

# 施肥和混播对松嫩平原退化草地 土壤和牧草产量的影响

方玉凤<sup>1</sup>, 曹志伟<sup>1</sup>, 孙洪升<sup>2</sup>, 韩勤<sup>1</sup>, 闫敦梁<sup>1</sup>, 温宝阳<sup>1</sup>, 任秀彬<sup>1</sup>

(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, 为该区天然退化草地修复提供科学依据。[方法] 试验以黑龙江省西部天然轻度退化草地为研究对象, 沙打旺(*Astragalus adsurgens*)和披碱草(*Elymus dahuricus*)为补播草种, 设 2 个间行混播[豆禾比 2 : 2 (B<sub>1</sub>) 和 1 : 2 (B<sub>2</sub>)] 和 6 个水平氮磷钾施肥组合 [N<sub>50</sub> P<sub>40</sub> K<sub>45</sub> (A<sub>1</sub>), N<sub>100</sub> P<sub>240</sub> K<sub>225</sub> (A<sub>2</sub>), N<sub>150</sub> P<sub>0</sub> K<sub>180</sub> (A<sub>3</sub>), N<sub>200</sub> P<sub>120</sub> K<sub>0</sub> (A<sub>4</sub>), N<sub>250</sub> P<sub>80</sub> K<sub>270</sub> (A<sub>5</sub>), N<sub>300</sub> P<sub>200</sub> K<sub>90</sub> (A<sub>6</sub>)] 进行田间试验 [其中, 每个元素后的下标数字分别表示 N, P<sub>2</sub> O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub> O 的施用量 (kg/hm<sup>2</sup>)]。[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。0—10 cm 土层土壤养分变化受施肥和混播的影响较 20—30 cm 土层大。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。高氮 (A<sub>6</sub>) 处理的电导率显著高于其他处理 ( $p < 0.05$ )。豆禾 2 : 2 混播 + N<sub>150</sub> P<sub>0</sub> K<sub>180</sub>, 豆禾 1 : 2 混播 + N<sub>300</sub> P<sub>200</sub> K<sub>90</sub> 的 1 m<sup>2</sup> 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/hm<sup>2</sup> 较适宜该区轻度退化草地修复。

**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

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0016-08

中图分类号: S147.2, S158

**文献参数:** 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(1): 16-23. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.01.003; Fang Yufeng, Cao Zhiwei, Sun Hongsheng, et al. Effects of fertilization and mixed sowing on soil nutrients and pasture yield of degraded grassland in Songnen Plain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 16-23.

## Effects of Fertilization and Mixed Sowing on Soil Nutrients and Pasture Yield of Degraded Grassland in Songnen Plain

Fang Yufeng<sup>1</sup>, Cao Zhiwei<sup>1</sup>, Sun Hongsheng<sup>2</sup>, Han Qin<sup>1</sup>, Yan Dunliang<sup>1</sup>, Wen Baoyang<sup>1</sup>, Ren Xiubin<sup>1</sup>

(1. Qiqihar Branch Heilongjiang Academy of Forestry Sciences, Qiqihar, Heilongjiang 161005, China; 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 of degraded grassland in the Songnen Plain, Western Heilongjiang Province were studied, in order to provide a scientific basis for restoration of natural degraded grassland in local area. [Methods] The study was conducted on a natural lightly degraded grassland in the Songnen Plain of Western Heilongjiang Province. *Astragalus adsurgens* and *Elymus dahuricus* were used as reseeding grasses. Treatments consisted of two interrow mixed sowing ratios [legume:grass ratio 2 : 2 (B<sub>1</sub>) and 1 : 2 (B<sub>2</sub>)], and six nitrogen, phosphorus, and potassium application rate combinations: N<sub>50</sub> P<sub>40</sub> K<sub>45</sub> (A<sub>1</sub>), N<sub>100</sub> P<sub>240</sub> K<sub>225</sub> (A<sub>2</sub>), N<sub>150</sub> P<sub>0</sub> K<sub>180</sub> (A<sub>3</sub>), N<sub>200</sub> P<sub>120</sub> K<sub>0</sub> (A<sub>4</sub>), N<sub>250</sub> P<sub>80</sub> K<sub>270</sub> (A<sub>5</sub>), and N<sub>300</sub> P<sub>200</sub> K<sub>90</sub> (A<sub>6</sub>), where subscripts after each element indicated the application

收稿日期: 2022-05-21

修回日期: 2022-07-18

资助项目: 黑龙江省省属科研院所科研业务费项目“松嫩平原退化草地修复技术研究”(CZKYF2020C019)

第一作者: 方玉凤 (1988—), 女 (汉族), 黑龙江省富裕县人, 硕士, 工程师。主要从事草原生态与修复研究。Email: qqhrfyf@163.com。

