19
- [24] 肖铁娆, 景东林. 不同时期镇压对冬小麦生长发育和产量的影响[J]. 农业科技通讯, 2019(5): 155-156
XIAO Y R, JING D L. Effects of repression in different periods on growth and yield of winter wheat[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2019(5): 155-156
- [25] MIRANSARI M, BAHRAMI H A, REJALI F, et al. Using arbuscular mycorrhiza to reduce the stressful effects of soil compaction on corn (*Zea mays* L.) growth[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(8): 2014-2026
- [26] 侯平军, 宋淑玲, 崔永辉, 等. 优质小麦宽幅精播双镇压栽培技术[J]. 基层农技推广, 2023, 11(5): 89-91
HOU P J, SONG S L, CUI Y H, et al. Cultivation techniques of wide and precise sowing and double suppression for high quality wheat[J]. *Primary Agricultural Technology Extension*, 2023, 11(5): 89-91
- [27] 孙伶俐, 孟翔, 谢开云, 等. 不同混播模式对播种当年牧草产量和营养价值的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(1): 340-348
SUN L L, MENG X, XIE K Y, et al. Effect of different mixed sowing patterns on yield and nutritional value of grass in sowing year[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(1): 340-348
- [28] 王高峰. 昭苏马场退化草甸草地最佳改良措施的确立[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2007: 45-46
WANG G F. The best improvement measures established in degradation meadow of Zhaosu horse farm[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2007: 45-46
- [29] 李文亚, 邱璇, 白龙, 等. 氮、磷添加对贝加尔针茅草原凋落物分解的影响[J]. 草业学报, 2017, 26(8): 43-53
LI W Y, QIU X, BAI L, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on litter decomposition on the *Stipa baicalensis* steppe[J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2017, 26(8): 43-53
- [30] 柴瑜, 李希来, 于金峰, 等. 有机肥施用量对黄河源不同坡向退化高寒草甸土壤团聚体及有机碳的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(7): 1613-1620
CHAI Y, LI X L, YU J F, et al. Effects of different applications

- of organic fertilizer in degraded alpine meadow on soil aggregates and organic carbon in the source zone of Yellow River [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(7):1613-1620
- [31] DENG L, SHANGGUAN Z P, SWEENEY S. "Grain for Green" driven land use change and carbon sequestration on the Loess Plateau, China [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4:7039
- [32] 宋彩荣, 王宁, 彭文栋, 等. 补播对草地植被影响效果的研究进展 [J]. *畜牧与饲料科学*, 2005, 26(6):32-34
- SONG C R, WANG N, PENG W D, et al. Research progress on the effect of supplementary sowing on grassland vegetation [J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2005, 26(6):32-34
- [33] 杨春华, 张新全. 人工建植混播草地技术研究 [J]. *草业科学*, 2003, 20(3):42-46
- YANG C H, ZHANG X Q. Study on the techniques of mixed sown grassland establishment [J]. *Pratacultural Science*, 2003, 20(3):42-46
- [34] 赵海新, 朱占林, 张永亮, 等. 混播草地之研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2005, 21(11):38-41, 49
- ZHAO H X, ZHU Z L, ZHANG Y L, et al. Progress of research in mixed-seeding meadow [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(11):38-41, 49
- [35] BERDAHL J D, KARN J F, HENDRICKSON J R. Dry matter yields of cool-season grass monocultures and grass - alfalfa binary mixtures [J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93(2):463-467
- [36] SHEAFFER C C, MILLER D W, MARTEN G C. Grass dominance and mixture yield and quality in perennial grass-alfalfa mixtures [J]. *Journal of Production Agriculture*, 1990, 3(4):480-485
- [37] 吴晓娟, 杨梅, 芦奕晓, 等. 混播比例和施氮肥对箭筈豌豆/燕麦草地根系特性的影响 [J]. *草业学报*, 2020, 29(9):106-116
- WU X J, YANG M, LU Y X, et al. Effects of mixing ratio and nitrogen fertilization on root characteristics in the common vetch/oat mixture [J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2020, 29(9):106-116
- [38] 柳茜, 傅平, 敖学成, 等. 冬闲田多花黑麦草+光叶紫花苜蓿混播草地生产性能与种间竞争的研究 [J]. *草地学报*, 2016, 24(1):42-46
- LIU Q, FU P, AO X C, et al. Study on production performance and interspecific competition of Italian ryegrass and villose vetch mixed grassland in winter fallow farmlands [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(1):42-46
- [39] 来幸樑, 师尚礼, 吴芳, 等. 紫花苜蓿与3种多年生禾草混播草地的土壤养分特征 [J]. *草业科学*, 2020, 37(1):52-64
- LAI X L, SHI S L, WU F, et al. Nutrient characteristics of soil sowed with different combinations of alfalfa and three perennial grasses [J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(1):52-64
