

# 施肥和豆禾混播对松嫩平原退化草地修复的影响

方玉凤<sup>1</sup>, 曹志伟<sup>1\*</sup>, 唐丽红<sup>2</sup>, 任秀彬<sup>1</sup>, 姜峰<sup>1</sup>, 蒋先翠<sup>1</sup>, 高野<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一心乡乡村振兴发展中心, 黑龙江 大庆 166200)

**摘要:**【目的】探索适合松嫩平原中度退化草地的最佳修复模式,为松嫩平原退化草地的保护修复提供技术支持。【方法】设置紫花苜蓿(*Medicago sativa*)与羊草(*Leymus chinensis*)2种混播比例,结合不同N施用量,分析土壤养分含量、牧草品质和产量之间的关系。【结果】施肥水平显著影响群落物种丰富度( $P<0.01$ ),施肥水平、混播比例及二者交互显著影响土壤有机质、Shannon-Wiener多样性指数、牧草粗蛋白含量及产量( $P<0.05$ )。土壤全氮、牧草粗蛋白含量与施氮量存在极显著正相关性( $P<0.01$ )。两种混播比例下,土壤全氮含量变化与N施用量一致;N施用量300 kg/hm<sup>2</sup>的牧草粗蛋白含量高达20.22%,与其他处理差异显著( $P<0.05$ )。【结论】N施用量200~250 kg/hm<sup>2</sup>在试验当年秋季和第二年春季均获得最佳产量;豆禾1:2混播的群落丰富度和多样性优于2:2混播,其中N施用量150 kg/hm<sup>2</sup>表现最佳。

**关键词:**豆禾混播;土壤养分;牧草产量;粗蛋白;群落构成

中图分类号:S54 文献标志码:A 文章编号:1009-5500(2024)02-0192-08

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2024.02.020



草原约占我国国土面积的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。草地养分含量受环境、植被类型、草地利用方式等因素的显著影响<sup>[2]</sup>。研究证实人类活动(如载畜量增加、耕种等)加速了草地退化<sup>[3]</sup>,引起草原年净初生产力(ANPP)减少,土壤养分流失、有机质含量下降<sup>[4-5]</sup>。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>[6]</sup>。施肥通过改变植物地上、地下竞争强度,引起植物群落多样性的改变,其中,氮是影响草地生产力、对退化草甸恢复效果明显的主要因素<sup>[7-9]</sup>。豆禾混播比单播一种牧草更能充分利用土壤养分<sup>[10-11]</sup>,在固定、利用氮素,空间竞争等方面具有优

势<sup>[12-13]</sup>。豆禾牧草混播提高了牧草产量、粗蛋白含量<sup>[14]</sup>,群落多样性指数、丰富度指数<sup>[15]</sup>,群落生物量稳定性增大<sup>[16]</sup>。对提高浅层土壤全氮含量<sup>[17]</sup>、有机质和速效氮含量影响显著<sup>[18]</sup>。目前开展的研究均侧重于单一因素(即施肥或豆禾牧草混播)对退化草地土壤养分及牧草产量的影响,但对二者互作在提升退化草地土壤肥力及牧草产量方面的研究较少。

松嫩平原草原区处于国际地圈-生物圈计划(IGBP)之一的中国东北样带(NECT)内<sup>[19]</sup>,生态较脆弱,已普遍存在退化现象,土壤养分流失严重。近年来有引进黄花草木樨(*Melilotus officinalis*)、翻耙撒播野大麦(*Hordeum brevisubularum*)等措施对松嫩退化草地进行修复的研究<sup>[20-21]</sup>。但有关于施肥和混播应用于该地区的研究鲜有报道。因此,本研究通过评估豆禾混播、施肥及其交互效应对土壤养分、牧草产量、品质、群落构成等因素的影响,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,为松嫩平原退化草地的保护修复提供技术支持。

收稿日期:2023-02-10;修回日期:2023-03-02

基金项目:黑龙江省省属科研院所科研业务费项目(CZKYF2020C019)

作者简介:方玉凤(1988-),女,黑龙江富裕县人,硕士,高级工程师。主要研究方向为草原生态保护与修复。E-mail:qqhrfyf@163.com

\*通信作者。E-mail:cwv898@163.com

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究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, 海拔198.8 m),地处松嫩平原典型草原带内,属温带半干旱大陆性季风气候,年均气温3.6~4.4℃,年均降水量428 mm,无霜期148 d。土壤为草甸土、风沙土、轻度盐碱土。试验地为长期围封禁牧的天然打草场,草地类型为温性草甸草原,优势种为糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、羊草等;伴生种为莎草(*Cyperus difformis*)、多叶棘豆(*Oxytropis myriophylla*)等;偶见种为兴安胡枝子(*Lespedeza daurica*)、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 jensenseensis*)等。每年秋季刈割,产草量为干草80~100 kg/666 m<sup>2</sup>。通过近2年实地调查,该草地处于轻度至中度退化状态。

