

施肥和混播对退化草地土壤和牧草产量的影响¹

方玉凤¹, 曹志伟^{1*}, 孙洪升², 韩勤¹, 闫敦梁¹, 温宝阳¹, 任秀彬¹

(1.黑龙江省林业科学院齐齐哈尔分院, 黑龙江 齐齐哈尔 161005;

2.杜尔伯特蒙古族自治县林业和草原局, 黑龙江 大庆 166200)

摘要: [目的] 研究施肥和混播牧草对松嫩平原黑龙江省西部退化草地土壤养分和牧草产量的影响, 探索本地区天然退化草地修复的最佳施肥量和牧草混播比例。[方法] 试验以黑龙江省西部天然轻度退化草地为研究对象, 设 6 个水平氮磷钾施肥组合、2 种豆禾牧草(沙打旺 *Astragalus adsurgens* Pall. 和披碱草 *Elymus dahuricus* Turcz.) 混播比例, 探讨施肥和混播对土壤养分变化及对牧草产量的影响。[结果] 在确定混播比例的情况下, 施肥能显著提高土壤速效养分含量和牧草产量。浅层土壤养分变化受施肥和混播的影响较大, 深层土壤受影响小。施肥、混播及二者交互对土壤速效氮含量影响显著 ($p < 0.05$), 0-10 cm 土层速效氮、速效磷含量的变化趋势与氮、磷添加水平的高低基本一致, 豆禾 1:2 混播的 0-10 cm 土层全氮、速效氮、速效磷含量高于同一施肥水平下的豆禾 2:2 混播。 A_6 ($N_{300}P_{200}K_{90}$) 处理的电导率显著高于其他处理 ($p < 0.05$)。豆禾 2:2 混播+N150P0K180、豆禾 1:2 混播+N₃₀₀P₂₀₀K₉₀ 的 1 m² 样方地上生物量分别为 290.68 g 与 254.31 g, 是各自混播比例下最高的。[结论] 综合考虑牧草产量及土壤养分变化情况, 豆禾 2:2 混播, N 施量以 150 kg/hm² 较适宜。

关键词: 松嫩草原; 退化草地; 施肥; 豆禾混播; 土壤养分; 牧草产量

中图分类号: S812.2

该论文已发表于《水土保持通报》2023 年第 1 期。

[1] 方玉凤, 曹志伟, 孙洪升等. 施肥和混播对松嫩平原退化草地土壤和牧草产量的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(01): 16-23. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.01.003.

Effects of fertilization and mixed sowing on soil and pasture yield in degraded grassland

FANG Yufeng¹, CAO Zhiwei^{1*}, SUN Hongsheng², HAN Qin¹, YAN Dunliang¹, WEN Baoyang¹, REN Xiubin¹

(1. Qiqihar Branch Heilongjiang Academy of Forestry Sciences, Qiqihar, Heilongjiang 161005;

2. Forestry and Grassland Administration of Duer Bert Mongolian National Minority Autonomous County, Daqing, Heilongjiang 166200, China)

Abstract: [Objective] The effects of fertilization and mixed sowing on soil nutrients and pasture yield in degraded grassland of Songnen Plain in western Heilongjiang province were studied in order to determine the optimal amount of fertilization and the ratio of legume to grass in mixed sowing for restoration of natural degraded grassland in this area. [Methods] The experiment took the natural light degraded grassland in Songnen Plain of western Heilongjiang province as the research object, six different fertilization treatments and two mixed sowing ratios of legume and grass pasture seed (*Astragalus adsurgens* Pall. and *Elymus dahuricus* Turcz.) were set up to explore the effects of fertilization and mixed sowing on soil nutrient changes and pasture yield. [Results] Fertilization could

¹ 基金项目: 黑龙江省省属科研院所科研业务费项目 (编号: CZKYF2020C019)

作者简介: 第一作者方玉凤 (1988—), 女, 黑龙江省富裕县人, 硕士, 工程师。主要研究方向为草原生态与修复。Email: qqhrfyf@163.com, 联系电话 15904523293

通信作者: 曹志伟 (1965—), 男, 黑龙江省拜泉县人, 研究员级高级工程师。主要研究方向为草原生态与修复、森林食品资源培育技术。Email: cvw898@163.com

significantly improve available nutrients and pasture yield under the condition of determining the ratio of mixed sowing. The changes of soil nutrients in shallow layer were greatly affected by fertilization and mixed sowing than in deep layer. Fertilization, mixed sowing and their interaction had significant effects on the content of soil available nitrogen ($p < 0.05$). The variation trend of available nitrogen and available phosphorus in 0-10 cm soil layer were basically consistent with addition of nitrogen and phosphorus. The contents of total nitrogen, available nitrogen and available phosphorus in 0-10 cm soil layer of legume-grass in the 1:2 configuration mixed sowing were higher than in the 2:2 configuration under the same fertilization level. The conductivity of A_6 ($N_{300}P_{200}K_{90}$) was significantly higher than other treatments ($p < 0.05$). The aboveground biomass in 1 m² quadrat of legume-grass in the 2:2 configuration+N150P0K180 and legume-grass in the 1:2 configuration+N₃₀₀P₂₀₀K₉₀ achieved 290.68 g and 254.31 g, were the highest respectively. [Conclusion] Considering forage yield and changes of soil nutrient, legume-grass in the 2:2 configuration mixed sowing, and fertilizer application of 150kg/hm² N can be recommended, based on these results.

