

DOI: 10.11686/cyxb2020009

http://cyxb.magtech.com.cn

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. 草业学报, 2020, 29(11): 91—101.

Zhang Y L, Yu T F, Hao F, *et al.* Effects of fertilization and legume-grass ratio on forage yield and NPK utilization efficiency. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(11): 91—101.

## 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

张永亮\*, 于铁峰, 郝凤, 高凯

(内蒙古民族大学农学院, 内蒙古 通辽 028042)

**摘要:** 氮磷钾施量、豆禾混播比例是影响混播草地产量和肥料利用效率的关键因素, 分析不同氮磷钾组合与混播比例下牧草产量和氮磷钾利用效率, 为豆禾混播草地高产栽培管理提供科学依据。以紫花苜蓿+无芒雀麦混播草地为对象, 采用 2 个间行混播比例(豆禾比 2:2 和 1:2)和 7 个氮磷钾组合 [ $N_{280}P_{150}K_0$  ( $A_1$ ),  $N_{350}P_{100}K_{360}$  ( $A_2$ ),  $N_{140}P_{300}K_{300}$  ( $A_3$ ),  $N_{420}P_{250}K_{120}$  ( $A_4$ ),  $N_{70}P_{50}K_{60}$  ( $A_5$ ),  $N_{210}P_0K_{240}$  ( $A_6$ ) 和  $N_0P_{200}K_{180}$  ( $A_7$ )] 进行田间试验。结果表明, 全年豆禾总产量以  $A_2$  处理最高 ( $11.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), 极显著 ( $P < 0.01$ ) 高于其他处理;  $A_1$  处理禾草产量 ( $3.80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 极显著 ( $P < 0.01$ ) 高于其他处理;  $A_2$  处理苜蓿产量 ( $8.60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 极显著 ( $P < 0.01$ ) 高于  $A_1, A_5, A_6, A_7$  处理; 缺氮 ( $A_7$ ) 处理全年禾草及豆禾总产量最低。氮肥及氮钾交互与豆禾产量、氮钾交互与苜蓿产量显著相关 ( $P < 0.05$ )。禾草、苜蓿及豆禾 NPK 偏生产力 and 吸收率随着 NPK 施量增加而逐渐下降,  $A_5$  处理极显著 ( $P < 0.01$ ) 高于其他处理。缺钾 ( $A_1$ ) 和低钾 ( $A_5$ ) 处理苜蓿 N 利用率明显降低, 缺磷 ( $A_6$ ) 和高磷 ( $A_3$ ) 处理禾草、苜蓿及豆禾 K 利用率明显下降。豆禾 2:2 混播全年苜蓿产量及豆禾总产量极显著 ( $P < 0.01$ ) 高于 1:2 混播。豆禾 2:2 混播苜蓿 NPK 偏生产力、吸收量和吸收率、豆禾 NPK 偏生产力、N 吸收量和吸收率极显著高于 1:2 混播, 禾草 NPK 偏生产力、吸收量和吸收率极显著 ( $P < 0.01$ ) 低于 1:2 混播。综合考虑牧草产量及养分利用效率, 豆禾 2:2 间行混播, 氮磷钾施量以  $N 140 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $P_2O_5 100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $K_2O 120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  较适宜。

**关键词:** 紫花苜蓿; 无芒雀麦; 混播草地; 施肥; 牧草产量; 肥料利用效率

## Effects of fertilization and legume-grass ratio on forage yield and NPK utilization efficiency

ZHANG Yong-liang\*, YU Tie-feng, HAO Feng, GAO Kai

College of Agronomy, Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028042, China

**Abstract:** The amounts of nitrogen, phosphorus and potassium applied and the ratio of legume to grass in mixed sowings are key factors affecting the yield and fertilizer use efficiency of mixed grassland. The forage yield and utilization efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium under different application ratios of those nutrients were analyzed to provide a scientific basis to manage cultivation of mixed grass-legume grassland for high yield. Field experiments were conducted on mixed swards of alfalfa and smooth brome. The experiment comprised two row configurations (legume : grass inter-row pattern 2 : 2 and 1 : 2) and seven nitrogen, phosphorus and potassium combinations:  $N_{280}P_{150}K_0$  ( $A_1$ ),  $N_{350}P_{100}K_{360}$  ( $A_2$ ),  $N_{140}P_{300}K_{300}$  ( $A_3$ ),  $N_{420}P_{250}K_{120}$  ( $A_4$ ),

收稿日期: 2020-01-07; 改回日期: 2020-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31560673, 31960352) 和内蒙古自治区科技储备项目 (2018MDCB03-02) 资助。

作者简介: 张永亮 (1959-), 男, 内蒙古包头人, 教授, 博士。E-mail: zyl8802@163.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zyl8802@163.com

$N_{70}P_{50}K_{60}(A_5)$ ,  $N_{210}P_0K_{240}(A_6)$  and  $N_0P_{200}K_{180}(A_7)$ , where subscripts after each element indicate the application rate as  $kg \cdot ha^{-1}$  N,  $P_2O_5$ , and  $K_2O$ , respectively. The highest value for annual total yield of mixed legume-grass forage ( $11.68 t DM \cdot ha^{-1}$ ) occurred in the  $A_2$  treatment, and yield in this treatment was significantly higher than in other treatments ( $P < 0.01$ ). Alfalfa yield in the  $A_2$  treatment was  $8.60 t DM \cdot ha^{-1}$ , and it was significantly higher than  $A_1$ ,  $A_3$ ,  $A_6$  and  $A_7$  treatments ( $P < 0.01$ ). Grass yield in the  $A_1$  treatment was  $3.80 t DM \cdot ha^{-1}$ , and it was significantly higher than in other treatments ( $P < 0.01$ ). Yields of grass and grass-legume forage were lowest in the zero nitrogen treatment,  $A_7$ . The combined grass-legume yield was significantly related to the rate of N fertilizer. Both combined grass-legume yield and alfalfa yield displayed a  $N \times K$  interaction ( $P < 0.05$ ). The NPK partial productivity, and uptake efficiency of grass, alfalfa and grass-legume forage all showed a downward trend with increase in NPK level, and the  $A_5$  treatment was significantly superior to other treatments ( $P < 0.01$ ). The nitrogen utilization efficiency of alfalfa decreased significantly in the zero potassium ( $A_1$ ) and low potassium ( $A_5$ ) treatments, and the potassium utilization efficiency of grass, alfalfa and grass-legume forage decreased significantly in the zero phosphorus ( $A_6$ ) and high phosphorus ( $A_3$ ) treatments. The annual total yield of alfalfa and legume-grass forage in the  $2 : 2$  row configuration were significantly higher than in the  $1 : 2$  configuration, with extreme significance ( $P < 0.01$ ). Also, the partial productivity, uptake rate and uptake efficiency of alfalfa NPK, and partial productivity of NPK, N uptake rate and N uptake efficiency of grass-legume forage in the  $2 : 2$  row configuration mixture were significantly higher than in the  $1 : 2$  configuration with extreme significance ( $P < 0.01$ ), and the partial productivity, uptake amount and absorption efficiency of grass NPK were significantly lower in the  $2 : 2$  than in the  $1 : 2$  configuration with extreme significance ( $P < 0.01$ ). Considering forage yield and nutrient utilization efficiency, alfalfa-smooth brome mixed sowing in a  $2 : 2$  row configuration, and fertilizer application of  $140 kg \cdot ha^{-1}$  N,  $100 kg \cdot ha^{-1}$   $P_2O_5$ , and  $120 kg \cdot ha^{-1}$   $K_2O$  can be recommended, based on these results.