表1 施肥及播种组合方案

Table 1 Combination of fertilization and sowing

主区 副区	施肥处理							
	A <sub>0</sub> (N <sub>0</sub> )	A <sub>1</sub> (N <sub>50</sub> )	A <sub>2</sub> (N <sub>100</sub> )	A <sub>3</sub> (N <sub>150</sub> )	A <sub>4</sub> (N <sub>200</sub> )	A <sub>5</sub> (N <sub>250</sub> )	A <sub>6</sub> (N <sub>300</sub> )	
混播 处理	B <sub>1</sub> (豆禾 2:2混播)	A <sub>0</sub> B <sub>1</sub> (豆禾2:2 混播+N <sub>0</sub> )	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> (豆禾2:2 混播+N <sub>50</sub> )	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> (豆禾2:2 混播+N <sub>100</sub> )	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> (豆禾2:2 混播+N <sub>150</sub> )	A <sub>4</sub> B <sub>1</sub> (豆禾2:2 混播+N <sub>200</sub> )	A <sub>5</sub> B <sub>1</sub> (豆禾2:2 混播+N <sub>250</sub> )	A <sub>6</sub> B <sub>1</sub> (豆禾2:2 混播+N <sub>300</sub> )
	B <sub>2</sub> (豆禾1 :2混播)	A <sub>0</sub> B <sub>2</sub> (豆禾1:2 混播+N <sub>0</sub> )	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> (豆禾1:2 混播+N <sub>50</sub> )	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> (豆禾1:2 混播+N <sub>100</sub> )	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> (豆禾1:2 混播+N <sub>150</sub> )	A <sub>4</sub> B <sub>2</sub> (豆禾1:2 混播+N <sub>200</sub> )	A <sub>5</sub> B <sub>2</sub> (豆禾1:2 混播+N <sub>250</sub> )	A <sub>6</sub> B <sub>2</sub> (豆禾1:2 混播+N <sub>300</sub> )

### 1.3 调查项目及测定方法

2021年8月中旬进行试验区调查,每个试验小区随机选取3个具有代表性,牧草长势、物种构成基本一致的地块设定样方,避免边界效应。清查1 m<sup>2</sup>样方内的植物种类、数量、高度、盖度,齐地面刈割全部地上部分并立即称重,带回实验室进行产量和品质的测定,3个样方的测定值取平均值进行分析。用土钻取0~30 cm土壤样品,带回实验室进行理化性质的测定,3个样方的土样混合在一起后进行化验分析。产量的测定为105℃烘箱杀青30 min,65℃烘干至恒重、称重;粗蛋白含量为植物样粉碎后过0.25 mm筛,采用凯氏定氮法测定。土壤有机质含量采用4 mol/L盐

### 1.2 试验设计

试验于2021年5月末进行。采用裂区设计,主区为混播处理,副区为施肥处理,参考在辽河平原试验效果较好<sup>[22]</sup>的施肥、混播试验设计。每个小区面积666 m<sup>2</sup>。6个施氮量A<sub>1</sub>~A<sub>6</sub>分别为50、100、150、200、250、300 kg/hm<sup>2</sup>,肥料选用尿素(N 46%)。另有单播苜蓿不施肥(S-M)、单播羊草不施肥(S-L)和未退化草地(CK)处理。

选用本地区适生性较强的优良豆科牧草紫花苜蓿和禾本科牧草羊草进行间行混播,紫花苜蓿单播播种量为22.5 kg/hm<sup>2</sup>,羊草单播播种量为75 kg/hm<sup>2</sup>;2种混播处理在总量上进行区分:豆禾2:2混播处理(B<sub>1</sub>为对应草种单播播种量的50%,即紫花苜蓿11.25 kg/hm<sup>2</sup>+羊草37.5 kg/hm<sup>2</sup>)、豆禾1:2混播处理(B<sub>2</sub>为对应草种单播播种量的33%和67%,即紫花苜蓿7.5 kg/hm<sup>2</sup>+羊草50 kg/hm<sup>2</sup>)。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(表1)。

酸浸提,碳氮分析仪测定;土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定<sup>[23]</sup>。2022年6月下旬进行春季调查,产量的测定方法同上。

### 1.4 数据计算<sup>[24]</sup>与分析

$$\text{Margalef 丰富度指数 } DMG \ D = \frac{S - 1}{\ln N}$$

Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H = - \sum (P_i) (\ln P_i)$$

式中:S为群落中物种数目;N为观察到的个体总数;P<sub>i</sub>为第i个物种占总数的比例。

采用WPS Office Excel进行数据处理和绘图,IBM SPSS Statistics 22.0进行数据分析,施肥、混播

及二者交互作用对各指标的影响使用 Two-Way ANOVA 方差分析,对结果差异显著的因素采用 Duncan 多重比较;对同一混播比例下,不同施肥水平对各因素的影响采用单因素 ANOVA 检验, Duncan 事后多重比较。单样本 K-S 检验进行正态分布检验,对于呈正态分布的数据采用 Pearson 双尾检验法进行相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 施肥和混播对土壤指标、牧草品质、群落构成的综合影响