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

rate given as  $\text{kg}/\text{hm}^2$  N,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , and  $\text{K}_2\text{O}$ , respectively. [Results] Fertilization significantly improved available nutrients and pasture yield based on the ratio of mixed sowing. Soil nutrient changes in the surface soil layer (0—10 cm) were more affected by fertilization and mixed sowing than in the deeper layer (20—30 cm). Fertilization, mixed sowing, and their interaction had significant effects on the content of available soil nitrogen ( $p < 0.05$ ). The variation trends of available nitrogen and available phosphorus in the 0—10 cm soil layer were basically consistent with the additions of nitrogen and phosphorus. The contents of total nitrogen, available nitrogen, and available phosphorus in the 0—10 cm soil layer of legume-grass mixture in the 1 : 2 ratio were greater than in the 2 : 2 ratio at the same fertilization level. The productivity of the high nitrogen treatment ( $A_6$ ) was significantly ( $p < 0.05$ ) greater than that of the other treatments. The greatest aboveground biomass values were observed for the legume-grass 2 : 2 ratio +  $N_{150} P_0 K_{180}$  treatment combination ( $290.68 \text{ g}/\text{m}^2$ ) and for the legume-grass 1 : 2 ratio +  $N_{300} P_{200} K_{90}$  treatment combination ( $254.31 \text{ g}/\text{m}^2$ ). [Conclusion] Considering pasture yield and changes in soil nutrients, the legume-grass mixed sowing in the 2 : 2 ratio and the fertilizer application rate of  $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$  for nitrogen can be recommended.

**Keywords:** 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%<sup>[1]</sup>,在地球陆地生态系统碳、氮循环中发挥着重要作用<sup>[2]</sup>。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<sup>[3]</sup>。近年来,中国草地退化严重,人类活动(如牧畜增加、耕种等)加速了草地退化。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<sup>[4]</sup>。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<sup>[5-9]</sup>。

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<sup>[10-12]</sup>。王玲等<sup>[13]</sup>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  $70 \sim 140 \text{ kg}/\text{hm}^2$  时经济效益最佳;黄军等<sup>[14]</sup>的研究表明,施肥量  $225 \text{ kg}/\text{hm}^2$  对新疆退化草甸恢复具有明显效果;王长庭等<sup>[12]</sup>认为  $30 \text{ g}/\text{m}^2$  施肥量是三江源区高寒矮嵩草草甸群落的最佳施肥水平。

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<sup>[15-16]</sup>,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<sup>[17]</sup>,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<sup>[18]</sup>。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<sup>[19]</sup>。刘明健等<sup>[20]</sup>在科尔沁沙地的研究表明紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、无芒麦雀(*Bromus inermis*) 1 : 2, 1 : 1 混播能显著提高浅层土壤全氮含量;李昂等<sup>[21]</sup>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;霍雅媛等<sup>[22]</sup>在甘肃省的试验表明红豆草(*Onobrychis cyri*)与无芒麦雀豆禾比 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%。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<sup>[23]</sup>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;汤洁等<sup>[24]</sup>在吉林西部松嫩平原南,引进黄花草木樨(*Melilotus officinalis*)进行土壤改良;李强<sup>[25]</sup>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。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 个水平的施肥处理、2 种豆禾混播比例试验,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,探索该区天然退化草地修复的最佳施肥量和牧草混播

比例。以期为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,  $124^{\circ}12'41.66''$ — $124^{\circ}12'51.55''$ E,  $46^{\circ}30'3.57''$ — $46^{\circ}30'26.90''$ 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  $3.6\sim 4.4^{\circ}\text{C}$ ,年降水量  $428\text{ mm}$ 。无霜期  $148\text{ d}$ ,年均风速  $2.5\sim 4.2\text{ m/s}$ 。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  $80\sim 100\text{ kg}/666\text{ m}^2$ 。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*)、羊草(*Leymus chinensis*)等;伴生种为莎草(*Cyperus rotundus*)、多叶棘豆(*Oxytropis myriophylla*)等;偶见种为细叶胡枝子(*Lespedeza hedysaroides*)、星星草(*Puccinellia tenuiflora*)等;杂类草有叉分蓼(*Polygonum divaricatum*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)、知母(*Anemarrhena asphodeloides*)、展枝唐松草(*Thalictrum squarrosum*)、旱麦瓶草(*Silene jensseensis*)、猪毛菜(*Salsola collina*)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,参考在辽河平原试验效果较好<sup>[26]</sup>的施肥、混播试验设计。每个小区面积  $666\text{ m}^2$ 。6种氮磷钾均匀组合施肥处理记为  $A_1$ — $A_6$ ,如  $A_1$  处理为  $N_{50}P_{40}K_{45}$ ,则表示  $N, P_2O_5, K_2O$  用量分别为  $50, 40, 45\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。肥料选用尿素( $N\ 46\%$ )、磷酸二铵( $N\ 18\%, P_2O_5\ 46\%$ )和硫酸钾( $K_2O\ 60\%$ ),先根据  $P_2O_5$  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。

选用该区适应性较强的优良乡土豆科牧草沙打旺(*Astragalus adsurgens*)和禾本科牧草披碱草(*Elymus dahuricus*)进行草籽间行混播,沙打旺单播播种量为  $15\text{ kg}/\text{hm}^2$ ,披碱草单播播种量为  $30\text{ kg}/\text{hm}^2$ ,两种混播处理在总量上进行区分:豆禾  $2:2$  混播处理( $B_1$  为对应草种单播播种量的  $50\%$ ,即沙打旺  $7.5\text{ kg}/\text{hm}^2$  + 披碱草  $15\text{ kg}/\text{hm}^2$ )、豆禾  $1:2$  混播处理( $B_2$  为对应草种单播播种量的  $33\%$  和  $67\%$ ,即沙打旺  $5\text{ kg}/\text{hm}^2$  + 披碱草  $20\text{ kg}/\text{hm}^2$ );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  $5\text{ cm}$ ,行距  $15\text{ cm}$ ,两种混播方式均进行空白对照处理(详见表 1)。