Key words: Songnen Plain; degraded grassland; fertilizer; legume-grass mixed sowing; soil nutrient; pasture yield

草原是中国的主要自然景观之一, 约占国土面积的 40%^{错误!未找到引用源。}, 在地球陆地生态系统碳、氮循环中发挥着重要作用^{错误!未找到引用源。}。草地养分含量除受环境影响外, 主要受植被类型、草地利用方式等因素影响显著^{错误!未找到引用源。}。近年来, 我国草地退化严重, 李辉等分析了 1982~2015 年间气候变化和人类活动对内蒙古草原的影响, 认为人类活动(如牧畜增加、耕种等)加速了草地退化^{错误!未找到引用源。}。在草地生态系统的退化中, 土壤的退化要滞后于植物的退化, 是比植物退化更加严重的退化, 退化后的恢复时间也要远远长于植物的恢复时间。大量研究表明草地的退化导致土壤有机质含量减少、影响牧草生产力^{错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。}。目前对于退化草地的修复技术主要有施肥、混播、切根、围栏等。适当施肥是保证草地生态系统物质输入与输出平衡、实现可持续生产的重要措施^{错误!未找到引用源。}。王玲等对青海湖区域轻度退化高寒草原进行的研究表明, 氮磷合施显著提高了牧草品质和土壤养分, 氮素施量为 70~140 kg/hm² 时经济效益最佳^{错误!未找到引用源。}; 黄军等在新疆退化草甸进行的研究表明, 施肥量 225 kg/hm² 对退化草甸草地恢复具有明显效果^{错误!未找到引用源。}; 王长庭等在三江源区研究不同施肥梯度对高寒矮嵩草草甸群落的影响, 认为 30 g/m² 施肥量是该区域最佳施肥水平^{错误!未找到引用源。}。

在混播方式中, 豆禾混播比单播一种牧草更能充分利用土壤养分^{错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。}, 主要原因是豆科植物能固定氮素, 禾本科等喜氮植物可利用豆科植物固定的氮素^{错误!未找到引用源。}, 并且豆禾混播在地上空间利用上也具有优势, 二者种间竞争较小^{错误!未找到引用源。}。豆科牧草的固氮能力主要受土壤含氮量、豆禾比例等因素的影响^{错误!未找到引用源。}。刘明健等在科尔沁沙地进行紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)、无芒麦雀(*Bromus inermis* Leyss.)混播对土壤碳氮含量的影响试验, 结果表明豆禾 1:2、1:1 混播比例能显著提高浅层土壤全氮含量^{错误!未找到引用源。}; 李昂等在甘肃沿黄灌区进行的试验表明, 混播披碱草+苜蓿可提高土壤肥力, 改善土壤质量^{错误!未找到引用源。}; 霍雅媛等在甘肃省进行不同豆禾牧草混播的试验结果表明, 红豆草(*Onobrychis viciifolia* Scop.)与无芒麻雀豆禾比 4:6 作用效果最好, 土壤有机质和速效氮较豆科单播分别增加了 23.1%和 20.1%^{错误!未找到引用源。}。目前开展的研究基本都是侧重于单一因素(即施肥或豆禾牧草混播)对退化草地土壤养分及