混播比例和施肥水平对全氮含量影响极显著 ( $P < 0.01$ ),二者交互作用影响不显著;混播比例、施肥水平及交互作用对有机质含量影响显著 ( $P < 0.05$ );混播比例、施肥水平及二者交互作用对粗蛋白含量、Shannon-Wiener 多样性指数的影响极显著 ( $P < 0.01$ ),施肥水平对 Margalef 丰富度指数的影响极显著

( $P < 0.01$ ),混播比例和交互作用影响不显著。

### 2.2 施肥和混播对土壤全氮和有机质的影响

2种混播比例下,土壤全氮量变化与氮施用量一致(表3)。2:2混播中,处理 A<sub>6</sub>、A<sub>5</sub>、A<sub>4</sub>与单播紫花苜蓿均存在显著差异( $P < 0.05$ )。1:2混播中,处理 A<sub>6</sub>、A<sub>5</sub>、A<sub>4</sub>与处理 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、单播紫花苜蓿差异显著( $P < 0.05$ )。以混播比例作全氮含量的分析,2:2混播高于1:2混播。有机质含量方面,2种混播比例下,均为 A<sub>4</sub>处理的有机质含量最高,分别为 1.633% 和 1.617%,CK 最低,为 0.816%。从施氮水平来看,处理 A<sub>4</sub>最高,处理 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>最低,其他4个处理介于中间,这3组处理之间存在显著差异( $P < 0.05$ )。从混播比例来看,2:2混播的有机质含量高于1:2混播。相关性分析发现,全氮与施氮量之间存在极显著正相关性( $P < 0.01$ ),相关系数为  $r = 0.721$ ,显著性 Sig = 0.001。说明施肥显著影响了土壤中的全氮含量。

表2 土壤指标方差分析 F 值 ( $df=26$ )

Table 2 Soil index analysis of variance F value ( $df=26$ )

	全氮含量	有机质含量	粗蛋白含量	Margalef 丰富度指数	Shannon-Wiener 指数
混播	9.625**	6.607*	81.365**	2.305 <sup>ns</sup>	22.545**
施肥	9.171**	24.629**	632.164**	20.100**	43.352**
交互作用	0.626 <sup>ns</sup>	12.866**	210.421**	1.843 <sup>ns</sup>	14.526**

注:\*表示在 0.05 水平存在显著差异;\*\*表示在 0.01 水平上差异极显著;ns 表示差异不显著 ( $P > 0.05$ ),下同。

表3 施肥和混播对土壤全氮和有机质的影响

Table 3 Effects of fertilization and mixed sowing on soil total nitrogen and organic matter

副区 (施肥水平)	全氮含量/(g·kg <sup>-1</sup> )			有机质含量/%		
	主区(混播比例)		施肥水平	主区(混播比例)		施肥水平
	2:2	1:2		2:2	1:2	
A <sub>0</sub>	0.867±0.130 <sup>abcd</sup>	0.673±0.010 <sup>CD</sup>	0.770±0.070 <sup>cd</sup>	1.453±0.050 <sup>b</sup>	1.087±0.050 <sup>BC</sup>	1.270±0.090 <sup>b</sup>
A <sub>1</sub>	0.710±0.060 <sup>cd</sup>	0.611±0.040 <sup>D</sup>	0.661±0.040 <sup>d</sup>	0.924±0.030 <sup>cd</sup>	1.253±0.040 <sup>B</sup>	1.089±0.080 <sup>c</sup>
A <sub>2</sub>	0.774±0.050 <sup>bcd</sup>	0.638±0.020 <sup>D</sup>	0.706±0.040 <sup>cd</sup>	1.003±0.010 <sup>c</sup>	1.208±0.030 <sup>BC</sup>	1.105±0.050 <sup>c</sup>
A <sub>3</sub>	0.852±0.020 <sup>abcd</sup>	0.764±0.010 <sup>BCD</sup>	0.808±0.020 <sup>bc</sup>	1.390±0.050 <sup>b</sup>	1.181±0.060 <sup>BC</sup>	1.286±0.060 <sup>b</sup>
A <sub>4</sub>	0.902±0.050 <sup>abc</sup>	0.881±0.040 <sup>AB</sup>	0.892±0.030 <sup>ab</sup>	1.633±0.050 <sup>a</sup>	1.617±0.050 <sup>A</sup>	1.625±0.030 <sup>a</sup>
A <sub>5</sub>	0.956±0.020 <sup>ab</sup>	0.887±0.080 <sup>AB</sup>	0.922±0.040 <sup>ab</sup>	1.353±0.030 <sup>b</sup>	1.187±0.100 <sup>BC</sup>	1.270±0.060 <sup>b</sup>
A <sub>6</sub>	0.991±0.080 <sup>a</sup>	0.966±0.100 <sup>A</sup>	0.978±0.060 <sup>a</sup>	1.420±0.020 <sup>b</sup>	1.162±0.110 <sup>BC</sup>	1.291±0.080 <sup>b</sup>
混播比例	0.865±0.030	0.774±0.030		1.311±0.050	1.242±0.040	
S-L	0.803±0.040 <sup>abcdABC</sup>			1.113±0.050 <sup>BC</sup>		
S-M	0.669±0.040 <sup>dCD</sup>			1.047±0.020 <sup>cC</sup>		
CK	0.841±0.050 <sup>abcdAB</sup>			0.816±0.060 <sup>dD</sup>		

