

DOI:10.11686/cyxb2024210

http://cyxb.magtech.com.cn

王斌, 史佳梅, 王腾飞, 等. 施氮对饲用高粱/拉巴豆混播草地生产性能和氮肥贡献率的影响. 草业学报, 2025, 34(4): 53—63.

WANG Bin, SHI Jia-mei, WANG Teng-fei, et al. Effect of nitrogen application on production performance and nitrogen fertilizer contribution of forage sorghum/lablab mixed cropping. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(4): 53—63.

## 施氮对饲用高粱/拉巴豆混播草地生产性能和氮肥贡献率的影响

王斌<sup>1,2</sup>, 史佳梅<sup>3</sup>, 王腾飞<sup>1,2</sup>, 张译尹<sup>1,2</sup>, 马江萍<sup>1,2</sup>, 李佳旺<sup>1,2</sup>, 王小兵<sup>1,2</sup>, 邓建强<sup>1,2\*</sup>, 兰剑<sup>1,2\*</sup>

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏草业工程研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏平罗县农业农村局, 宁夏 石嘴山 753000)

**摘要:**为了探究施氮量对饲用高粱单作及混播模式下饲草产量形成及氮素利用的影响,本研究以饲用高粱品种“绿巨人”和拉巴豆品种“高值”为试验材料,于2021—2022年在宁夏大学草业科学教学科研基地进行大田裂区试验,设置两个种植模式(饲用高粱单播,SS;饲用高粱/拉巴豆混播,SL)为主区,4个施氮量( $N_0$ ,  $0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $N_{90}$ ,  $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $N_{180}$ ,  $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $N_{270}$ ,  $270\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )为副区,测定生产性能、营养品质及氮肥利用效率等相关指标。结果表明,饲用高粱/拉巴豆混播结合施氮可促进饲草生长,提高草地生产性能,其中饲用高粱/拉巴豆混播结合施氮量  $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  模式下的干草产量和粗蛋白产量均达到最高,分别为  $28352.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $2481.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,较单播饲用高粱分别提高了  $14.8\%$  和  $25.9\%$ 。混播结合施氮可改善饲草营养品质,混播模式下施氮量为  $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时,茎秆糖锤度和相对饲喂价值较单播饲用高粱分别提高  $10.3\%$  和  $18.9\%$ 。适宜的施氮量也可显著提高氮肥贡献率,单播模式的氮肥贡献率在施氮量为  $270\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时达到最高,混播模式在  $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时最高。此外,混播模式的氮肥农艺利用效率和氮肥偏生产力较单播均有不同程度的增加,在施氮量为  $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时达到最大值。综上所述,饲用高粱/拉巴豆混播结合施氮量  $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  模式是宁夏干旱区增加饲草产量、改善饲草营养品质和提高氮肥利用效率的适宜种植模式和施氮水平。

**关键词:**混播;氮肥;生产性能;营养品质;氮肥利用

## Effect of nitrogen application on production performance and nitrogen fertilizer contribution of forage sorghum/lablab mixed cropping

WANG Bin<sup>1,2</sup>, SHI Jia-mei<sup>3</sup>, WANG Teng-fei<sup>1,2</sup>, ZHANG Yi-yin<sup>1,2</sup>, MA Jiang-ping<sup>1,2</sup>, LI Jia-wang<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-bing<sup>1,2</sup>, DENG Jian-qiang<sup>1,2\*</sup>, LAN Jian<sup>1,2\*</sup>

1. College of Forestry and Grassland, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Grassland and Pasture Engineering Research Center, Yinchuan 750021, China; 3. Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Pingluo County, Shizuishan 753000, China

**Abstract:** This research investigated the effect of nitrogen application on the forage yield and nutrient utilization of forage sorghum (*Sorghum bicolor*) variety “Hulk” and lablab (*Dolichos lablab*) variety “High Value” under different cropping patterns. A split-plot experiment was conducted at the Grass Science Teaching and Research Base of Ningxia University in 2021—2022, with two planting patterns (sole forage sorghum (SS)), forage sorghum/lablab

收稿日期:2024-06-04;改回日期:2024-07-29

基金项目:宁夏高等学校一流学科建设(草学学科)项目(NXYLK2017A01)和“一年两熟”人工草地可持续发展模式研究与示范项目(2020BBF02001)资助。

作者简介:王斌(1995—),男,宁夏中卫人,在读博士。E-mail: 241544056@qq.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: dengjq2022@nxu.edu.cn, ndlanjian@163.com

mixed cropping (SL) as main plot treatments, and four nitrogen (N) application rates ( $N_0$ ,  $0 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ;  $N_{90}$ ,  $90 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ;  $N_{180}$ ,  $180 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ; and  $N_{270}$ ,  $270 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) as the sub-plot treatments, to measure the related indexes of yield, nutrient quality and nitrogen fertilizer utilization efficiency. It was found that forage sorghum/lablab mixed cropping combined with N fertilization promoted the growth of forage and improved the productivity of pastures. The dry matter yield and crude protein yield of forage were highest in the sorghum/lablab mixed cropping treatment with N application of  $180 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , and were  $28352 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  and  $2481 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , respectively. These values were higher than corresponding values of sole forage sorghum by 14.8% and 25.9%. Mixed cropping combined with N fertilization improved the nutritional quality of forage. At the N application of  $180 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  in the mixed cropping system, stalk sugar content and relative feeding value increased by 10.3% and 18.9%, respectively, compared with that of sole forage sorghum in the  $N_0$  treatment. N application also significantly increased N fertilizer response, which was highest at  $270 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  for sole forage sorghum and at  $180 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  for the mixed cropping treatment. In addition, both N fertilizer agronomic use efficiency and N partial factor productivity of the mixed cropping treatment patterns across N fertilizer application rates differed from those of the sole forage sorghum plots, and reached their maximum at a N application rate of  $90 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . In conclusion, forage sorghum/lablab mixed cropping combined with nitrogen application at  $180 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  pattern is a suitable planting pattern and nitrogen application level for increasing forage yield, improving forage nutritional quality and improving nitrogen fertilizer utilization efficiency in the arid region of Ningxia.

