

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.02.034

引用格式:吕亮雨,付守全,刘青青,等.木里矿区4种生态草种适宜播种量筛选[J].草地学报,2026,34(2):723-733

LÜ Liang-yu, FU Shou-quan, LIU Qing-qing, et al. Screening of Suitable Sowing Amount of Four Ecological Grass Species in Muli Mining Area[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2):723-733

木里矿区4种生态草种适宜播种量筛选

吕亮雨^{1,2,3#}, 付守全^{2,3#}, 刘青青^{1,2}, 赫苗花¹, 蔡宗程^{1,2}, 施建军^{1,2,3*}

(1. 青海大学畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016; 3. 青海省高寒草地适应性管理重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要:本研究以筛选适宜草种、确定低播量并实现高盖度为目标,选取青海草地早熟禾(*Poa pretensis* ‘Qinghai’)、发草(*Deschampsia cespitosa*)、洽草(*Koeleria macrantha*)和麦宾草(*Elymus tangutorum*)4种生态草种为试验材料,开展适宜播量筛选试验。分析3种播量下植物表型性状、生物量和土壤养分变化特征。结果表明:播量为 $9\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,青海草地早熟禾、发草和洽草地上生物量最高,分别为 $296.45\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $224.32\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $236.35\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$;麦宾草播量为 $18\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,地上生物量为 $356.24\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,显著高于其他处理($P<0.05$)。青海草地早熟禾、发草和洽草的播种量达到 $9\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,土壤中的有机质、全氮和全磷等养分指标表现良好;而麦宾草播量为 $18\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,显示出较好的土壤养分状况。对植物和土壤的13个指标进行主成分分析,发现前5个主成分累计贡献率达到89.615%,隶属函数综合评价发现青海草地早熟禾、发草和洽草播量为 $9\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,综合评价值最高,分别为0.420、0.486和0.698;麦宾草播量为 $18\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,综合评价值最高,为0.634。综上所述, $9\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 是木里矿区建植青海草地早熟禾、发草和洽草人工草地的最佳播量, $18\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 是木里矿区建植麦宾草人工草地的最佳播量。

关键词:生态草种;播量;生物量;土壤理化性质;木里矿区;生态修复

中图分类号:S812.4

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)02-0723-11

Screening of Suitable Sowing Amount of Four Ecological Grass Species in Muli Mining Area

LÜ Liang-yu^{1,2,3#}, FU Shou-quan^{2,3#}, LIU Qing-qing^{1,2}, HE Miao-hua¹,
CAI Zong-cheng^{1,2}, SHI Jian-jun^{1,2,3*}

(1. Academy of Animal science and Veterinary, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China; 2. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China; 3. Qinghai Provincial Key Laboratory of Adaptive Management on Alpine Grassland, Xining, Qinghai Province 810016, China)

Abstract: This study aims to screen the suitable grass species with low sowing rate and high coverage. Four ecological grass species, *Poa pretensis* ‘Qinghai’, *Deschampsia cespitosa*, *Koeleria macrantha* and *Elymus tangutorum*, were selected as experimental materials to carry out the screening experiment of suitable sowing rate. The characteristics of plant phenotypic traits, biomass and soil nutrients under three sowing rates were analyzed. The results showed that when the sowing rate was $9\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, the aboveground biomass of *Poa pretensis* ‘Qinghai’, *Deschampsia cespitosa* and *Koeleria macrantha* were the highest, which were $296.45\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, $224.32\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ and $236.35\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ respectively. The aboveground biomass of *Elymus tangutorum* was $356.24\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ when the seeding rate was $18\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, which was significantly higher than other treatments ($P<0.05$). When the sowing amount of *Poa pretensis* ‘Qinghai’, *Deschampsia cespitosa* and *Koeleria macrantha* reached $9\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, the soil nutrient indexes such as organic matter, total nitrogen and total phosphorus performed well.

收稿日期:2025-03-07;修回日期:2025-03-27

基金项目:高寒矿区生态修复关键技术与集成资助项目(2021YFC3201605);青海省科技特派员专项(2025-NK-P25)资助

作者简介:吕亮雨(1997-),男,汉族,山东烟台人,博士研究生,主要从事牧草经营管理研究,E-mail:1670240560@qq.com;#付守全(2002-),男,汉族,河南信阳人,硕士研究生,主要从事牧草经营管理研究,E-mail:1521722043@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:378605242@qq.com

The seeding rate of *Elymus tangutorum* was $18 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, which showed a good soil nutrient status. Principal component analysis of 13 indexes of plants and soil showed that the cumulative contribution rate of the first five principal components reached 89.615%. The comprehensive evaluation of membership function showed that the comprehensive evaluation values of *Poa pretensis* 'Qinghai', *Deschampsia cespitosa* and *Koeleria macrantha* were the highest when the sowing amount was $9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, which were 0.420, 0.486 and 0.698 respectively. When the seeding rate of *Elymus tangutorum* was $18 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, the comprehensive evaluation value was the highest, which was 0.634. To sum up, $9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ is the most suitable sowing amount for planting *Poa pretensis* 'Qinghai', *Deschampsia cespitosa* and *Koeleria macrantha* in Muli mining area, and $18 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ is *Elymus tangutorum* in Muli mining area.

Key words: Ecological grass species; Sowing quantity; Biomass; Physical and chemical properties of soil; Muli mining area; Eco-restoration

木里煤矿位于青海省祁连山南麓,由江仓、聚乎更、弧山和哆嗦贡马4个矿区组成,包括11座露天矿坑,19座渣山,采坑总面积 1433.04 hm^2 、渣山总面积 1856.79 hm^2 。目前,木里矿区生态恢复是中国在高寒、高海拔地区开展的大面积矿山治理的首例示范性工程,受高寒气候和脆弱生境的影响,国内外尚无成功经验和成熟模式可借鉴,具有很强的探索和现实意义^[3]。

青藏高原高寒矿区生态修复具有特殊性,受高寒高海拔特殊环境条件的限制,其生态修复的研究主要围绕土壤重构和植被重建两个方面开展^[4],高寒矿区植被修复的关键是适宜草种及其播量筛选^[5-7]。高寒矿区植被修复筛选适宜草种,既要适应高寒气候条件,还要针对矿区土壤特征及各类重金属污染问题^[8]。许多研究表明,乡土植物较外来物种适应性更强,能更好的适应区域气候环境,是矿区生态修复的首选^[9-11]。目前,高寒矿区生态修复选择的草种主要以禾本科草种为主,这源于禾本科草种的耐寒和耐金属等特性。例如,西藏东南缘铜矿区生态修复选用垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、中华羊茅(*Festuca sinensis*)和青海冷地早熟禾(*Poa araratica* 'Qinghai')建植人工草地,建植后草本层平均高度显著增加,同时降低了土壤重金属污染的风险^[12]。中国三江源区德尔尼铜矿以垂穗披碱草和青海冷地早熟禾进行植被修复,随建植年限的增加,群落向稳定状态演替^[13]。

木里矿区生态系统稳定性差且气候和地理位置独特,生态修复过程中生态草种适宜播量缺乏科学依据。本研究以适宜草种、低播量和高盖度为目标,选取青海草地早熟禾(*Poa pretensis* 'Qinghai', Pp)、发草(*Deschampsia cespitosa*, Dc)、洽草(*Koeleria macrantha*, Kc)和麦宾草(*Elymus tangutorum*, Et)4种生态草种开展最适播量筛选试验,旨在探究高寒