注:主区(混播比例)下的小写字母表示处理混播 2:2 与单播、CK 之间的差异性分析,大写字母表示处理混播 1:2 与单播、CK 之间的差异性分析,施肥水平下的小写字母表示不同施肥水平之间的差异性分析。不同字母表示差异显著。

### 2.3 施肥和混播对牧草产量指标的综合影响

不同混播比例、施肥水平对2021年秋季干草产量影响极显著( $P<0.01$ ),二者交互作用的影响显著

( $P<0.05$ );施肥水平对2022年春季干草产量影响极显著( $P<0.01$ ),不同混播比例及二者交互作用对干草产量的影响未达到显著水平(表4)。

表4 2021年和2022年的干草产量的方差分析( $df=26$ )

Table 4 Analysis of variance for hay yield of 2021 and 2022( $df=26$ )

	2021年		2022年	
混播	$F=19.263$	$Sig=0.000^{**}$	$F=0.327$	$Sig=0.572^{ns}$
施肥	$F=594.633$	$Sig=0.000^{**}$	$F=4.834$	$Sig=0.002^{**}$
交互作用	$F=5.429$	$Sig=0.010^*$	$F=0.719$	$Sig=0.638^{ns}$

### 2.4 施肥和混播对牧草产量的影响

2021年秋季,2:2混播比例下, $A_4$ 处理的产量最高,达到 $392.82\text{ g/m}^2$ ;其次是 $A_5$ 处理; $A_0$ 处理产量最低,为 $94.79\text{ g/m}^2$ 。 $A_4$ 、 $A_5$ 、 $A_0$ 与其他处理均存在显著差异( $P<0.05$ )(表5)。1:2混播比例下,依旧为 $A_4$ 、 $A_5$ 处理产量最高,二者差异不显著; $A_0$ 处理产量最低,与其他处理差异显著( $P<0.05$ )。以施氮水平作产量的分析,处理 $A_4$ 、 $A_5$ 的产量最高,处理 $A_3$ 、 $A_6$ 的产量相当,约为处理 $A_4$ 、 $A_5$ 产量的1/2,处理 $A_1$ 、 $A_2$ 差异不显著,略低于处理 $A_3$ 、 $A_6$ 、 $A_0$ 处理的产量最低。以混播比例作产量的分析,豆禾1:2混播的产量高于豆禾2:2

混播,但差别不大。单播羊草的产量高于单播紫花苜蓿,CK的产量与处理 $A_2$ 近似。

2022年春季,2:2混播比例下,仍为处理 $A_4$ 、 $A_5$ 的产量最高,与处理 $A_6$ 之间差异不显著,与其余4个处理差异显著( $P<0.05$ ),处理 $A_0$ 仍为最低产量;1:2混播比例下, $A_2$ 处理产量最高,其次为 $A_4$ 、 $A_5$ 、 $A_6$ 处理,各处理之间差异不显著。以施氮水平作产量的分析,处理 $A_4$ 、 $A_5$ 的产量最高,处理 $A_2$ 、 $A_6$ 略低于处理 $A_4$ 、 $A_5$ ,两组处理之间差异不显著;以混播比例作产量的分析,2:2混播的产量略高于1:2混播。