**Key words:** mixed cropping; nitrogen fertilizer; production performance; nutritional quality; nitrogen fertilizer utilization

畜牧业是我国农业生产和农民经济收入的重要组成部分。近年来,随着人们生活水平的提高,对肉蛋奶等产品的需求促使畜牧业迅速发展,致使对优质饲草的需求也逐年增加<sup>[1]</sup>。为确保饲草安全供给,须加快我国饲草产业的发展。饲用高粱(*Sorghum bicolor*)具有产量高、适口性好、抗逆性强等特点,是缓解牧区饲草短缺的重要来源,也是农牧交错地区冬春饲草供给的有力保障<sup>[2-3]</sup>。高效种植饲用高粱是响应国家“保护耕地非粮化”战略,也是促进种植业结构调整的重要措施之一。因此,亟须研究饲用高粱高产优质的高效栽培技术。氮素是饲草生长的必需营养元素,过量使用化学氮肥会造成环境污染、生态系统受损以及养分流失等一系列问题<sup>[4-5]</sup>。然而,土壤中氮含量不足会降低饲草生产力,还可能导致土壤退化<sup>[6]</sup>。因此,优化氮肥管理以提高肥料利用效率,是实现我国农业可持续发展的关键。同时,选择适当的种植模式对提高草地生产性能和改善饲草品质具有重要意义。

豆禾混播是我国现代农业中常见的种植模式,可以充分利用光、热、水、肥等资源,提高草地生产性能<sup>[7]</sup>。同时,豆科饲草具有丰富的营养物质含量,与禾本科饲草混播后可显著改善饲草品质<sup>[8]</sup>。此外,氮在豆禾混播草地中也起着至关重要的作用,因为豆科饲草具有氮的生物固定功能<sup>[9-10]</sup>。研究表明,种间相互作用会刺激豆科饲草固氮,促进邻近禾本科饲草的氮吸收<sup>[11-12]</sup>。因此,以豆科饲草为基础的混播可以通过提高豆科饲草的保氮能力来提高土壤肥力,在保持饲草产量的同时节省氮肥投入,并提高氮肥利用效率,有利于农业生态可持续性。拉巴豆(*Dolichos lablab*)作为豆科草本植物,具有固氮能力强、粗蛋白含量高特点,在国内外广泛种植<sup>[13-14]</sup>。研究发现,拉巴豆与饲用高粱混播可显著提高饲草总产量和改善饲草品质<sup>[15]</sup>。还有研究显示,青贮玉米(*Zea mays*)/拉巴豆混播结合减施氮肥能够提高干草产量和饲草粗蛋白含量<sup>[16]</sup>。饲用高粱的干草产量在施氮量为  $160 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时达到最高,在  $320 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时反而会降低<sup>[17]</sup>。然而,目前大多数研究只关注施氮水平或混播单一因素对饲草产量、品质和氮肥利用的影响,在宁夏干旱区饲用高粱和拉巴豆混播方式下的适宜施氮量尚不确定,有待进一步研究。此外,我国的氮肥利用效率仍有优化的空间<sup>[18]</sup>。因此,研究混播模式下草地生产力和氮肥利用效率具有重要意义。基于此,本试验采用饲用高粱单播和饲用高粱/拉巴豆混播2个种植方式,并设置4个施氮水平,研究不同种植方式和施氮水平对草地生产性能、营养价值和氮肥利用效率的影响,以期混播草地减氮增效提质高效生产方式提供科学指导和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

本试验于宁夏盐池县宁夏大学四墩子草学野外科学观测研究站(37°46′26″ N, 107°26′16″ E, 海拔1380 m)开展, 该区域牧草生育期月平均降水量、气温以及多年月平均降水量、气温(2007—2020年)见图1。该地属典型大陆性季风气候, 年均降水229.5 mm, 年均潜在蒸发量2135.3 mm, 年均气温9.2℃, 年均无霜期163 d。土壤类型为灰钙土, pH值8.5, 有机质8.81 g·kg<sup>-1</sup>, 碱解氮28.89 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效氮21.32 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效钾112.59 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效磷23.65 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验材料

供试饲用高粱品种为“绿巨人”, 拉巴豆品种为“高值”(表1)。

### 1.3 试验设计与田间管理

采用裂区试验设计, 主处理为两种种植模式: 饲用高粱单播, 饲用高粱/拉巴豆混播; 副处理为4个施氮水平: N 0 kg·hm<sup>-2</sup>(N<sub>0</sub>)、N 90 kg·hm<sup>-2</sup>(N<sub>90</sub>)、N 180 kg·hm<sup>-2</sup>(N<sub>180</sub>)和N 270 kg·hm<sup>-2</sup>(N<sub>270</sub>)。共计8个处理, 每个处理设4个重复, 总计32个小区, 小区面积为70 m<sup>2</sup>(10 m×7 m)。尿素(N≥46%)分两次施用, 其中30%的氮肥用作基肥, 70%在拔节期施用。播种前撒施磷酸二铵150 kg·hm<sup>-2</sup>(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>≥46%)和硫酸钾120 kg·hm<sup>-2</sup>(K<sub>2</sub>O≥50%)全部作为基肥。饲用高粱和拉巴豆播种量分别为18.0 kg·hm<sup>-2</sup>和49.5 kg·hm<sup>-2</sup>, 采用穴播方式播种, 饲用高粱株距为23 cm, 行距为30 cm和70 cm(宽窄行种植), 拉巴豆种植在饲料高粱穴间(图2)。饲用高粱和拉巴豆于2021年5月6日播种, 9月11日收获; 2022年5月8日播种, 9月9日收获。试验地采用地面滴灌, 滴头间隔25 cm, 生长季灌水4次, 2021年每次灌水分别为70、90、90、80 mm; 2022年每次灌水分别为60、70、70、60 mm, 生育期内人工除草2次。试验用具: 鸭嘴式多功能点播机(2BFG-2×7, 山东临沂)。

表1 供试材料信息

Table 1 Information of test materials

材料 Material	品种 Variety	纯净度 Purity (%)	发芽率 Germination rate (%)	千粒重 Thousand seeds weight (g)	来源 Source
饲用高粱 <i>S. bicolor</i>	绿巨人 Green hulk	99	98	29.74	北京百斯特草业有限公司
拉巴豆 <i>D. lablab</i>	高值 High value	99	91	268.52	Beijing Best Grass Industry Co., Ltd

### 1.4 测定指标及方法

**1.4.1 干草产量和粗蛋白产量** 在每个小区内随机取3个2.3 m<sup>2</sup>(1.0 m×2.3 m)的样方, 将所采集的甜高粱和拉巴豆鲜草分开风干至恒重后称量干草重量, 最后换算为每hm<sup>2</sup>干草产量。

$$\text{粗蛋白产量}^{[19]}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{干草产量}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \times \text{粗蛋白含量}(\%)$$

**1.4.2 营养品质** 在每个小区内随机取5个整株饲用高粱和拉巴豆鲜草样品, 剪至4~5 cm, 放在通风处自然阴干。将阴干后的饲用高粱和拉巴豆粉碎, 混合均匀后过0.45 mm筛。参照《饲料及饲料添加剂质量检测与品质管理》<sup>[20]</sup>, 测定粗蛋白(crude protein, CP)、中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)含量。根据测定的NDF和ADF含量, 计算饲料相对饲喂价值(relative feeding value,