牧草产量影响的研究,对于二者互作在提升退化草地土壤肥力及牧草产量的研究较少,鉴于此,特开展施肥和混播对退化草地修复技术的研究。

松嫩平原草原区位于黑龙江省西部,以温性草甸草原和低地草甸为主要草地类型,处于温带半湿润-半干旱过渡带,生态较脆弱。2020 年黑龙江省草原监测报告显示,松嫩平原草原区受自然条件和人为活动影响,已普遍存在退化现象,土壤养分流失严重。关于松嫩平原退化草地修复的研究,如李洪影在松嫩平原西部混播一年生、多年生牧草配合玉米秸秆覆盖的生物措施进行退化盐碱草地改良研究^{错误!未找到引用源。};汤洁等在吉林西部松嫩平原南,引进黄花草木樨(*Melilotus officinalis* (L.) Pall.) 进行土壤改良^{错误!未找到引用源。};李强采用翻耙撒播野大麦、打垄播种水稗草、扦插玉米秸秆和围栏封育等措施对松嫩退化草地进行修复^{错误!未找到引用源。}。但有关于施肥和混播应用于该地区进行退化草地修复的研究鲜有报道。本试验研究在对松嫩草原天然轻度退化草地进行围封禁牧的前提下,设置 6 个梯度的施肥处理、2 种豆禾混播比例混播试验,分析土壤养分在不同处理下的含量变化情况,研究施肥与豆禾混播互作对黑龙江省西部松嫩草原土壤养分变化特征的影响,探索本地区天然退化草地修复的最佳施肥量和牧草混播比例。以期对黑龙江省西部松嫩草原天然退化草地的保护修复提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于黑龙江省大庆市杜尔伯特蒙古族自治县胡吉吐莫镇赛罕他拉村, 124°12'41.66"~124°12'51.55"E, 46°30'3.57"~46°30'26.90"N。该区域处于松嫩平原沙地的典型草原带内,属于温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温 3.6~4.4℃,年降水量 428mm。无霜期 148 天,年均平均风速 2.5~4.2m/s。土壤为草甸土、风沙土、轻度盐碱土。

试验地属于天然打草场,长期处于围封禁牧管理,每年秋季进行刈割,打草量为 80~100 kg/666 m²。通过近两年的实地调查,已表现为轻度退化的典型温性草甸草原。优势种为糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、虎尾草(*Chloris virgata*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*);伴生种为莎草(*Cyperus rotundus*)、平车前(*Plantago depressa*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、多叶棘豆(*Oxytropis myriophylla*)等;偶见种为细叶胡枝子(*Lespedeza hedysaroides*),芦苇(*Phragmites australis*)、星星草(*Puccinellia tenuiflora*)等;杂类草有野韭(*Allium ramosum*)、叉分蓼(*Polygonum divaricatum*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)、野古草(*Arundinella anomala*)、知母(*Anemarrhena asphodeloides*)、问荆(*Equisetum arvense*)、展枝唐松草(*Thalictrum squarrosum*)、旱麦瓶草(*Silene jensenseensis*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、黄花菜(*Hemerocallis minor*)、米口袋(*Gueldenstaedtia verna*)等。

1.2 试验设计

2021 年 5 月末,在试验区进行施肥与牧草混播试验,采用裂区设计,主区为施肥处理,副区为混播处

理。每个小区面积 666 m²。施肥设计采用 6 种氮磷钾均匀组合^{错误:未找到引用源。}，分别记为 A₁~A₆ 施肥处理，如 A₁ 处理为 N₅₀P₄₀K₄₅，则表示 N、P₂O₅、K₂O 用量分别为 50kg/hm²、40 kg/hm²、45kg/hm²。肥料选用尿素（N 46%）、磷酸二铵（N 18%、P₂O₅ 46%）和硫酸钾（K₂O 60%），先根据 P₂O₅ 需肥量计算磷酸二铵实际施用量，用 N 需肥量减去磷酸二铵中含 N 量，再换算成尿素实际施用量。

选用本地区适应性较强的优良乡土豆科牧草沙打旺（*Astragalus adsurgens* Pall.）和禾本科牧草披碱草（*Elymus dahuricus* Turcz.）进行草籽混播处理，沙打旺单播播种量为 15kg/hm²，披碱草单播播种量为 30 kg/hm²，两种混播处理在总量上进行区分：豆禾 2:2 混播处理（B₁ 为对应草种单播播种量的 50%，即沙打旺 7.5kg/hm²+披碱草 15kg/hm²）、豆禾 1:2 混播处理（B₂ 为对应草种单播播种量的 33%和 67%，即沙打旺 5kg/hm²+披碱草 20kg/hm²）；两种混播处理的施肥方式一致，施肥试验结合播种一次性施入，使用河北辛帝王 24 行谷物播种机，开沟深度 5 cm，行距 15 cm，两种混播方式均进行空白对照处理，具体见表 1。

