

DOI:10.11686/cyxb2024438

http://cyxb.magtech.com.cn

鲍平安, 王志林, 王炎, 等. 不同牧草补播模式对荒漠草原植物群落结构及土壤特性的影响. 草业学报, 2025, 34(10): 62-73.

BAO Ping-an, WEN Zhi-lin, WANG Yan, *et al.* Effects of different forage reseeding patterns on plant community structure and soil characteristics in desert steppe. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(10): 62-73.

不同牧草补播模式对荒漠草原植物群落结构及土壤特性的影响

鲍平安^{1,2}, 王志林³, 王炎⁴, 陈彦虎^{5,6}, 季波^{1,2*}, 王占军^{1,2}, 吴旭东^{1,2}, 蒋齐^{1,2}

(1. 宁夏农林科学院林业与草地生态研究所, 宁夏银川 750002; 2. 宁夏防沙治沙与水土保持重点实验室, 宁夏银川 750002; 3. 宁夏盐池县草原实验站, 宁夏吴忠 751506; 4. 盐池县林业和草原局, 宁夏吴忠 751599; 5. 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 宁夏银川 750000; 6. 宁夏石嘴山气象局, 宁夏石嘴山 753000)

摘要:为揭示退化荒漠草原逆向演替的驱动因素,本研究探究了不同牧草补播配置模式(禾本科牧草混播P₁、豆科牧草混播P₂、禾本科+豆科牧草混播P₃)下退化荒漠草原植物群落特征、土壤理化性质及二者相关性的变化规律,阐明牧草补播配置模式对宁夏退化荒漠草原植物群落结构与土壤养分含量的影响。研究表明:牧草补播提高了豆科植物在植物群落中的占比和植物群落盖度、Simpson、Shannon-Wiener和Margalef指数,地上生物量在禾本科+豆科牧草混播下得到提升。禾本科牧草混播显著降低了土壤容重;禾本科牧草与禾本科+豆科牧草混播模式显著降低了土壤电导率;牧草补播提高了0~10 cm和10~20 cm土层土壤全磷和全钾含量,提高了0~10 cm土层土壤有机碳和全氮含量以及10~20 cm土层土壤pH,降低了0~10 cm土层土壤pH和10~20 cm土层有机碳含量。0~10 cm土层土壤有机碳和全氮含量均与植物群落物种Simpson、Shannon-Wiener和Margalef指数呈正相关。植被恢复过程中0~10 cm土层土壤有机碳和全磷含量以及10~20 cm土壤pH值与全磷含量是主要影响因子。综上所述,禾本科+豆科牧草混播对提高草地生产力,改善荒漠草原植物群落及其土壤养分具有促进作用,可作为退化荒漠草原恢复的优选配置模式。

关键词:荒漠草原;牧草补播;植物群落特征;土壤理化性质

Effects of different forage reseeding patterns on plant community structure and soil characteristics in desert steppe

BAO Ping-an^{1,2}, WEN Zhi-lin³, WANG Yan⁴, CHEN Yan-hu^{5,6}, JI Bo^{1,2*}, WANG Zhan-jun^{1,2}, WU Xu-dong^{1,2}, JIANG Qi^{1,2}

1. Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 2. Ningxia Key Laboratory of Sand Control and Soil and Water Conservation, Yinchuan 750002, China; 3. Yanchi County Grassland Experimental Station, Ningxia, Wuzhong 751506, China; 4. Yanchi County Forestry and Grassland Bureau, Wuzhong 751599, China; 5. Ningxia Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750000, China; 6. Shizuishan Meteorological Bureau, Ningxia, Shizuishan 753000, China

Abstract: We conducted an in-depth analysis of reverse succession in degraded desert grasslands to identify its driving

收稿日期:2024-11-07;改回日期:2024-12-16

基金项目:自治区农业科技自主创新资金农业高质量发展和生态保护科技创新示范课题(NGSB-2021-14-06),自治区青年拔尖人才培养项目,自治区重点研发(引才专项)(2024BEH04058),宁夏农林科学院科技平台建设提升项目(NKYP-22-06)和宁夏农牧交错带温性草原生态系统定位观测研究站资助。

作者简介:鲍平安(1999-),男,宁夏银川人,硕士。E-mail: 2454284398@qq.com

*通信作者 Corresponding author. E-mail: nxjibo311@163.com

factors. A field experiment was conducted in degraded desert grasslands of Ningxia, and the changes in plant community characteristics, soil physicochemical properties, and their correlations under different forage reseeding configurations (a grass mixture P_1 , a legume mixture P_2 , and a grass-legume mixture P_3) were investigated. The effects of reseeding configurations on plant community structure and soil nutrient contents were also evaluated. The results show that forage reseeding of the degraded pasture increased the proportion of legumes in plant communities, and resulted in increased vegetation cover and increased values of Simpson's, Shannon-Wiener's, and Margalef's indexes. Reseeding with the grass-legume mixture increased the aboveground biomass of the plant community. Reseeding with the grass mixture significantly reduced soil bulk density, and reseeding with either the grass mixture or the grass-legume mixture decreased soil electrical conductivity. All the reseeding treatments resulted in increased total phosphorus and potassium contents in the 0–10 cm and 10–20 cm soil layers, increased organic carbon and total nitrogen contents in the 0–10 cm soil layer, and increased pH in the 10–20 cm layer; and decreases in soil pH in the 0–10 cm soil layer and organic carbon content in the 10–20 cm soil layer. The organic carbon and total nitrogen contents in the 0–10 cm soil layer showed positive correlations with plant community diversity indexes (Simpson's, Shannon-Wiener's, and Margalef's indices). Key factors driving vegetation restoration included organic carbon and total phosphorus contents in surface soil (0–10 cm), along with pH and total phosphorus content in the subsurface soil layer (10–20 cm). The grass-legume mixed configuration demonstrated optimal performance in enhancing grassland productivity, improving plant communities, and optimizing the soil nutrient profile. Therefore, reseeding with a grass-legume mixture is the preferred approach for restoration of degraded desert grasslands.