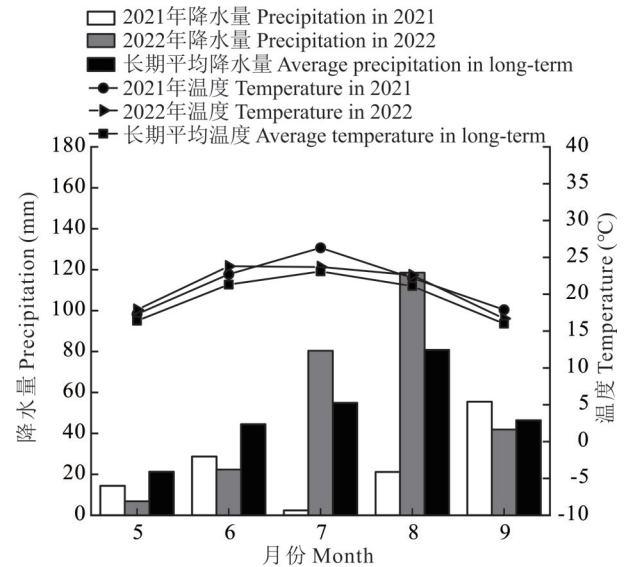


图1 试验基地月平均降水量和气温

Fig. 1 Monthly average rainfall and temperature at the experiment site

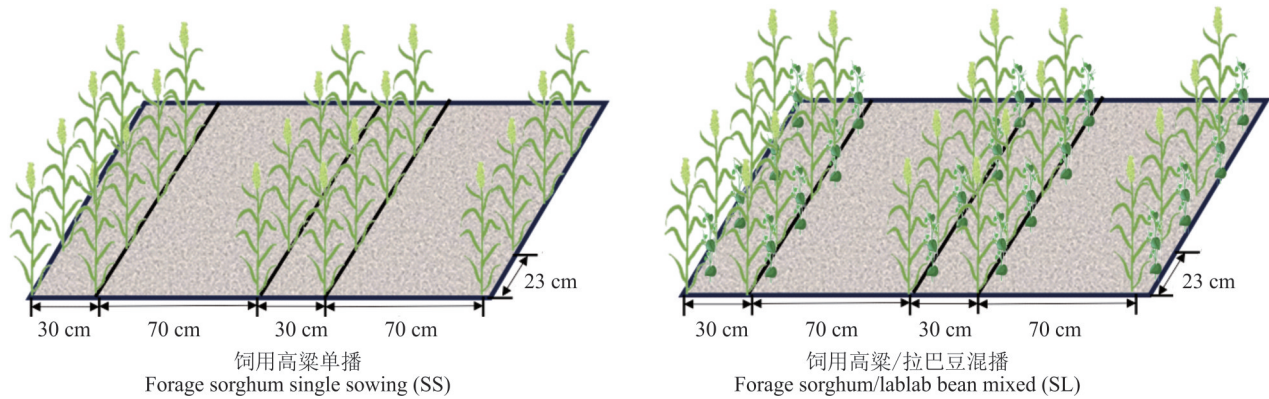


图2 种植模式

Fig. 2 Planting pattern

RFV)、总可消化养分(total digestible nutrients, TDN)、泌乳净能(net energy for lactation, NEL), 计算公式分别为<sup>[21-22]</sup>:

$$TDN = (-1.291 \times ADF) + 101.35$$

$$NEL = [1.044 - (0.0119 \times ADF)] \times 2.205$$

$$RFV = (88.9 - 0.779 \times ADF) \times \left(\frac{120}{NDF}\right) / 1.29$$

在每个小区内随机选取10株饲用高粱采用手持数显糖量计(HB-110ATC, 河南郑州)测定茎秆2~4节茎秆糖锤度。

**1.4.3 氮肥贡献率及利用效率** 氮肥贡献率(contribution rate of N fertilizer, CN)、氮肥农艺利用效率(N agronomic efficiency, NAE)和氮肥偏生产力(N partial factor productivity, NPFP)的计算公式如下<sup>[23-24]</sup>:

$$CN(\%) = (\text{施氮处理饲草产量} - \text{不施氮处理饲草产量}) / \text{施氮处理饲草产量} \times 100$$

$$NAE(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) = (\text{施氮处理饲草产量} - \text{不施氮处理饲草产量}) / \text{施氮量}$$

$$NPFP(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) = \text{施氮处理饲草产量} / \text{施氮量}$$

## 1.5 数据处理与分析

采用Excel 2019软件整理数据, 利用SPSS Statistics 25.0软件进行方差分析, 多重比较, 用Origin 2021作图。通过结构方程模型(structural equation model, SEM)分析混播结合施氮对饲草产量和营养价值的影响, 分析前对所有指标进行Z-score标准化处理, 借助Amos 27.0软件进行SEM拟合分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 年份、种植方式和施氮量对饲草产量、营养品质以及氮肥利用效率的方差分析

由表2可知, 种植方式对干草产量、粗蛋白产量、粗蛋白、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、相对饲喂价值、泌乳净能、总可消化养分、氮肥贡献率、氮肥农艺利用效率和氮肥偏生产力有极显著影响( $P < 0.01$ ), 对糖锤度无显著影响( $P > 0.05$ ); 施氮肥对干草产量、粗蛋白产量、糖锤度、粗蛋白、氮肥农艺利用效率和氮肥偏生产力有极显著影响( $P < 0.01$ ), 对中性洗涤纤维、相对饲喂价值和氮肥贡献率有显著影响( $P < 0.05$ ), 对酸性洗涤纤维、泌乳净能和总可消化养分无显著影响( $P > 0.05$ ); 种植模式和施氮交互作用对粗蛋白产量、中性洗涤纤维、相对饲喂价值和氮肥偏生产力有极显著影响( $P < 0.01$ ), 对干草产量和氮肥农艺利用效率有显著影响( $P < 0.05$ )。

### 2.2 不同种植方式下施氮量对干草产量和粗蛋白产量的影响

种植方式、施氮水平以及其交互作用对干草产量和粗蛋白产量有显著影响( $P < 0.05$ , 表2)。在施氮水平下, 2021和2022年SL种植方式的干草产量平均值较SS分别增加了15.7%和13.9%(图3)。在SL和SS种植方式下, 施氮显著提高了干草产量, 与 $N_0$ 相比, 2021年 $N_{90}$ 、 $N_{180}$ 和 $N_{270}$ 的增幅分别为9.3%、16.9%和14.7%, 2022年

表 2 饲草产量、营养品质以及氮肥利用效率的方差分析

Table 2 Analysis of variance for forage yield, nutritional quality, and nitrogen fertilizer use efficiency

因素 Factor	DM	CPY	TCD	CP	NDF	ADF	RFV	NEL	TDN	CN	NAE	NFPF
年份 Year	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
种植模式 Planting pattern	***	***	NS	***	***	***	***	***	***	**	***	***
氮水平 Nitrogen level	***	***	*	**	*	NS	*	NS	NS	*	**	***
年份×种植模式 Year×planting pattern	NS	NS	NS	NS	NS	**	NS	**	**	NS	NS	NS
年份×氮水平 Year×nitrogen level	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
种植模式×氮水平 Planting pattern×nitrogen level	*	**	NS	NS	**	NS	**	NS	NS	NS	*	***
年份×种植模式×氮水平 Year×planting pattern×nitrogen level	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

\*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ ; \*\*\*:  $P < 0.001$ ; NS: 无显著性差异 No significant difference; DM: 干草产量 Dry yield; CPY: 粗蛋白产量 Crude protein yield; TCD: 糖锤度 Saccharinity; CP: 粗蛋白 Crude protein; NDF: 中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber; ADF: 酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber; RFV: 相对饲喂价值 Relative feeding value; NEL: 泌乳净能 Net lactation energy; TDN: 总可消化养分 Total digestible nutrients; CN: 氮肥贡献率 Nitrogen fertilizer contribution; NAE: 氮肥农艺利用效率 Nitrogen fertilizer agronomic use efficiency; NFPF: 氮肥偏生产力 Nitrogen fertilizer bias productivity.