表 1 施肥与混播设计

主区（施肥处理）	副区（混播处理）	处理编号
A ₁ (N50P40 K45)	B ₁ (豆禾 2:2 混播)	A ₁ B ₁ (豆禾 2:2 混播+N50P40 K45)
	B ₂ (豆禾 1:2 混播)	A ₁ B ₂ (豆禾 1:2 混播+N50P40 K45)
A ₂ (N100P240K225)	B ₁ (豆禾 2:2 混播)	A ₂ B ₁ (豆禾 2:2 混播+N100P240K225)
	B ₂ (豆禾 1:2 混播)	A ₂ B ₂ (豆禾 1:2 混播+N100P240K225)
A ₃ (N150P0K180)	B ₁ (豆禾 2:2 混播)	A ₃ B ₁ (豆禾 2:2 混播+N150P0K180)
	B ₂ (豆禾 1:2 混播)	A ₃ B ₂ (豆禾 1:2 混播+N150P0K180)
A ₄ (N200 P120 K0)	B ₁ (豆禾 2:2 混播)	A ₄ B ₁ (豆禾 2:2 混播+N200 P120 K0)
	B ₂ (豆禾 1:2 混播)	A ₄ B ₂ (豆禾 1:2 混播+N200 P120 K0)
A ₅ (N250P80K270)	B ₁ (豆禾 2:2 混播)	A ₅ B ₁ (豆禾 2:2 混播+N250P80K270)
	B ₂ (豆禾 1:2 混播)	A ₅ B ₂ (豆禾 1:2 混播+N250P80K270)
A ₆ (N300P200 K90)	B ₁ (豆禾 2:2 混播)	A ₆ B ₁ (豆禾 2:2 混播+N300P200 K90)
	B ₂ (豆禾 1:2 混播)	A ₆ B ₂ (豆禾 1:2 混播+N300P200 K90)
A ₀ (对照不施肥)	B ₁ (豆禾 2:2 混播)	A ₀ B ₁ (豆禾 2:2 混播+对照不施肥)
	B ₂ (豆禾 1:2 混播)	A ₀ B ₂ (豆禾 1:2 混播+对照不施肥)

1.3 样地调查与分析方法

根据当地气候特征，2021 年 9 月中旬进行样地调查，在每个试验小区内随机选取 3 个立地类型、土壤条件及植物群落基本一致的样地设定样方，避免边界效应，样方为 1m ×1m。进行植被调查，对 1 m²样方内地上部牧草齐地面刈割，立即称重，之后带回实验室，105℃烘箱杀青 30min，65℃烘干至恒重、称重。在此样方挖土壤剖面，分为三个土层，0-10cm、10-20cm 和 20-30cm，用环刀在不同土层的剖面进行取土，用以计算土壤容重，用土钻在各土层取土壤样品，带回实验室进行理化性质的测定。

理化性质测定方法参照鲍士旦《土壤农化分析》^{错误:未找到引用源。}一书。土壤含水率、容重测定采用烘干法；土壤 pH 值、电导率采用液土比 5:1，pH 仪、电导率仪测定；土壤有机质采用 4 mol/L 盐酸浸提，碳氮分

析仪测定；土壤全氮采用凯氏定氮法；速效氮采用氢氧化钠扩散法；速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗显色法。

1.4 数据处理

采用 WPS Office 表格进行数据处理和绘图，用 IBM SPSS Statistics 22.0 进行数据差异性分析，Two-Way ANOVA 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 施肥和混播牧草对土壤全氮、有机质的影响

0-10cm 土层中，两种混播处理下，均为 A₄ 的全氮含量最高，与 A₁、A₀ 处理存在显著差异 ($p < 0.05$)；10-20cm 土层中，B₁、B₂ 混播处理下，分别为 A₅、A₆ 的全氮含量最高，均与 A₁、A₂、A₃、A₀ 处理存在显著差异 ($p < 0.05$)；20-30cm 土层中，两种混播处理下，均为 A₆ 的全氮含量最高，A₆B₁ 与 A₄B₁、A₀B₁ 处理，A₆B₂ 与 A₁B₂ 处理存在显著差异 ($p < 0.05$)。整体来看，在同一施肥水平下，B₂ 处理的各土层全氮含量高于 B₁ 处理。

有机质含量方面，0-10cm 土层中，B₁ 处理下，A₆ 的有机质含量最高，与其他处理存在显著差异 ($p < 0.05$)，B₂ 处理下，A₅ 的有机质含量最高，与 A₀ 处理存在显著差异 ($p < 0.05$)；10-20cm 土层中，B₁、B₂ 混播处理下，均为 A₆ 的有机质含量最高，与 A₃、A₀ 处理存在显著差异 ($p < 0.05$)；20-30cm 土层中，B₁、B₂ 处理下，分别为 A₁、A₃ 的有机质含量最高，各处理之间差异未达到显著水平。

各处理全氮、有机质含量在各土层中的变化规律一致，均随土层深度的增加呈现减少的趋势，0-10 cm 土层中的全氮、有机质含量最高，20-30cm 土层中的全氮、有机质含量最低。