**Key words:** alfalfa; smooth brome; mixed pastures; fertilization; forage yield; fertilizer use efficiency

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)和无芒雀麦(*Bromus inermis*)具有产草量高、品质好等特点,是我国北方地区重要的栽培牧草。用苜蓿与无芒雀麦混播建立人工草地不仅能提高饲草产量和品质,而且有较好的生态效益。禾本科牧草与豆科牧草混播后禾本科牧草能够利用豆科牧草固定的氮素,使土壤氮素减少,有利于提高豆科牧草固氮效率<sup>[1-2]</sup>,促进混播草地中禾本科牧草对氮的吸收<sup>[1]</sup>,降低土壤速效氮含量,从而提高土壤氮素的利用效率<sup>[3]</sup>。通过豆禾混播比例和种类优化能够增加豆禾混播牧草氮素固定和转移效率,是提高混播草地生产性能的有效途径<sup>[4]</sup>。混播牧草种类组合与混播比例是否科学合理,是豆禾混播草地能否稳定持续存在的关键,是实现混播群落组分稳定的基础<sup>[5]</sup>。豆禾合理搭配不仅可以降低植物间资源竞争,甚至可以改善种间关系,促进植物对养分的吸收<sup>[6]</sup>。施肥是豆禾混播草地获得高产、高效的重要管理措施,氮磷钾肥的合理施用对调控牧草生长发育、产量与品质有重要影响<sup>[7-8]</sup>,施肥过多或过少均不利于植物生长<sup>[9-10]</sup>,只有适量施用氮磷钾肥才能提高牧草产量和品质<sup>[8,11]</sup>,磷、钾肥可显著提高苜蓿的固氮能力<sup>[10,12]</sup>,氮肥对禾草产量的影响大于磷、钾肥<sup>[13]</sup>。适宜的氮磷钾配施可显著提高牧草产量<sup>[10]</sup>和促进牧草对氮磷钾的吸收<sup>[7-8,13]</sup>。沙地土壤通常养分贫乏,尤其是缺磷少氮,且保水保肥能力差。以苜蓿为主的人工草地年刈割3~4茬,营养元素从土壤中流失的较多,为了减少肥料流失,提高肥料利用率,保持苜蓿-禾草混播草地持续高效生产,合理施肥是技术关键之一。目前有关氮磷钾肥处理对苜蓿-禾草混播草地牧草产量及氮磷钾吸收利用效率的影响研究鲜有报道。科尔沁沙地风沙土壤氮磷严重缺乏,且速效钾含量较低,氮磷钾合理配合不仅是保障人工草地优质高产的有效措施,而且对维持豆禾混播草地群落稳定性起重要作用。为此,本研究通过田间氮磷钾肥效试验,系统分析了氮磷钾施肥处理和豆禾混播比例对混播禾草、苜蓿及豆禾产量、NPK偏生产力、吸收量、吸收率及利用率等的影响,以为豆禾混播草地合理施肥提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于西辽河平原内蒙古民族大学农牧业科技示范园区。试验地区为典型的温带大陆性季风气候,年平均气温  $6.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,极端最低温  $-30.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  积温  $3184\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,无霜期 150 d,年均降水量  $399.1\text{ mm}$ ,生长季降水量占全年的 89%。土壤为风沙土,土壤含有机质  $4.86\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾  $94.65\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效磷  $10.46\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,碱解氮  $11.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,pH 为 8.2。具有喷灌条件,干旱时灌水。

### 1.2 试验材料与试验设计

试验材料为紫花苜蓿(品种为工农 1 号,来自吉林省农业科学院)和无芒雀麦(品种为 Carlton,来自北京正道种业有限公司)。试验设豆禾 2:2( $B_1$ )和 1:2( $B_2$ )两种间行混播比例;采用 3 因素 7 水平的均匀设计方法进行氮磷钾组合设计,氮、磷、钾上限水平分别为  $N\ 420\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , $P_2O_5\ 300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , $K_2O\ 360\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,下限均为  $0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,共有  $N_{280}P_{150}K_0(A_1)$ , $N_{350}P_{100}K_{360}(A_2)$ , $N_{140}P_{300}K_{300}(A_3)$ , $N_{420}P_{250}K_{120}(A_4)$ , $N_{70}P_{50}K_{60}(A_5)$ , $N_{210}P_0K_{240}(A_6)$ 和  $N_0P_{200}K_{180}(A_7)$  7 个组合。氮肥为尿素(N 46%),磷肥为重过磷酸钙( $P_2O_5\ 44\%$ ),钾肥为氯化钾( $K_2O\ 60\%$ )。小区采用裂区设计,主区为施肥处理,副区为混播比例,小区面积  $4\text{ m}\times 5\text{ m}=20\text{ m}^2$ ,每个小区 12 行,行距 30 cm,3 次重复。试验地于 2017 年 5 月 22 日建植,苜蓿播种量为  $15\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,无芒雀麦播种量为  $30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,豆禾 2:2 处理苜蓿与禾草各占其单播量的 50%,豆禾 1:2 处理苜蓿与禾草各占其单播量的 33% 和 67%。施肥试验于 2018 年进行,磷肥在返青期(4 月 10)全部施入,氮肥和钾肥分 3 次施入,牧草返青期施设计总量的 40%,头茬刈割后施 30%,第 2 茬刈割后施 30%。第一次在垅间开 3~4 cm 沟施肥后覆土,第 2 和第 3 次撒施,施肥后浇水。年刈割 3 次,头茬和第 2 茬草在苜蓿盛花期刈割,第 3 茬在 9 月初刈割,留茬高度 5 cm。随时人工防除杂草。

### 1.3 牧草产量及氮、磷、钾含量测定

1) 牧草产量测定:在苜蓿盛花期(2018 年 6 月 9 日)进行第一次刈割,于 7 月 20 日和 9 月 1 日进行第 2 和第 3 次刈割。测产面积根据混播比例确定,即豆禾 1:2 处理每小区测定 3 行,每行测 1 m 长,2:2 处理每小区测定 4 行,每行测 1 m 长,留茬 5 cm,苜蓿和无芒雀麦分种修剪后称鲜重,再分别取鲜样 200~500 g 带回实验室  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  杀青 30 min, $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  烘干后称重,根据干鲜比和小区面积计算产草量。干草样粉碎过筛后装入塑料自封袋备用。

2) 牧草氮、磷、钾含量测定<sup>[14]</sup>:采用  $H_2SO_4-H_2O_2$  消化-凯氏定氮法测定氮含量。采用  $H_2SO_4-H_2O_2$  消化-钼锑抗比色法测定磷含量。采用  $H_2SO_4-H_2O_2$  消化-火焰分光光度法测定钾含量。

### 1.4 牧草氮、磷、钾相关指标计算<sup>[9]</sup>

全年牧草氮(磷、钾)素偏生产力( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )=施氮(磷、钾)全年牧草产量/施氮(磷、钾)量。

各茬牧草氮(磷、钾)素吸收量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )=各茬牧草干重 $\times$ 各茬氮(磷、钾)含量。

全年禾草氮(磷、钾)素吸收量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )=各茬禾草氮(磷、钾)素吸收量之和。

全年苜蓿氮(磷、钾)素吸收量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )=各茬苜蓿氮(磷、钾)素吸收量之和。

全年豆禾氮(磷、钾)素吸收量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )=全年禾草氮(磷、钾)素吸收量+全年苜蓿氮(磷、钾)素吸收量。

氮(磷、钾)素吸收效率( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )=全年牧草氮(磷、钾)素吸收量/施氮(磷、钾)量。

氮(磷、钾)素利用效率( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )=全年牧草产量/全年牧草氮(磷、钾)素吸收量。

### 1.5 数据统计与分析

采用 Excel 2007 进行数据处理和绘图,用 DPS 数据处理系统软件(DPS 17.10 高级版)进行差异显著性分析,采用 LSD 法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 施肥与混播比例对全年牧草产量的影响

施肥与混播比例及其互作对混播禾草、苜蓿及豆禾总产量影响极显著(表 1)。 $A_1$  处理禾草产量极显著( $P<0.01$ )高于其他处理, $A_2$  处理极显著高于  $A_3$ , $A_5$ , $A_6$  和  $A_7$  处理,与  $A_4$  处理差异不显著( $P>0.05$ )(表 2)。苜蓿