表 1 施肥与混播设计

Table 1 Design of fertilization and mixed sowing

主区(施肥处理)	副区(混播处理)	处理编号
$A_1(N_{50}P_{40}K_{45})$	$B_1$ (豆禾 $2:2$ 混播)	$A_1B_1$ (豆禾 $2:2$ 混播 + $N_{50}P_{40}K_{45}$ )
	$B_2$ (豆禾 $1:2$ 混播)	$A_1B_2$ (豆禾 $1:2$ 混播 + $N_{50}P_{40}K_{45}$ )
$A_2(N_{100}P_{240}K_{225})$	$B_1$ (豆禾 $2:2$ 混播)	$A_2B_1$ (豆禾 $2:2$ 混播 + $N_{100}P_{240}K_{225}$ )
	$B_2$ (豆禾 $1:2$ 混播)	$A_2B_2$ (豆禾 $1:2$ 混播 + $N_{100}P_{240}K_{225}$ )
$A_3(N_{150}P_0K_{180})$	$B_1$ (豆禾 $2:2$ 混播)	$A_3B_1$ (豆禾 $2:2$ 混播 + $N_{150}P_0K_{180}$ )
	$B_2$ (豆禾 $1:2$ 混播)	$A_3B_2$ (豆禾 $1:2$ 混播 + $N_{150}P_0K_{180}$ )
$A_4(N_{200}P_{120}K_0)$	$B_1$ (豆禾 $2:2$ 混播)	$A_4B_1$ (豆禾 $2:2$ 混播 + $N_{200}P_{120}K_0$ )
	$B_2$ (豆禾 $1:2$ 混播)	$A_4B_2$ (豆禾 $1:2$ 混播 + $N_{200}P_{120}K_0$ )
$A_5(N_{250}P_{80}K_{270})$	$B_1$ (豆禾 $2:2$ 混播)	$A_5B_1$ (豆禾 $2:2$ 混播 + $N_{250}P_{80}K_{270}$ )
	$B_2$ (豆禾 $1:2$ 混播)	$A_5B_2$ (豆禾 $1:2$ 混播 + $N_{250}P_{80}K_{270}$ )
$A_6(N_{300}P_{200}K_{90})$	$B_1$ (豆禾 $2:2$ 混播)	$A_6B_1$ (豆禾 $2:2$ 混播 + $N_{300}P_{200}K_{90}$ )
	$B_2$ (豆禾 $1:2$ 混播)	$A_6B_2$ (豆禾 $1:2$ 混播 + $N_{300}P_{200}K_{90}$ )
$A_0$ (对照不施肥)	$B_1$ (豆禾 $2:2$ 混播)	$A_0B_1$ (豆禾 $2:2$ 混播 + 对照不施肥)
	$B_2$ (豆禾 $1:2$ 混播)	$A_0B_2$ (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  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 。进行植被调查,对  $1\text{ m}^2$  样方内地上部牧草齐地面刈割,立即称重,之后带回实验室,  $105\text{ }^\circ\text{C}$  烘箱杀青  $30\text{ min}$ ,  $65\text{ }^\circ\text{C}$  烘干至恒重、称重。在此样方挖土壤剖面,分为 3 个土层,  $0\text{--}10$ ,  $10\text{--}20$ ,  $20\text{--}30\text{ cm}$ ,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》<sup>[27]</sup>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  $4\text{ mol/L}$  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,用 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

如表 2 所示,  $0\text{--}10\text{ cm}$  土层中,两种混播处理

下,均为  $A_4$  的全氮含量最高,达到  $0.96\text{ g/kg}$ ,与  $A_1$ ,  $A_0$  处理存在显著差异 ( $p < 0.05$ );  $10\text{--}20\text{ cm}$  土层中,  $A_5B_1$ ,  $A_6B_2$  处理的全氮含量最高,分别为  $0.79\text{ g/kg}$  和  $0.87\text{ g/kg}$ ,均与  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_0$  处理存在显著差异 ( $p < 0.05$ );  $20\text{--}30\text{ cm}$  土层中,两种混播处理下,均为  $A_6$  的全氮含量最高,分别为  $0.64\text{ g/kg}$  和  $0.81\text{ g/kg}$ ,  $A_6B_1$  与  $A_4B_1$ ,  $A_0B_1$  处理,  $A_6B_2$  与  $A_1B_2$  处理存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。整体来看,在同一施肥水平下,  $B_2$  处理的  $0\text{--}30\text{ cm}$  土层全氮含量高于  $B_1$  处理。

有机质含量方面,  $0\text{--}10\text{ cm}$  土层中,处理  $A_6B_1$  达到  $1.68\%$ ,与其他处理存在显著差异 ( $p < 0.05$ ),  $A_5B_2$  处理达到  $1.40\%$ ,与  $A_0$  处理存在显著差异 ( $p < 0.05$ );  $10\text{--}20\text{ cm}$  土层中,两种混播处理下,均为  $A_6$  的含量最高,分别为  $1.25\%$  和  $1.29\%$ ,与  $A_3$ ,  $A_0$  处理存在显著差异 ( $p < 0.05$ );  $20\text{--}30\text{ cm}$  土层中,分别为  $A_1B_1$ ,  $A_3B_2$  处理的含量最高,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,  $0\text{--}10\text{ cm}$  土层中的全氮、有机质含量最高,  $20\text{--}30\text{ cm}$  土层最低。