表 2 施肥和混播对土壤全氮、有机质的影响

处理	全氮含量 (g·kg ⁻¹)			有机质含量 (%)		
	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
A ₁ B ₁	0.59±0.038c	0.51±0.010ef	0.53±0.065bcd	1.04±0.05bcd	1.05±0.03abc	0.85±0.30a
A ₂ B ₁	0.75±0.003abc	0.57±0.023def	0.42±0.285bcd	1.19±0.22bcd	1.06±0.13abc	0.71±0.02a
A ₃ B ₁	0.85±0.130ab	0.51±0.145f	0.48±0.175bcd	0.99±0.14cd	0.92±0.32bc	0.77±0.09a
A ₄ B ₁	0.96±0.062a	0.64±0.055cdef	0.37±0.045cd	1.16±0.10bcd	1.04±0.03abc	0.63±0.08a
A ₅ B ₁	0.79±0.163abc	0.79±0.098abc	0.57±0.093abc	1.18bcd	0.99±0.05abc	0.59±0.46a
A ₆ B ₁	0.81±0.003abc	0.75±0.019abcd	0.64±0.174ab	1.68±0.80a	1.25±0.05a	0.82±0.07a
A ₀ B ₁	0.61±0.138c	0.55±0.105ef	0.27±0.028d	0.86±0.02d	0.80±0.04c	0.84±0.06a
A ₁ B ₂	0.68±0.080bc	0.53±0.088ef	0.52±0.106bcd	1.05±0.06bcd	0.86±0.34bc	0.53±0.43a
A ₂ B ₂	0.94±0.134a	0.70±0.084bcde	0.56±0.230abc	1.20±0.03bcd	1.09±0.10abc	0.46±0.46a
A ₃ B ₂	0.82±0.071abc	0.68±0.163bcdef	0.66±0.190ab	1.14±0.18bcd	0.94±0.09bc	0.97±0.21a

A ₄ B ₂	0.96±0.080a	0.85±0.058ab	0.60±0.012abc	1.12±0.02bcd	1.13±0.11ab	0.94±0.03a
A ₅ B ₂	0.96±0.194a	0.87±0.166ab	0.60±0.034abc	1.40±0.39ab	1.03±0.12abc	0.88±0.19a
A ₆ B ₂	0.95±0.134a	0.90±0.071a	0.81±0.088a	1.24±0.13bc	1.29±0.12a	0.96±0.06a
A ₀ B ₂	0.64±0.021bc	0.57±0.033def	0.54±0.032abcd	0.96±0.40cd	0.80±0.14c	0.52±0.47a

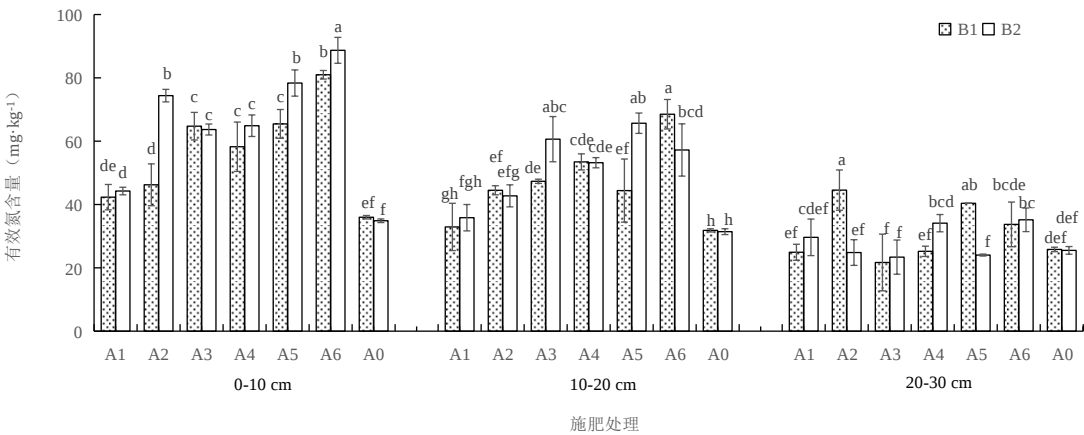
注：数据为均值±标准差；不同小写字母表示同列数据不同处理之间差异显著（ $p<0.05$ ）。

2.2 施肥和混播对土壤速效氮、磷的影响

图 1 表示的是施肥和混播对土壤速效氮、速效磷的影响，这是生育期内植物可以直接吸收利用的养分。可以看出，土壤速效氮、磷含量的整体变化随着土层的增加有降低的趋势。0-30cm 土层速效氮、速效磷含量的变化趋势与氮、磷添加的变化基本一致，尤其是 0-10cm 土层的变化趋势更加明显，土壤速效氮、速效磷含量随着氮、磷添加量的增加而增加。即 A₆、A₁ 处理的施氮量分别是最高和最低的，为 300 kg/hm² 和 50kg/hm²，0-10cm 土层速效氮含量分别是各自混播处理中最高和最低的（空白处理 A₀ 除外）；A₂ 处理施磷量最高，为 240kg/hm²，A₃ 处理未设置磷添加，速效磷含量在该混播处理中分别表现为最高和最低（空白处理 A₀ 除外）。

对 0-10cm 土层养分进行方差分析，由表 3 可知，施肥对土壤全氮、有机质、速效氮磷含量有显著影响（ $p<0.01$ ），混播对土壤全氮、速效氮含量有显著影响（ $p<0.05$ ），二者交互作用对速效氮含量影响显著（ $p<0.001$ ）。