及豆禾产量均以 A<sub>2</sub> 处理最高(表 2), 豆禾 A<sub>2</sub> 处理产量极显著 ( $P < 0.01$ ) 高于其他处理, 苜蓿 A<sub>2</sub> 处理产量极显著 ( $P < 0.01$ ) 高于 A<sub>1</sub>, A<sub>5</sub>, A<sub>6</sub> 和 A<sub>7</sub> 处理, 显著 ( $P < 0.05$ ) 高于 A<sub>3</sub> 和 A<sub>4</sub> 处理。A<sub>7</sub> 处理下, 禾草产量及豆禾产量最低, 与其他处理(A<sub>5</sub> 豆禾产量除外) 间差异极显著 ( $P < 0.01$ ), 表明缺氮处理(A<sub>7</sub>) 严重影响了混播禾草及豆禾产量, 而较高的氮钾处理(A<sub>2</sub>) 可提高苜蓿产量及豆禾产量。缺氮(A<sub>7</sub>) 或低氮(A<sub>3</sub>) 条件下, 较高的磷肥能促进苜蓿生长, 提高苜蓿产量, 因此苜蓿 A<sub>7</sub> 处理产量极显著大于 A<sub>1</sub> 和 A<sub>5</sub> 处理, A<sub>3</sub> 处理极显著高于 A<sub>5</sub> 处理。

表 1 不同施肥和混播比例下牧草产量和 NPK 利用效率方差检验

Table 1 The results of variance analysis of different fertilization and mixed sowing ratio on the yield and N, P, K use efficiency of forage

项目 Item	处理 Treatment	方差分析 F 值 Analysis of variance F-value								
		禾草 Grass			苜蓿 Alfalfa			豆禾 Alfalfa+grass		
		A	B	A×B	A	B	A×B	A	B	A×B
产量 Yield		59.75***	124.11***	18.29***	27.84***	226.08***	11.35***	32.03***	46.55***	8.28***
偏生产力 Partial productivity	N	155.33***	50.63***	5.53**	758.34***	402.28***	79.13***	1299.32***	205.07***	88.27***
	P	204.84***	26.86***	9.53***	651.37***	270.34***	72.87***	1171.90***	149.67***	74.91***
	K	213.45***	32.04***	5.28**	633.71***	230.87***	74.19***	1094.42***	114.80***	76.49***
全年吸收量 Annual uptake rate	N	38.66***	96.02***	10.07**	12.56***	87.87***	6.29***	19.09***	16.58***	5.70***
	P	14.95***	33.08***	6.00***	11.40**	42.26**	2.32ns	21.05***	3.78ns	3.56**
	K	41.57***	104.04***	13.42***	10.73***	9.15**	3.02*	11.78***	3.44ns	4.23**
吸收率 Uptake efficiency	N	100.47***	83.47***	6.44***	260.24***	93.71***	19.62***	279.08***	29.43***	16.32***
	P	60.59***	9.84**	3.54*	55.82***	25.01***	5.31**	99.20***	6.39*	3.58*
	K	147.44***	37.17***	4.61**	95.85***	18.00***	10.33***	161.90***	0.03ns	7.22***
利用率 Use efficiency	N	3.280*	4.453*	0.783ns	1.45ns	2.53ns	0.63ns	1.02ns	0.93ns	0.93ns
	P	2.20ns	0.45ns	2.42ns	2.96*	0.03ns	0.41ns	4.20**	4.67*	1.51ns
	K	5.39***	1.01ns	0.79ns	6.98***	7.83**	0.68ns	2.68*	31.41***	1.48ns

注: A 表示施肥水平, B 表示豆禾比例。\* 表示  $0.01 < P < 0.05$ ; \*\* 表示  $0.001 < P < 0.01$ ; \*\*\* 表示  $P < 0.001$ ; ns 表示处理之间不显著 ( $P > 0.05$ )。

Note: A, Fertilization level; B, Legume-grass mixed ratio; \*,  $0.01 < P < 0.05$ ; \*\*,  $0.001 < P < 0.01$ ; \*\*\*,  $P < 0.001$ ; ns, Not significant ( $P > 0.05$ ).

表 2 施肥处理对全年牧草产量的影响

Table 2 Effects of fertilization on annual yield of forage grass ( $t \cdot \text{hm}^{-2}$ )

处理 Treatment	禾草 Grass	苜蓿 Alfalfa	豆禾 Alfalfa+grass	处理 Treatment	禾草 Grass	苜蓿 Alfalfa	豆禾 Alfalfa+grass
A <sub>1</sub> (N <sub>280</sub> P <sub>150</sub> K <sub>0</sub> )	3.80±0.45Aa	6.47±1.62CDde	10.27±1.33Cc	A <sub>5</sub> (N <sub>70</sub> P <sub>30</sub> K <sub>60</sub> )	2.26±0.23Dd	6.09±1.91De	8.36±1.88Ee
A <sub>2</sub> (N <sub>350</sub> P <sub>100</sub> K <sub>360</sub> )	3.08±0.99Bb	8.60±1.21Aa	11.68±0.58Aa	A <sub>6</sub> (N <sub>210</sub> P <sub>0</sub> K <sub>240</sub> )	2.65±1.17CDc	6.79±1.94BCcd	9.44±1.12Dd
A <sub>3</sub> (N <sub>140</sub> P <sub>300</sub> K <sub>300</sub> )	2.56±0.51CDcd	8.16±0.91Ab	10.72±0.48BCb	A <sub>7</sub> (N <sub>0</sub> P <sub>200</sub> K <sub>180</sub> )	1.12±0.25Ee	7.18±0.51Bc	8.30±0.60Ee
A <sub>4</sub> (N <sub>420</sub> P <sub>250</sub> K <sub>120</sub> )	2.79±0.52BCbc	8.16±0.47Ab	10.95±0.60Bb				

注: 同列不同大写字母表示处理间差异极显著 ( $P < 0.01$ ), 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

Note: Different uppercase letters in the same column indicate extremely significant differences among treatments ( $P < 0.01$ ), and different lower-case letters in the same column indicate significant differences among treatments ( $P < 0.05$ ). The same below.

B<sub>2</sub> 处理下, 全年禾草产量极显著 ( $P < 0.01$ ) 高于 B<sub>1</sub> 处理(图 1), 而 B<sub>1</sub> 处理下, 全年苜蓿产量及豆禾产量极显著 ( $P < 0.01$ ) 高于 B<sub>2</sub> 处理, 表明苜蓿混播比例是影响豆禾产量的主要因素。

采用表 1 中产量数据通过多因子及交互项逐步回归分析表明, 氮肥、氮磷和氮钾交互与禾草产量存在正相关(表 3), 而与磷肥、钾肥及磷钾交互呈现负相关, 氮肥对禾草产量影响最明显。苜蓿产量、豆禾产量与氮、磷、钾肥

及氮磷、氮钾和磷钾互作均呈正相关,其中,苜蓿产量受钾肥和氮钾、磷钾互作影响大于氮、磷肥及氮磷互作;而豆禾总产量与氮肥及氮钾、氮磷互作相关性较大,氮肥及氮钾互作与豆禾总产量的相关性均达显著水平( $P < 0.05$ )。

### 2.2 施肥处理对牧草 NPK 偏生产力和吸收量的影响

施肥处理对混播禾草、苜蓿及豆禾氮磷钾偏生产力均有极显著影响(表 1)。禾草、苜蓿及豆禾氮磷钾偏生产力均随施肥量增加而降低(图 2)。低氮磷钾( $A_5$ )处理禾草、苜蓿及豆禾氮磷钾偏生产力最高,与其他处理间差异均达极显著水平( $P < 0.01$ )。禾草磷钾肥偏生产力在缺氮处理( $A_7$ )时最低(图 2B,图 2C),与其他处理间差异极显著或显著( $A_3$  处理磷肥偏生产力除外)。因为缺氮严重影响了禾草的生长,使禾草产量显著下降,也表明氮肥对禾草生长的影响大于磷钾肥。