表5 施肥和混播对2021年秋季和2022年春季牧草产量的影响

Table 5 Effects of fertilization and mixed sowing on yield in 2021 and 2022

副区(施肥水平)	2021年秋季产量/( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )			2022年春季产量/( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )		
	主区(混播比例)		施肥水平	主区(混播比例)		施肥水平
	2:2	1:2		2:2	1:2	
$A_0$	$94.79\pm 3.05^e$	$94.03\pm 3.70^d$	$94.41\pm 2.15^e$	$84.91\pm 14.44^c$	$86.05\pm 33.16^a$	$85.48\pm 16.13^c$
$A_1$	$129.76\pm 3.87^d$	$164.02\pm 0.99^{bc}$	$146.89\pm 7.87^d$	$95.73\pm 7.71^c$	$105.85\pm 9.56^a$	$100.79\pm 5.94^{bc}$
$A_2$	$133.83\pm 4.28^{cd}$	$145.40\pm 4.91^c$	$139.61\pm 3.90^d$	$132.54\pm 9.16^{bc}$	$171.59\pm 35.03^a$	$152.07\pm 18.02^{ab}$
$A_3$	$153.73\pm 0.70^{cd}$	$186.57\pm 3.36^b$	$170.15\pm 7.50^c$	$91.18\pm 7.27^c$	$88.45\pm 21.99^a$	$89.81\pm 10.38^c$
$A_4$	$392.82\pm 1.51^a$	$376.95\pm 1.36^a$	$384.89\pm 3.66^a$	$194.98\pm 21.06^a$	$157.34\pm 39.85^a$	$176.16\pm 21.84^a$
$A_5$	$315.44\pm 2.35^b$	$354.28\pm 7.55^a$	$334.86\pm 9.38^b$	$195.37\pm 30.39^a$	$144.33\pm 12.67^a$	$169.85\pm 18.63^a$
$A_6$	$168.39\pm 4.53^c$	$171.50\pm 4.59^{bc}$	$169.95\pm 2.97^c$	$157.74\pm 27.66^{ab}$	$145.30\pm 35.69^a$	$151.52\pm 20.38^{ab}$
混播比例	$198.39\pm 23.01$	$213.25\pm 22.46$		$136.06\pm 11.59$	$128.42\pm 11.60$	
S-L		$61.64\pm 0.93$			$59.01\pm 3.12$	
S-M		$46.49\pm 1.18$			$60.51\pm 2.26$	
CK		$140.18\pm 5.76$			$55.32\pm 1.53$	

### 2.5 施肥和混播对牧草品质的影响

2:2混播比例下, $A_6$ 处理的粗蛋白含量最高,为21.96%;1:2混播比例下,处理 $A_2$ 的粗蛋白最高,其次是处理 $A_6$ ,分别为18.76%和18.49%,二者差异不显著( $P>0.05$ )(图1)。2种混播比例下,均为单播羊草和CK的粗蛋白含量最低,在10%以下;综合来看,两种混播比例处理 $A_6$ 粗蛋白含量最高,为20.22%,与其

他处理存在显著差异( $P<0.05$ );2:2混播高于1:2混播。粗蛋白含量与施氮量相关分析发现,二者存在极显著正相关性( $P<0.01$ ),相关系数 $r=0.632$ 。

### 2.6 施肥和混播对牧草群落构成的影响

单播羊草的Margalef丰富度指数高于单播紫花苜蓿,二者差异显著( $P<0.05$ ),1:2混播高于2:2混播;Margalef丰富度指数最低的是CK处理,仅有0.94(表

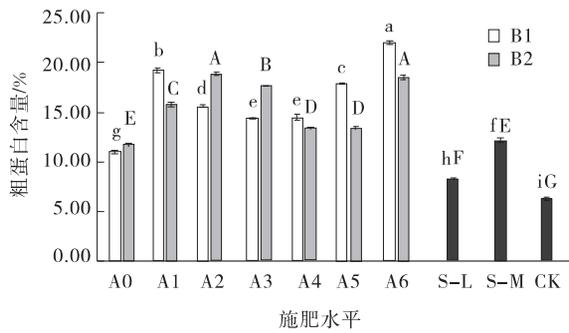


图1 施肥和混播对牧草粗蛋白含量的影响

Figure 1 Effects of fertilization and mixed sowing on crude protein content of herbage

6)。2:2混播比例下,A<sub>0</sub>、A<sub>3</sub>处理最高,处理A<sub>5</sub>最低;1:2混播比例下,A<sub>0</sub>、A<sub>6</sub>处理最高,处理A<sub>4</sub>、A<sub>5</sub>最低。施

肥处理中,A<sub>0</sub>处理最高,为2.66,其次是A<sub>3</sub>处理,为2.01,均与其他处理差异显著( $P<0.05$ ),最低的为A<sub>4</sub>、A<sub>5</sub>处理。单播羊草的Shannon-Wiener多样性指数高于单播紫花苜蓿,二者差异显著( $P<0.05$ ),均显著高于CK;1:2混播高于2:2混播。2:2混播比例下,Shannon-Wiener多样性指数最高为A<sub>0</sub>处理,为2.23,最低的是A<sub>5</sub>、A<sub>6</sub>处理;1:2混播比例下,仍为A<sub>0</sub>处理最高,为2.30,最低的是A<sub>4</sub>、A<sub>5</sub>处理。综合来看,Shannon-Wiener多样性指数最高为A<sub>0</sub>处理,其次是A<sub>3</sub>处理,与各处理差异显著( $P<0.05$ )。对Margalef丰富度指数和Shannon-Wiener多样性指数进行相关性分析,可以得到二者之间存在极显著正相关性( $P<0.01$ ),相关系数 $r=0.901$ 。

表6 施肥和混播对群落Margalef丰富度和Shannon-Wiener多样性指数的影响

Table 6 Effects of fertilization and mixed sowing on Margalef richness index and Shannon-Wiener diversity index of community