- [40] 李文, 魏廷虎, 永措巴占, 等. 混播比例对三江源人工草地植被和土壤养分特征的影响 [J]. *草业学报*, 2021, 30(12):39-48
- LI W, WEI Y H, YONG C B Z, et al. Effects of different mixed planting ratios on vegetation and soil characteristics of sown pasture in the Sanjiangyuan region [J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2021, 30(12):39-48
- [41] 李洁, 潘攀, 王长庭, 等. 三江源区不同建植年限人工草地根系动态特征 [J]. *草业学报*, 2021, 30(3):28-40
- LI J, PAN P, WANG C T, et al. Root dynamics of artificial grassland for swards of differing ages in the 'Three-River Source' region [J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2021, 30(3):28-40
- [42] 官惠玲, 樊江文, 李愈哲. 不同人工草地对青藏高原温性草原群落生物量组成及物种多样性的影响 [J]. *草业学报*, 2019, 28(9):192-201
- GUAN H L, FAN J W, LI Y Z. The impact of different introduced artificial grassland species combinations on community biomass and species diversity in temperate steppe of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2019, 28(9):192-201
- [43] COX S, PEEL D M, CREECH E J, et al. Forage production of grass-legume binary mixtures on intermountain western USA irrigated pastures [J]. *Crop Science*, 2017, 57(3):1742-1753
- [44] 张永超, 牛得草, 韩潼, 等. 补播对高寒草甸生产力和植物多样性的影响 [J]. *草业学报*, 2012, 21(2):305-309
- ZHANG Y C, NIU D C, HAN T, et al. Effect of reseeding on productivity and plant diversity on alpine meadows [J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2012, 21(2):305-309
- [45] 杨增增, 张春平, 董全民, 等. 补播对中度退化高寒草地群落特征和多样性的影响 [J]. *草地学报*, 2018, 26(5):1071-1077
- YANG Z Z, ZHANG C P, DONG Q M, et al. Effects of reseeding on plant community composition and diversity of moderately degraded alpine grassland in Qinghai-Tibetan plateau [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(5):1071-1077
- [46] 王辛有, 曹文侠, 师尚礼, 等. 基于生态位理论的豆禾混播草地群落稳定性利用管理研究 [J]. *草地学报*, 2022, 30(2):456-463
- WANG X Y, CAO W X, SHI S L, et al. Study on the stability utilization and management of legume-grass mixtures community based on niche theory [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(2):456-463
- [47] 张道百, 景美玲, 秦金萍, 等. 混播对退化草地植物群落生长及物种多样性的影响 [J]. *世界生态学*, 2024, 13(4):9
- ZHANG D B, JING M L, QIN J P, et al. Effects of mixed sowing on degraded grassland plant community growth and species diversity [J]. *International Journal of Ecology*, 2024, 13(4):9
- [48] 祁军, 郑伟, 张鲜花, 等. 不同豆禾混播模式的草地生产性能 [J]. *草业科学*, 2016, 33(1):116-128
- QI J, ZHENG W, ZHANG X H, et al. Determination and comparison of the production performance of pastures among different spatial structure of legume-grass mixtures [J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(1):116-128
- [49] SMITH R D, JONES T M, BROWN A L. Global patterns of plant diversity enhancement in legume-grass mixtures [J]. *Nature Ecology and Evolution*, 2018, 2(8):1234-1242
- [50] LI Q, SONG Y, LI G, et al. Grass-legume mixtures impact soil

- N, species recruitment, and productivity in temperate steppe grassland[J]. *Plant and Soil*, 2015, 394(1-2): 271-285
- [51] 张永亮, 王建丽, 胡自治. 杂花苜蓿与无芒雀麦混播群落间竞争及稳定性[J]. *草地学报*, 2007, 15(1): 43-49
ZHANG Y L, WANG J L, HU Z Z. Interspecific competition and community stability of variegated Alfalfa+Awnless brome mixture[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2007, 15(1): 43-49
- [52] LIU X, HE Y, CHENG L, et al. Effects of precipitation variation and trampling disturbance on seedling emergence of annual plants in a semi-arid grassland[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 10: 1078541
- [53] NING W. Research progress on the effect of biological soil crust on seed germination and seedling establishment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(18): 7464-7474
- [54] 刘滨硕, 薛洪海, 李明, 等. 土壤紧实度对羊草形态及其生物量的影响[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(2): 59-62
LIU B S, XUE H H, LI M, et al. Effects of soil bulk density on morphology and biomass of *Leymus chinensis* [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(2): 59-62
- [55] 卢纪元. 陕北植物群落结构与微地形土壤养分耦合关系研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016: 39-49