0-10cm 土层中，B₁ 处理各施肥水平速效氮含量较空白处理 A₀ 高出 7.00%~95.69%，速效磷含量高 11.66%~35.17%；B₂ 处理各施肥水平速效氮含量较空白处理 A₀ 高出 19.51%~97.23%，速效磷含量高 19.02%~66.75%。两种混播处理下，A₆ 的速效氮含量均最高，与其他处理存在显著性差异（ $p<0.05$ ）；同一施肥水平下，B₂ 处理的速效氮、磷含量高于 B₁ 处理（除 A₃、A₀ 处理含量相当外）；A₀B₁ 处理各土层速效氮、磷含量始终略高于 A₀B₂ 处理，二者之间差异不显著。10-20cm、20-30cm 土层中的各处理速效磷含量差异未达到显著水平。



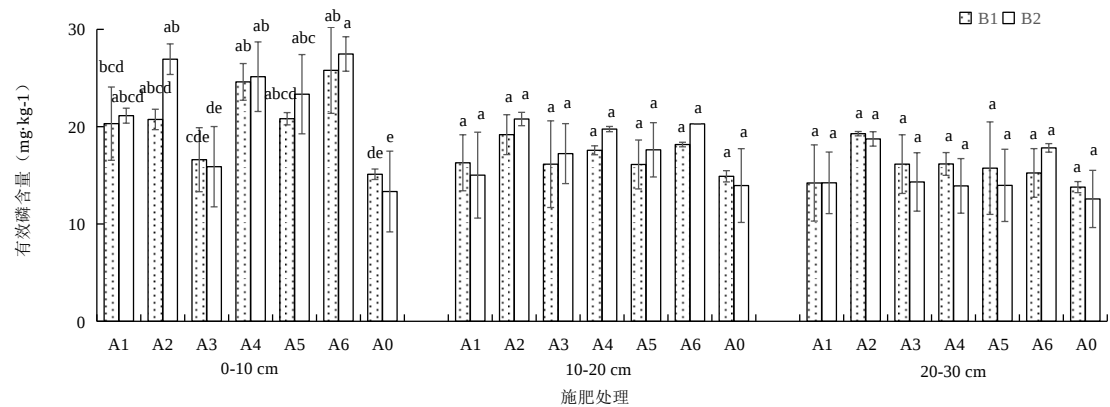


图 1 施肥和混播对土壤速效氮、速效磷的综合影响

注：不同小写字母表示同一土层不同处理之间差异显著（ $p<0.05$ ）。

表 3 施肥和混播对 0-10 cm 土层养分指标的综合影响

处理	方差分析 F 值			
	全氮	有机质	速效氮	速效磷
施肥	7.059***	5.464**	93.141***	13.941***
混播	5.071*	0.003ns	36.602***	2.061ns
施肥×混播	0.824ns	1.984ns	8.887***	1.121ns

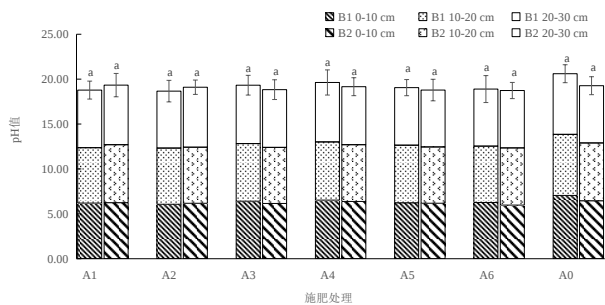
注：*表示 $0.01<p<0.05$ ，**表示 $0.001<p<0.01$ ，***表示 $p<0.001$ ，ns 表示处理之间差异不显著（ $p>0.05$ ）。

2.3 施肥和混播对土壤 pH 值、电导率、容重的影响

对土壤 pH 值、电导率、容重进行比较分析，见图 2。土壤 pH 值的变化幅度较小，各处理之间的差异未达到显著水平。

电导率的变化较突出，两种混播比例下，A₆ 处理各土层的电导率较其他处理高，空白 A₀ 处理的电导率最低，A₆、A₀ 处理与其他处理之间存在显著差异（ $p<0.05$ ），0-10cm 土层中，A₆B₁、A₆B₂ 处理的电导率分别为 111.3μs/cm 和 151.5μs/cm，是对应混播比例下 A₀ 处理的 2.9 倍和 3.9 倍，B₁ 处理的其他施肥水平较空白 A₀ 处理高出 40.4%~131.3%，B₂ 处理的其他施肥水平较 A₀ 处理高出 48.8%~89.0%。