Key words: desert grassland; forage reseeding; plant community characteristics; soil physical and chemical properties

草地作为陆地生态系统中重要的组成部分,为人类提供着丰富的资源和生态服务功能^[1]。我国拥有草地面积约2.65亿 hm^2 ,占国土总面积的27.6%^[2]。然而由于长期受自然和人为因素干扰,草地退化依然为中国严峻的环境问题之一^[3],主要体现为植被生产力下滑、生物多样性降低、有害杂草增加,以及土壤有机质含量大幅降低^[4]。因此,退化草地的恢复与整治研究现已成为草地生态学研究的重要领域。

补播作为草地恢复最有效的措施之一,通过引入与当地生态环境相匹配的牧草品种,不仅能够有效地补充土壤种子库,还能显著提升草地的整体质量。在各类草地上补种优质的豆科和禾本科牧草后,草地的生产力和牧草的品质将得到显著增强,从而进一步优化草地植物群落的构成,使其更加合理和均衡^[5]。目前,我国通过补播改良的草地面积占改良草地面积的2/3^[6]。豆科与禾本科牧草是草地补播过程中常用的草种。其中,豆科牧草含有较高的蛋白质含量,同时具有固氮培肥和改善土壤结构的功能^[7];禾本科牧草本身含有大量碳水化合物,适口性好^[8]。相较于单播草地,混播草地不仅有助于提升草地生产力和牧草品质^[9],更能显著改善土壤肥力,增强草地生态系统的多样性,进而实现系统的可持续生产,展现出多方面的明显优势^[10]。研究表明,通过补播禾本科牧草,可以有效提高退化苜蓿(*Medicago sativa*)草地生产性能,并显著改善牧草品质^[11]。在以禾本科植物为主的天然草地补播豆科牧草,牧草产量和质量均得到显著提高^[12]。借助禾本科与豆科牧草之间协同共生和营养互补的特性,可以有效改良退化的天然草地,提升其生态与生产功能。

宁夏回族自治区坐落于我国西北内陆农牧交错带,天然草地分布范围广,其中荒漠草原覆盖了全区天然草地的62.77%,占主导地位。荒漠草原生态系统在维护区域生态平衡、促进经济稳健发展及保障生态安全方面扮演着重要的角色^[13]。然而,长期以来的过度放牧与盲目开垦等不合理的开发利用行为,已导致宁夏境内荒漠草原出现了不同程度的退化现象,使得草地生产力降低,风蚀问题愈发严重,进而影响了草地生态系统的整体功能和植物群落的稳定性^[14]。为有效保护天然草地,当地政府积极采取一系列措施,包括封山禁牧、围栏封育以及人工补播等,旨在恢复被破坏的草地。这些举措的实施取得了显著成效,不仅提升了草地生产力,同时植被盖度和生态

环境得到了明显的提高和改善^[15]。本研究以宁夏荒漠草原为对象,通过探究禾本科牧草混播、豆科牧草混播及禾本科+豆科牧草混播3种补播配置模式下宁夏荒漠草原植物群落和土壤特征差异及其之间的关系,旨在为干旱半干旱区退化草地植被恢复过程研究,提供补播牧草配置选择的科学依据和理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验地点位于宁夏回族自治区吴忠市盐池县南部的大水坑镇(东经107°06'53",北纬37°24'50")。研究区位于鄂尔多斯台地向黄土高原的过渡地带,地形特征鲜明,南部地势较高,北部则相对较低,缓坡丘陵广布其间,呈现出显著的过渡性特点,同时兼具农牧业的发展特点。土壤以灰钙土、风沙土为主,具有良好的透气性和导热性,白天能迅速吸收热量,增温效率高,夜间能快速散热,使得昼夜温差大。境内海拔均在1380~1600 m之间。该地区属于大陆性季风气候,冬冷夏热,年平均气温7.7℃,冬季1月平均气温-8.9℃,夏季7月平均气温22.5℃,≥0℃的活动积温为3430.3℃,≥10℃的活动积温为2949.9℃。年均降水量289.4 mm,7-9月的降水量约占全年降水量的60%~70%,冬春少雨雪。年蒸发量为2131.8 mm,无霜期160 d左右,绝对无霜期120 d。植被类型属荒漠草原,常见优势种有蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、远志(*Polygala tenuifolia*)等。

1.2 试验设计

本研究以退化草地为对象,于2017年选择地形、土壤和植被一致的草地进行补播。设置3种不同的牧草补播配置模式,分别为禾本科牧草混播(P_1)、豆科牧草混播(P_2)、禾本科+豆科牧草混播(P_3),以围封未补播草地为对照(CK)。选择具有抗旱性、抗寒性等特点的优良牧草作为补播草种。其中补播禾本科牧草为蒙古冰草、沙生冰草(*Agropyron desertorum*)和细茎冰草(*Agropyron trachycaulum*),豆科牧草为沙打旺(*Astragalus laxmannii*)、牛枝子和草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)。每个小区的总播量设定为0.45 kg,禾本科牧草混播(P_1)比例为蒙古冰草:沙生冰草:细茎冰草=7.0:1.5:1.5,豆科牧草混播(P_2)比例为沙打旺:牛枝子:草木樨状黄芪=2:4:4,禾本科+豆科牧草混播(P_3)比例为蒙古冰草:沙生冰草:细茎冰草:沙打旺:牛枝子=4.0:1.5:1.5:1.5:1.5。补播工作选择在2017年6月雨后进行人工开沟播种,设置3个重复,共12个小区,每个小区面积为150 m²(3 m×50 m),各小区间隔6 m。为确保播种的准确性和有效性,本研究根据每种混播牧草的千粒重、发芽率以及之前确定的配比来进行精确计算,以确定每种牧草的具体播量。

1.3 样品采集

2023年8月植被生长最旺盛的时期在各小区进行采样。在每个小区内设置1 m×1 m的样方,进行植被调查,测定每个样方的物种组成及样方内每种植物的高度、密度、盖度、生物量和频度。其中高度为物种自然高度,6株均值;密度使用个数法;盖度采用针刺法测定总盖度和种的分盖度;频度采用样圆法测定,测定10次获取平均值^[16];地上生物量采取分种齐地刈割测定,将剪下的植物装入纸袋后称其鲜重,带回实验室于65℃烘箱中烘至恒重。剪取地上部分植物后,使用铁锹分别取0~10 cm和10~20 cm土层的土壤,带回实验室风干后用于土壤理化性质的测定。

1.4 项目测定及方法

本研究使用 α 多样性指标来表示植物群落多样性,分别为优势度指数(Simpson)、多样性指数(Shannon-Wiener)、均匀度指数(Pielou)和丰富度指数(Margalef)。植物群落中物种的优势度由重要值(P_i)确定。计算公式如下:

1) Simpson指数(P):

$$P = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2$$

2) Shannon-Wiener指数(H'):

$$H' = \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$$

3) Pielou指数(E):

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

4) Margalef 指数(MA):

$$MA = (S - 1)/\ln N$$

5) 重要值(P_i):

$$P_i = (\text{相对密度} + \text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度})/4 \times 100$$

式中: S 表示植物群落中物种数量; N 表示所有物种个体数总和; P_i 表示物种重要值。

土壤理化性质测定^[17]: 土壤容重(bulk density, BD)采用环刀法测定; 土壤 pH 和电导率(electrical conductivity, EC)采用 pH 计(PHS-2F, 上海)和电导率仪(DDS-307A, 上海)测定; 土壤有机碳(soil organic carbon, OC)含量采用重铬酸钾-H₂SO₄氧化外加热法测定; 土壤全氮(total nitrogen, TN)含量采用凯氏定氮法测定; 全磷(total phosphorus, TP)含量采用高氯酸-H₂SO₄法测定; 全钾(total potassium, TK)含量采用碱溶-原子吸收分光光度计(UV3000S, 上海)法测定。