表 2 施肥和混播对土壤全氮、有机质的影响

Table 2 Effects of fertilization and mixed sowing on soil total nitrogen and organic matter

处 理	全氮含量/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )			有机质含量/%		
	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm
$A_1B_1$	$0.59 \pm 0.038^c$	$0.51 \pm 0.010^{ef}$	$0.53 \pm 0.065^{bcd}$	$1.04 \pm 0.05^{bcd}$	$1.05 \pm 0.03^{abc}$	$0.85 \pm 0.30^a$
$A_2B_1$	$0.75 \pm 0.003^{abc}$	$0.57 \pm 0.023^{def}$	$0.42 \pm 0.285^{bcd}$	$1.19 \pm 0.22^{bcd}$	$1.06 \pm 0.13^{abc}$	$0.71 \pm 0.02^a$
$A_3B_1$	$0.85 \pm 0.130^{ab}$	$0.51 \pm 0.145^f$	$0.48 \pm 0.175^{bcd}$	$0.99 \pm 0.14^{cd}$	$0.92 \pm 0.32^{bc}$	$0.77 \pm 0.09^a$
$A_4B_1$	$0.96 \pm 0.062^a$	$0.64 \pm 0.055^{edef}$	$0.37 \pm 0.045^{cd}$	$1.16 \pm 0.10^{bcd}$	$1.04 \pm 0.03^{abc}$	$0.63 \pm 0.08^a$
$A_5B_1$	$0.79 \pm 0.163^{abc}$	$0.79 \pm 0.098^{abc}$	$0.57 \pm 0.093^{abc}$	$1.18^{bcd}$	$0.99 \pm 0.05^{abc}$	$0.59 \pm 0.46^a$
$A_6B_1$	$0.81 \pm 0.003^{abc}$	$0.75 \pm 0.019^{abcd}$	$0.64 \pm 0.174^{ab}$	$1.68 \pm 0.80^a$	$1.25 \pm 0.05^a$	$0.82 \pm 0.07^a$
$A_0B_1$	$0.61 \pm 0.138^c$	$0.55 \pm 0.105^{ef}$	$0.27 \pm 0.028^d$	$0.86 \pm 0.02^d$	$0.80 \pm 0.04^c$	$0.84 \pm 0.06^a$
$A_1B_2$	$0.68 \pm 0.080^{bc}$	$0.53 \pm 0.088^{ef}$	$0.52 \pm 0.106^{bcd}$	$1.05 \pm 0.06^{bcd}$	$0.86 \pm 0.34^{bc}$	$0.53 \pm 0.43^a$
$A_2B_2$	$0.94 \pm 0.134^a$	$0.70 \pm 0.084^{bcde}$	$0.56 \pm 0.230^{abc}$	$1.20 \pm 0.03^{bcd}$	$1.09 \pm 0.10^{abc}$	$0.46 \pm 0.46^a$
$A_3B_2$	$0.82 \pm 0.071^{abc}$	$0.68 \pm 0.163^{bcdef}$	$0.66 \pm 0.190^{ab}$	$1.14 \pm 0.18^{bcd}$	$0.94 \pm 0.09^{bc}$	$0.97 \pm 0.21^a$
$A_4B_2$	$0.96 \pm 0.080^a$	$0.85 \pm 0.058^{ab}$	$0.60 \pm 0.012^{abc}$	$1.12 \pm 0.02^{bcd}$	$1.13 \pm 0.11^{ab}$	$0.94 \pm 0.03^a$
$A_5B_2$	$0.96 \pm 0.194^a$	$0.87 \pm 0.166^{ab}$	$0.60 \pm 0.034^{abc}$	$1.40 \pm 0.39^{ab}$	$1.03 \pm 0.12^{abc}$	$0.88 \pm 0.19^a$
$A_6B_2$	$0.95 \pm 0.134^a$	$0.90 \pm 0.071^a$	$0.81 \pm 0.088^a$	$1.24 \pm 0.13^{bc}$	$1.29 \pm 0.12^a$	$0.96 \pm 0.06^a$
$A_0B_2$	$0.64 \pm 0.021^{bc}$	$0.57 \pm 0.033^{def}$	$0.54 \pm 0.032^{abcd}$	$0.96 \pm 0.40^{cd}$	$0.80 \pm 0.14^c$	$0.52 \pm 0.47^a$