副区 (施肥水平)	Margalef丰富度指数			Shannon-Wiener多样性指数		
	主区(混播比例)		施肥水平	主区(混播比例)		施肥水平
	2:2	1:2		2:2	1:2	
A <sub>0</sub>	2.41±0.31 <sup>a</sup>	2.91±0.08 <sup>A</sup>	2.66±0.18 <sup>a</sup>	2.23±0.06 <sup>a</sup>	2.30±0.01 <sup>A</sup>	2.26±0.03 <sup>a</sup>
A <sub>1</sub>	1.54±0.15 <sup>cd</sup>	1.91±0.18 <sup>B</sup>	1.73±0.13 <sup>b</sup>	1.78±0.04 <sup>bc</sup>	2.07±0.04 <sup>B</sup>	1.92±0.07 <sup>c</sup>
A <sub>2</sub>	1.81±0.11 <sup>bc</sup>	1.78±0.08 <sup>BC</sup>	1.80±0.06 <sup>b</sup>	1.82±0.06 <sup>bc</sup>	2.06±0.03 <sup>B</sup>	1.94±0.06 <sup>c</sup>
A <sub>3</sub>	2.13±0.20 <sup>ab</sup>	1.89±0.25 <sup>B</sup>	2.01±0.15 <sup>b</sup>	2.09±0.04 <sup>a</sup>	2.00±0.05 <sup>B</sup>	2.05±0.04 <sup>b</sup>
A <sub>4</sub>	1.37±0.21 <sup>ede</sup>	1.14±0.06 <sup>DE</sup>	1.26±0.11 <sup>c</sup>	1.91±0.05 <sup>b</sup>	1.62±0.02 <sup>C</sup>	1.76±0.07 <sup>d</sup>
A <sub>5</sub>	1.10±0.05 <sup>de</sup>	1.32±0.14 <sup>DE</sup>	1.21±0.08 <sup>c</sup>	1.54±0.03 <sup>de</sup>	1.73±0.04 <sup>C</sup>	1.64±0.05 <sup>e</sup>
A <sub>6</sub>	1.73±0.07 <sup>bc</sup>	2.03±0.06 <sup>B</sup>	1.88±0.08 <sup>b</sup>	1.67±0.03 <sup>cd</sup>	2.05±0.04 <sup>B</sup>	1.86±0.09 <sup>c</sup>
混播比例	1.73±0.11	1.86±0.13		1.86±0.05	1.97±0.05	
S-L		1.86±0.15 <sup>bcB</sup>			2.12±0.03 <sup>ab</sup>	
S-M		1.39±0.18 <sup>edeCD</sup>			1.72±0.06 <sup>cC</sup>	
CK		0.94±0.05 <sup>eE</sup>			1.45±0.04 <sup>ed</sup>	

### 3 讨论

豆禾混播较单播处理提高了表层土壤全氮、有机质含量<sup>[25-27]</sup>。单播紫花苜蓿的全氮和有机质含量高于单播羊草,这与豆科植物进行的根瘤固氮有关;单播羊草有氮的流失,而豆禾混播通过根瘤将流失的氮素固定下来<sup>[28]</sup>。同一施肥量下,豆禾2:2混播的土壤全氮和有机质含量均高于豆禾1:2混播,主要是因为此混播比例中,豆科牧草占比增加,提高了可转移到禾本科牧草的氮素的量,从而减少牧草对土壤中原有氮素的利用,造成氮素残留<sup>[29]</sup>,导致土壤中全氮含量更高。

2021年秋季,单播羊草的产量高于单播紫花苜蓿,说明单位面积禾本科羊草的产量高于豆科紫花苜

蓿的产量,这也符合豆禾1:2混播的产量略高于豆禾2:2混播的结论,主要原因可能是羊草单株所占空间小,单位面积下羊草生长密度高于紫花苜蓿。CK的产量与处理A<sub>2</sub>近似,初步认为对于中度退化草原来讲,氮施用量为100 kg/hm<sup>2</sup>时基本可以将牧草生产力恢复到天然未退化草原标准。2022年春季的产量调查,是在羊草开花期之前进行的,豆禾2:2混播的产量略高于豆禾1:2混播,可能是羊草还处于生长旺盛期,直接影响着禾本科植物占比较大的豆禾1:2混播的单位面积产量,也可能是施肥第二年,氮肥利用率减弱,豆禾2:2混播有更多的豆科植物,这些豆科植物在2021年扎根后,2022年可以释放更多的根瘤菌,影响了整个群落的单位面积产量。氮施用量200~250 kg/hm<sup>2</sup>的牧草产量高于氮施用量300 kg/hm<sup>2</sup>的产

量,主要原因是羊草分蘖数随着施氮量的增加先增加后减少<sup>[30]</sup>,说明过多施氮影响羊草分蘖。

由于植物品质是用2021年秋季取样进行测定的,羊草在该时期的茎叶比增大,植物体内氮含量逐渐降低,粗蛋白含量下降<sup>[31]</sup>,对于紫花苜蓿来说,株龄越大,粗蛋白含量越低<sup>[32]</sup>,成熟期含量最低<sup>[33]</sup>,试验结果显示单播羊草的粗蛋白含量低于单播紫花苜蓿,豆禾2:2混播高于豆禾1:2混播,说明在生长后期,羊草的粗蛋白含量低于紫花苜蓿。施肥可提高羊草和紫花苜蓿的粗蛋白含量<sup>[34-35]</sup>,显著高于不施肥牧草( $P < 0.05$ ),表明不同施氮水平都能增加牧草粗蛋白含量<sup>[36]</sup>,施肥、混播及二者交互对于提高牧草品质皆影响显著( $P < 0.05$ )。