1.5 数据分析

运用 Excel 2017 软件对数据进行整理和计算; 运用 SPSS 26.0 软件对不同牧草补播配置下植物群落组成、密度、地上生物量、物种多样性指数进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 对土壤理化性质进行双因素方差分析(two-way ANOVA), 同时进行差异显著性检验($\alpha=0.05$), 并利用 GraphPad Prism 8 绘图; 采用 Origin 2021 进行相关性分析并绘制热图; 运用 Canoco 5 进行土壤理化性质和植物群落特征之间的主成分分析(principal component analysis, PCA)。

2 结果与分析

2.1 植物群落特征

2.1.1 各牧草补播配置模式下植物群落组成 从表 1 可以看出, CK 样地禾本科草重要值为 0.31, 豆科草重要

表 1 补播地植物群落组成

Table 1 Composition of plant community in reseeding field

科 Family	种 Species	CK	P ₁	P ₂	P ₃
禾本科 Gramineae	蒙古冰草 <i>A. mongolicum</i>	0.15	0.30	0.13	0.24
	短花针茅 <i>S. breviflora</i>	0.13	0.11	0.07	0.05
	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	0.03	0.02	0.04	0.02
	白草 <i>Pennisetum flaccidum</i>	—	0.04	—	0.04
	赖草 <i>Leymus secalinus</i>	—	0.01	0.11	0.11
豆科 Fabaceae	牛枝子 <i>L. potanini</i>	0.12	0.14	0.19	0.16
	沙打旺 <i>A. laxmannii</i>	—	—	—	0.01
	草木樨状黄芪 <i>A. melilotoides</i>	0.01	—	0.10	0.01
	砂珍棘豆 <i>Oxytropis racemosa</i>	0.07	—	—	—
	披针叶黄华 <i>Thermopsis lanceolata</i>	—	0.04	—	—
	苜蓿 <i>M. sativa</i>	—	—	—	0.02
	狭叶米口袋 <i>Gueldenstaedtia stenophylla</i>	—	0.01	—	—
菊科 Asteraceae	猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	0.26	0.17	0.15	0.23
	阿尔泰狗娃花 <i>Aster altaicus</i>	—	—	—	—
	叉枝鸦葱 <i>Scorzonera divaricata</i>	—	0.05	0.02	0.02
藜科 Chenopodiaceae	猪毛菜 <i>Kali collinum</i>	0.01	0.02	0.02	0.04
	虫实 <i>Corispermum hyssopifolium</i>	—	—	—	—
远志科 Polygalaceae	远志 <i>P. tenuifolia</i>	0.06	0.03	0.04	0.05
十字花科 Brassicaceae	蚰果芥 <i>Braya humilis</i>	0.01	—	0.03	—
旋花科 Convolvulaceae	银灰旋花 <i>Convolvulus ammannii</i>	0.01	—	—	—
蔷薇科 Rosaceae	二裂委陵菜 <i>Sibbaldianthe bifurca</i>	0.06	—	—	—

值为0.20。P₁配置模式下禾本科草重要值为0.48,较CK提高了54.84%;P₃配置模式下禾本科草重要值为0.46,较CK提高了48.39%。不同补播配置下豆科草重要值无明显变化,但牛枝子重要值有所提升,P₂配置模式下最大,为0.19。

2.1.2 不同牧草补播配置模式对植物群落地上生物量的影响 由图1可知,禾本科混播(P₁)和豆科混播(P₂)模式下,植物群落地上总生物量下降,但禾本科与豆科植物生物量在植物群落中占比呈上升趋势;禾本科+豆科混播(P₃)模式下,植物群落地上总生物量较对照样地提高了17.96%。

2.1.3 不同牧草补播配置模式对植物群落特征的影响 如图2所示,牧草补播提高了植物群落盖度,其中P₂和P₃配置模式较未补播样地差异显著($P < 0.05$);植物群落密度表现为未补播样地显著高于3种补播配置模式($P < 0.05$)。

从表2中看出,不同牧草配置处理下植物群落 Simpson、Shannon-Wiener 和 Margalef 指数均高于对照样地, Pielou 指数无显著变化。P₂补播配置模式下植物群落 Simpson 指数为0.85,显著高于CK($P < 0.05$);P₂补播配置模式下植物群落 Shannon-Wiener 和 Margalef 指数分别为2.06和3.76,P₃补播模式为2.04和4.83,均显著高于CK($P < 0.05$)。

2.2 不同牧草补播配置模式对土壤理化性质的影响

由图3可得,各配置模式下各土层土壤理化性质具有差异($P < 0.05$)。P₁配置模式下土壤容重最低($P < 0.05$);在10~20 cm土层,3种配置模式下土壤 pH 较未补播样地均显著上升,电导率显著下降($P < 0.05$);补播处理下,0~10 cm 土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量均高于未补播样地,且P₁和P₃模式与CK间差异显著($P < 0.05$);10~20 cm 土层下,补播处理土壤有机碳含量低于未补播样地,土壤全磷、全钾含量显著高于未补播样地($P < 0.05$)。

表2 植物群落物种多样性指数

Table 2 Species diversity index of plant community

补播配置模式 Replay configuration mode	优势度指数 Simpson index	多样性指数 Shannon-Wiener index	均匀度指数 Pielou index	丰富度指数 Margalef index
CK	0.77±0.02b	1.62±0.07b	0.86±0.05a	1.89±0.19c
P ₁	0.81±0.03ab	1.83±0.15ab	0.87±0.03a	2.99±0.38bc
P ₂	0.85±0.00a	2.06±0.03a	0.89±0.02a	3.76±0.43ab
P ₃	0.83±0.02ab	2.04±0.10a	0.82±0.03a	4.83±0.56a

注:不同小写字母表示各配置间同一多样性指数差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences in the same diversity index among different configurations ($P < 0.05$).

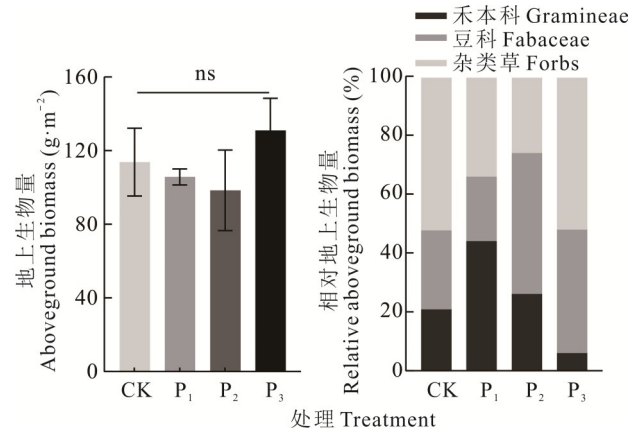


图1 补播地植物群落地上生物量

Fig. 1 Aboveground biomass of replanted plant communities

“ns”表示各处理之间无显著差异($P > 0.05$)。“ns” indicates no significant differences among treatments ($P > 0.05$).