施肥处理对混播禾草、苜蓿及豆禾全年氮磷钾吸收量影响极显著(表 1)。禾草、苜蓿及豆禾的 N 吸收量随 N 肥施量增加呈双峰型变化趋势(图 3A),第一个峰值均出现在  $A_3$  处理,第二个峰值禾草出现在  $A_1$ ,豆禾出现在  $A_2$ ,苜蓿出现在  $A_4$ ,其中禾草及豆禾第二个峰值极显著大于第一个峰值,苜蓿无显著差异。缺磷处理( $A_6$ )禾草、苜蓿及豆禾氮吸收量明显下降。禾草、苜蓿及豆禾的 P 吸收量随 P 肥施量增加呈双峰型变化的趋势(图 3B),禾草第一个峰值出现在  $A_1$  处理,苜蓿与豆禾均出现在  $A_2$  处理;第二个峰值均出现在  $A_4$  处理,且禾草、苜蓿及豆禾第一个峰值均大于第二个峰值,但仅禾草差异显著,苜蓿及豆禾无显著差异。缺氮处理( $A_7$ )严重影响了禾草、苜蓿及豆禾 P 吸收量,其中禾草 P 吸收量极显著低于其他处理。苜蓿及豆禾的 K 吸收量随 K 肥施量增加呈波动上升的趋势(图 3C),达到最大施 K 量时略有下降。禾草及豆禾 K 吸收量在低氮磷钾和缺氮处理时出现低谷,缺氮处理禾草及豆禾 K 吸收量极显著低于其他处理。苜蓿的 K 吸收量在缺磷处理时略有下降,但极显著高于缺钾处理( $A_1$ ),缺钾处理苜蓿 K 吸收量最低。禾草 K 吸收量在缺 K 处理最高,缺氮处理最低,二者差异极显著( $P < 0.01$ ),表明氮肥对禾草生长及 K 吸收量的影响大于钾肥。

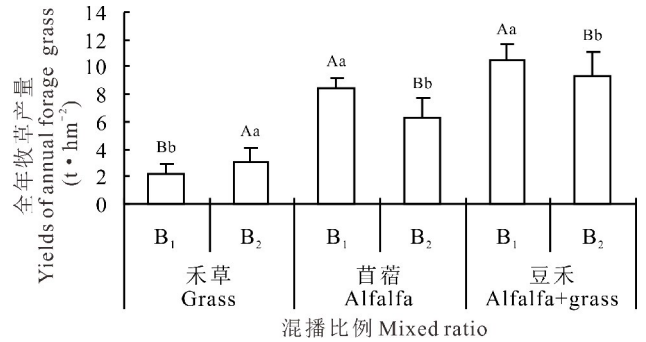


图 1 混播比例对全年牧草产量的影响

Fig. 1 Effect of mixed sowing ratio on annual yield of forage grass

不同大写字母表示处理间差异极显著( $P < 0.01$ ),不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。Different uppercase letters on the graph bar indicate extremely significant differences between treatments ( $P < 0.01$ ), and different lowercase letters on the graph bar indicate significant differences between treatments ( $P < 0.05$ ). The same below. B<sub>1</sub> 表示豆禾比 2 : 2, B<sub>2</sub> 表示豆禾比 1 : 2。B<sub>1</sub> means legume-grass mixed ratio at the 2 : 2, B<sub>2</sub> means legume-grass mixed ratio at the 1 : 2.

表 3 氮,磷,钾素与牧草产量之间的相关性分析

Table 3 Correlation between N, P, K and forage yield

因子 Factor	禾草 Grass		苜蓿 Alfalfa		豆禾 Alfalfa+grass	
	相关系数	P 值	相关系数	P 值	相关系数	P 值
	Correlation coefficient	P-value	Correlation coefficient	P-value	Correlation coefficient	P-value
N	0.7440	0.0552	0.5017	0.2514	0.8368	0.0189
P	-0.1103	0.8138	0.5465	0.2044	0.3338	0.4644
K	-0.1603	0.7313	0.7329	0.0610	0.4403	0.3228
N×P	0.4483	0.3130	0.5611	0.1900	0.6954	0.0828
N×K	0.3046	0.5065	0.7655	0.0449	0.7564	0.0491
P×K	-0.2325	0.6159	0.7131	0.0720	0.3806	0.3996

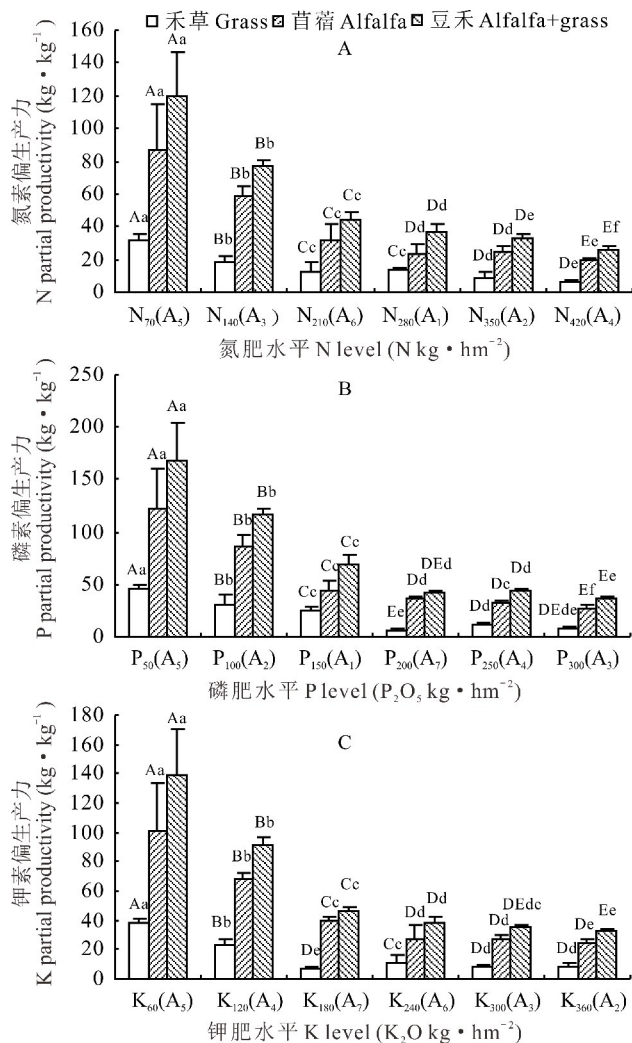


图2 氮磷钾肥对混播牧草偏生产力的影响

Fig. 2 Effects of N, P and K fertilizers on partial productivity of mixed sowing forage

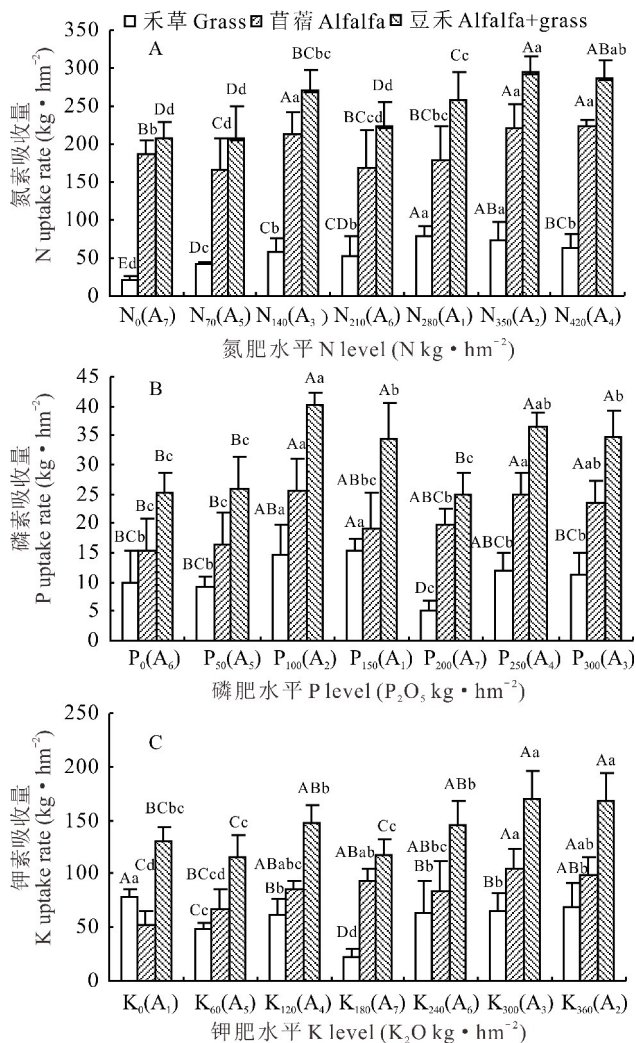


图3 氮磷钾肥对混播牧草全年NPK吸收量的影响

Fig. 3 Effects of N, P and K fertilizer on annual NPK uptake rate of mixed sowing forage