物种多样性对退化草地改良恢复起着主导作用<sup>[37]</sup>,草地物种多样性越高,生态系统越稳定<sup>[38-39]</sup>。丰富度指数和多样性指数方面,单播羊草高于单播紫花苜蓿,这可能是紫花苜蓿占据较大生境空间,在单播紫花苜蓿的情况下,该群落以紫花苜蓿为优势种,其他植物得不到有效光照及适宜的生长空间,导致群落多样性和丰富度下降。而羊草虽然长势较高,但单株所占地上空间很小,本试验播种有行间距30 cm,这就给其他植物的生长留出了一定空间,最终导致单播羊草的群落多样性和丰富度更高,也造成了混播1:2的群落多样性高于混播2:2的结论。A<sub>0</sub>处理的丰富度和多样性指数显著高于同一混播比例下的施肥处理,表明施肥降低了群落物种丰富度,普遍认为养分添加降低了物种丰富度,主要原因是施肥有利于以禾本科植物为优势种的群落生物量向地上分配<sup>[38]</sup>,在养分和光照等资源的竞争中占有优势,处于劣势的植物数量减少甚至消失<sup>[40]</sup>,降低了群落多样性。CK处理的丰富度和多样性指数最低,说明混播牧草在一定程度上对增加群落多样性、改善群落结构有促进作用。

## 4 结论

施肥可改善土壤养分含量、提高牧草品质,豆禾混播能增加群落多样性、改善群落结构。豆禾2:2混播在增加土壤全氮和有机质含量、提高牧草粗蛋白含量方面优于豆禾1:2混播。施氮量在200~250 kg/hm<sup>2</sup>时,2种混播比例牧草均可获取最佳地上生物量,混播措施中,禾本科植物占比较大可在第一年获得相

对更高的产量,豆科植物占比较大可在第二年获得相对更高的产量。豆禾1:2混播的群落多样性和丰富度高于豆禾2:2混播,氮施用量150 kg/hm<sup>2</sup>时,对草地多样性的维持具有积极作用。