矿区以上述4种常见生态恢复草种建植人工草地后植被群落特征及土壤修复效果,确定最优播量。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省天峻县木里镇聚乎更矿区($38^{\circ}9'34'' \text{ N}$, $99^{\circ}9'40'' \text{ E}$),平均海拔4200 m,属于高原大陆性气候,年平均气温 -5.3°C ,最冷月份(1月)平均温度为 -17.2°C ,最热月份(7月)平均温度为 15.6°C ,年降雨量282~774 mm,且主要集中于5—9月,占全年降水量的90%左右。年蒸发量1050 mm,年日照时数在2551~3332 h之间,无四季之分,多大风天气。牧草生长时间较短,仅为120 d左右。

1.2 试验设计

于2021年7月初开展4种生态草种(Pp、Dc、Kc和Et)适宜播量筛选试验。结合团队前期研究成果,设置3个播量(表1),播种方式为人工条播^[14-16]。试验地矿渣筛分铺覆后,将底肥配合旋耕机翻耕10~20 cm施入。施肥量为羊板粪 $375 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ +

表1 4种生态草种的不同播量

草种名称 Grass seed name	处理 Treatments	播量 Seed rate/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$
青海草地早熟禾(Pp)	Pp ₁	6
	Pp ₂	9
	Pp ₃	12
发草(Dc)	Dc ₁	6
	Dc ₂	9
	Dc ₃	12
洽草(Kc)	Kc ₁	6
	Kc ₂	9
	Kc ₃	12
麦宾草(Et)	Et ₁	18
	Et ₂	24
	Et ₃	30

商品有机肥 $22.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (肥料有机质 $\geq 45\%$, 总养分: $\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O} \geq 5\%$)。试验小区采用随机区组设计, 12个处理, 每处理3次重复, 共36个小区, 小区面积 $4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 。播种后铺设 $(20 \pm 2) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 无纺布, 以保水保温, 防止水土流失。7月下旬齐苗后, 捡拾收集铺设的无纺布, 将其进行无害化处理。

1.3 样品采集与测定

2023年8月下旬, 即植物生长的旺盛期, 在每个试验小区随机设置3个 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 样方用于样品采集, 共108个样方。

1.3.1 生长特性测定 叶片干质量和茎干质量: 采集样方内全部植物叶片和茎秆, 烘干测其干重。茎叶比: 样方内茎干质量与叶片干质量的比值。地上和地下生物量: 样方内的植物齐地刈割(留茬 2 cm), 同时用直径 7 cm 的根钻, 采集 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层根样, 于烘箱中烘干测其干重, 计算地上和地下生物量。根冠比: 植物地下部分与地上部分干重的比值。穗长: 样方内随机取10株成熟期完整植株, 测定穗基部至顶端的绝对长度。穗数: 样方内植株小穗个数。每穗粒数: 测定单穗脱粒后籽粒数。千粒重: 样方内的随机1000粒成熟种子的重量。种子产量 = 穗数 $\times$ 每穗粒数 $\times$ 千粒重 / 1000。

1.3.2 植物全碳、全氮和全磷含量测定 将采集的植物样品, 烘干、粉碎后测定植物全碳、全氮和全磷含量。具体测定方法如下: 植物全碳含量采用重铬酸钾氧化外加热滴定法测定; 植物全氮含量采用“硫酸-过氧化氢”法消解, AA3连续流动分析仪测定; 植物全磷含量采用“硫酸-过氧化氢”法消煮, 用分光光度计测定^[17-18]。

1.3.3 土壤理化指标测定 按照5点混合取样法在各个小区随机采集 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 的土壤样品, 阴干, 测量土壤有机质、土壤全氮和土壤全磷含量。土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定; 土壤全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定; 土壤全磷含量采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法测定^[17-19]。

1.4 综合评价

利用主成分分析将反映植物生产性能和土壤质量的13个主要指标(叶片干质量、穗长、穗数、每穗粒数、千粒重、种子产量、植物全碳含量、植物全氮含量、植物全磷含量、地上生物量、土壤有机质含量、土壤全氮含量和土壤全磷含量)降维并筛选出

综合指标, 然后采用隶属函数法对4种牧草的3个播量进行隶属函数综合评价^[20-23]。

隶属函数值计算公式为: $U(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$

式中的 X_j , $X_{\min}$, $X_{\max}$ 分别为该指标在第 j 个处理综合指标, 及 j 个处理综合指标的最小值和最大值;

权重计算公式为: $W_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j$

式中的 W_j 值表示第 j 个综合指标的权重, P_j 为第 j 个处理综合指标的贡献率;

综合评价值: $D = \sum_{j=1}^n [U(x_j) \times W_j]$

式中的 $U(x_j)$ 表示第 j 个综合指标值的隶属函数值, W_j 表示第 j 个综合指标的权重。

1.5 数据分析

用 Origin 2022 软件绘制图表, SPSS 19.0 软件数据差异性分析和隶属函数分析。采用单因素方差分析各处理间的显著性差异 ($P < 0.05$), 用 LSD 法进行多重比较, 利用隶属函数进行综合分析排序。

2 结果与分析

2.1 不同播量对生态草种生长性状的影响

2.1.1 叶片干质量 3种播量处理下, 生态草种的叶片干质量差异显著(图1)。Pp品种的3个播量处理下, Pp₁和Pp₂处理间差异不显著, 但均显著高于Pp₃处理 ($P < 0.05$)。Dc品种3个播量处理中, Dc₂处理叶片干质量最大, 为 $59.52 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 显著高于Dc₃处理, 增量高达 57.83% ($P < 0.05$)。Kc品种在3个播量处理中, 叶片干质量由大到小依次为Kc₁, Kc₃和Kc₂处理, 且Kc₁处理显著高于Kc₂处理, 增量高达 31.08% 。Et品种的3个播量处理中, Et₁处理最高, 显著高于Et₂和Et₃处理 ($P < 0.05$)。

2.1.2 茎干质量 在3种播量下, 4种生态草种茎干质量差异明显(图2)。Pp品种3个播量中, Pp₂处理茎干质量最高, 为 $199.06 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。Dc品种3个播量处理下, Dc₂处理茎干质量最高, 为 $101.55 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 显著高于Dc₁和Dc₃处理, 分别提高 55.13% 和 49.09% ($P < 0.05$)。Kc品种3个播量处理下, Kc₃处理茎干质量最高, Kc₂处理次之, 均显著高于Kc₁处理 ($P < 0.05$)。Et品种3个播量处理中, Et₁处理茎干质量最高, 较Et₃处理显著增加 94.51% ($P < 0.05$)。

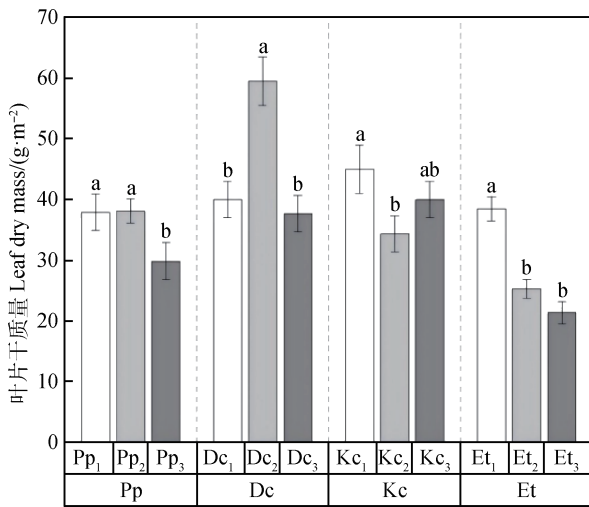


图1 不同播量下生态草种叶片的干质量比较

Fig. 1 Comparison of dry quality of ecological grass seed leaves at different sowing amount