LU J Y. Coupling relationship between plant community structure and soil nutrient on micro-topography in loess area of north Shaanxi Province [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016: 39-49
- [56] 李泽藩, 张振豪, 董书明, 等. 施肥对退化草地植被生产力和群落结构特征的影响[J]. *草地学报*, 2024, 23(9): 2973-2981
LI Z F, ZHANG Z H, DONG S M, et al. Effects of fertilization on productivity and community structure of degraded grassland [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 23(9): 2973-2981
- [57] YANG H, LI Y, WU M, et al. Plant community responses to nitrogen addition and increased precipitation: the importance of water availability and species traits[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(9): 2936-2944
- [58] 王洪义, 常继方, 王正文. 退化草地恢复过程中群落物种多样性及生产对氮磷养分的响应[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(13): 2604-2613
WANG H Y, CHANG J F, WANG Z W. Responses of community species diversity and productivity to nitrogen and phosphorus addition during restoration of degraded grassland [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(13): 2604-2613
- [59] 李强, 黄迎新, 周道玮, 等. 土壤氮磷添加下豆科草本植物生物固氮与磷获取策略的权衡机制[J]. *植物生态学报*, 2021, 45(3): 286-297
LI Q, HUANG Y X, ZHOU D W, et al. Mechanism of the trade-off between biological nitrogen fixation and phosphorus acquisition strategies of herbaceous legumes under nitrogen and phosphorus addition [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(3): 286-297
- [60] 龙会英, 张德, 曾丽萍, 等. 氮磷肥对3种牧草的生长效应和氮磷吸收的影响[J]. *草业学报*, 2019, 28(5): 171-177
LONG H Y, ZHANG D, ZENG L P, et al. Herbage accumulation, and nitrogen and phosphorus absorption responses of three forage species following addition of nitrogen and phosphorus fertilizer[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(5): 171-177
- [61] 李彤瑶, 周青平, 陈有军, 等. 氮肥用量对披碱草属牧草种子产量和氮肥利用效率的影响[J]. *草业学报*, 2023, 32(3): 80-90
LI T Y, ZHOU Q P, CHEN Y J, et al. Effects of nitrogen application rate on seed yield and nitrogen use efficiency of *Elymus* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(3): 80-90
- [62] 张仁懿, 史小明, 李文金, 等. 氮、磷添加对亚高寒草甸地上生物量的影响[J]. *生态科学*, 2016, 35(5): 15-20
ZHANG R Y, SHI X M, LI W J, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on the plant aboveground biomass on a sub-alpine meadow[J]. *Ecological Science*, 2016, 35(5): 15-20
- [63] PENG Y, YANG J X, SEABLOOM E W, et al. Nutrient effects on plant diversity loss arise from nutrient identity and decreasing niche dimension[J]. *Ecology*, 2024, 106(1): e4496
- [64] WANG D J, ZHOU H K, YAO B Q, et al. Effects of nutrient addition on degraded alpine grasslands of the Qinghai-Tibetan Plateau: a meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 301: 106970
- [65] HARPOLE W S, SULLIVAN L L, LIND E M, et al. Addition of multiple limiting resources reduces grassland diversity [J]. *Nature*, 2016, 537(7618): 93-96
- [66] 杨路存, 刘何春, 李长斌, 等. 氮磷钾不同施肥配方对退化高寒草原植物群落结构的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(1): 25-32
YANG L C, LIU H C, LI C B, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer applications on plant community structure in a degraded alpine steppe [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(1): 25-32
- [67] 高若凡, 张天宇, 白杨, 等. 不同改良措施对退化割草场物种多样性及群落生产力的影响[J]. *中国草地学报*, 2019, 41(6): 98-104
GAO R F, ZHANG T Y, BAI Y, et al. Effects of different improvement measures on species diversity and community productivity of degraded mowing grassland [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(6): 98-104
- [68] 杨元武, 周华坤, 李希来, 等. 高寒草甸物种多样性和生产力对养分添加的初期响应[J]. *西北农业学报*, 2017, 26(2): 159-166
YANG Y W, ZHOU H K, LI X L, et al. Initial response of species diversity and productivity to nutrients addition on alpine meadow [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2017, 26(2): 159-166
- [69] 温超, 单玉梅, 高丽娟, 等. 施肥对科尔沁羊草割草场植物群落多样性和生产力的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(16): 250-254
WEN C, SHAN Y M, GAO L J, et al. Effects of fertilization on plant community diversity and productivity in *Leymus chinensis* mowing field in Horqin [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(16): 250-254

(责任编辑 刘婷婷)