注:①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处理详情见表 1。下同。

### 2.2 施肥和混播对土壤速效氮、磷的影响

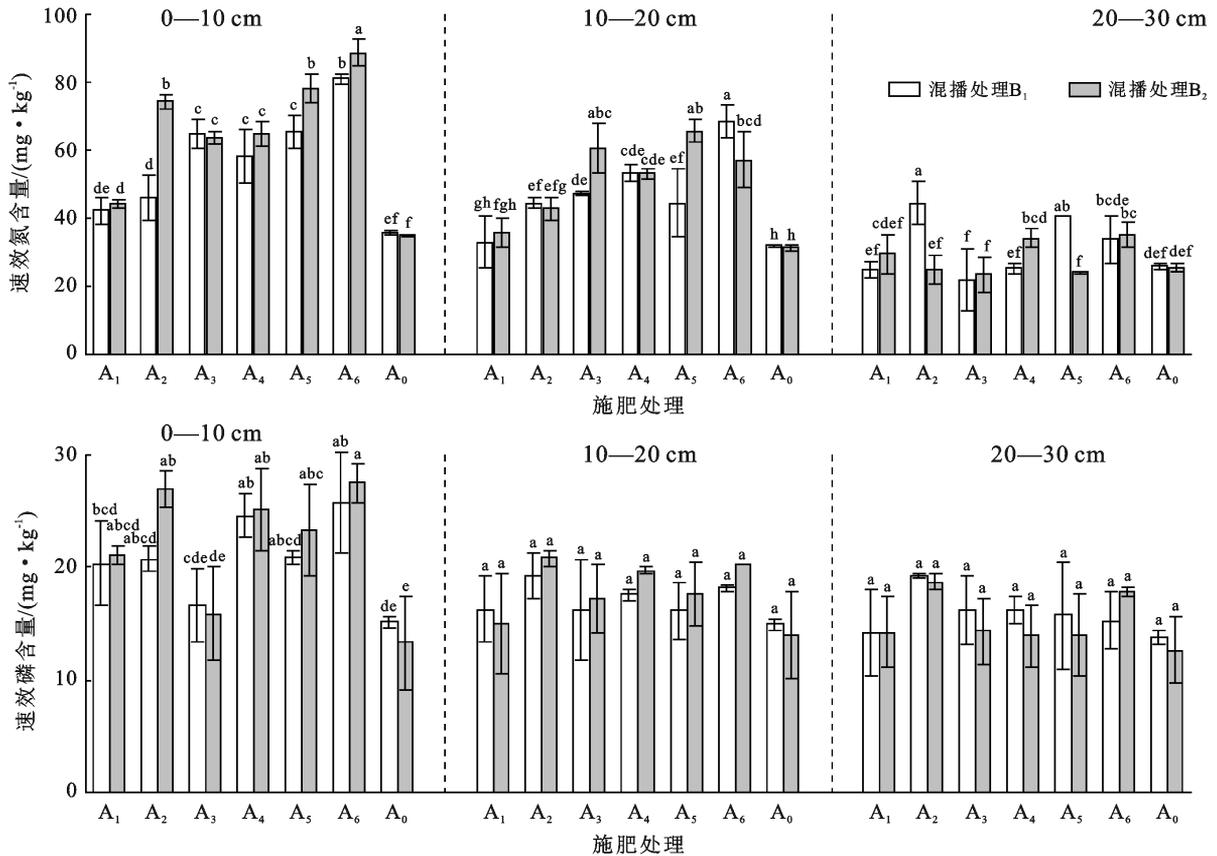
土壤速效氮、速效磷是生育期内植物可以直接吸收利用的养分(图 1)。土壤速效氮、磷含量的整体变化随着土层的增加有降低的趋势。  $0\text{--}30\text{ cm}$  土层速效氮、速效磷含量的变化趋势与氮、磷添加的变化基本一致,尤其是  $0\text{--}10\text{ cm}$  土层的变化趋势更加明显。

$A_6$ ,  $A_1$  处理的施氮量分别是最高和最低的,为  $300\text{ kg/hm}^2$ ,  $50\text{ kg/hm}^2$ ,  $0\text{--}10\text{ cm}$  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  $A_0$  除外);  $A_3$  处理未设置磷添加,  $0\text{--}10\text{ cm}$  土层速效磷含量最低(空白处理  $A_0$  除外)。

对  $0\text{--}10\text{ cm}$  土层养分进行双因素方差分析,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—10 cm 土层中,两种混播处理下, $A_6$  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, $B_2$  处理的速效氮、磷含量高于  $B_1$  处理(除  $A_3, A_0$  处理含量相当外); $A_0B_1$  处理各土层速效氮、磷含量始终略高于  $A_0B_2$  处理,二者之间差异不显著。10—20 cm, 20—30 cm 土层中的各处理速效磷含量差异不显著。



注:不同小写字母表示同一土层不同处理之间差异显著( $p < 0.05$ )。

图 1 施肥和混播对土壤速效氮、速效磷的综合影响

Fig.1 Comprehensive effects of fertilization and mixed sowing on soil available nitrogen and available phosphorus

表 3 施肥和混播对 0—10 cm 土层养分指标的综合影响

Table 3 Comprehensive effects of fertilization and mixed sowing on nutrient indexes in 0—10 cm soil layer

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*	0.003 <sup>ns</sup>	36.602***	2.061 <sup>ns</sup>
施肥×混播	0.824 <sup>ns</sup>	1.984 <sup>ns</sup>	8.887***	1.121 <sup>ns</sup>