注:不同小写字母表示同一草种不同播量间差异显著($P < 0.05$),下同

Note: Different lowercase letters indicate that there are significant differences between different sowing rates of the same grass species ($P < 0.05$), the same as below

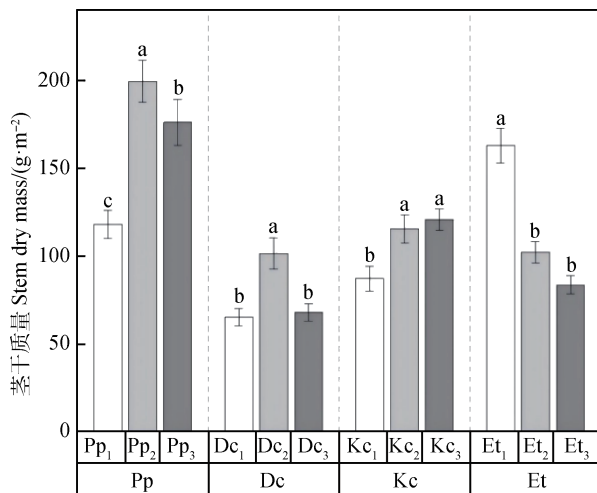


图2 不同播量下生态草种茎干质量比较

Fig. 2 Comparison of stem quality of ecological grass species at different sowing rate

2.1.3 茎叶比 在3个播量下,生态草种茎叶比差异显著(图3)。Pp品种在3个播量中,Pp₃处理茎叶比最高,为5.94,较Pp₁处理显著增加89.10% ($P < 0.05$)。Dc品种中,茎叶比顺序为Dc₃>Dc₂>Dc₁,各处理之间差异不显著。Kc品种在3个播量处理中,Kc₂处理的茎叶比最高,显著高于Kc₁处理($P < 0.05$)。Et品种在3个播量处理下茎叶比差异不显著,分别为4.23,4.22和4.23。

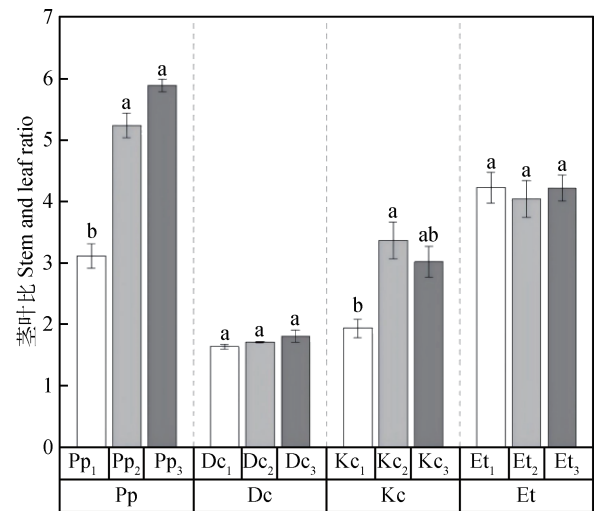


图3 不同播量下生态草种的茎叶比

Fig. 3 Stem and leaf ratio of ecological grass species at different sowing amount

2.1.4 种子产量及构成因素 在3个播量下,生态草种种子产量及构成因素差异明显(表2)。Pp品种的3个播量中,Pp₂处理穗长、穗数、每穗粒数和种子产量均最高,分别为4.61 cm, 3794.68穗·m⁻², 125.36粒·穗⁻¹和690.63 kg·hm⁻²,其中,穗数、每穗粒数和种子产量显著高于Pp₁和Pp₃处理($P < 0.05$)。Kc品种的3个播量中,Kc₂处理穗长、穗数、每穗粒数和种子产量最高,显著高于Kc₁和Kc₃处理($P < 0.05$),其中Kc₂处理穗长显著高于Kc₁和Kc₃处理,分别高22.40%和27.42% ($P < 0.05$)。Et品种的3个播量中,Et₁处理穗数显著高于Et₂和Et₃处理,分别高78.25%和70.57%;种子产量也最高,显著高于Et₂和Et₃处理,分别增加104.04%和43.62% ($P < 0.05$)。DC品种的3个播量中,均未进入成熟期,未完成抽穗。3个播量下,不同生态草种千粒重差异不显著。

2.2 不同播量对植物全碳、全氮和全磷含量的影响

3个播量下,植物全碳含量有所差异(图4A)。在Pp品种的3个播量处理中,Pp₂处理植物全碳含量显著高于Pp₁和Pp₃处理,分别高23.01%和15.55% ($P < 0.05$)。Dc品种中不同播量处理间植物全碳含量差异不显著。Kc品种在不同播量处理中,Kc₂处理植物全碳含量最高,为486.32 g·kg⁻¹,显著高于其他处理($P < 0.05$)。在Et品种3个播量处理下,Et₁处理碳含量最高,显著高于Et₂处理,增量为16.25% ($P < 0.05$)。

表 2 不同播量下生态草种种子产量及构成因素

Table 2 Yield and composition factors of ecological grass at different sowing amount

处理 Treatments		穗长 Ear length/cm	穗数 Ear number/ (穗·m ⁻²)	每穗粒数 Number of grain per ear/ (粒·穗 ⁻¹)	千粒重 Thousand-grain weight/ g	种子产量 Seed yield/(kg·hm ⁻²)
Pp	Pp ₁	4.52±0.26 ^a	2340.20±18.43 ^b	95.36±7.45 ^b	0.22±0.02 ^a	422.77±6.58 ^b
	Pp ₂	4.61±0.52 ^a	3794.68±57.30 ^a	125.36±10.34 ^a	0.25±0.01 ^a	690.63±35.36 ^a
	Pp ₃	3.20±0.35 ^b	1840.01±17.42 ^b	86.47±8.69 ^b	0.22±0.01 ^a	398.34±29.52 ^b
Kc	Kc ₁	7.86±0.52 ^b	672.25±9.61 ^b	96.48±9.32 ^b	0.34±0.01 ^a	240.57±13.60 ^b
	Kc ₂	9.62±0.68 ^a	976.30±12.03 ^a	114.47±12.54 ^a	0.35±0.04 ^a	437.98±17.60 ^a
	Kc ₃	7.55±0.52 ^b	648.38±27.36 ^b	108.36±14.58 ^b	0.32±0.02 ^a	251.28±14.25 ^b
Et	Et ₁	7.55±0.30 ^a	628.64±34.21 ^a	45.83±3.56 ^b	2.18±0.03 ^a	615.84±42.25 ^a
	Et ₂	7.62±0.58 ^a	352.68±25.50 ^b	44.04±2.68 ^b	2.05±0.14 ^a	301.83±24.30 ^c
	Et ₃	7.30±0.26 ^a	368.56±36.42 ^b	51.47±3.56 ^a	2.28±0.12 ^a	428.81±25.31 ^b

注:不同小写字母表示相同草种不同播量的处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Note: Different lowercase letters indicate different sowing amount of the same grass species ($P<0.05$). The same as below