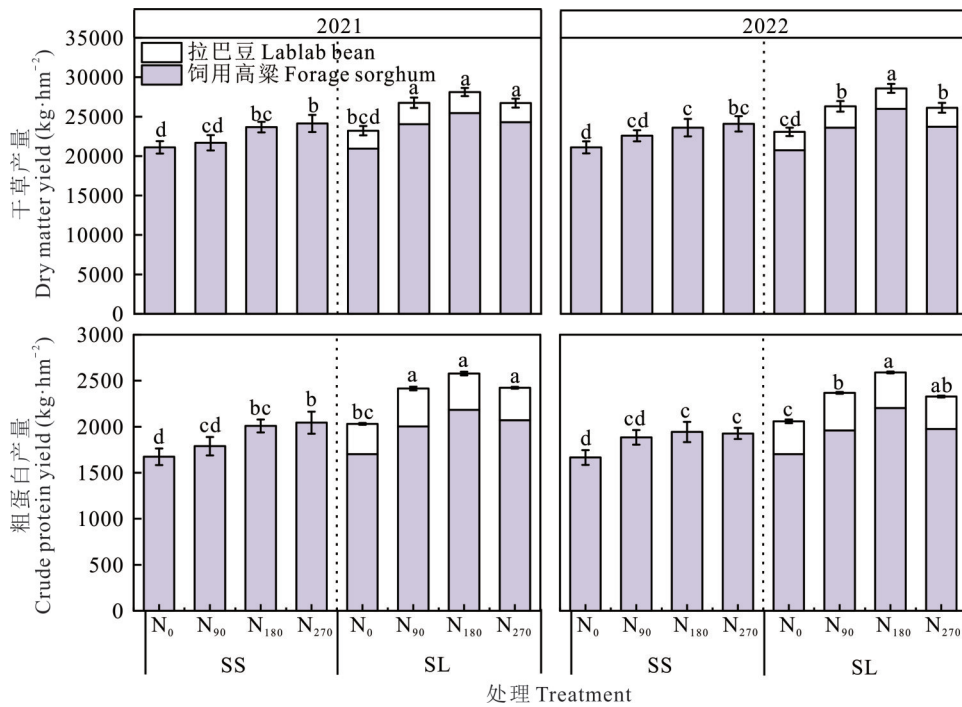


图 3 不同种植模式及施氮水平下干草产量和粗蛋白产量的差异

Fig. 3 Differences in dry matter yield and crude protein yield under different cropping patterns and nitrogen application levels

SS: 饲用高粱单播 Forage sorghum monoculture; SL: 饲用高粱拉巴豆混播 Forage sorghum and lablab bean mixed. N<sub>0</sub>: 氮肥 Nitrogen 0 kg·ha<sup>-1</sup>; N<sub>90</sub>: 氮肥 Nitrogen 90 kg·ha<sup>-1</sup>; N<sub>180</sub>: 氮肥 Nitrogen 180 kg·ha<sup>-1</sup>; N<sub>270</sub>: 氮肥 Nitrogen 270 kg·ha<sup>-1</sup>. 不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different letters meant significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

N<sub>90</sub>、N<sub>180</sub> 和 N<sub>270</sub> 的增幅分别为 10.6%、18.1% 和 13.6%。此外,施氮水平下,2021 和 2022 年 SL 的平均粗蛋白产量较 SS 分别提高了 25.8% 和 26.0%。同时,施氮显著提高了粗蛋白产量,与 N<sub>0</sub> 相比,2021 年提高了 13.8%~24.1%,2022 年提高了 13.9%~21.4%。

2.3 不同种植方式下施氮量对饲用高粱茎秆糖锤度的影响

施氮水平对茎秆糖锤度有显著影响 ( $P < 0.05$ , 图 4)。在施氮处理下,2021 和 2022 年 SL 的茎秆糖锤度与 SS 无显著差异。在 SL 和 SS 种植方式下,施氮显著提高了茎秆糖锤度,与 N<sub>0</sub> 相比,2021 年 N<sub>90</sub>、N<sub>180</sub> 和 N<sub>270</sub> 的增幅分别

为6.7%、10.6%和5.9%，2022年 $N_{90}$ 、 $N_{180}$ 和 $N_{270}$ 的增幅分别为7.1%、9.9%和5.9%。

#### 2.4 不同种植方式下施氮量对饲草营养品质的影响

种植方式和施氮水平对CP含量有显著影响( $P < 0.05$ ,表2)。在施氮处理下,SL的CP含量显著高于SS,平均值显示,2021和2022年SL的CP含量较SS分别增加了14.8%和14.6%(图5);同一种植方式下,2021年不同施氮水平的CP含量间无显著差异,2022年SL的 $N_0$ 施氮水平获得了最高的CP含量,较 $N_{180}$ 提高了3.7%。

种植方式、施氮水平及其交互作用对NDF含量有显著影响( $P < 0.05$ ,表2)。在施氮水平下,SL的NDF含量显著低于SS,平均值显示,2021和2022年SL的NDF含量较SS分别降低了13.0%和13.3%(图5);同一种植方式下,2021和2022年SS不同施氮水平的NDF含量间无显著差异,而2021和2022年SL的 $N_{180}$ 施氮水平获得了最低的NDF含量,分别为48.8%和47.0%。此外,种植方式对ADF含量有显著影响( $P < 0.05$ ,表2)。在施氮处理下,2021年SL的ADF含量平均值较SS低12.4%,而2022年SL和SS的ADF含量无显著差异;同一种植方式下,2021和2022年SL不同氮水平的ADF含量无显著差异,2021年SS的 $N_{90}$ 水平获得了最低的ADF含量,较 $N_{180}$ 和 $N_{270}$ 分别降低了8.8%和9.5%。

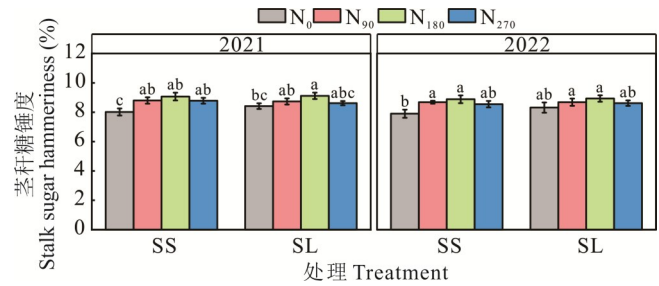


图4 不同种植模式及施氮水平下茎秆糖锤度的差异

Fig. 4 Differences in stalk sugar hammeriness under different cropping patterns and nitrogen application levels