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

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(图 2)。

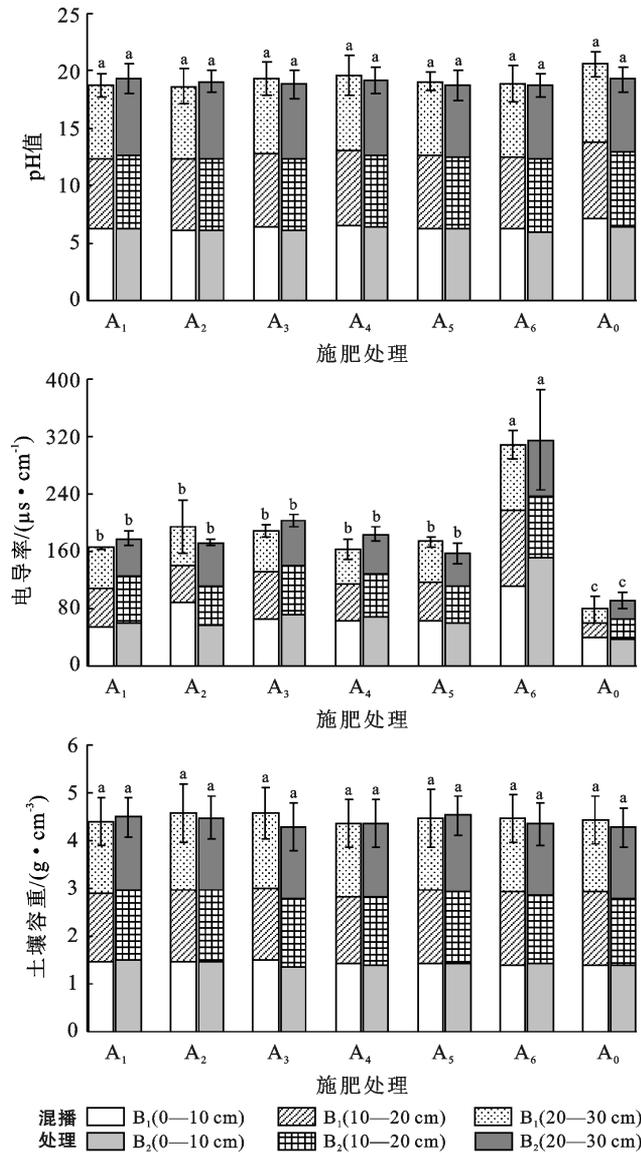
电导率的变化较突出, $A_6$  处理各土层的电导率较其他处理高,空白  $A_0$  处理的电导率最低, $A_6, A_0$  处理

与其他处理存在显著差异( $p < 0.05$ ),0—10 cm 土层中, $A_6B_1, A_6B_2$  处理的电导率分别为  $111.3 \mu\text{s}/\text{cm}$  和  $151.5 \mu\text{s}/\text{cm}$ ,是对应混播比例下  $A_0$  处理的 2.9 倍和 3.9 倍,其他施肥水平较空白  $A_0$  处理高出  $40.4\% \sim 131.3\%$ 。

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。

### 2.4 施肥和混播对牧草产量的影响

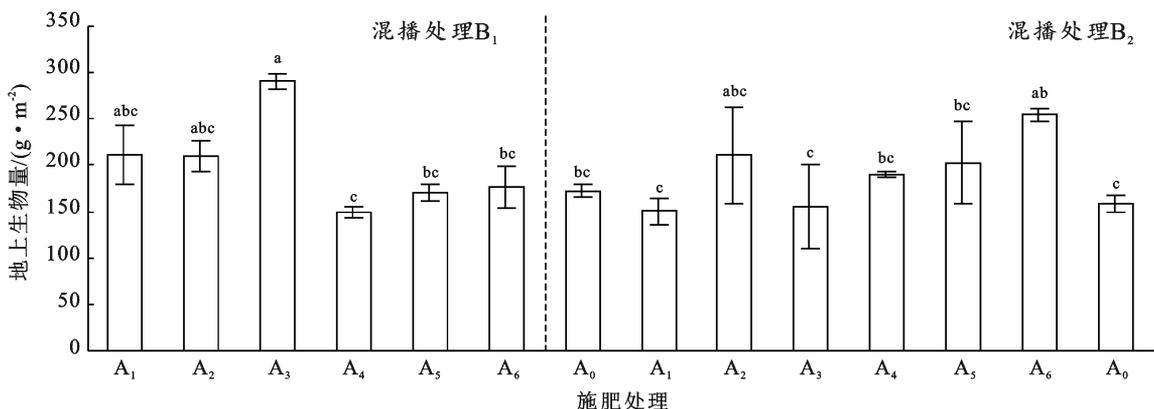
对  $1 \text{ m}^2$  样方的地上生物量进行分析。 $A_3B_1$  处理最高,达到  $290.68 \text{ g}$ ,与  $A_1, A_5, A_6, A_0$  处理存在显著差异( $p < 0.05$ ),高于  $A_1, A_2$  处理  $37.75\% \sim 38.77\%$ ;  $A_6B_2$  处理最高,为  $254.31 \text{ g}$ ,与  $A_1, A_3, A_0$  处理存在显著差异( $p < 0.05$ )。对比同一施肥水平下的不同混播处理,可以发现仅有  $A_3$  处理存在显著差异( $p < 0.05$ ),其余处理之间差异不显著(图 3)。