在不同播量下,植物全氮含量差异明显(图 4B)。Pp 品种植物全氮含量在 3 个播量中,Pp₂处理最高,为 27.41 g·kg⁻¹,显著高于 Pp₁处理,增量高达 47.36%($P<0.05$)。在 Dc 品种 3 个播量处理下,植物全氮含量差异不显著。Kc 品种 3 个播量处理下,Kc₂处理植物全氮含量最高,Kc₃处理次之,Kc₁处理最小,仅为 15.78 g·kg⁻¹。Et 品种在 3 个播量处理中,Et₁处理植物全氮含量最高,较 Et₂处理显著增加 25.91%($P<0.05$)。

不同播量处理,植物全磷含量不同(图 4C)。在 Pp 品种的 3 个播量处理中,Pp₂处理最高,为 2.93 g·kg⁻¹,显著高于 Pp₁处理,增量为 13.28%($P<0.05$)。Dc 品种中,Dc₃处理下植物全磷含量为 4.25 g·kg⁻¹,较 Dc₂显著增加 25.45%($P<0.05$)。Kc 品种的 3 个播量处理中,植物全磷含量差异不显著。在 Et 品种 3 个播量处理下,Et₁处理植物全磷含量最高,高达 2.94 g·kg⁻¹,显著高于 Et₂处理,增量高达 29.46%($P<0.05$)。

2.3 不同播量对生态草种地上生物量和根冠比的影响

3 种播量下,生态草种地上生物量差异明显(图 5)。Pp 品种的 3 个播量,Pp₂处理地上生物量最高,高达 296.45 g·m⁻²,较 Pp₁处理显著增加 51.22%($P<0.05$)。Dc 品种的 3 个播量,仅 Dc₂处理地上生物量达到 200 g·m⁻²以上,为 224.32 g·m⁻²,显著高于其他播量处理($P<0.05$)。Kc 品种在 3 个播量处理中,Kc₂和 Kc₃处理显著高于 Kc₁处理($P<0.05$)。Et 品种在 3 种播量处理下,地上生物量差异显著($P<0.05$),其中,Et₁处理地上生物量最高,为 356.45 g·m⁻²,Et₃处理次之,Et₂处理最小。

3 种播量下,生态草种根冠比差异显著(图 6)。在 Pp 品种的 3 个播量处理中,根冠比排序为 Pp₃>Pp₁>Pp₂,其中,Pp₃处理显著高于其他处理($P<0.05$)。Dc 品种的 3 个播量处理中,Dc₃处理根冠比最大,为 4.59,较 Dc₁处理显著增加 22.07%($P<0.05$)。Kc 品种在 3 个播量处理中,Kc₁处理根冠比显著高于其余两个处理($P<0.05$)。在 Et 品种 3 个播量处理下,Et₂处理根冠比最高,显著高于 Et₁处理,增量高达 52.13%($P<0.05$)。

2.4 不同播量生态草种对土壤理化性质的影响

与 CK 相比,4 种生态草种的 3 个播量处理下土壤有机质、土壤全氮含量和土壤全磷含量均有所提高,且 3 个播量处理下土壤养分改良情况各不相同(表 3)。在 Pp 品种的 3 个播量处理下,Pp₁处理土壤改良效果最好,其土壤有机质含量较 CK 处理增加了 31.12%;土壤全氮含量和土壤全磷含量与 CK 处理相比增量达到 38.07% 和 29.09%。在 Dc 品种的 3 个播量处理下,Dc₂处理土壤改良效果最好,该处理土壤有机质含量、土壤全氮含量和土壤全磷含量分别较 CK 处理显著提高 11.69%, 28.69% 和 27.88%,差异显著($P<0.05$)。在 Kc 品种的 3 个播量处理下,Kc₂处理的土壤改良效果最好,该处理土壤中的土壤有机质含量、土壤全氮含量和土壤全磷含量分别为 283.71 g·kg⁻¹, 7.17 g·kg⁻¹ 和 2.03 g·kg⁻¹,较 CK 处理分别提高了 38.82%, 41.42% 和 23.03%,差异显著($P<0.05$)。在 Et 品种的 3 个播量处理下,Et₁处理的土壤改良效果最好,该处理土壤有机质含量、土壤全氮含量和土壤全磷含量分别较 CK 处理提高 56.66%, 44.97% 和 36.36%($P<0.05$)。

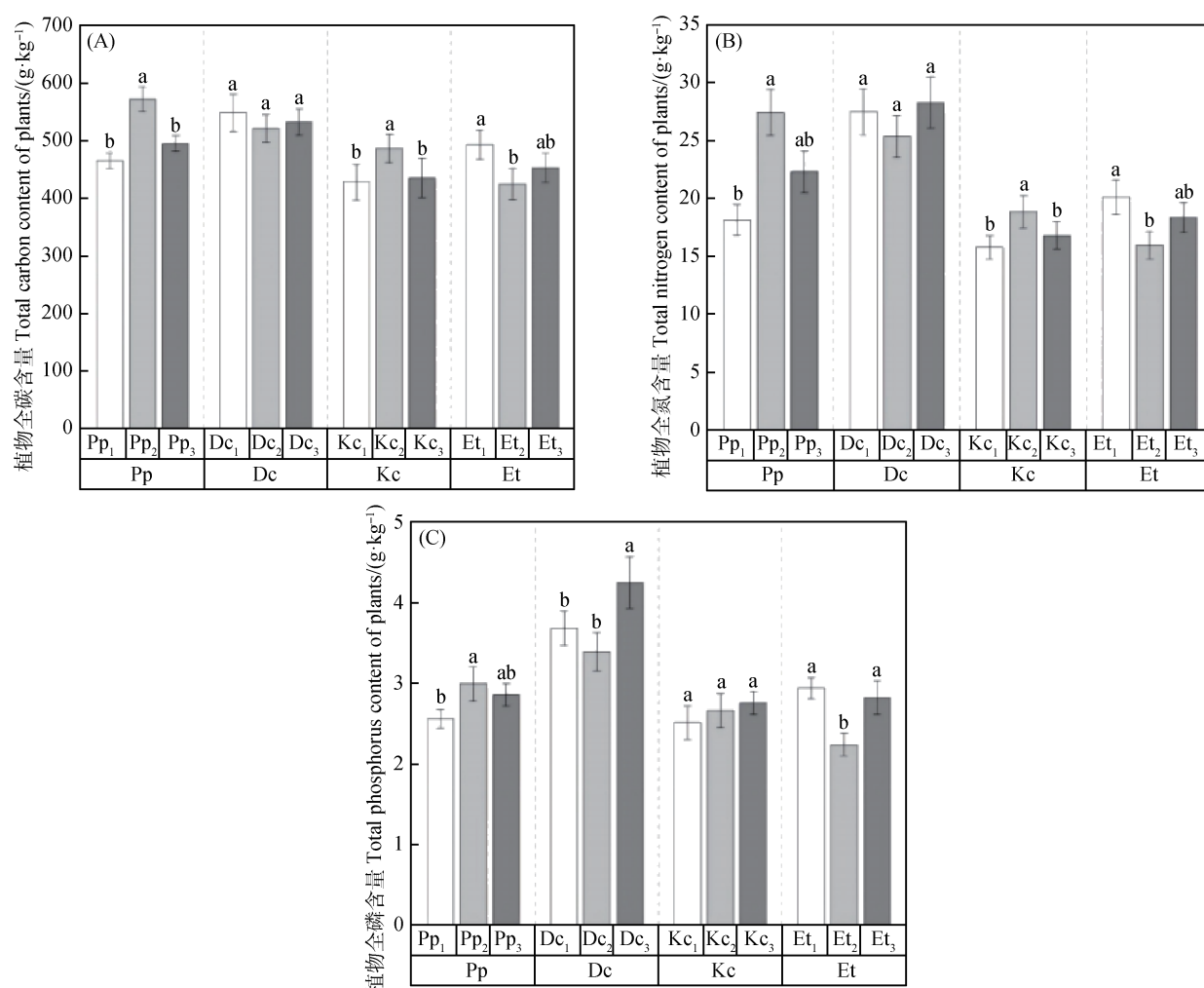


图 4 不同播量下植物全碳、全氮和全磷含量比较

Fig. 4 Stoichiometric ratios of ecological grass species at different sowing amount