### 2.3 施肥处理对牧草 NPK 吸收率和利用率的影响

施肥处理对混播禾草、苜蓿及豆禾 NPK 吸收率均有显著影响(表 1)。NPK 吸收率均分别随 NPK 施量增加而下降(图 4)。低氮磷钾处理(A<sub>5</sub>)禾草、苜蓿及豆禾的 NPK 吸收率最高,与其他处理间差异均达极显著水平(P < 0.01)。禾草的 PK 吸收率在缺氮处理最低(图 4B,图 4C),表明缺氮处理对禾草生长及 PK 吸收率影响显著。氮肥量在 280~360 kg·hm<sup>-2</sup>时,苜蓿、豆禾 N 吸收率无显著差异。磷肥量在 150~300 kg·hm<sup>-2</sup>时,苜蓿 P 吸收率无显著差异;磷肥量在 200~300 kg·hm<sup>-2</sup>时,豆禾 P 吸收率无显著差异。钾肥量在 240~360 kg·hm<sup>-2</sup>时,苜蓿、豆禾 K 吸收率无显著差异。

施肥处理对混播禾草和苜蓿 K 以及豆禾 P 利用率影响极显著,对禾草 N、苜蓿 P 及豆禾 K 利用率影响显著,对苜蓿 N、禾草 P 及豆禾 N 利用率没有显著影响(表 1)。禾草、苜蓿及豆禾的 N 利用率随 N 肥施量增加呈先增后降的趋势(图 5A),禾草峰值出现在低氮(A<sub>5</sub>)处理,苜蓿及豆禾峰值均出现在 A<sub>6</sub> 处理。缺钾(A<sub>1</sub>)和低钾(A<sub>5</sub>)处理下,苜蓿 N 利用率较低,显著低于 A<sub>4</sub> 处理之外的其他处理,表明土壤钾不足显著影响苜蓿 N 利用率。缺磷处理(A<sub>6</sub>)禾草、苜蓿及豆禾的 P 利用率最高(图 5B),其中禾草显著高于 A<sub>2</sub> 和 A<sub>7</sub> 处理,苜蓿显著高于 A<sub>2</sub>, A<sub>1</sub>, A<sub>4</sub> 和 A<sub>3</sub> 处理,豆禾显著高于 A<sub>2</sub>, A<sub>1</sub> 和 A<sub>4</sub> 处理,其余处理间无显著差异。高钾处理(A<sub>2</sub>)禾草及豆禾的 P 利用率最低,高氮处理(A<sub>4</sub>)苜蓿的 P 利用率最低。苜蓿及豆禾的 K 利用率随 K 肥施量增加呈先下降后升高趋势(图 5C),缺钾处理(A<sub>1</sub>)苜蓿和豆禾 K 利用率最高,其中苜蓿显著高于其他处理,其余处理间无显著差异;豆禾显著

高于  $A_6$ ,  $A_3$  处理,其余处理间无显著差异。缺氮 ( $A_7$ )处理禾草 K 利用率最高,显著高于  $A_6$ ,  $A_3$ ,  $A_2$  处理。缺磷和高磷处理使禾草、苜蓿及豆禾 K 利用率明显降低。

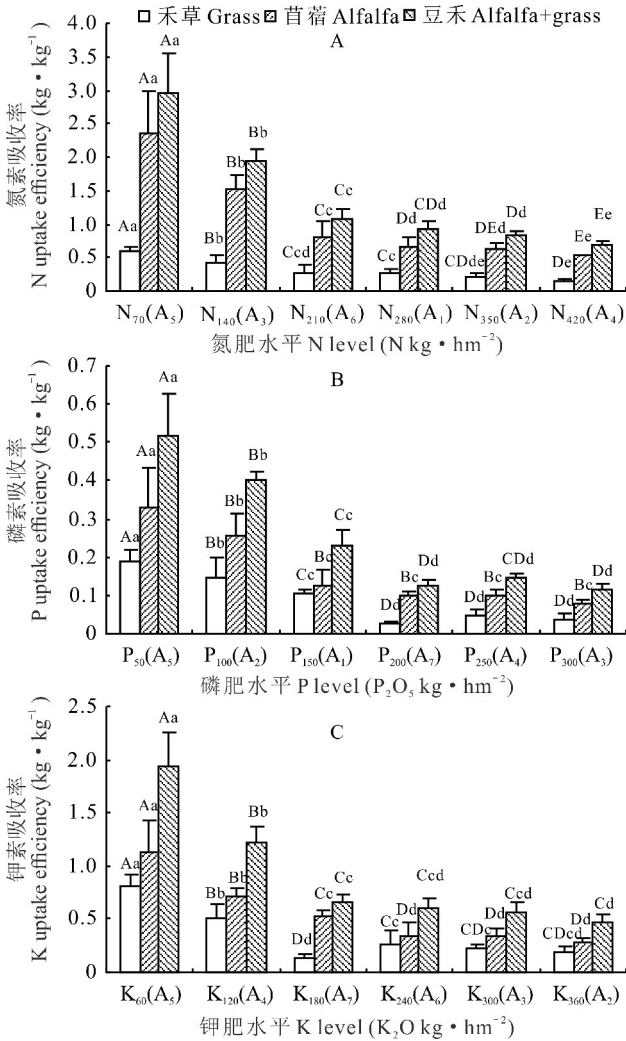


图 4 氮磷钾肥对混播牧草 NPK 吸收率的影响

Fig. 4 Effects of N, P and K fertilizer on NPK uptake efficiency of mixed sowing forage

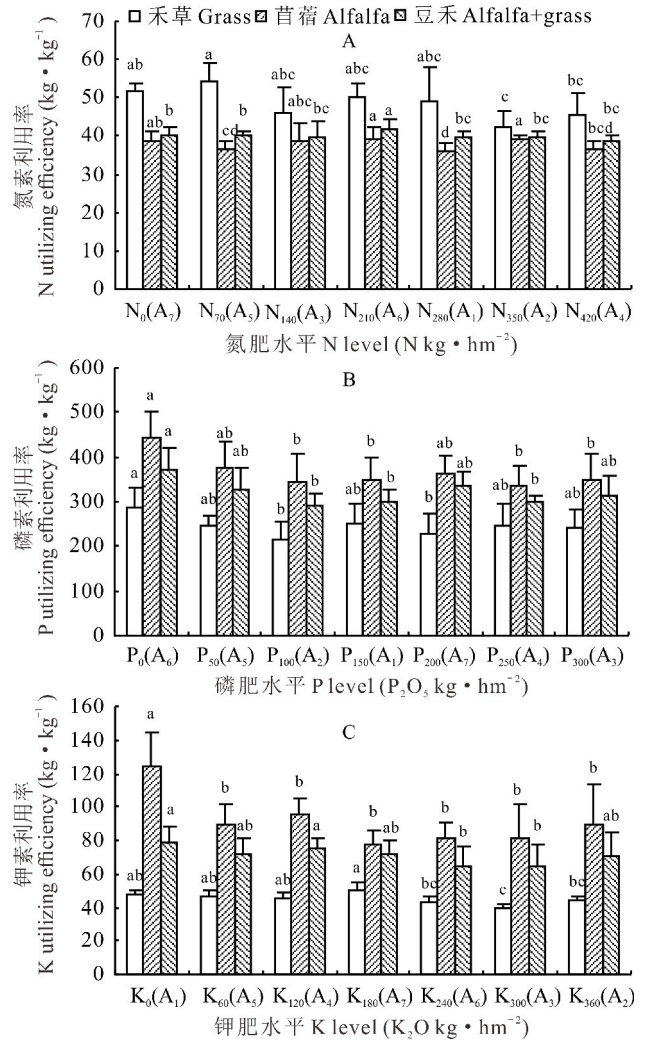


图 5 氮磷钾肥对混播牧草 NPK 利用率的影响

Fig. 5 Effects of N, P and K fertilizers on NPK utilization efficiency of mixed sowing forage