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

图 2 施肥和混播对土壤 pH 值、电导率、容重的影响

Fig.2 Effects of fertilization and mixed sowing on pH value, conductivity and bulk density of soil



注:不同小写字母分别表示 B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> 混播比例下的不同处理差异显著 ( $p < 0.05$ )。

图 3 施肥和混播对牧草产量的影响

Fig.3 Effects of fertilization and mixed sowing on pasture yield

### 3 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<sup>[28]</sup>。两种混播处理下,豆禾 2:2 混播处理的 0—30 cm 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比例大,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比例相对较少的豆禾 1:2 混播处理。0—20 cm 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/hm<sup>2</sup> 处理的土壤有机质含量与对照处理存在显著差异 ( $p < 0.05$ ),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<sup>[29]</sup>。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<sup>[30-32]</sup>。本研究各施肥处理的 0—30 cm 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,这应该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,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, N<sub>150</sub> P<sub>0</sub> K<sub>180</sub> 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,高于 150 kg/hm<sup>2</sup> 的氮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,结果与于铁峰等<sup>[33]</sup>的研究相一致,表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<sup>[20]</sup>,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<sup>[34]</sup>,说明高氮添加处理 A<sub>6</sub> 的含盐量高,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,季波等<sup>[35]</sup>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,这与本研究结果相似。由于松嫩平原地理位置和天气等原因,导致牧草生长只有半年时间,冬季土壤冻结导致无法取样,本试验周期对土壤养分的分析缺少代表性,施肥和混播对土壤产生的持续影响将在第二年继续进行调查取样,以完善数据综合分析。

### 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,N<sub>150</sub>P<sub>0</sub>K<sub>180</sub>处理的地上生物量最高,施氮量高于 150 kg/hm<sup>2</sup> 时,地上生物量开始减少;豆禾 1:2 混播中,N<sub>300</sub>P<sub>200</sub>K<sub>90</sub>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,说明该混播处理更高的氮素供应能显著提高牧草产量。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<sup>[36]</sup>。施氮量为 50~150 kg/hm<sup>2</sup> 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 150 kg/hm<sup>2</sup> 时,豆禾 1:2 混播的地上生物量大于豆禾 2:2 混播,这可能是由于过多施氮会减少豆科植物的根瘤数,降低固氮能力<sup>[37]</sup>,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<sup>[38]</sup>,这就可能会导致禾本科植物比例较大的豆禾 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牧草产量构成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,以便得出更多具有代表性的结果,为松嫩平原黑龙江省西部地区退化草地修复提供更有价值的参考。

## 4 结论

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—10 cm 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+N<sub>150</sub>P<sub>0</sub>K<sub>180</sub>,豆禾 1:2 混播+N<sub>300</sub>P<sub>200</sub>K<sub>90</sub>的地上生物量分别是各自混播比例下最高的。高氮添加处理的土壤含盐量高,可能会导致土壤盐碱化。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 150 kg/hm<sup>2</sup> N 较适宜该区轻度退化草地的修复。

### [参 考 文 献]

- [1] Kang Le, Han Xingguo, Zhang Zhibin, et al. Grassland ecosystems in China: Review of current knowledge and research advancement [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society (B: Biological Sciences), 2007, 362 (1482):997-1008.
- [2] [美]希斯.牧草:草地农业科学(第四版)[M].北京:农业出版社,1992:18-19.
- [3] 曹静娟.祁连山草地管理方式变化对土壤有机碳、氮库的影响[D].甘肃 兰州:甘肃农业大学,2010.
- [4] 李辉,红英,邓国荣,等.1982—2015 年气候变化和人类活动对内蒙古草地净初级生产力的影响[J].应用生态学报,2021,32(2):415-424.
- [5] 李香真,陈佐忠.不同放牧率对草原植物与土壤 C、N、P 含量的影响[J].草地学报,1998,6(2):90-98.
- [6] 王长庭,龙瑞军,王启兰,等.放牧扰动下高寒草甸植物多样性、生产力对土壤养分条件变化的响应[J].生态学报,2008,28(9):4144-4152.
- [7] Wang Qilan, Wang Xi, Cao Guangmin, et al. Soil quality assessment of alpine meadow in Haibei State of Qinghai Province [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011,22(6):1416-1422.
- [8] Wu Ronggui, Tiessen H. Effect of land use on soil degradation in alpine grassland soil, China [J]. Soil Science Society of America Journal, 2002,66(5):1648-1655.
- [9] Zou Chunjing, Wang Kaiyun, Wang Tianhou, et al. Overgrazing and soil carbon dynamics in Eastern Inner Mongolia of China [J]. Ecological Research, 2007, 22 (1):135-142.
- [10] 王启兰,曹广民,王长庭.放牧对小嵩草草甸土壤酶活性及土壤环境因素的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(5):856-864.
- [11] 董全民,赵新全,马玉寿,等.放牧强度对高寒人工草地土壤有机质和有机碳的影响[J].青海畜牧兽医杂志,2007,37(1):6-8.
- [12] 王长庭,王根绪,刘伟,等.施肥梯度对高寒草甸群落结构、功能和土壤质量的影响[J].生态学报,2013,33 (10):3103-3113.