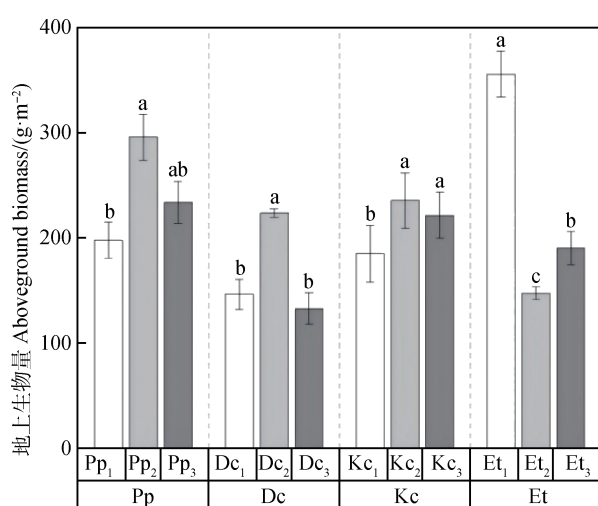


图 5 不同播量下生态草种地上生物量比较

Fig. 5 Comparison of the aboveground biomass of ecological grass species at sowing amount

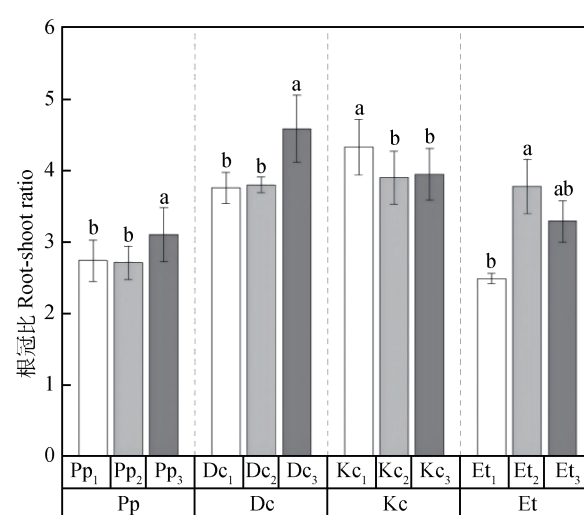


图 6 不同播量下生态草种根冠比比较

Fig. 6 Comparison of the root-crown ratio of ecological grass species at different sowing amount

表3 不同播量下土壤养分含量(0~20 cm)

Table 3 Soil nutrients at at different sowing amount (0~20 cm)

土层 Soil layer/cm	处理 Treatments	土壤有机质含量 Soil organic matter content/ (g·kg ⁻¹)	土壤全氮含量 Soil total nitrogen content/(g·kg ⁻¹)	土壤全磷含量 Soil total phosphorus content/ (g·kg ⁻¹)
0~20	Pp ₁	267.96±8.21 ^a	6.31±0.29 ^b	2.13±0.12 ^a
	Pp ₂	264.03±10.74 ^a	6.91±0.18 ^a	2.10±0.04 ^a
	Pp ₃	246.96±13.24 ^b	5.70±0.31 ^b	1.93±0.07 ^b
	CK	204.37±11.65 ^c	4.57±0.06 ^c	1.65±0.12 ^c
	Dc ₁	230.70±13.64 ^b	5.65±0.23 ^b	2.08±0.13 ^a
	Dc ₂	228.26±14.72 ^b	6.01±0.29 ^a	2.11±0.04 ^a
	Dc ₃	280.14±21.34 ^a	5.30±0.36 ^c	2.05±0.02 ^a
	CK	204.37±13.42 ^c	4.67±0.09 ^d	1.65±0.12 ^b
	Kc ₁	221.82±19.43 ^c	5.58±0.26 ^b	2.35±0.15 ^a
	Kc ₂	283.71±25.27 ^a	7.17±0.39 ^a	2.03±0.06 ^a
	Kc ₃	246.34±14.51 ^b	5.78±0.30 ^b	2.10±0.03 ^a
	CK	204.37±12.81 ^d	5.07±0.11 ^c	1.65±0.08 ^b
	Et ₁	320.17±14.23 ^a	7.35±0.13 ^a	2.25±0.12 ^a
	Et ₂	253.98±19.41 ^c	5.98±0.42 ^b	2.15±0.07 ^a
	Et ₃	275.56±14.24 ^b	6.04±0.44 ^b	2.15±0.02 ^a
	CK	204.37±10.35 ^d	5.07±0.02 ^c	1.65±0.13 ^b

2.5 不同播量下生态草种的综合评价

2.5.1 主成分分析 通过对7个植物表型性状、3个植物养分含量和3个土壤理化指标进行主成分分析,结果发现5个主成分的特征值都大于1,且累积贡献率达到89.615%,这表明5个主成分可以综合评价各处理下的生态草种(表4)。第一主成分特征值最大,为5.437,贡献率为28.616%,该主成分中地上生物量(0.905)、土壤全氮(0.747)的特征向量绝对值较高。第二主成分特征值为4.448,贡献率为23.409%,该主成分中每穗粒数(0.660)、植物碳含量(0.902)、植物氮含量(0.966)、植物磷含量(0.892)的特征向量绝对值较高。第三主成分特征值为3.430,贡献率为18.054%,该主成分中叶片干质量(0.874)、穗长(0.791)、千粒重(0.538)、种子产量(0.765)和土壤有机质(-0.649)的特征向量绝对值较高。第四主成分特征值为2.563,贡献率为13.49%,该主成分中仅穗数(-0.634)的特征向量绝对值较高。第五主成分特征值为1.149,贡献率为6.047%,该主成分中仅土壤全磷(-0.840)的特征向量绝对值较高。

2.5.2 隶属函数分析 4种草种播量处理中 Pp₂、Dc₂、Kc₂和 Et₁处理下,综合评价(D)最高,分别为0.420,0.486,0.698和0.634,表明 Pp、Dc和 Kc播量为9 g·m⁻²,Et播量为18 g·m⁻²时更适应木里矿区的生态环境(表5)。