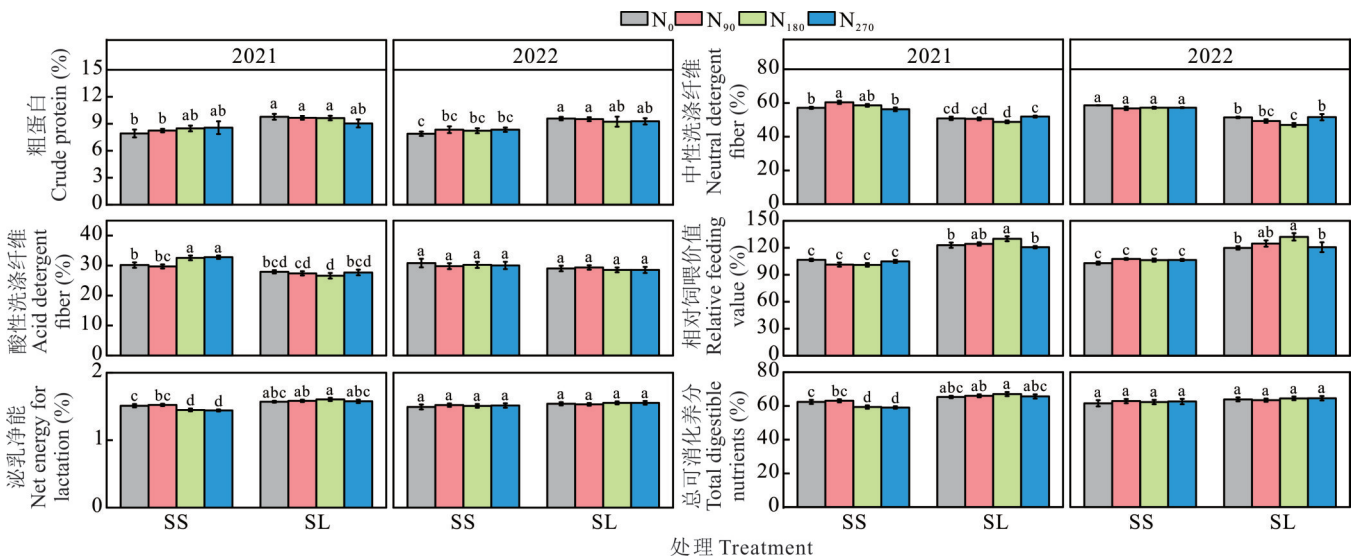


图5 不同种植模式及施氮水平下牧草营养品质的差异

Fig. 5 Differences in nutritional quality of pasture grasses under different cropping patterns and nitrogen application levels

种植方式、施氮水平及其交互作用对RFV有显著影响( $P < 0.05$ ,表2)。在施氮处理下,SL的RFV显著高于SS,其中2021和2022年SL的RFV较SS分别增加了20.3%和17.5%;在SL种植方式下,2021和2022年的 $N_{180}$ 获得了最高的RFV,对比两年平均值 $N_{180}$ 较 $N_0$ 和 $N_{270}$ 分别提高了8.0%和8.7%。

种植方式对TDN和NEL有显著影响( $P < 0.05$ ,表2)。在施氮处理下(图5),2021年SL的TDN平均值较SS提高了8.3%,而2022年SL和SS的TDN无显著差异;2021年SS种植模式的 $N_{90}$ 水平获得了最高的TDN值,较 $N_{180}$ 和 $N_{270}$ 分别提高了6.2%和6.8%。此外,在施氮水平下,2021年SL的NEL平均值较SS提高了6.9%,而2022年SL和SS的NEL无显著差异。同一种植方式下,2021和2022年SL不同氮水平的NEL无显著差异,2021年SS的 $N_{90}$ 水平获得了最高的NEL值,较 $N_{180}$ 和 $N_{270}$ 分别提高了5.2%和5.6%。

### 2.5 不同种植方式下施氮量对氮肥利用的影响

适量施氮可显著提高氮肥贡献率( $P < 0.05$ ), 2021 和 2022 年平均值显示, SS 模式的氮肥贡献率在  $N_{270}$  水平下达到最高, 较  $N_{180}$  和  $N_{90}$  分别提高了 171.9% 和 16.3%, 而 SL 模式在  $N_{180}$  水平下最高, 较  $N_{270}$  和  $N_{90}$  分别提高了 44.0% 和 48.3% (图 6)。此外, 两年平均值显示, SS 和 SL 模式的氮肥农艺利用效率和氮肥偏生产力随着施氮量的增加呈下降趋势, 其中在施氮量为  $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时达到最小值, 显著低于  $N_{90}$  和  $N_{180}$ 。

### 2.6 相关性分析和结构方程模型

干草产量和粗蛋白产量与施氮量的关系均为多项式线性回归方程(图 7)。在单播模式下, 干草产量和粗蛋白产量随着施氮量的增加呈上升趋势, 其中在施氮量为  $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时干草产量和粗蛋白产量达到最高, 分别为  $24112.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $1985.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在混播模式下, 干草产量和粗蛋白产量随着施氮量的增加呈先上升后下降趋势, 其中最优施氮量为  $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 干草产量和粗蛋白产量分别高达  $28352.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $2481.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

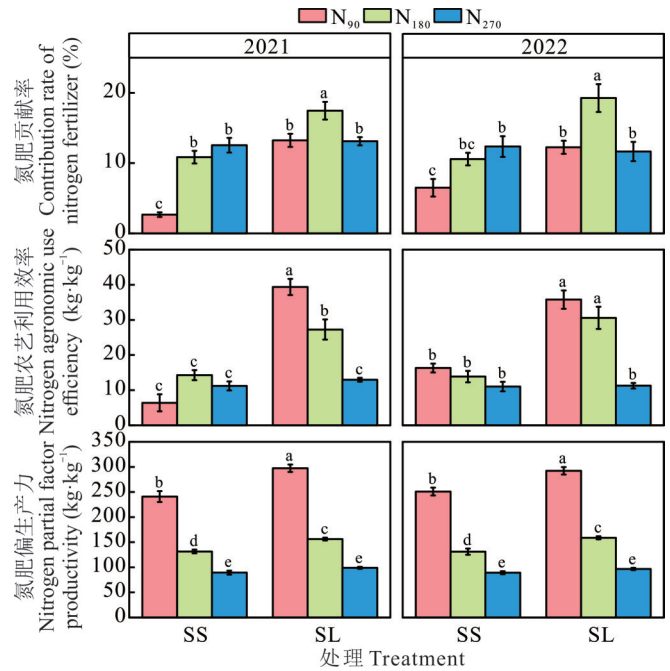


图 6 不同种植模式及施氮水平下氮肥利用率的差异

Fig. 6 Differences in nitrogen fertilizer utilization under different cropping patterns and nitrogen application levels