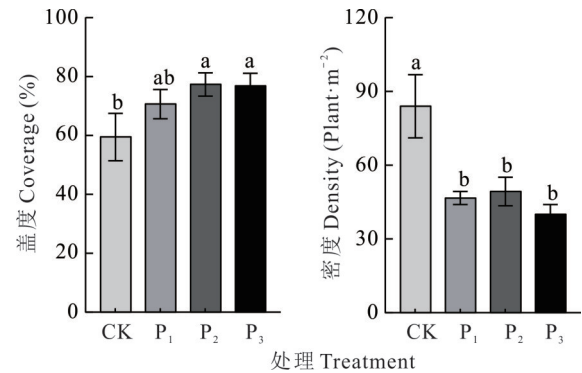


图2 植物群落特征

Fig. 2 Characteristics of plant community

不同小写字母表示不同配置模式间差异显著($P < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences among different configuration modes ($P < 0.05$).

2.3 不同牧草补播配置模式下植物群落特征与土壤理化性质相关性分析

如图 4 所示,植物群落 Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数与 0~10 cm 土层土壤有机碳之间均存在极显著正相关关系($R=0.90$, $R=0.83$, $P<0.01$),植物群落 Simpson 指数、Shannon-Wiener 和 Margalef 指数与 0~10 cm 土层土壤全氮之间均存在显著正相关关系($R=0.73$, $R=0.76$, $R=0.71$, $P<0.05$);密度与 0~10 cm 土层土壤有机碳呈显著负相关关系($R=-0.71$, $P<0.05$),与全磷之间存在极显著负相关关系($R=-0.98$, $P<0.01$);物种 Pielou 指数和地上生物量均与 0~10 cm 土层土壤全钾之间存在极显著负相关关系($R=-0.80$, $R=-0.74$, $P<0.01$)。

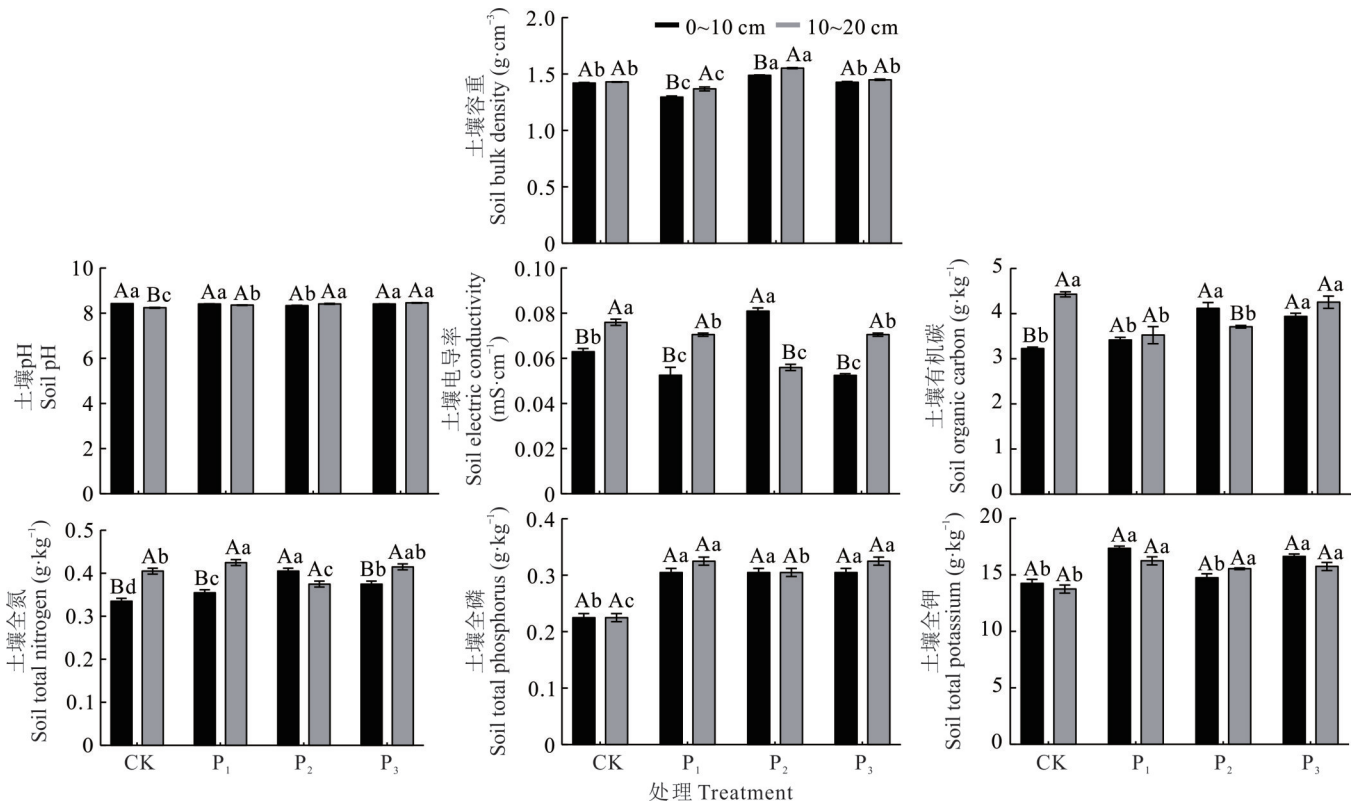


图 3 土壤理化性质

Fig. 3 Soil physical and chemical properties

不同大写字母表示同一配置模式下不同土层之间差异显著,不同小写字母表示同一土层下不同配置模式之间差异显著($P<0.05$)。Different capital letters indicate significant difference between different soil layers under the same configuration mode, different lowercase letters indicate significant differences among different configuration modes under the same soil layer ($P<0.05$).

植物群落 Simpson 指数与 10~20 cm 土层土壤 pH 之间存在显著正相关关系($R=0.81$, $P<0.05$),植物群落 Shannon-Wiener 和 Margalef 指数与 10~20 cm 土层土壤 pH 之间存在极显著正相关关系($R=0.84$, $R=0.86$, $P<0.01$);Pielou 指数与 10~20 cm 土层土壤全氮呈显著负相关关系($R=-0.73$, $P<0.05$);密度与 10~20 cm 土层土壤 pH、全磷和全钾呈极显著负相关关系($R=-0.92$, $R=-0.97$, $R=-0.94$, $P<0.01$)。

2.4 植物群落特征与土壤因子 PCA 分析

通过主成分分析,可以更深入探究牧草补播后植物群落特征的变化规律及影响因素。如图 5 所示,0~10 cm 土层下,第一轴和第二轴分别解释了总变异的 55.10% 和 25.70%。土壤有机碳、土壤全磷的贡献率较大,分别为 41.7% 和 26.4%,是影响植物群落特征较显著的因子($F=4.3$, $P=0.026$; $F=4.1$, $P=0.008$,表 3)。10~20 cm 土层下,前两轴分别解释了总变异的 55.10% 和 25.70%。土壤 pH 和土壤全磷贡献率较大,分别为 48.5% 和 22.0%,是影响植物群落特征较显著的两个因子($F=5.7$, $P=0.002$; $F=3.7$, $P=0.010$,表 3)。