3 讨论

青海木里矿区气候寒冷,生态系统脆弱,土壤偏碱性。长期的无规划开采加之缺乏生态保护意识,致使该区生态环境持续恶化,地质灾害隐患日益加重^[24]。植被恢复是生态治理的重要方式,早期矿区生态治理主要围绕植被恢复开展。大量研究表明,在矿区修复中,应选择适应能力强、抗逆性好、能改良土壤,且根系发达、生长速度快、成活率高、在矿区废弃地上能自然定居建植的植物^[25-27]。本研究通过建植4种不同生态草种人工草地,探究其对土壤养分含量的影响,以期加速木里矿区植被、土壤和微生物的恢复速度。然而,利用 Pp、Dc、Kc和 Et 4种生态草种建植人工草地的前提之一是选择适宜的播种量,大量研究发现播量对植物生长和土壤特性均有显著影响^[28-30]。本研究发现, Pp、Dc和 Kc播量为9 g·m⁻²时,植被地上生物量最大,同时地上生物量随着播量的增加呈先增后降的趋势,这与黄花苜蓿(*Medicago falcata*)和燕麦生产中得到的结果基本一致,即适宜的播种量可促进植物生长发育,提高植物生产力^[31-33]。 Pp和 Dc播量为9 g·m⁻²(中等密度)时,穗长和种子产量最高,与陈映霞等^[34]在种植无芒雀麦(*Bromus inermis*)时得到的研究结果一致,即中播量处理下,可促进牧草穗长和种子产量提高。中等播量下植物生长特性最佳,主要原因是适宜的播种量能使植物获得足够的

表 4 主成分特征向量及累计贡献率

Table 4 Principal component eigenvector and cumulative contribution rates

项目 Project	观测指标 Observation index	主成分 Principal component				
		PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
特征值 Eigenvalue		5.437	4.448	3.43	2.563	1.149
贡献率 Contribution rate/%		28.616	23.409	18.054	13.490	6.047
累积贡献率 Cumulative contribution rate/%		28.616	52.025	70.079	83.569	89.615
特征向量 Eigenvector	地上生物量 Above-ground biomass	0.905	-0.021	0.030	0.308	-0.177
	叶片干质量 Leaf dry weight	0.037	0.280	0.874	0.208	-0.183
	穗长 Ear length	-0.272	0.321	0.791	0.121	0.372
	穗数 Number of ears	0.587	0.292	0.226	-0.634	0.224
	每穗粒数 Number of grains per spike	0.095	0.660	0.498	-0.415	0.295
	千粒重 Thousand grain weight	-0.101	-0.475	0.538	0.366	0.491
	种子产量 Seed yield	0.317	0.052	0.765	-0.340	0.397
	植物全碳含量 Plant total carbon content	0.311	0.902	0.093	-0.085	-0.067
	植物全氮含量 Plant total nitrogen content	0.029	0.966	0.113	-0.105	0.058
	植物全磷含量 Plant total phosphorus content	-0.331	0.892	0.068	0.130	0.035
	土壤有机质含量 Soil organic matter content	0.388	0.111	-0.649	0.474	-0.110
	土壤全氮含量 Soil total nitrogen content	0.747	-0.062	-0.205	0.409	-0.135
	土壤全磷含量 Soil total phosphorus content	0.129	-0.108	-0.243	0.193	-0.840

表 5 不同播量下各草种的隶属函数值、权重以及 D 值

Table 5 Subordinate function value, weight and D value of each grass species under different sowing amount

处理 Treatments	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	$U(X_4)$	$U(X_5)$	D	排序 Sorted
Pp ₁	0.307	0.371	0.384	0.082	0.402	0.311	3
Pp ₂	0.312	1.000	0.154	0.000	0.427	0.420	1
Pp ₃	0.330	0.552	0.382	0.057	0.884	0.394	2
Dc ₁	0.000	0.322	0.082	0.699	0.598	0.246	3
Dc ₂	0.212	0.762	0.342	1.000	0.000	0.486	1
Dc ₃	0.075	0.379	0.028	0.963	0.795	0.327	2
Kc ₁	0.311	0.393	1.000	0.635	0.325	0.521	2
Kc ₂	0.658	0.570	0.711	0.859	1.000	0.698	1
Kc ₃	0.424	0.429	0.797	0.495	0.409	0.510	3
Et ₁	1.000	0.653	0.000	0.765	0.429	0.634	1
Et ₂	0.539	0.000	0.265	0.250	0.296	0.283	3
Et ₃	0.587	0.113	0.086	0.524	0.401	0.340	2
权重 Weight	0.319	0.261	0.201	0.151	0.067		

养分,但随着播种量的增加,种群间植株竞争强烈,种群内个体可利用的资源减少,从而抑制植物生长发育^[35]。在本研究中,播量最高的4个处理(Pp₃, Dc₃, Kc₃和 Et₃处理)下植株竞争强烈,地上生物量均显著低于中等播量处理(Pp₂, Dc₂, Kc₂和 Et₂处理),植株生长发育受到抑制。

另外,牧草饲用价值的高低可由植物全碳含量、植物全氮含量和植物全磷含量高低来衡量^[36],且适宜的播种量能提高牧草的产量和饲用品质。本研究发现,在3个播量下生态草种饲用品质显著不同,Pp植物全碳含量和植物全氮含量在中播量处

理下显著高于高播量处理,与林志玲等^[37]研究结果相似。这些结果表明Pp播量为9 g·m⁻²(中等密度)时能合成较高的光合同化产物,但随播种量增大,植物对土壤养分需求增多,土壤养分竞争激烈,养分的可获得性降低,养分吸收被抑制,导致植物全碳含量、植物全氮含量降低^[38-41]。Dc₂和 Kc₂处理下土壤有机质含量、土壤全氮含量和土壤全磷含量较高,与刘文谨等^[42]研究结果相似,即同一草种不同播量处理,土壤理化性质也存在显著差异。另外, Dc₂和 Kc₂处理下植物生长状况较好,同时土壤养分含量也最高,可能是因为植物长势越好,地表盖度越大,地表径流导致的土壤养分流失越少;同时,植物凋落物输入量越多,土壤有机质含量越高。

通过主成分分析和隶属函数综合评价能解决指标过多而无法对所有指标进行分析的问题^[43]。本试验利用该方法发现Pp、Dc和 Kc在9 g·m⁻², Et在18 g·m⁻²的播量下植物地上生物量高,生长快、饲草品质优,同时土壤改良效果好。草种适应性和群落稳定性是一个长期评价的结果,本研究受限于时间,仅探讨了建植第3年的植物长势和土壤修复效果,相关结论只是初步结果。在未来研究中,一方面应在更大地域范围内开展多点试验或长期定位监测,明确不同矿区土壤和播种方式下的最佳播量。另一方面,随着分子生物学和组学技术的发展,通过宏基因组学和土壤微生物组学等手段,可深入解析播种量对根际微生物系统的影响,包括它们

如何参与土壤碳氮循环以及如何调节种间竞争,这些研究将有助于在高寒矿区等相对脆弱的生态区构建高效、可持续的人工草地。

4 结论

播量为 $9\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, Pp、Dc 和 Kc 建植的人工草地土壤养分含量高, 植物生长状况好。在该播量下, 植物地上生物量最高, 分别为 $296.45\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, $224.32\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $236.35\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 同时该播量下植物全碳含量、植物全氮含量较高。Et 播量为 $18\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 其建植的人工草地土壤养分含量高, 生长状况更好。该处理下, 植物地上生物量为 $356.24\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 显著高于其他处理 ($P<0.05$), 同时该播量下植物全碳、全氮含量较高。主成分分析和隶属函数综合评价结果表明, 青海草地早熟禾、发草和洽草播量为 $9\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 、麦宾草播量为 $18\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 为最佳播量, 显著提高了木里矿区人工草地生产力及土壤养分含量, 为高寒矿区生态修复和人工草地建植提供了科学依据和数据支撑。