## 2.4 混播比例对牧草 NPK 偏生产力、吸收量、吸收率和利用率的影响

混播比例对混播禾草、苜蓿 NPK 偏生产力、吸收量和吸收率以及豆禾 NPK 偏生产力、N 吸收率、苜蓿及豆禾 K 利用率影响极显著,对禾草 P, K 和苜蓿 N, P 利用率无显著影响(表 1)。施肥与混播比例交互对混播禾草、苜蓿及豆禾 NPK 偏生产力、吸收量和吸收率有极显著或显著影响,对 NPK 利用率影响不显著(表 1)。豆禾 2 : 2 ( $B_1$ )混播苜蓿及豆禾 NPK 偏生产力极显著高于 1 : 2 ( $B_2$ )混播(图 6A)。  $B_1$  处理苜蓿 NPK 吸收量(图 6B)以及豆禾 N 吸收量极显著高于  $B_2$  处理。  $B_1$  处理下,苜蓿 NPK 吸收率以及豆禾 NP 吸收率极显著高于  $B_2$  处理(图 6C),混播比例对豆禾 K 吸收率无显著影响。混播比例对苜蓿 K、豆禾 PK 利用率有显著影响,  $B_1$  处理苜蓿 K 及豆禾 PK 利用率显著 ( $P < 0.05$ ) 高于  $B_2$  处理(图 6D)。混播比例对禾草 PK、苜蓿 NP 利用率以及豆禾 PK 吸收量、K 吸收率和 N 利用率没有显著影响。混播比例对禾草 NPK 偏生产力、吸收量、吸收率及 N 利用率影响显著,  $B_2$  处理禾草 NPK 偏生产力、吸收量、吸收率极显著 ( $P < 0.01$ ) 高于  $B_1$  处理,  $B_1$  处理禾草 N 利用率显著高于  $B_2$  处理,混播比例对禾草 PK 利用率影响不显著。

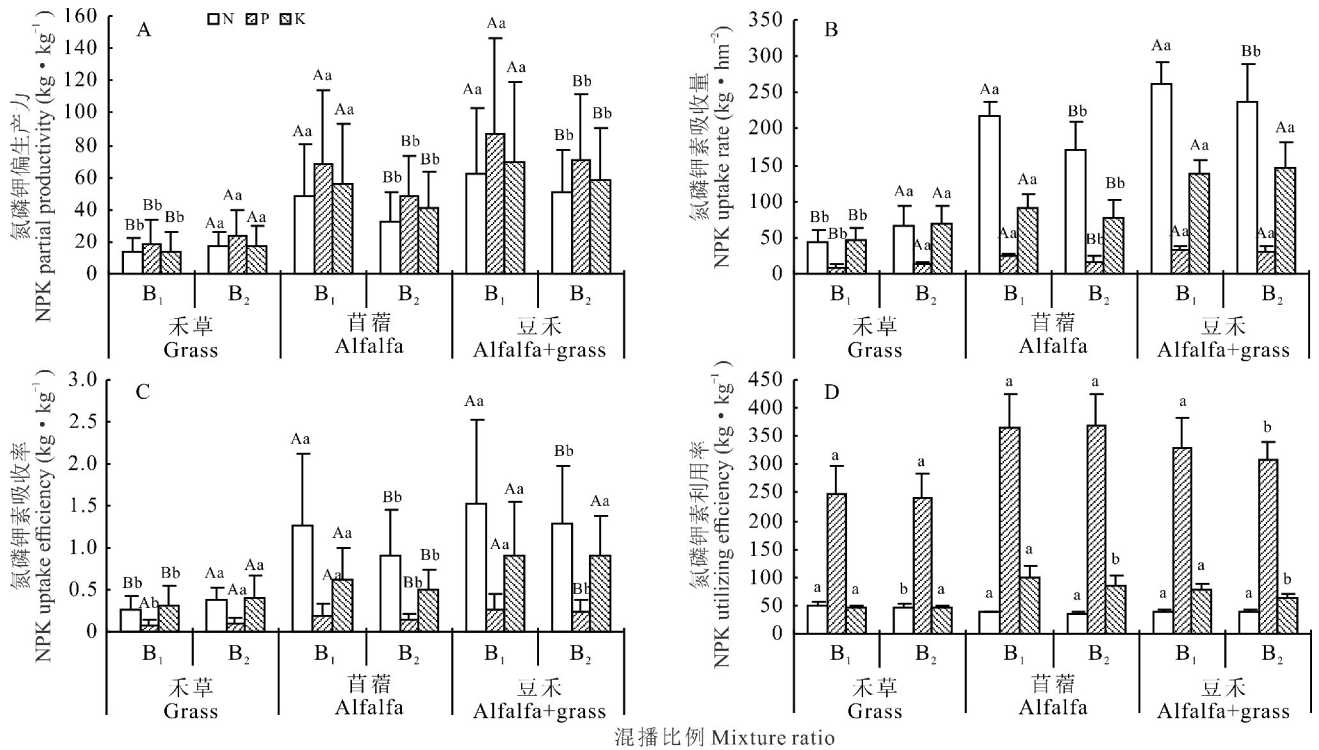


图 6 混播比例对牧草 NPK 偏生产力、吸收量、吸收率和利用率的影响

Fig. 6 Effects of mixed seeding ratio on NPK partial productivity, uptake rate, uptake efficiency and utilization efficiency of mixed sowing forage

### 3 讨论

#### 3.1 氮肥对豆禾混播牧草产量及 NPK 利用效率的影响

氮素是豆禾混播草地中禾本科牧草与豆科牧草协调共生的一个重要限制因子。适量氮肥可提高苜蓿产量和品质<sup>[15-18]</sup>,施氮能提高紫花苜蓿的氮积累<sup>[19]</sup>。但也有学者认为,施氮肥对苜蓿干物质产量和氮含量没有显著影响<sup>[20-21]</sup>。本研究结果表明氮肥与豆禾总产量极显著相关,高氮处理( $A_2, A_4$ )提高了禾草、苜蓿及豆禾产量,缺氮( $A_7$ )和低氮( $A_5$ )处理显著降低了禾草产量,这与谢开云等<sup>[22]</sup>的研究结果一致。有学者认为,在单播苜蓿草地,施氮量 $>52 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,苜蓿产量不再增加<sup>[23]</sup>。何飞等<sup>[17]</sup>认为在一定范围内,苜蓿产量随施氮量增加而显著增加,超过限值后苜蓿产量反而逐渐降低。本试验在磷钾肥较充分条件下,施氮量 $<350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,苜蓿产量随施氮量的增加而增加,施氮量达到 $420 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,苜蓿与禾草产量均下降,与何飞等<sup>[17]</sup>的研究结果相似,但与苗晓茸等<sup>[21]</sup>、魏志标等<sup>[23]</sup>的试验结果不一致,这可能是豆禾混播和风沙土壤条件差异所致。高氮处理( $A_2, A_4$ )提高了禾草与苜蓿 K 吸收率,降低了禾草、苜蓿 N, P 的偏生产力以及禾草对 N 的利用率。这是因为高氮处理限制了禾草和苜蓿生长,降低了禾草与苜蓿产量<sup>[17, 24]</sup>。低氮处理( $A_5$ )苜蓿与无芒雀麦 NPK 偏生产力、N 吸收率及禾草 N 利用率明显增高。有研究表明,随施氮量的增加苜蓿<sup>[25]</sup>、玉米(*Zea mays*)<sup>[9]</sup>氮肥偏生产力显著降低,苏丹草(*Sorghum sudanense*)<sup>[26]</sup>、玉米<sup>[9]</sup>等氮肥利用效率呈下降趋势,本研究结果与前人<sup>[9, 25-26]</sup>研究结果相似。禾草、苜蓿及豆禾 N 吸收量随施氮量增加呈现增长的趋势,施氮量 $>280 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,禾草 N 吸收量开始下降,施氮量超过 $350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,豆禾 N 吸收量开始降低,而苜蓿 N 吸收量略有增加。缺氮处理( $A_7$ )显著降低了禾草 PK 偏生产力以及 NPK 吸收量,主要是因为缺氮严重影响了禾草生长,使其产量较低。另外,增施氮肥可促进禾草对 P 的吸收<sup>[11]</sup>。缺氮处理对混播禾草的影响明显大于缺磷或缺钾处理,平衡施肥更有利于提高混播牧草产量及养分吸收量。

#### 3.2 磷肥对豆禾混播牧草产量及 NPK 利用效率的影响

磷肥不仅影响牧草产量<sup>[8]</sup>,而且影响牧草对氮素的吸收<sup>[11]</sup>和利用率<sup>[27]</sup>。施磷肥可显著增加苜蓿产