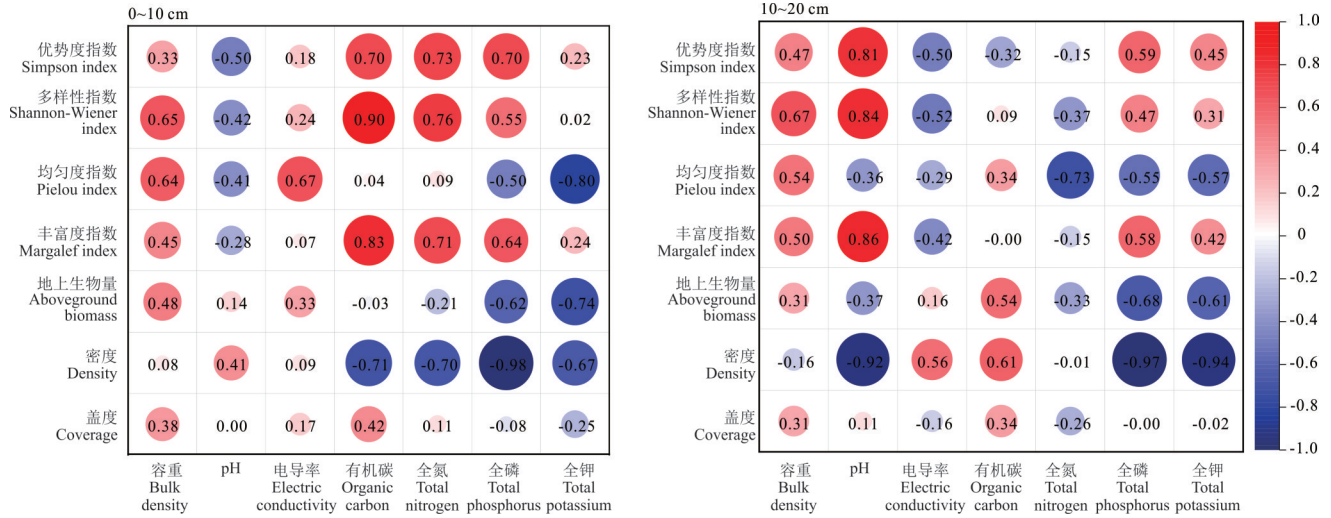


图4 补播草地植物群落特征与土壤理化性质之间的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between plant community characteristics and soil physicochemical properties in replanted grasslands

图中数值均为相关系数。The values in the figure are all correlation coefficients.

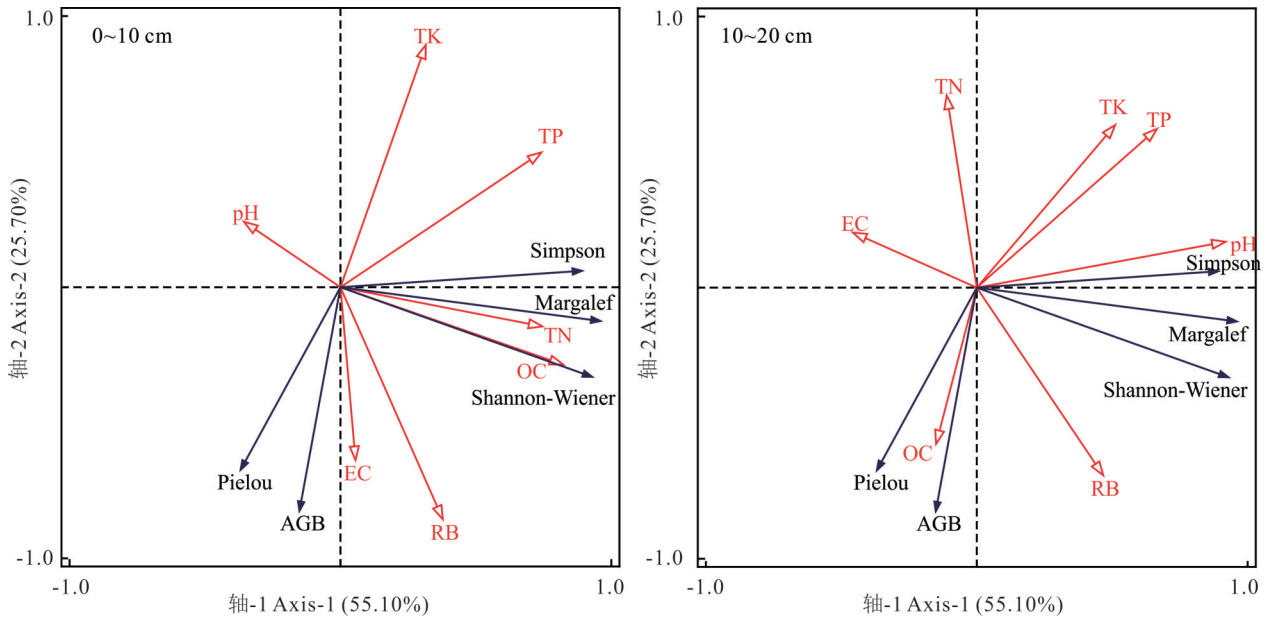


图5 牧草补播后土壤理化性质与植物群落特征主成分分析

Fig. 5 Principal component analysis of soil physical and chemical properties and plant community characteristics after grass reseeding

红色箭头表示解释变量,蓝色箭头表示响应变量。The red arrow represents the explanatory variable, and the blue arrow represents the response variable. Simpson: 优势度指数; Shannon-Wiener: 多样性指数; Pielou: 均匀度指数; Margalef: 丰富度指数; AGB: 地上生物量 Aboveground biomass; OC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN: 土壤全氮 Soil total nitrogen; TP: 土壤全磷 Soil total phosphorus; TK: 土壤全钾 Soil total potassium; RB: 土壤容重 Soil bulk density; EC: 土壤电导率 Soil electric conductivity.

3 讨论

3.1 不同牧草补播配置模式对植物群落特征的影响

人工补播对原生草地的各经济类群影响存在差异,这与草地类型及补播物种的特性密切相关^[18]。随着优良牧草的播入,一定程度上改变了原生退化草地的物种组成,同时提高了优良牧草的竞争能力,抑制了部分不良物种的生长。本研究结果显示,补播后草地生物量无显著变化,但P₁和P₂牧草混播草地中禾本科植物和豆科植物生物量分别占主要部分,这是由于补播的草种使草地植物群落中禾本科与豆科植物比重加大,同时补播过程中对

土壤的破坏抑制了部分杂草的生长^[19],降低了杂类草生物量在群落中的占比。相关研究表明,通过人工补播改良,使利用价值较低的退化草地逐步以禾本科和豆科牧草为主,杂草类和毒草比例下降的同时,草地质量得以提高^[20]。补播增加了草地植物群落盖度,与宁夏荒漠草地^[21]及冀西北坝上地区草地^[22]研究结果一致,主要原因是人工补播优选了乡土适生、抗逆性强,且耐干旱的牧草种质资源,占据了草地空缺的生态位,填补了裸露的地表^[22-23],使资源得到了充分利用。