- [13] 王玲,施建军,史慧兰,等.氮磷添加对环青海湖高寒草原牧草营养成分和土壤养分的影响[J].草业科学,2019,36(12):3065-3075.
- [14] 黄军,王高峰,安沙舟,等.施氮对退化草甸植被结构和生物量及土壤肥力的影响[J].草业科学,2009,26(3):75-78.
- [15] 王琦,师尚礼,曹文侠.国际草田耕作制度研究进展[J].草原与草坪,2013,33(2):85-91.
- [16] 刘捷.浅谈国内外牧草品种选育与人工草地建植技术进展[J].天津农林科技,2006(3):36-37.
- [17] 何飞,赵忠祥,康俊梅,等.氮磷钾配比施肥对紫花苜蓿草产量及品质的影响[J].中国草地学报,2019,41(5):24-32.
- [18] 谢开云,何峰,李向林,等.我国紫花苜蓿主产田土壤养分和植物养分调查分析[J].草业学报,2016,25(3):202-214.
- [19] 王平,王天慧,周雯,等.禾—豆混播草地中土壤水分与种间关系研究进展[J].应用生态学报,2007,18(3):653-658.
- [20] 刘明健,张永亮,贾玉山,等.豆禾混播对草地土壤碳氮磷含量的影响[J].中国草地学报,2021,43(8):50-57.
- [21] 李昂,吴应珍,台喜生,等.甘肃沿黄灌区种植豆禾混播牧草对土壤盐分和养分的影响[J].草地学报,2021,29(4):664-670.
- [22] 霍雅媛,曹宏,柴守玺,等.不同豆禾牧草混播对土壤质地及肥力的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(3):238-244.
- [23] 李洪影.生物措施对松嫩平原盐碱退化草地改良效果的研究[D].黑龙江 哈尔滨:东北农业大学,2014.
- [24] 汤洁,梁爽,林年丰,等.黄花草木樨改良盐碱土及修复生态环境研究:以松嫩平原吉林西部为例[C].美国科研出版社,2012:757-761.
- [25] 李强.不同恢复措施对松嫩平原退化草地的作用[D].吉林 长春:东北师范大学,2010.
- [26] 张永亮,于铁峰,郝凤,等.施肥与混播比例对豆禾混播牧草产量及氮磷钾利用效率的影响[J].草业学报,2020,29(11):91-101.
- [27] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [28] 姜哲浩,康文娟,柳小妮,等.施肥和补播对高寒草甸草原载畜能力的影响[J].草原与草坪,2018,38(6):68-78.
- [29] 祖元刚,李冉,王文杰,等.我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性[J].生态学报,2011,31(18):5207-5216.
- [30] 齐鹏,刘晓静,刘艳楠,等.施氮对不同紫花苜蓿品种氮积累及土壤氮动态变化的影响[J].草地学报,2015,23(5):1026-1032.
- [31] 张进霞,刘晓静,郝凤,等.氮磷调控对紫花苜蓿氮积累与土壤氮磷营养的影响[J].草地学报,2016,24(1):61-68.
- [32] 郝凤,刘晓静,齐敏兴,等.磷水平和接根瘤菌对紫花苜蓿根系形态特征和根瘤固氮特性的影响[J].草地学报,2015,23(4):818-822.
- [33] 于铁峰,郝凤,张永亮,等.沙地豆禾混播草地土壤酶与土壤养分对混播比例的响应[J].草地学报,2021,29(6):1217-1223.
- [34] 徐志闻,刘亚斌,胡夏嵩,等.基于水分和原位电导率的西宁盆地盐渍土含盐量估算模型[J].农业工程学报,2019,35(5):148-154.
- [35] 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.
- [36] White J, Hodgson J. New Zealand Pasture and Crop Science [M]. Oxford University Press,2000.
- [37] Fan Jingwei, Du Yanlei, Wang Bingru, et al. Forage yield, soil water depletion, shoot nitrogen and phosphorus uptake and concentration, of young and old stands of alfalfa in response to nitrogen and phosphorus fertilisation in a semiarid environment [J]. Field Crops Research, 2016,198:247-257.
- [38] 陈宝书.豆科和禾本科牧草之间的竞争[J].牧草与饲料,1993,4:23-27.

(上接第 15 页)

- [34] Zhang Shaoliang, Jiang Lili, Liu Xiaobing, et al. Soil nutrient variance by slope position in a Mollisol farmland area of Northeast China [J]. Chinese Geographical Science, 2016,26(4):508-517.
- [35] Shi Peili, Zhang Yuxiu, Hu Zhenqi, et al. The response of soil bacterial communities to mining subsidence in the West China aeolian sand area [J]. Applied Soil Ecology, 2017,121:1-10.
- [36] Zhen Qing, Ma Wenmei, Li Mingming, et al. Effects of vegetation and physicochemical properties on solute transport in reclaimed soil at an opencast coal mine site on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2015,133:403-411.
- [37] 马康,杨帆,张玉秀.西北干旱半干旱区煤炭井工开采对土壤肥力质量的影响研究进展[J].中国科学院大学学报,2020,37(4):442-449.
- [38] 崔鲁楠.淮南矿区不同塌陷类型土壤典型特性研究[D].安徽 合肥:安徽大学,2016.
- [39] 郑海金,王辉文,杨洁,等.地表径流和壤中流对坡耕地氮磷流失影响研究概述[J].中国水土保持,2015(2):36-39.