## 参考文献:

- [1] Kang Le, Han Xingguo, Zhang Zhibin, *et al.* Grassland eco-systems in China: review of current knowledge and research advancement[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 2007, 362(1482): 997-1008.
- [2] 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]. 兰州: 甘肃农业大学, 2010.
- [3] Li Hui, Hong Ying, Deng Guorong, *et al.* Impacts of climate change and human activities on net primary productivity of grasslands in Inner Mongolia, China during 1982-2015[J]. The Journal of Applied Ecology, 2021, 32(2): 415-424.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Liu Changcheng, Liu Yuguo, Guo Ke, *et al.* Effects of nitrogen, phosphorus and potassium addition on the productivity of a karst grassland: Plant functional group and community perspectives [J]. Ecological Engineering, 2018, 117: 84-95.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 刘捷. 浅谈国内外牧草品种选育与人工草地建植技术发展[J]. 天津农林科技, 2006(3): 36-37.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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[J]. 草地学报, 2021, 29(11): 2583—2590.
- [15] 孙伟, 刘玉玲, 王德平, 等. 补播羊草和黄花苜蓿对退化草甸植物群落特征的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(8): 1809—1817.
- [16] 段丽辉, 刘晓丽, 韩冰, 等. 乡土物种补播对青藏高原高寒草甸群落稳定性的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(8): 1793—1800.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 张新时, 高琼, 杨奠安, 等. 中国东北样带的梯度分析及其预测[J]. 植物学报, 1997, 39(9): 785—799+889—890.
- [20] 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]//Proceedings of Conference on Environmental Pollution and Public Health(CEPPH 2012, Scientific Research Publishing, 2012: 757—761.
- [21] 李强. 不同恢复措施对松嫩平原退化草地的作用[D]. 长春: 东北师范大学, 2010.
- [22] 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.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] 杨利民, 韩梅, 李建东. 中国东北样带草地群落放牧干扰植物多样性的变化[J]. 植物生态学报, 2001, 25(1): 110—114.
- [25] 吴晓娟, 杨梅, 芦奕晓, 等. 混播比例和施氮肥对箭筈豌豆/燕麦草地根系特性的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(9): 106—116.
- [26] 来幸樑, 师尚礼, 吴芳, 等. 紫花苜蓿与3种多年生禾草混播草地的土壤养分特征[J]. 草业科学, 2020, 37(1): 52—64.
- [27] 李文, 魏廷虎, 永措巴占, 等. 混播比例对三江源人工草地植被和土壤养分特征的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(12): 39—48.
- [28] 钱诗祎, 德科加, 冯廷旭, 等. 高寒地区一年生禾豆混播对土壤养分与牧草营养的影响[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2022, 52(4): 34—40.
- [29] 郑伟, 加娜尔古丽, 唐高溶, 等. 混播种类与混播比例对豆禾混播草地浅层土壤养分的影响[J]. 草业科学, 2015, 32(3): 329—339.
- [30] 董晓兵, 郝明德, 郭胜安, 等. 氮磷肥配施对羊草干草产量、养分吸收及品质影响[J]. 草地学报, 2014, 22(6): 1232—1238.
- [31] 田野, 张爽, 刘佳, 等. 不同刈割时期和留茬高度对羊草割草地产量和品质的影响[J]. 草原与草业, 2020, 32(1): 35—40.
- [32] 白玉龙, 乌艳虹, 韩晓华. 紫花苜蓿株龄与其营养成分关系的研究[J]. 草业科学, 1999, 16(1): 18—21.
- [33] 杨何宝, 李继泉, 王俊娟, 等. 有机肥施用水平对紫花苜蓿粗蛋白含量及氮代谢关键酶活性的影响[J]. 保定: 河北农业大学学报, 2015, 38(5): 22—27.
- [34] 孙启忠, 桂荣. 影响苜蓿草产量和品质诸因素研究进展[J]. 中国草地, 2000(1): 58—64.
- [35] 邓庆华, 李化丹, 于翔, 等. 切根、施肥对羊草营养成分的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2018(2): 142—143.
- [36] 才源, 李子勇, 张春艳, 等. 氮肥与有机肥混施对新建植羊草草原生长的影响[J]. 农业与技术, 2020, 40(22): 123—127.
- [37] 宝音陶格涛, 刘美玲. 退化羊草草原在浅耕翻处理后植物群落生物量组成动态研究[J]. 自然资源学报, 2003, 18(5): 544—551.
- [38] 高若凡, 张天宇, 白杨, 等. 不同改良措施对退化割草场物种多样性及群落生产力的影响[J]. 中国草地学报, 2019, 41(6): 98—104.
- [39] Zhang Yong, Dong Shikui, Gao Qingzhu, *et al.* Responses of alpine vegetation and soils to the disturbance of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) at burrow level on the Qinghai-Tibetan Plateau of China[J]. Ecological Engineering: The Journal of Ecotechnology, 2016, 88(1): 232—236.
- [40] 杨元武, 周华坤, 李希来, 等. 高寒草甸物种多样性和生产力对养分添加的初期响应[J]. 西北农业学报, 2017, 26(2): 159—166.

# Effects of fertilization and mixed sowing on restoration of degraded grassland in Songnen Plain

FANG Yu-feng<sup>1</sup>, CAO Zhi-wei<sup>1</sup>, TANG Li-hong<sup>2</sup>, REN Xiu-bin<sup>1</sup>, JIANG Feng<sup>1</sup>,  
JIANG Xian-cui<sup>1</sup>, GAO Ye<sup>1</sup>

(1. Qiqihar Branch Heilongjiang Academy of Forestry Sciences, Qiqihar, 161005; 2. Rural Revitalization and Development Center of Yixin Township, Duer Bert Mongolian National Minority Autonomous County, Daqing, 166200, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the best restoration mode suitable for moderately degraded grassland and provide technical support for the protection and restoration of degraded grassland in Songnen Plain. [Method] The study examined two types of mixed sowing, involving *Medicago sativa* and *Leymus chinensis* (legume: grass inter-row patterns of 2:2 (B<sub>1</sub>) and 1:2 (B<sub>2</sub>)), along with seven levels of nitrogen fertilization of 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300 kg/hm<sup>2</sup>. The aim was to identify the optimal restoration model for moderately degraded grassland in Songnen Plain by analyzing soil nutrient content, forage quality and yield. [Result] Fertilizer levels significantly affected community species richness ( $P < 0.01$ ). Additionally, fertilizer levels, mixed sowing proportions, and their interaction significantly affected soil organic matter, Shannon-Wiener diversity index, crude protein content and forage yield ( $P < 0.05$ ). Significant positive correlations were observed between soil total nitrogen, forage crude protein content and nitrogen application ( $P < 0.01$ ). The variation in soil total nitrogen corresponded to the nitrogen application rate under both mixed sowing proportions. Forage crude protein content with 300 kg/hm<sup>2</sup> N reached 20.22%, significantly higher than other treatments ( $P < 0.05$ ). [Conclusion] Nitrogen application rate of 200~250 kg/hm<sup>2</sup> yielded the best results in the autumn of 2021 and the spring of 2022. The Margalef richness index and Shannon-Wiener diversity index of legume-grass in the 1:2 configuration were higher than those in the 2:2 configuration, with 150 kg/hm<sup>2</sup> N identified as optimal.

**Key words:** legume-grass mixed sowing; soil nutrient; forage yield; crude protein content; community composition

(责任编辑 刘建荣)