物种多样性揭示了自然地理条件与群落之间的密切关系,而用于衡量植物群落多样性的丰富度、优势度和均匀度指数,能更深入地反映出植被群落的结构类型、发展阶段以及生境的不同^[24-25]。在本研究中,豆科牧草混播(P_2)和禾本科+豆科牧草混播(P_3)的多样性(Shannon-Wiener)与丰富度(Margalef)指数显著高于CK(围封未补播),与李鑫洋等^[22]和张永超等^[26]的研究结果相似,人工补播适应性物种后,原有的生态位被重新分配,从而改变了植物群落的空间格局^[27],新的生态位空间得以形成,增加了植物群落中的物种种类,同时还提高了群落的多样性和丰富度指数^[28-29]。补播与未补播处理之间在植物群落物种均匀度指数(Pielou)方面差异并不显著,与Foster等^[30]的研究结果相似,这可能与研究区属于干旱半干旱地区,降水量较少,植物生长缓慢,植物群落均匀度变化较小有关。

3.2 不同牧草补播配置模式对土壤理化性质的影响

实施生态恢复措施会促使土壤理化性质发生一系列变化,同时,地上植被与土壤性质之间也存在着紧密的相互作用^[31]。在本研究中,禾本科牧草混播(P_1)显著降低了0~20 cm土层土壤容重。第一个原因可能是人工补播措施增大了土壤疏松程度^[32],从而降低了土壤容重;第二个原因是人工补播后,草地植物群落的盖度得到了显著提升,这不仅有效减少了地表的裸露面积,还显著降低了表层土壤的蒸发量,有助于维持土壤的水分和肥力^[24],从而有效降低了土壤容重。在本研究所在区域,土壤呈碱性,pH值为8.26~8.46。有研究发现,补播能降低土壤电导率^[6],本研究结果与其相似,禾本科牧草混播(P_1)与禾本科+豆科牧草混播(P_3)均显著降低了0~20 cm土层土壤电导率,补播后植被覆盖率的提升可能增加了土壤的水分含量,进而减缓了土壤表面盐分的积聚,这种变化有助于改善土壤环境,促进植物的健康生长^[33]。

在本研究中,补播显著提高了0~10 cm土层土壤有机碳和全氮含量,但围封未补播(CK)10~20 cm土层土壤有机碳含量显著高于补播处理,这可能是由于补播改变了植物群落的结构和物种组成,影响了凋落物的积累和分解过程,进而对表层土壤的养分循环和周转产生了影响^[15],使得在0~10 cm的土层中,补播草地的土壤有机碳和全氮含量反而高于未补播的围封样地。此外,补播过程中可能扰动了表层土壤,导致土壤孔隙结构改变,土壤变得更加疏松,从而增加了碳素和氮素的输入量^[34],进而增加了补播地0~10 cm土层的有机碳与全氮含量。围封未补播(CK)地表没有受到破坏,呼吸作用减缓,导致土壤有机质氧化程度较低^[34],进而使得10~20 cm土层土壤有机碳含量较高。在本研究中,补播地土壤全磷和全钾含量均显著高于围封未补播地,与刘国富等^[35]、范博^[36]和吴金凤等^[37]的研究结果相似,补播牧草后,植被盖度显著增加,减少了土壤侵蚀与养分流失,同时土壤有机碳的增

表3 土壤理化指标与植物群落特征主成分分析排序结果

Table 3 Principal component analysis ordination results of soil physical and chemical indicators and plant community characteristics

土壤因子 Soil factors	土层深度 Soil depth (cm)	贡献率 Contribution (%)	F	P
土壤有机碳 Soil organic carbon	0~10	41.7	4.3	0.026*
	10~20	5.9	1.1	0.364
土壤全磷 Soil total phosphorus	0~10	26.4	4.1	0.008**
	10~20	22.0	3.7	0.010**
pH	0~10	9.3	1.7	0.224
	10~20	48.5	5.7	0.002**
土壤全钾 Soil total potassium	0~10	10.0	2.4	0.152
	10~20	4.6	0.8	0.486
土壤容重 Soil bulk density	0~10	6.6	2.2	0.210
	10~20	6.6	1.5	0.444
土壤全氮 Soil total nitrogen	0~10	3.5	1.4	0.394
	10~20	7.9	1.5	0.246
土壤电导率 Soil electric conductivity	0~10	2.5	<0.1	1.000
	10~20	4.4	<0.1	1.000

注: *表示 $P < 0.05$; **表示 $P < 0.01$ 。

Note: The * represents $P < 0.05$; ** indicates $P < 0.01$.

加促进了土壤微生物的活动,微生物通过矿化、解磷和解钾作用,释放出更多植物可吸收的磷和钾,进而提高了全磷和全钾含量^[38]。

3.3 不同牧草补播配置模式下植物群落特征与土壤因子的关系

植物与土壤之间存在着紧密的相互作用和相互依赖的关系。为了维持其生长,植物不断从土壤中汲取所需的养分和水分。与此同时,植物所产生的凋落物不仅有助于改善土壤的结构,还能显著提升土壤的养分含量,从而形成了植物与土壤之间的良性循环。大量研究表明,植被与土壤理化因子之间存在较强的相关性^[39-40],并且植被与土壤的相互作用是其维持的内稳性机制^[41]。白永飞等^[42]的研究结果显示,锡林河流域草原植物群落物种丰富度(Margalef)和多样性(Shannon-Wiener)指数与土壤有机质和全氮含量之间存在正相关关系;赵景学等^[43]通过分析高寒植被群落物种多样性与土壤环境因子之间的相关关系发现,物种 Shannon-Wiener 和 Margalef 指数与土壤有机质、全氮、全磷和速效氮质量分数之间存在极显著正相关关系,均匀度指数(Pielou)与环境因子之间相关性未达到显著水平;海旭莹等^[44]对黄土高原退耕还草地植物群落多样性的研究发现,物种优势度(Simpson)指数与土壤磷含量呈显著正相关,Pielou 指数与土壤氮含量呈显著正相关。在本研究中,不同土层土壤理化性质对植物群落有明显的影响:在 0~10 cm 土层下,土壤有机碳和全氮是影响植物群落物种 Simpson、Shannon-Wiener、Margalef 指数的关键环境因子,全磷影响植物群落密度,全钾影响 Pielou 指数和地上生物量;10~20 cm 土层下,pH 成为影响植物群落物种 Simpson、Shannon-Wiener、Margalef 指数的关键环境因子,全氮影响 Pielou 指数,植物群落密度受到土壤 pH、全磷和全钾的影响。总的来说,土壤全磷含量对荒漠草原补播草地植物群落特征的影响最显著。部分变量之间相关性不显著,原因可能是由于人为对土壤的扰动,使得土壤中某些养分的恢复以及植物群落特征的变化需要经历更长的时间才能得到验证。但是,从本研究结果来看,人工补播修复措施对植物群落特征变化及土壤养分的改良起着积极的作用。