量<sup>[8,15,28]</sup>,但在苜蓿生长中对磷素的需求有个阈值<sup>[28]</sup>。在阈值之下增施磷肥对苜蓿生长有利,超过阈值苜蓿生长受到抑制<sup>[28]</sup>。有学者认为,苜蓿的产量最佳施磷量为 $(P_2O_5)141\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ <sup>[23]</sup>,施磷量大于 $141\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,苜蓿产量不再增加<sup>[29]</sup>。于铁峰等<sup>[10]</sup>研究表明,在灌溉条件下二年生苜蓿磷肥优化施肥量为 $77.69\sim 90.48\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。本研究发现,在磷肥施量为 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,且氮钾较充分时( $N_{350}P_{100}K_{360}$ ),苜蓿及豆禾产量最高,禾草产量次之,本研究适宜磷肥施量与前人<sup>[23,27,29]</sup>结果相近。有学者认为,磷肥对苜蓿干草产量的影响大于氮钾肥<sup>[7,10,17,21]</sup>。在本试验中,磷肥对苜蓿及豆禾产量的影响小于氮钾肥,与前人的研究结果有所不同,这也许是豆禾混播与单播苜蓿不同的缘故。缺氮( $A_7$ )或低氮( $A_3$ )条件下,较高的磷肥能促进苜蓿生长,提高苜蓿产量,这与磷肥可促进苜蓿对氮素的吸收<sup>[30]</sup>和固氮作用<sup>[30]</sup>有关。高磷处理( $A_3$ )使禾草产量明显降低,表明过量磷肥抑制了禾草生长发育。苜蓿、禾草及豆禾的磷素偏生产力和吸收率均随磷肥增加而降低,但当磷肥水平 $>200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,P素偏生产力和吸收率均无显著差异。缺磷( $A_6$ )和高磷( $A_3$ )处理使苜蓿、禾草与豆禾的P吸收量和吸收率以及K利用率下降,使禾草N利用率降低。有研究表明,适当增施磷肥可促进牧草对N的吸收<sup>[29]</sup>,过量磷肥处理使羊草(*Leymus chinensis*)<sup>[11]</sup>和苜蓿<sup>[32]</sup>对磷素的吸收率和利用率下降,本研究结果与前人<sup>[11,20,32]</sup>的研究结果相似。

### 3.3 钾肥对豆禾混播牧草产量及 NPK 利用效率的影响

施适量的钾肥不仅可增加苜蓿产量<sup>[8,33]</sup>,而且能促进禾本科牧草生长发育,提高禾草产量和种间竞争力<sup>[23]</sup>。高钾( $A_2$ )处理促进了禾草、苜蓿 NPK 吸收量及苜蓿 N 利用率,表明较高的钾氮能促进禾草与苜蓿生长,因牧草产量较高,因此 NPK 吸收量增加,同时钾素还能促进苜蓿对氮素的吸收,使苜蓿 N 利用率提高。邢月华等<sup>[34]</sup>研究表明,施钾增加了苜蓿  $K_2O$  的积累量,于铁峰等<sup>[10]</sup>认为,钾素能提高苜蓿蛋白运转及积累。缺钾处理( $A_1$ )严重影响了苜蓿钾素吸收量,显著提高了苜蓿 K 利用率。缺钾处理禾草产量较高,这可能是由于该处理氮肥水平较高,磷肥适中,而土壤中速效钾含量( $94.65\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )基本可以满足禾草生长,同时缺钾不利于苜蓿生长,苜蓿对禾草的抑制作用相对较小。

### 3.4 氮磷钾交互作用对牧草产量及 NPK 利用效率的影响

本试验表明,氮磷和氮钾交互与禾草产量呈正相关,而与磷钾交互呈负相关。氮磷、氮钾和磷钾交互与苜蓿及豆禾产量均呈正相关,其中,苜蓿产量及豆禾产量与氮钾交互显著相关( $P<0.05$ )。磷钾交互与苜蓿产量的相关系数(0.71)大于氮磷交互(0.56)。有研究表明,适宜的氮、磷、钾交互对苜蓿干草产量具有一定的促进作用<sup>[8,10,35]</sup>,氮磷钾配施与不施氮相比显著高了苏丹草—黑麦草(*Lolium perenne*)轮作鲜草产量<sup>[13]</sup>,本研究结果与上述<sup>[8,10,13,35]</sup>结果一致。

## 4 结论

适量的氮磷钾肥组合能显著提高混播牧草产量,其中氮肥对禾草及豆禾产量及肥料利用效率的影响大于钾肥和磷肥,钾肥对苜蓿产量的影响大于磷肥和氮肥。氮钾交互对苜蓿及豆禾产量影响大于氮磷和磷钾交互。禾草与苜蓿 NPK 偏生产力和吸收率均随氮磷钾肥水平增加而降低。缺氮处理对混播禾草及豆禾产量、禾草 PK 偏生产力和 NPK 吸收量的影响大于缺磷或缺钾处理。豆禾 2:2 混播苜蓿及豆禾 NPK 偏生产力和吸收量、吸收率以及禾草氮素利用率、苜蓿钾素利用率显著高于 1:2 混播。综合考虑牧草产量及养分利用效率,豆禾 2:2 间行混播,氮磷钾施量以  $N\ 140\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , $P_2O_5\ 100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , $K_2O\ 120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  较适宜。

## 参考文献 References:

- [1] Hauggrd-Nielsen H, Gooding M, Ambus P, et al. Pea barley intercropping for efficient symbiotic  $N_2$ -fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in Europe an organic cropping systems. *Field Crops Research*, 2009, 113: 64—71.
- [2] Li C J, Li Y Y, Yu C B, et al. Crop nitrogen use and soil mineral nitrogen accumulation under different crop combinations and patterns of strip intercropping in Northwest China. *Plant and Soil*, 2011, 342: 221—231.
- [3] Li L, Zhang F S, Li X, et al. Interspecific facilitation of nutrient uptake by intercropped maize and faba bean. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 65: 61—71.