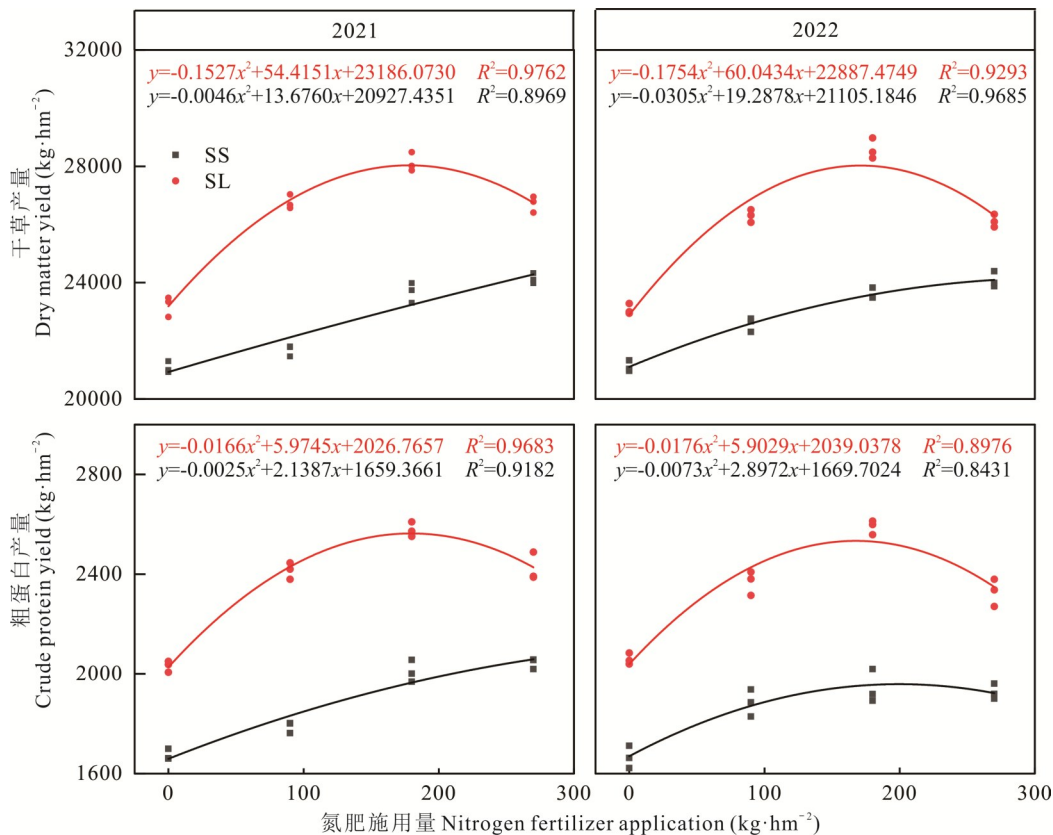


图 7 干草产量和粗蛋白产量与施氮量的关系

Fig. 7 Dry matter yield and crude protein yield in relation to nitrogen applied level

结构方程模型表明(图8),氮肥贡献率对干草产量有极显著的直接正效应( $P<0.001$ ),氮肥农艺利用效率对相对饲喂价值有显著的直接正效应( $P<0.01$ ),粗蛋白与相对饲喂价值间存在极显著正相关关系( $P<0.001$ ),氮肥农艺利用效率对氮肥偏生产力、氮肥贡献率有极显著的直接正效应( $P<0.001$ ),氮肥贡献率对氮肥偏生产力有极显著的直接负效应( $P<0.001$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 饲用高粱/拉巴豆混播及施氮对草地生产性能的影响

饲草产量是草地生产力和经济效益的直接体现,其中豆禾混播能够高效利用光照、水分、养分等资源提高草地生产性能<sup>[24]</sup>。魏正业等<sup>[16]</sup>研究表明,青贮玉米与拉巴豆混播处理的干草产量较单播提高了8.8%。本研究结果显示,饲用高粱与拉巴豆混播种植方式下总干草产量较单播提高了21.2%,主要原因是混播系统增加了拉巴豆的干草产量,继而使混播方式下的总干草产量显著高于单作。氮是饲草间竞争或补充利用的重要元素,混播系统中的禾本科饲草主要通过与其他混播饲草的竞争获得土壤无机氮<sup>[25]</sup>。相比之下,豆科饲草主要依靠根瘤菌共生固氮,过量施氮肥可能抑制固氮效果,降低饲草生产力<sup>[26]</sup>。研究表明,施氮可显著提高玉米/豆科作物间作系统的饲草产量<sup>[27-29]</sup>。然而,赵笃勤等<sup>[30]</sup>研究发现,玉米/豆类作物间作结合施氮量为 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时的总产量与施氮量为 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时无显著差异。本研究发现施氮显著促进了干草产量的形成,其中施氮处理的干草产量较不施氮提高了10.0%~17.5%。在饲用高粱单作方式下, $N_{270}$ 水平获得了最高干草产量( $24112.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),而在饲用高粱与拉巴豆混播方式下, $N_{180}$ 水平获得了最高干草产量( $28352.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),说明适宜的氮肥是实现混播在饲草产量方面优势的主要措施之一。结构方程模型结果也表明,氮肥贡献率对饲草产量具有明显的正效应。此外,本研究发现,混播饲草的粗蛋白产量较单播提高了25.8%,这主要取决于饲用高粱与拉巴豆混播后干草产量和粗蛋白含量的提高。本研究还发现,在 $N_{180}$ 水平下,混播系统的粗蛋白产量达到最高。因此,适宜的施氮量与混播结合是提高饲草生产力的重要措施。2022年的降水量高于2021年,具有较大的季节性和年际变化,故而2021年的干草产量和粗蛋白产量均低于2022年。西北地区具有丰富的光热资源,蕴藏着巨大的饲草开发潜力。利用豆科牧草固氮原理将拉巴豆与饲用高粱混播提高了草地生产力和土壤肥力,也减少了氮肥施用量,为企业和养殖户种植节省了部分肥料支出,提高了经济效益。目前,饲用高粱与拉巴豆混播结合施氮量 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 模式表现出了良好的推广应用前景。

#### 3.2 饲用高粱/拉巴豆混播及施氮对牧草营养品质的影响

饲草的营养价值对家畜正常生长具有重要影响。豆禾混播草地能够提高粗蛋白含量,降低酸性和中性洗涤纤维含量,增加总可消化养分,改善饲草品质<sup>[31]</sup>。有研究表明,青贮玉米与拉巴豆混播后显著提高了饲草粗蛋白含量和相对饲喂价值<sup>[14]</sup>。本研究表明,饲用高粱与拉巴豆混播较饲用高粱单播营养更丰富、更全面以及更均衡,两年混播处理的饲草粗蛋白含量、相对饲喂价值、总可消化养分和泌乳净能较单播分别提高了14.7%、18.9%、5.5%和4.6%。与前人研究结果吻合,这主要得益于拉巴豆的粗蛋白含量显著高于饲用高粱单播,中性和酸性洗涤纤维含量低于饲用高粱单播,二者混合后的饲草营养价值整体高于饲用高粱单播。此外,适宜的施氮量也是改善饲草营养品质的关键。王晨光等<sup>[32]</sup>研究发现,增加施氮量能够提高玉米秸秆中的粗蛋白和干物质消化率,降低玉米秸秆中纤维含量,且在施氮量为 $270\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时达到最大值。蒋紫薇等<sup>[33]</sup>的研究显示,在氮肥120、240、