4 结论

牧草补播提升了植物群落盖度及多样性指数(Simpson、Shannon-Wiener、Margalef);禾本科+豆科牧草混播增加了地上生物量。禾本科牧草混播显著降低了土壤容重;禾本科牧草与禾本科+豆科牧草混播模式显著降低了土壤电导率;牧草补播提高了土壤表层全磷、全钾、有机碳和全氮含量。禾本科+豆科混播模式在退化荒漠草原恢复中表现相对较好,促进土壤理化性质与植物群落的正向演替。

参考文献 References:

- [1] Stevens N, Bond W, Feurdean A, *et al.* Grassy ecosystems in the anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources*, 2022, 47: 261–289. DOI: 10.1146/annurev-environ-112420-015211.
- [2] Tuo D F, Lu Q, Que X E, *et al.* Evaluation of grassland ecosystem services in northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(2): 455–462.
脱登峰, 卢琦, 却晓娥, 等. 中国北方草地生态系统服务评估. *生态学报*, 2024, 44(2): 455–462.
- [3] Liu G X, Zhang Y J, Hovstad K A, *et al.* Competition of *Leymus chinensis* and *Bromus inermis* in response to gap size and neighbouring root exclusion. *Grass and Forage Science*, 2014, 69(3): 479–487.
- [4] Liu J G, Diamond J. China's environment in a globalizing world. *Nature*, 2005, 435(7046): 1179–1186.
- [5] Yue L N, Shi S L, Qi J, *et al.* Effects of no-tillage reseeded on productivity and nutritional quality of degraded grassland in northern China. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(11): 2583–2590.
岳丽楠, 师尚礼, 祁娟, 等. 免耕补播对北方退化草地生产力及营养品质的影响. *草地学报*, 2021, 29(11): 2583–2590.
- [6] Luo D. Effects of different improved measures on vegetation and soil in the *Stipa breviflora* desert steppe. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016.
罗冬. 不同改良措施对短花针茅荒漠草原植被和土壤的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- [7] Suter M, Connolly J, Finn J A, *et al.* Nitrogen yield advantage from grass-legume mixtures is robust over a wide range of legume proportions and environmental conditions. *Global Change Biology*, 2015, 21(6): 2424–2438.
- [8] Yang C H, Zhang X Q. Study on the techniques of mixed sown grassland establishment. *Pratacultural Science*, 2003, 20(3):

42—46.

杨春华, 张新全. 人工建植混播草地技术研究. 草业科学, 2003, 20(3): 42—46.

- [9] Du J Y, Li X Y, Yang L, *et al.* Study on the changes of grassland productivity in the third year of mixed sowing in Bashang area of northwest of Hebei. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(7): 1855—1861.
杜俊颖, 李鑫洋, 杨莉, 等. 冀西北坝上地区豆禾混播草地建植第三年草地生产力变化研究. 草地学报, 2022, 30(7): 1855—1861.
- [10] Li W, Wei T H, Yongcuobazhan, *et al.* Effects of different mixed planting ratios on vegetation and soil characteristics of sown pasture in the Sanjiangyuan region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(12): 39—48.
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. 草业学报, 2021, 30(12): 39—48.
- [11] Wang B, Yang Y J, Dong X, *et al.* Effects of reseeding grass on production performance and forage quality of degraded alfalfa grassland. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(3): 618—624.
王斌, 杨彦军, 董秀, 等. 补播禾草对退化苜蓿草地生产性能及牧草品质的影响. 草地学报, 2021, 29(3): 618—624.
- [12] Shu S M, Yang C H, Chen L Z. Effects of overseeding legumes on the forage yield and quality of whipgrass. *Pratacultural Science*, 2011, 28(6): 1041—1043.
舒思敏, 杨春华, 陈灵鸷. 补播豆科牧草对扁穗牛鞭草草地的影响. 草业科学, 2011, 28(6): 1041—1043.
- [13] Ji B, He J L, Wang Z J, *et al.* Effects of tillage on soil carbon and nitrogen reserves in desert steppe of Ningxia. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(1): 30—38.
季波, 何建龙, 王占军, 等. 翻耕补播措施对宁夏荒漠草原土壤碳氮储量的影响. 中国草地学报, 2022, 44(1): 30—38.
- [14] Hou C X, Zhou L H, Wen Y, *et al.* Evaluation of social-ecological systems resilience in ecological policy: a case study in Yanchi, Ningxia, China. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(8): 117—126.
侯彩霞, 周立华, 文岩, 等. 生态政策下草原社会—生态系统恢复力评价—以宁夏盐池县为例. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(8): 117—126.
- [15] 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. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(3): 60—66.
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. 中国草地学报, 2021, 43(3): 60—66.
- [16] Niu Y J, Yang S W, Wang G Z, *et al.* Study on the relationships between plant species richness, lifeform richness, and above- and belowground biomass under grazing disturbance in an alpine meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(8): 2791—2801.
牛钰杰, 杨思维, 王贵珍, 等. 放牧干扰下高寒草甸物种和生活型丰富度与地上及地下生物量的关系. 生态学报, 2018, 38(8): 2791—2801.
- [17] Bao S D. *Soil agro-chemical analysis (the third edition)*. Beijing: China Agriculture Press, 2008.
鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [18] Wang J Y, Sun Z J, An S Z, *et al.* Primary studies on the resuming effect of reseeding on vegetational restoration of natural grassland. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2011, 48(4): 690—695.
王吉云, 孙宗玖, 安沙舟, 等. 补播对天然割草场植被恢复效果的初步研究. 新疆农业科学, 2011, 48(4): 690—695.
- [19] Sun S Q. *The study of reseeding artificially on the sandy degraded grassland in Wuzhu Muqin*. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011.
孙树青. 乌珠穆沁沙质退化草地人工补播调查研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
- [20] Yan Z M, Zhang Y J, Pan L, *et al.* Research progress of reseeding forage legumes into natural grassland. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(29): 1—7.
阎子盟, 张玉娟, 潘利, 等. 天然草地补播豆科牧草的研究进展. 中国农学通报, 2014, 30(29): 1—7.
- [21] Wang B, Lin X K, Feng Z R, *et al.* Effects of reseeded native forage species on soil water holding capacity and vegetation biomass in a desert steppe. *Pratacultural Science*, 2023, 40(9): 2247—2256.
王博, 蔺雄奎, 冯占荣, 等. 补播乡土牧草对荒漠草地土壤持水性及植被生物量的影响. 草业科学, 2023, 40(9): 2247—2256.
- [22] Li X Y, Du J Y, Yang L, *et al.* Effects of no-tillage reseeding on plant community characteristics in northwest of Hebei Province. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(9): 2249—2254.
李鑫洋, 杜俊颖, 杨莉, 等. 免耕补播对冀西北坝上地区草原植被群落特征的影响. 草地学报, 2022, 30(9): 2249—2254.
- [23] Zhu Y Q, Yu H, Zheng W, *et al.* Effects of different planting configurations on yield of *Avena sativa* and *Vicia sativa* mixed