参考文献

- [1] 王佟, 杜斌, 李聪聪, 等. 高原高寒煤矿区生态环境修复治理模式与关键技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 230-244
WANG T, DU B, LI C C, et al. Ecological environment rehabilitation management model and key technologies in plateau alpine coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 230-244
- [2] 文怀军, 邵龙义, 李永红, 等. 青海省天峻县木里煤田聚乎更矿区构造轮廓和地层格架[J]. 地质通报, 2011, 30(12): 1823-1828
WEN H J, SHAO L Y, LI Y H, et al. Structure and stratigraphy of the Juhugeng coal district at Muli, Tianjun County, Qinghai Province[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(12): 1823-1828
- [3] LI X L, GAO J, ZHANG J, et al. Adaptive strategies to overcome challenges in vegetation restoration to coalmine wasteland in a frigid alpine setting[J]. Catena, 2019, 182(1): 104142
- [4] 南维鸽, 焦磊, 王浩, 等. 高寒矿区人工建植草地和自然草皮移植生态修复效应[J]. 草业科学, 2023, 40(12): 3018-3029
NAN W G, JIAO L, WANG H, et al. Ecological restoration effect of artificial grassland and turf transplantation in alpine mining area on plateau[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(12): 3018-3029
- [5] GUSEV E M, NASONOVA O N, KOVALEV E E. Change in Water availability in territories of river basins located in different regions of the world due to possible climate changes[J]. Arid Ecosystems, 2021, 11(3): 221-230
- [6] NAHID J, JAVAD M, REZA O, et al. Effects of micro-climatic conditions on soil properties along a climate gradient in oak forests, west of Iran: Emphasizing phosphatase and urease enzyme activity[J]. Catena, 2023, 224: 106960
- [7] SCHUTZ C, CHRISTIE S, HERMAN B. Site relationships for some wood properties of pine species in plantation forests of southern africa[J]. South African Forestry Journal, 2010, 156(1): 1-6
- [8] ZERIZGHI T, GUO Q, TIAN L, et al. An integrated approach to quantify ecological and human health risks of soil heavy metal contamination around coal mining area[J]. The Science of the Total Environment, 2021, 814(3): 152653
- [9] KRAUSS S L, SINCLAIR E A, BUSSELL J D, et al. An ecological genetic delineation of local seed-source provenance for ecological restoration[J]. Ecology and Evolution, 2013, 3(7): 2138-2149
- [10] JOCHIMSEN M E. Vegetation development and species assemblages in a long-term reclamation project on mine spoil[J]. Ecological Engineering, 2001, 17(2): 187-198
- [11] PETERS T H. Mine Tailings Reclamation. Inco limited's experience with the reclaiming of sulphide tailings in the sudbury area, ontario, canada[J]. Springer Berlin Heidelberg, 1988, 156(4): 152-165
- [12] LYU L Y, LIU Q Q, HE M H, et al. Screening suitable ecological grasses and the seeding rate in the Muli Mining area[J]. Sustainability, 2024, 16(23): 10184
- [13] 庞景豪, 梁桑, 刘亚斌, 等. 恢复年限对高寒金属矿山排土场植物多样性和土壤化学特性的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 110-120
PANG J H, LIANG S, LIU Y B, et al. Influence of recovery years on plant diversity and soil chemical properties for alpine metal mine dumps[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 110-120
- [14] 谢乐乐. 三江源区“黑土山”退化草地栽培草种适应性评价[D]. 西宁: 青海大学, 2021: 8-12
XIE L L. Adaptability evaluation of cultivation grass seed in black soil mountain of degraded grassland in the source area of three rivers[D]. Xining: Qinghai University, 2021: 8-12
- [15] 马利利, 蒋福祯, 马玉寿, 等. 粒径配比、施肥量以及播量耦合对矿区煤矸石基质的改良效果[J]. 草业学报, 2025, 34(3): 71-84
MA L L, JIANG F Z, MA Y S, et al. Effect of particle size ratio, fertilizer application amount, and seeding rate combinations coal gangue matrix properties in restoration of a mining area[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2025, 34(3): 71-84
- [16] 王彦龙, 马玉寿, 邓波, 等. 行距和播量对麦宾草生产性能的影响[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2015, 45(3): 7-9
WANG Y L, MA Y S, DENG B, et al. Effect of row spacing and seeding rate on the forage and seed yield of *Elymus tangutorum*[J]. Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences, 2015, 45(3): 7-9
- [17] 邢浩, 乌日汗, 于红博, 等. 锡林郭勒草原植物叶片碳、氮、磷