- [4] Zhu Y Q, Guan Z X, Zheng W, *et al.* Effects of species diversity and community structure on nitrogen use efficiency of mixed legume+grass pastures. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(10): 1-14.  
朱亚琼, 关正翔, 郑伟, 等. 混播种类和群体结构对豆禾牧草混播系统氮素利用效率的影响. *草业学报*, 2018, 27(10): 1-14.
- [5] Xie K Y, Zhao Y, Li X L, *et al.* Relationships between grasses and legumes in mixed grassland: A review. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(3): 284-296.  
谢开云, 赵云, 李向林, 等. 豆-禾混播草地种间关系研究进展. *草业学报*, 2013, 22(3): 284-296.
- [6] Kyriazopoulos A P, Abraham E M, Parissi Z M, *et al.* Forage production and nutritive value of *Dactylis glomerata* and *Trifolium subterraneum* mixtures under different shading treatments. *Grassland Forage Science*, 2012, 68: 72-82.
- [7] Zhang T J, Zhao Z X, Long R C, *et al.* Study on effects of N, P, K fertilizers on alfalfa hay and recommended fertilizer rate in Huang-Huai-Hai area. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(1): 243-249.  
张铁军, 赵忠祥, 龙瑞才, 等. 黄淮海地区紫花苜蓿氮磷钾肥料效应与推荐施肥量研究. *草地学报*, 2019, 27(1): 243-249.
- [8] Meng K, Li X Y, Ji X T, *et al.* Effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer on yield of caoyuan No. 3 alfalfa. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(3): 107-114.  
孟凯, 李星月, 冀晓婷, 等. 氮、磷、钾配施对草原3号苜蓿干草产量的影响. *中国草地学报*, 2019, 41(3): 107-114.
- [9] Wang Y H, Huang Y, Xin M H, *et al.* Effects of the year-round management model of N, P and K combined application on grain yield and nutrient efficiency of wheat-maize rotation system in lime concretion black soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(6): 1031-1046.  
王永华, 黄源, 辛明华, 等. 周年氮磷钾配施模式对砂姜黑土麦玉米轮作体系籽粒产量和养分利用效率的影响. *中国农业科学*, 2017, 50(6): 1031-1046.
- [10] Yu T F, Liu X J, Wu Y, *et al.* Fertilization effect of alfalfa high yield field and its recommended fertilizer application in Northwest drought irrigated area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(8): 15-27.  
于铁峰, 刘晓静, 吴勇, 等. 西北干旱灌区紫花苜蓿高产田施肥效应及推荐施肥量研究. *草业学报*, 2019, 28(8): 15-27.
- [11] Dong X B, Hao M D, Guo S A, *et al.* The effects of nitrogen fertilizer and phosphate fertilizer rates on the yield, nutrient uptake and quality of *Leymus chinensis*. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22(6): 1232-1238.  
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. *草地学报*, 2014, 22(6): 1232-1238.
- [12] Duke S H, Collins M, Soberalske M. Effects of potassium fertilization on nitrogen fixation and nodule enzymes of nitrogen metabolism in alfalfa. *Physiologia Plant Arum*, 2010, 54(3): 343-350.
- [13] Li W X, Lu J W, Lu J M, *et al.* Study on NPK fertilizer and nutrients utilizing efficiency under sudangrass and ryegrass rotation regime in Jiangnan Plains. *Acta Agrestia Sinica*, 2007, 15(5): 460-464.  
李文西, 鲁剑巍, 鲁君明, 等. 江汉平原苏丹草-黑麦草轮作中氮磷钾肥效果及养分利用率. *草地学报*, 2007, 15(5): 460-464.
- [14] Zou Q. *The experimental guide for plant physiology*. Beijing: China Agricultural Press, 2000.  
邹琦. *植物生理学实验指导*. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] Zhang J X, Liu X J, Hao F, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus regulation on alfalfa nitrogen accumulation and the nitrogen and phosphorus nutrients of soil. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(1): 61-68.  
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. *草地学报*, 2016, 24(1): 61-68.
- [16] Qi P, Liu X J, Liu Y N, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer on nitrogen accumulation in alfalfa and the content of nitrogen in soil. *Acta Agrestia Sinica*, 2015, 23(5): 1026-1032.  
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. *草地学报*, 2015, 23(5): 1026-1032.
- [17] He F, Zhao Z X, Kang J M, *et al.* Effects of N, P, and K fertilizer on alfalfa hay yield and quality. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(5): 24-32.  
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. *中国草地学报*, 2019, 41(5): 24-32.
- [18] Liu X J, Liu Y N, Kuai J L, *et al.* Effects of different N levels on productivity and quality of alfalfa varieties. *Acta Agrestia Sinica*, 2013, 21(4): 702-707.  
刘晓静, 刘艳楠, 蒯佳林, 等. 供氮水平对不同紫花苜蓿产量及品质的影响. *草地学报*, 2013, 21(4): 702-707.
- [19] Liu X J, Zhang J X, Ye F, *et al.* Effects of nitrogen application on nitrogen metabolism and nitrogen accumulation of alfalfa (*Medicago sativa*). *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, 29(7): 1399-1405.  
刘晓静, 张进霞, 叶芳, 等. 施氮对紫花苜蓿氮代谢及氮积累的影响. *核农学报*, 2015, 29(7): 1399-1405.
- [20] He F, Xie K Y, Li X L. Effect of nitrogen fertilizer and seeding rate on yield of alfalfa and weeds. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2018, 27(2): 647-653.

- [21] Miao X R, Sun Y M, Yu L, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus fertilizer rate on hay yield and nutritional quality of alfalfa under drip irrigation. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(9): 55–66.  
苗晓草, 孙艳梅, 于磊, 等. 氮磷互作对不同茬次滴灌苜蓿生产性能及营养品质的影响. *草业学报*, 2019, 28(9): 55–66.
- [22] Xie K L, Li X L, He F, *et al.* Response of alfalfa and smooth brome to nitrogen fertilizer in monoculture and mixed grasslands. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 33(6): 148–156.  
谢开云, 李向林, 何峰, 等. 单播与混播下紫花苜蓿与无芒雀麦生物量对氮肥的响应. *草业学报*, 2014, 33(6): 148–156.
- [23] Wei Z B, Bai Z H, Ma L, *et al.* Yield gap of alfalfa, ryegrass and oat grass and their influence factors in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 507–522.  
魏志标, 柏兆海, 马林, 等. 中国苜蓿、黑麦草和燕麦草产量差及影响因素. *中国农业科学*, 2018, 51(3): 507–522.
- [24] Zhang Y L, Luo X M, Gao K. Effect of fertilization on the yield of mixed grassland (*Medicago+Bromus inermis*). *Grassland and Turf*, 2008, (5): 6–10.  
张永亮, 骆秀梅, 高凯. 施肥对苜蓿+无芒雀麦混播草地的产量影响. *草原与草坪*, 2008, (5): 6–10.
- [25] Hu W, Zhang Y H, Li P, *et al.* Effects of water and nitrogen supply under drip irrigation on the production performance rate and water and nitrogen use efficiency of alfalfa. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(2): 41–50.  
胡伟, 张亚红, 李鹏, 等. 水氮供应对地下滴灌紫花苜蓿生产性能及水氮利用效率的影响. *草业学报*, 2019, 28(2): 41–50.
- [26] Pang L D, Li W J, Zhu J Z. Effects of top dressing nitrogen fertilizer to sudan grass in agronomic traits seed yield and nitrogen use efficiency. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(3): 682–688.  
庞立东, 李卫军, 朱进忠. 追施氮肥对苏丹草农艺性状、种子产量及氮肥利用效率的影响. *草地学报*, 2016, 24(3): 682–688.
- [27] Yu T F, Liu X J, Hao F. Effect of phosphate fertilizer application on alfalfa yield, nutritive value and N and P use efficiency. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(3): 154–163.  
于铁峰, 刘晓静, 郝凤. 施用磷肥对紫花苜蓿营养价值和氮磷利用效率的影响. *草业学报*, 2018, 27(3): 154–163.
- [28] Wen Y, Jin J Y. Effect of phosphorus levels on photosynthesis and herbage yield and quality of alfalfa. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2007, (6): 34–37.  
温洋, 金继运. 施磷对紫花苜蓿光合特性以及生长的影响. *中国土壤与肥料*, 2007, (6): 34–37.
- [29] Sun Y M, Liu X S, Zhang Q B, *et al.* Effects of phosphorus application on hay yield and phosphorus contents of alfalfa under drip irrigation. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(3): 154–163.  
孙艳梅, 刘选帅, 张前兵, 等. 施磷对滴灌苜蓿干草产量及磷素含量的影响. *草业学报*, 2019, 28(3): 154–163.
- [30] Hao X Y, Zhou B K, Ma X Z, *et al.* Characteristics of crop yield and nutrient balance under different long-term fertilization practices in black soil. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16): 178–185.  
郝小雨, 周宝库, 马星竹, 等. 长期不同施肥措施下黑土作物产量与养分平衡特征. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 178–185.
- [31] Hao F, Liu X J, Qi M X, *et al.* Effects of phosphate levels and rhizobium inoculation on the root morphology and nitrogen fixing characteristic of alfalfa. *Acta Agrestia Sinica*, 2015, 23(4): 818–822.  
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. *草地学报*, 2015, 23(4): 818–822.
- [32] Zhang F F, Yu L, Lu W H, *et al.* Effect of drop irrigation and fertilization on soil fertility and phosphorus utilization efficiency of alfalfa field in Oasis region. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(6): 1363–1368.  
张凡凡, 于磊, 鲁为华, 等. 绿洲区滴灌施磷对苜蓿地肥力和磷素利用率的影响. *草地学报*, 2016, 24(6): 1363–1368.
- [33] Loveras J L. Potassium fertilization affects on alfalfa in a Mediterranean climate. *Agronomy Journal*, 2001, (93): 139–143.
- [34] Xing Y H, Wang R, Xie F D, *et al.* Effects of potassium fertilizer on N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O absorption of alfalfa. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2008, (1): 32–34.  
邢月华, 汪仁, 谢甫绶, 等. 钾肥对苜蓿植株吸收氮磷钾的影响. *中国土壤与肥料*, 2008, (1): 32–34.
- [35] Liu X J, Zhang J X, Li W Q, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus addition and cuttings on yield and quality of alfalfa in dry region of Gansu, China. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(6): 1516–1526.  
刘晓静, 张进霞, 李文卿, 等. 施肥及刈割对干旱地区紫花苜蓿产量和品质的影响. *中国沙漠*, 2014, 34(6): 1516–1526.