- plantings with soybean in alpine pastures. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(1): 74–85.
- 朱亚琼, 于辉, 郑伟, 等. 燕麦+箭筈豌豆混播草地混播优势的测度与影响因素分析. *草业学报*, 2020, 29(1): 74–85.
- [24] Wu W P, Ma H B, Lu Q, *et al.* Effects of supplementary sowing on plant community and soil physical and chemical properties in Ningxia desert steppe. *Pratacultural Science*, 2020, 37(10): 1959–1969.
- 吴宛萍, 马红彬, 陆琪, 等. 补播对宁夏荒漠草原植物群落及土壤理化性状的影响. *草业科学*, 2020, 37(10): 1959–1969.
- [25] Zhu B W, Zhou H K, Xu Y X, *et al.* Study on seasonal dynamics of biomass in meadow grassland of north shore of Qinghai Lake. *Pratacultural Science*, 2008, 25(12): 62–66.
- 朱宝文, 周华坤, 徐有绪, 等. 青海湖北岸草甸草原牧草生物量季节动态研究. *草业科学*, 2008, 25(12): 62–66.
- [26] Zhang Y C, Niu D C, Han T, *et al.* Effects of reseeding on productivity and plant diversity on alpine meadows. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(2): 305–309.
- 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. *草业学报*, 2012, 21(2): 305–309.
- [27] Jiang X L, Yue J, Zhang W G, *et al.* Biodiversity, ecosystem functioning and spatio-temporal scales. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(1): 219–225.
- 江小雷, 岳静, 张卫国, 等. 生物多样性, 生态系统功能与时空尺度. *草业学报*, 2010, 19(1): 219–225.
- [28] Tilman D. Niche tradeoffs, neutrality, and community structure: A stochastic theory of resource competition, invasion, and community assembly. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 10854–10861.
- [29] Kawata M. Invasion of vacant niches and subsequent sympatric speciation. *Proceedings of the Royal Society B—Biological Sciences*, 2002, 269(1486): 55–63.
- [30] Foster B L, Tilman D. Seed limitation and the regulation of community structure in oak savanna grassland. *Journal of Ecology*, 2003, 91(6): 999–1007.
- [31] Hao W F, Du F, Chen X Y, *et al.* Composition and diversity analysis of natural-community plants in the loess hilly region. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(4): 609–615.
- 郝文芳, 杜峰, 陈小燕, 等. 黄土丘陵区天然群落的植物组成、植物多样性及其与环境因子的关系. *草地学报*, 2012, 20(4): 609–615.
- [32] Ji W Z, Wang Q H. Effects of over-seeding on plant community and soil physical and chemical properties of degraded grassland in Tianzhu County. *Pratacultural Science*, 2016, 33(5): 886–890.
- 姬万忠, 王庆华. 补播对天祝高寒退化草地植被和土壤理化性质的影响. *草业科学*, 2016, 33(5): 886–890.
- [33] Peng M, Zi X X, Shang W, *et al.* Effect of different land use on soil physicochemical properties, enzyme activity and microorganism quantity in Daqing. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, 43(10): 79–84.
- 彭木, 晔晓雪, 尚娟, 等. 不同土地利用方式对大庆地区土壤理化性质、酶活性与微生物数量的影响. *东北林业大学学报*, 2015, 43(10): 79–84.
- [34] Qiao Y M, Wang Z Q, Duan Z H. Effects of different land-use types on soil carbon and nitrogen contents in the northern region of Qinghai Lake. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(6): 105–112.
- 乔有明, 王振群, 段中华. 青海湖北岸土地利用方式对土壤碳氮含量的影响. *草业学报*, 2009, 18(6): 105–112.
- [35] Liu G F, Sun X, Xiao Z X, *et al.* Effects of reseeding and fertilizing on the chemical properties and enzyme activities of degraded meadow soil. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(11): 66–75.
- 刘国富, 孙雪, 肖知新, 等. 补播和施肥对退化草甸土壤化学性质及酶活性的影响. *中国草地学报*, 2022, 44(11): 66–75.
- [36] Fan B. Effects of fertilization and reseeding on soil carbon, nitrogen, phosphorus and vegetation characteristics of degraded grassland in desert steppe. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- 范博. 施肥和补播对荒漠草原退化草地的土壤碳氮磷和植被特征的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [37] Wu J F, Liu J S, Li Z M, *et al.* Grassland soil phosphorus cycle and its response to global change. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(6): 102–111.
- 吴金凤, 刘鞠善, 李梓萌, 等. 草地土壤磷循环及其对全球变化的响应. *中国草地学报*, 2021, 43(6): 102–111.
- [38] Zhang A M, Li N K, Zhao G Y, *et al.* Research progress on the phosphate-solubilizing and potassium-solubilizing microorganisms. *Journal of Hebei University(Natural Science Edition)*, 2015, 35(4): 442–448.
- 张爱民, 李乃康, 赵钢勇, 等. 土壤中解磷、解钾微生物研究进展. *河北大学学报(自然科学版)*, 2015, 35(4): 442–448.
- [39] Verdoodt A, Mureithi S, Ye L, *et al.* Chronosequence analysis of two enclosure management strategies in degraded rangeland of semi-arid Kenya. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2009, 129(1/2/3): 332–339.

- [40] Li K H, Hu Y K, Wang X, *et al.* Relationships between aboveground biomass and environmental factors along an altitude gradient of alpine grassland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(9): 2019–2024.
李凯辉, 胡玉昆, 王鑫, 等. 不同海拔梯度高寒草地地上生物量与环境因子关系. *应用生态学报*, 2007, 18(9): 2019–2024.
- [41] Sun Y F, Wan H W, Zhao Y J, *et al.* Spatial patterns and drivers of root turnover in grassland ecosystems in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(3): 337–348.
孙元丰, 万宏伟, 赵玉金, 等. 中国草地生态系统根系周转的空间格局和驱动因子. *植物生态学报*, 2018, 42(3): 337–348.
- [42] Bai Y F, Li L H, Wang Q B, *et al.* Changes in plant species diversity and productivity along gradients of precipitation and elevation in the Xilin river basin, Inner Mongolia. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2000, 24(6): 667–673.
白永飞, 李凌浩, 王其兵, 等. 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.
- [43] Zhao J X, Qu G P, Duojidunzhu, *et al.* Relationship between species diversity and soil factors of alpine grasslands in north Tibet. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(6): 105–108.
赵景学, 曲广鹏, 多吉顿珠, 等. 藏北高寒植被群落物种多样性与土壤环境因子的关系. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(6): 105–108.
- [44] Hai X Y, Dong L B, Wang X Z, *et al.* Effects of carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry characteristics on plant diversity since returning farmland to grassland on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(23): 8570–8581.
海旭莹, 董凌勃, 汪晓珍, 等. 黄土高原退耕还草地 C, N, P 生态化学计量特征对植物多样性的影响. *生态学报*, 2020, 40(23): 8570–8581.