- 化学计量特征及其影响因子[J]. 草地学报, 2024, 32(12): 3774-3787
- XING H, WU R H, YU H B, et al. Stoichiometric characteristics and influencing factors of carbon, nitrogen and phosphorus in leaves of steppe plants in Xilingol[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(12): 3774-3787
- [18] 成琳, 郭巧生, 朱再标, 等. “根际土-沙氏鹿茸草-寄主植物”连续体碳氮磷生态化学计量特征及其耦合关系[J]. 生态学报, 2024, 44(18): 8326-8337
- CHENG L, GUO Q S, ZHU Z B, et al. Ecological stoichiometric characteristics and the coupling relationship of carbon, nitrogen, and phosphorus in rhizosphere soil-*Monochasma savatieri*-the host continuum[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18): 8326-8337
- [19] 赵娜, 李国清, 李国瑜, 等. 绿肥轮作对谷子农艺性状、产量及土壤养分的影响[J]. 中国农学通报, 2025, 41(7): 15-21
- ZHAO N, LI G Q, LI G Y, et al. Effects of green fertilizer rotation on agronomic traits, yield and soil nutrients of millet[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2025, 41(7): 15-21
- [20] 李春燕, 张然然, 祝海燕, 等. 盐胁迫对紫花苜蓿幼苗生理特性的影响及苗期抗盐性评价[J]. 草地学报, 2025, 33(2): 516-523
- LI C Y, ZHANG R R, ZHU H Y, et al. Effects of salt stress on physiological characteristics of alfalfa seedlings and evaluation of salt tolerance at seedling stage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(2): 516-523
- [21] 张心怡, 何菲菲, 张亮, 等. 不同披碱草种质对低氮胁迫的形态和生理响应分析及耐低氮性评价[J]. 草地学报, 2024, 32(7): 2128-2142
- ZHANG X Y, HE F F, ZHANG L, et al. Analysis of the morphology and physiological response of different *Elymus dahuricus* germplasm under low nitrogen stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(7): 2128-2142
- [22] 吴文琪, 徐成体, 蒲小剑, 等. 柴达木轻度盐碱地不同燕麦品种生产性能比较研究[J]. 草地学报, 2025, 33(5): 1497-1509
- WU W Q, XU C T, PU X J, et al. Comparative study on production performance of different oat varieties in mild saline-alkali land of Qaidam[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(5): 1497-1509
- [23] 周涛, 卢蕊, 刘宁芳, 等. 不同来源老鸦谷种质牧草产量与品质性状的分析与评价[J]. 草地学报, 2023, 31(8): 2369-2376
- ZHOU T, LU R, LIU N F, et al. Analysis and evaluation of forage yield and quality on amaranthus cruentus germplasm from different origins[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(8): 2369-2376
- [24] 张大春, 刘晓雪, 唐小容. 浅析高海拔、高寒环境对青海木里煤田露天矿区开采的影响[J]. 四川地质学报, 2020, 40(1): 75-79
- ZHANG D C, LIU X X, TANG X R, et al. Simple analysis of influence of alpine cold environment on open-pit mining of the Muli coal field in Qinghai[J]. Acta Geologica Sichuan, 2020, 40(1): 75-79
- [25] GUO D G, ZHAO B Q, SHANGGUAN T L, et al. Dynamic Parameters of plant communities partially reflect the soil quality improvement in eco-reclamation area of an opencast coal mine[J]. Clean-Soil Air Water, 2013, 41(10): 1-9
- [26] 李娟, 赵竞英, 陈伟强. 矿区废弃地复垦与生态环境重建[J]. 国土与自然资源研究, 2004(1): 27-28
- LI J, ZHAO J Y, CHEN W Q, et al. Mining wasteland and its ecological restoration and reconstruction[J]. Territory & Natural Resources Study, 2004(1): 27-28
- [27] 赵陟峰, 郭建斌, 景峰, 等. 山西葛铺煤矿矿区废弃地植被恢复与重建技术[J]. 水土保持研究, 2009, 16(2): 92-94, 100
- ZHAO Z F, GUO J B, JING F, et al. Study on re-vegetation in mining wasteland of Gepu core mine, Shanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(2): 92-94, 100
- [28] 郁凯, 赵小慧, 何苏南, 等. 播量和行距对沿海滩涂盐地碱蓬生长发育及降盐改土效应的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(6): 250-256
- YU K, ZHAO X H, HE S N, et al. Effects of seeding rate and row spacing on growth of *Suaeda salsa* and salt reduction and soil improvement in tidal flat[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(6): 250-256
- [29] 王晓, 毕银丽, 王义, 等. 沙棘林密度和丛枝菌根真菌接种对林下植物和土壤性状的影响[J]. 林业科学, 2023, 59(10): 138-149
- WANG X, BI Y L, WANG Y, et al. Effects of planting density of *Hippophae rhamnoides* and inoculation of amf on understory vegetation growth and soil improvement[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(10): 138-149
- [30] 张静, 郭振升, 皇甫自起, 等. 播期播量对国审小麦品种郑麦1342产量的影响[J]. 中国种业, 2023(11): 71-76
- ZHANG J, GUO Z S, HUANG F Z Q, et al. Effects of sowing date and sowing amount on yield of a nationally approved wheat variety Zhengmai 1342[J]. China Seed Industry, 2023, (11): 71-76
- [31] 古琛, 刘佳月, 杜宇凡, 等. 播量对黄花苜蓿草产量与种子生产的影响[J]. 中国草地学报, 2016, 38(2): 86-91
- GU C, LIU J Y, DU Y F, et al. Effects of seeding rates on forage yields and seed productions of *Medicago falcata*[J]. Chinese Journal of Grassland, 2016, 38(2): 86-91
- [32] 景芳, 南铭, 刘彦明, 等. 品种和种植密度对燕麦饲草产量、品质和病害的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(10): 3174-3184
- JING F, NAN M, LIU Y M, et al. Effects of variety and planting density on yield, quality and disease of forage oat[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(10): 3174-3184
- [33] 王雪莱, 郭潇潇, 于崧, 等. 不同密度水平对裸燕麦(*Avena nuda*)光合特性、产量及品质的影响[J]. 分子植物育种, 2020, 18(23): 7943-7952
- WANG X L, GUO X X, YU S, et al. Effects of different densities levels on photosynthetic characteristics, yield and quality of naked oat(*Avena nuda*)[J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(23): 7943-7952

- [34] 陈映霞,杜雨,于秀明,等. 无芒雀麦幼穗分化及种子产量对种植密度的响应[J]. 草业科学,2023,40(5):1358-1367
CHEN Y X, DU Y, YU X M, et al. Response of young spike differentiation and seed yield to planting density in *Bromus inermis*[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(5):1358-1367
- [35] 王旭成,王星,王琴,等. 行距和播量对沙芦草种子产量及其构成因子的影响[J]. 草地学报,2023,31(9):2882-2889
WANG X C, WANG X, WANG Q, et al. Effects of row spacing and seeding rate on seed yield and its components of *Agropyron mongolicum* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(9): 2882-2889
- [36] 汪精海,齐广平,康燕霞,等. 干旱半干旱地区紫花苜蓿营养品质对水分胁迫的响应[J]. 草业科学, 2017, 34(1):112-118
WANG J H, QI G P, KANG Y X, et al. Effects of water stress on nutritional quality of alfalfa in arid and semiarid areas [J]. Pratacultural Science, 2017, 34(1):112-118
- [37] 林志玲,高阳,朱铁霞,等. 施氮量和密度对燕麦叶片C、N、P化学计量特征的影响[J]. 草业科学, 2020, 37(6):1107-1114
LIN Z L, GAO Y, ZHU T X, et al. Effects of nitrogen application rate and density on the stoichiometric characteristics of C, N, and P in oat leaves[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(6): 1107-1114
- [38] 郭子武,陈双林,杨清平,等. 密度对四季竹叶片C、N、P化学计量和养分重吸收特征的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(4):893-899
GUO Z W, CHEN S L, YANG Q P, et al. Effects of stand density on *Oligostachyum lubricum* leaf carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and nutrient resorption [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(4):893-899
- [39] 冯鹏,温定英,孙启忠. 种植密度对玉米产量及青贮品质的影响[J]. 草业科学,2011,28(12):2203-2208
FENG P, WEN D Y, SUN Q Z, et al. Effect of plant density on yield and quality of silage corn[J]. Pratacultural Science, 2011, 28(12):2203-2208
- [40] 刘信宝,吴森,赵照荣,等. 种植密度对桑田冬闲期种植牧草品质的影响[J]. 江苏蚕业,2014,36(3):13-16
LIU X B, WU M, ZHAO Z R, et al. Effects of planting density on forage quality in winter fallow period of mulberry field [J]. Jiangsu Sericulture, 2014, 36(3):13-16
- [41] 卢发光. 种植密度和施氮量对沿海盐碱地紫花苜蓿生长、生理、产量和品质的影响[D]. 扬州:扬州大学,2022:73-78
LU F G. Effects of planting density and nitrogen application rate on growth, physiology, yield and quality of alfalfa in coastal saline-aikali land [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022:73-78
- [42] 刘文谨,蒋福祯,祁凯斌,等. 不同施肥量和播种量对高寒矿区植被恢复和土壤质量的影响及综合评价[J]. 草业学报, 2024, 12(1): 1-13
LIU W J, JIANG F Z, QI K B, et al. Effects of different fertilization and sowing amounts on vegetation restoration and soil quality in alpine mining areas and comprehensive evaluation [J]. Acta Pratacultural Sinica, 2024, 12(1):1-13
- [43] 李东,黄耀,吴琴,等. 青藏高原高寒草甸生态系统土壤有机碳动态模拟研究[J]. 草业学报,2010,19(2):160-168
LI D, HUANG Y, WU Q, et al. Modeling dynamics of soil organic carbon in an alpine meadow ecosystem on Qinghai-Tibetan Plateau using the Century model [J]. Acta Pratacultural Sinica, 2010, 19(2):160-168

(责任编辑 付 宸)