不同处理之间的容重差异不显著，总体表现为随着土层深度的增加，土壤容重逐渐增大。



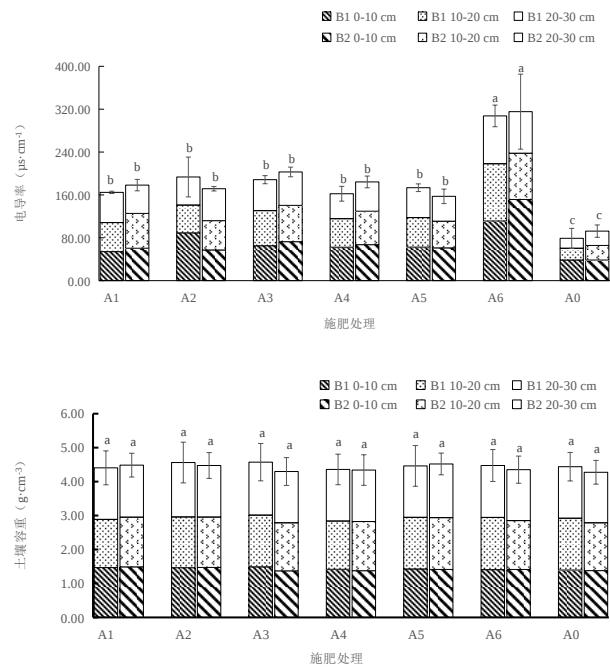


图 2 施肥和混播对土壤 pH 值、电导率、容重的影响

注：不同小写字母表示不同处理 0-10cm 土层各指标差异显著 ($p < 0.05$)。

2.4 施肥和混播对牧草产量的影响

对 1m^2 样方的地上生物量进行分析。B₁ 混播比例下，A₃ 处理的地上生物量最高，达到 290.68 g，与 A₄、A₅、A₆、A₀ 处理存在显著差异 ($p < 0.05$)，高于 A₁、A₂ 处理 37.75%~38.77%；B₂ 混播比例下，A₆ 处理的地上生物量最高，与 A₁、A₃、A₀ 处理存在显著差异 ($p < 0.05$)。对比同一施肥水平下的不同混播处理，可以发现仅有 A₃ 处理之间存在显著差异 ($p < 0.05$)，其余处理之间差异不显著。

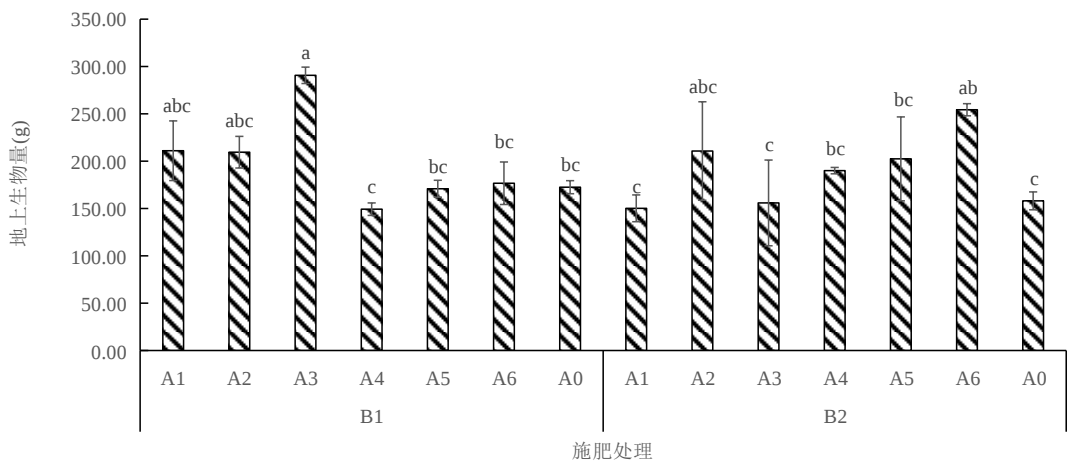


图 3 施肥和混播对牧草产量的影响

注：不同小写字母分别表示 B₁、B₂ 混播比例下的不同处理差异显著 ($p < 0.05$)。

3 结果与讨论

3.1 施肥和混播对土壤养分的影响

土壤中的氮含量决定了土壤肥力的高低^{错误!未找到引用源。}。两种混播处理下, 豆禾 2:2 混播处理的 0-30cm 土层全氮含量整体上低于同一施肥水平的豆禾 1:2 混播处理, 这可能是由于豆禾 2:2 混播处理的豆科牧草播种量占比大, 能够固定更多的氮素, 导致土壤中全氮含量低于同一施肥水平下豆科牧草占比相对较少的豆禾 1:2 混播处理。0-20cm 土层中, 各施肥处理的土壤有机质含量均高于对照处理, 氮添加量为 300 kg/hm² 处理的土壤有机质含量与对照处理存在显著差异 ($p<0.05$), 说明高水平氮添加显著增加了土壤中有机质含量, 研究表明有机质含量的高低与氮添加量关系密切^{错误!未找到引用源。}。说明在确定豆禾混播比例下, 施肥能显著提高土壤全氮和有机质含量, 土壤肥力得到明显提高, 但只有氮素大量添加下才与空白对照有显著差异。