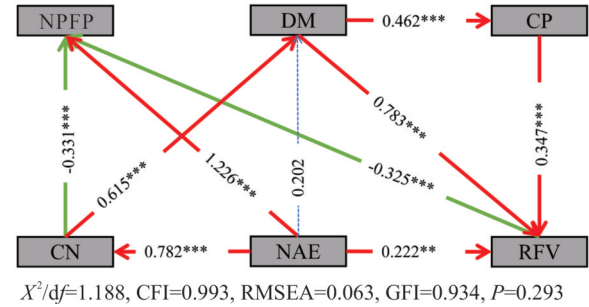


图8 结构方程模型

Fig. 8 Structural equation mode

红色线条表示正相关关系,绿色线条表示负相关关系,蓝色线条表示无显著相关关系。箭头宽度表示显著的标准化的路径系数强度( $P<0.05$ )。\*\*\*:  $P<0.001$ ; \*\*:  $P<0.01$ 。Red lines indicate positive correlations, green lines indicate negative correlations, and blue lines indicate no significant correlations. Arrow widths indicate significant standardized path coefficient strengths ( $P<0.05$ ). \*\*\*:  $P<0.001$ ; \*\*:  $P<0.01$ . NPFP: 氮肥偏生产力 Nitrogen fertilizer partial factor productivity; DM: 干草产量 Dry matter yield; CP: 粗蛋白 Crude protein; RFV: 相对饲喂价值 Relative feeding value; NAE: 氮肥农艺利用效率 Nitrogen fertilizer agronomic use efficiency; CN: 氮肥贡献率 Nitrogen fertilizer contribution.

360 kg·hm<sup>-2</sup>处理下的青贮玉米、秣食豆(*Glycine max*)及总体的粗蛋白含量显著高于不施氮,而中性和酸性洗涤纤维含量随施氮量的增加呈下降趋势,当施氮量达到240 kg·hm<sup>-2</sup>时,混播系统具有较高的营养品质。本试验结果表明,当施氮量为180 kg·hm<sup>-2</sup>时,饲用高粱与拉巴豆混播的粗蛋白含量和相对饲喂价值最高,同时,结构方程模型结果显示,氮肥农艺利用效率对相对饲喂价值的提高具有明显正效应。可见,在豆禾混播系统中,由于研究区及饲草品种的不同,适宜的施氮量也存在差异。

茎秆糖锤度作为表征饲草茎秆糖分含量高低的重要指标,已在评价饲用高粱适口性的研究中广泛使用<sup>[33]</sup>。本研究结果显示,混播与单播相比,饲用高粱的茎秆糖锤度无显著变化。然而,研究发现,施肥对饲用高粱茎秆含糖量有明显影响,尤其施氮肥可以增加甜高粱茎秆含糖量,但过量氮肥会导致含糖量下降<sup>[34]</sup>。本研究发现在N<sub>90</sub>、N<sub>180</sub>、N<sub>270</sub>水平下饲用高粱的茎秆糖锤度整体高于N<sub>0</sub>,其中混播方式下的N<sub>180</sub>处理获得了最高值。说明适宜的施氮量有利于饲用高粱茎秆含糖量的增加,而过量施氮则会导致高粱植株下部叶片早衰,光合能力下降,进而影响茎秆中同化物糖的积累<sup>[35]</sup>。

### 3.3 饲用高粱/拉巴豆混播及施氮对氮肥利用效率的影响

豆科与禾本科作物混播在氮肥贡献率方面具有明显优势。本研究表明,饲用高粱与拉巴豆混播后氮肥贡献率较单播高出22.6%。这与前人研究玉米与大豆间作其氮肥贡献率提高了14.7%<sup>[23]</sup>的结果相似。此外,本研究发现,单播饲用高粱的氮肥贡献率在N<sub>270</sub>水平下达到最高,而饲用高粱与拉巴豆混播的氮肥贡献率在N<sub>180</sub>水平下最高。造成这种差异的原因可能是氮素资源的互补利用,而不仅仅是从肥料中吸收氮素<sup>[36]</sup>。豆科牧草可以通过根瘤菌共生固氮,而禾本科牧草对土壤和肥料中氮的竞争将促进豆科牧草的生物固氮,同时加快了氮转化的强度<sup>[37]</sup>。同样,在混播系统中,禾本科作物对氮的吸收利用也会因土壤和肥料中的氮素转化而增强<sup>[38]</sup>。本研究两年平均数据显示,在单播和混播系统中,N<sub>270</sub>水平的氮肥农艺利用效率和氮肥偏生产力低于N<sub>90</sub>和N<sub>180</sub>水平,说明过量施氮会降低氮肥利用效率。此外,在饲用高粱与拉巴豆混播系统中,氮肥农艺利用效率和氮肥偏生产力在N<sub>90</sub>水平下达到最高值,表明减少施用氮肥可提高氮利用率,而过量施氮则会抑制作物生长并导致氮利用效率下降。这可能是饲用高粱与拉巴豆混播结合减少施氮能提高牧草产量的原因之一。因此,合理的施氮对豆禾混播草地提高氮肥利用率至关重要。基于本研究结果,还需要进一步探究饲用高粱/拉巴豆混播系统的氮转化机制,阐明减少氮肥投入对牧草产量和稳定性的长期影响。

## 4 结论

饲用高粱/拉巴豆混播结合适量氮肥可促进饲草生长,提高草地生产性能、改善饲草营养品质和提高氮肥利用效率。其中饲用高粱/拉巴豆混播结合施氮量180 kg·hm<sup>-2</sup>模式下的干草产量(28352.5 kg·hm<sup>-2</sup>)、粗蛋白产量(2481.1 kg·hm<sup>-2</sup>)、茎秆糖锤度(9.02%)、相对饲喂价值(131.08)以及氮肥贡献率(18.36%)均达到最大值。因此,饲用高粱/拉巴豆混播结合施氮量180 kg·hm<sup>-2</sup>模式是宁夏干旱区增加饲草产量、改善饲草营养品质和提高氮肥利用效率的适宜栽培措施。

### 参考文献 References:

- [1] Zhang Z, Whish J P M, Bell L W, *et al.* Forage production, quality and water-use-efficiency of four warm-season annual crops at three sowing times in the Loess Plateau region of China. *European Journal of Agronomy*, 2017, 84: 84–94.
- [2] Gao W, Shou N, Jiang C, *et al.* Optimizing N application for forage sorghum to maximize yield, quality, and N use efficiency while reducing environmental costs. *Agronomy*, 2022, 12(12): 2969.
- [3] Marsalis M A, Angadi S V, Contreras-Govea F E. Dry matter yield and nutritive value of corn, forage sorghum, and BMR forage sorghum at different plant populations and nitrogen rates. *Field Crops Research*, 2010, 116(1/2): 52–57.
- [4] Wang X, Feng Y, Yu L, *et al.* Sugarcane/soybean intercropping with reduced nitrogen input improves crop productivity and reduces carbon footprint in China. *Science of the Total Environment*, 2020, 719: 137517.
- [5] Zhang X, Davidson E A, Mauzerall D L, *et al.* Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 2015, 528(7580): 51–59.