已有大量研究表明氮磷添加能显著提高土壤中的速效氮、速效磷含量^{错误!未找到引用源。}。本研究各施肥处理的 0-30cm 土层速效氮、速效磷含量均高于空白处理, 变化趋势与氮、磷添加的变化基本一致。植物根系较集中的 0-10 cm 土层中, 速效氮磷含量与全氮含量表现一致: 同一施肥水平下, 豆禾 1:2 混播处理的速效氮磷含量高于豆禾 2:2 混播处理, 这与豆科牧草进行的根瘤固氮有主要关系。空白对照的各土层速效氮、磷含量均为豆禾 2:2 混播高于豆禾 1:2 混播, 豆禾 2:2 混播处理的豆科植物根瘤数更多, 说明在没有额外养分添加的情况下, 豆禾 2:2 混播的有效根瘤多于豆禾 1:2 混播处理, 可以固定土壤中更多的氮素, 使土层中速效氮、磷含量增加。各施肥处理中, N150P0K180 处理下的豆禾 2:2 混播的速效氮、磷含量高于豆禾 1:2 混播, 认为 150kg/hm² 的氮添加量对土壤养分的提升起到促进作用, 高于此添加量可能会使豆禾 2:2 混播处理的豆科牧草产生无效根瘤, 导致其土壤养分低于豆禾 1:2 混播处理。土壤全氮、有机质、速效氮、速效磷含量表现为随着土层深度的增加而减小, 结果与于铁峰的研究相一致^{错误!未找到引用源。}, 说明浅层土壤养分变化受施肥和混播的影响较大, 深层土壤受影响小。有研究认为相对于单播禾本科牧草, 豆禾混播对土壤全氮、有机质含量起到了一定的提升作用, 但对深层土壤养分的影响较小^{错误!未找到引用源。}, 这与本研究结果吻合。

在土壤含水率一定的条件下, 电导率随着含盐量的增加而增加, 二者符合线性函数关系^{错误!未找到引用源。}, 说明高氮添加处理的含盐量高, A₆ 处理与其他施肥量存在显著差异 ($p<0.05$)。随着土层深度的增加, 各处理的容重表现为增加的趋势, 季波的研究认为补植禾本科牧草两年后的土壤容重随着土层深度的加深逐渐增大, 而豆科牧草、豆禾混播模式表现为先增大再减小^{错误!未找到引用源。}, 这与本研究结果相似。

3.2 施肥和混播对牧草产量的影响

豆禾 2:2 混播中, 牧草产量随着施氮量的增加而增加, N150P0K180 处理的地上生物量最高, 但施氮量高于 150kg/hm² 时, 该混播处理的地上生物量开始减少; 豆禾 1:2 混播中, N₃₀0P₂₀0K90 处理的地上生物

量最高，其余施肥处理与空白对照处理差异不显著，说明该混播处理需要更高的氮素供应才能提高牧草产量。豆禾混播后，豆科植物通过根瘤菌固定的氮素，一部分被自身利用，另一部分再释放到土壤中，被禾本科植物吸收利用^{错误!未找到引用源。}。施氮量为 50~150kg/hm² 时，豆禾 2:2 混播的地上生物量大于豆禾 1:2 混播，当施氮量高于 150kg/hm² 时，豆禾 1:2 混播的地上生物量大于豆禾 2:2 混播，这可能是因为过多施氮会减少豆科植物的根瘤数，降低固氮能力^{错误!未找到引用源。}，豆禾 2:2 混播中豆科植物占比更大，生长受到过多施氮的抑制，而施氮能显著增加禾本科披碱草的生物量^{错误!未找到引用源。}，这就可能会导致禾本科植物占比较大的豆禾 1:2 混播处理的地上生物量大于豆禾 2:2 混播处理。由于本试验以修复退化草原为目标，小区面积设计较大，不同立地条件下不同群落构成的原生植物对试验产生的影响等问题还未可知，故本文的研究结果是阶段性的，试验还将继续进行样地调查与分析，以便得出更多结果，为黑龙江省西部地区退化草原修复提供更有价值的参考。

4 结论

与单纯混播牧草相比，施肥和混播牧草能显著提高土壤全氮、有机质及速效氮磷含量。在同一施肥水平下，豆禾 1:2 混播的 0-10cm 土层全氮、速效氮磷含量高于豆科植物占比更大的豆禾 2:2 混播。0-10 cm 土层速效氮、速效磷的变化趋势与氮、磷添加量一致。豆禾 2:2 混播+N150P0K180、豆禾 1:2 混播+N300P200K90 的地上生物量分别是各自混播比例下最高的。高氮添加的土壤含盐量高，可能会加重土壤盐碱化程度。综合考虑牧草产量及土壤养分变化，初步认为采用豆禾 2:2 混播，氮施量以 150kg/hm² N 较适宜本地区轻度退化草地的修复。