- [6] Wang X R, Zhang R Z, Li S M, *et al.* Simulation of dry matter accumulation and nitrogen absorption in a maize/soybean intercropping system supplied with different nitrogen levels. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(9): 1354–1363.  
王雪蓉, 张润芝, 李淑敏, 等. 不同供氮水平下玉米/大豆间作体系干物质积累和氮素吸收动态模拟. *中国生态农业学报*, 2019, 27(9): 1354–1363.
- [7] Li C, Hoffland E, Kuyper T W, *et al.* Syndromes of production in intercropping impact yield gains. *Nature Plants*, 2020, 6(6): 653–660.
- [8] Wang B, Deng J Q, Wang T F, *et al.* Effect of seeding options on interspecific competition in oat (*Avena sativa* L.)—common vetch (*Vicia sativa* L.) forage crops. *Agronomy*, 2022, 12(12): 3119.
- [9] Liu Z Y, Zhu Y A, Dong Y, *et al.* Interspecies interaction for nitrogen use efficiency via up-regulated glutamine and glutamate synthase under wheat-faba bean intercropping. *Field Crops Research*, 2021, 274: 108324.
- [10] Li Q, Sun J, Wei X, *et al.* Overyielding and interspecific interactions mediated by nitrogen fertilization in strip intercropping of maize with faba bean, wheat and barley. *Plant and Soil*, 2011, 339(1/2): 147–161.
- [11] Yu C B, Li Y Y, Li C J, *et al.* An improved nitrogen difference method for estimating biological nitrogen fixation in legume-based intercropping systems. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(3): 227–235.
- [12] Hu F, Zhao C, Feng F, *et al.* Improving N management through intercropping alleviates the inhibitory effect of mineral N on nodulation in pea. *Plant and Soil*, 2017, 412(1/2): 235–251.
- [13] Umesh M R, Angadi S, Begna S, *et al.* Intercropping and species interactions on physiological and light use characteristics of forage cereals-legumes combinations in semi-arid regions. *Field Crops Research*, 2023, 290: 108755.
- [14] Wang B, Dong X, Li M Y, *et al.* Effects of mixed planting of *Dolichos lablab* with different sowing rates and silage corn on grassland productivity and forage quality. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(4): 828–834.  
王斌, 董秀, 李满有, 等. 不同播量拉巴豆与青贮玉米混播对草地生产性能及牧草品质的影响. *草地学报*, 2021, 29(4): 828–834.
- [15] Wang T F, Wang B, Deng J Q, *et al.* Effect of sowing rate on yield and forage quality of a *Dolichos lablab*—*Sorghum bicolor* mixture under drip irrigation in arid areas of Ningxia. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(3): 30–40.  
王腾飞, 王斌, 邓建强, 等. 宁夏干旱区滴灌条件下拉巴豆不同播种量与甜高粱混播饲草生产性能研究. *草业学报*, 2023, 32(3): 30–40.
- [16] Wei Z Y, Zhang H X, Shi W, *et al.* Effects of planting methods and nitrogen application on forage crop yield, quality and water use in arid area of northwest China. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(10): 2638–2653.  
魏正业, 张海星, 石薇, 等. 种植方式与施氮对西北旱区饲草作物产量、品质和水分利用的影响. *作物学报*, 2022, 48(10): 2638–2653.
- [17] Gao W, Shou N, Jiang C Z, *et al.* Effect of nitrogen application rate on dry matter accumulation, allocation and water use efficiency of forage sorghum. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(9): 26–35.  
高玮, 受娜, 蒋丛泽, 等. 施氮量对饲用高粱干物质积累、分配及水分利用效率的影响. *草业学报*, 2022, 31(9): 26–35.
- [18] Tan Y, Hu F, Chai Q, *et al.* Expanding row ratio with lowered nitrogen fertilization improves system productivity of maize/pea strip intercropping. *European Journal of Agronomy*, 2020, 113: 125986.
- [19] Deng J, Zhang Z, Liang Z, *et al.* Replacing summer fallow with annual forage improves crude protein productivity and water use efficiency of the summer fallow-winter wheat cropping system. *Agricultural Water Management*, 2020, 230: 105980.
- [20] Li J B. Quality inspection and quality management of feed and feed additives. *China Animal Industry*, 2023(15): 64–65.  
厉建兵. 饲料及饲料添加剂质量检测与品质管理. *中国畜牧业*, 2023(15): 64–65.
- [21] Lithourgidis A S, Vasilakoglou I B, Dhima K V, *et al.* Forage yield and quality of common vetch mixtures with oat and triticale in two seeding ratios. *Field Crops Research*, 2006, 99(2/3): 106–113.
- [22] Sadeghpour A, Jahanzad E, Esmaeili A, *et al.* Forage yield, quality and economic benefit of intercropped barley and annual medic in semi-arid conditions: Additive series. *Field Crops Research*, 2013, 148: 43–48.
- [23] Liu Z, Nan Z, Lin S, *et al.* Millet/peanut intercropping at a moderate N rate increases crop productivity and N use efficiency, as well as economic benefits, under rain-fed conditions. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(3): 738–751.
- [24] Liu X, Meng L, Yin T, *et al.* Maize/soybean intercrop over time has higher yield stability relative to matched monoculture under different nitrogen-application rates. *Field Crops Research*, 2023, 301: 109015.
- [25] Li R, Zhang Z, Tang W, *et al.* Common vetch cultivars improve yield of oat row intercropping on the Qinghai—Tibetan plateau by optimizing photosynthetic performance. *European Journal of Agronomy*, 2020, 117: 126088.

- [26] Gong X, Dang K, Liu L, *et al.* Intercropping combined with nitrogen input promotes proso millet (*Panicum miliaceum* L.) growth and resource use efficiency to increase grain yield on the loess plateau of China. *Agricultural Water Management*, 2021, 243: 106434.
- [27] St Luce M, Grant C A, Zebarth B J, *et al.* Legumes can reduce economic optimum nitrogen rates and increase yields in a wheat-canola cropping sequence in western Canada. *Field Crops Research*, 2015, 179: 12–25.
- [28] Chen P, Du Q, Liu X, *et al.* Effects of reduced nitrogen inputs on crop yield and nitrogen use efficiency in a long-term maize-soybean relay strip intercropping system. *PLoS One*, 2017, 12(9): 0184503.
- [29] Du Q, Zhou L, Chen P, *et al.* Relay-intercropping soybean with maize maintains soil fertility and increases nitrogen recovery efficiency by reducing nitrogen input. *Crop Journal*, 2020, 8(1): 140–152.
- [30] Zhao D Q, Liu S H, Zhao K C. Effect of maize-soybean intercropping and reduced nitrogen application on maize growth, yield and soil nitrate content. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2020, 29(8): 1159–1166.  
赵笃勤, 刘淑慧, 赵凯超. 玉米-大豆间作和减量施氮对玉米生长、产量及土壤硝态氮含量的影响. *西北农业学报*, 2020, 29(8): 1159–1166.
- [31] Lithourgidis A S, Dordas C A. Forage yield, growth rate, and nitrogen uptake of faba bean intercrops with wheat, barley, and rye in three seeding ratios. *Crop Science*, 2010, 50(5): 2148–2158.
- [32] Wang C G, Zhao M J, Pei W D, *et al.* Effects of nitrogen rates on grain yield and forage quality of dual-purpose maize. *Journal of Maize Sciences*, 2020, 28(6): 148–153.  
王晨光, 赵美娟, 裴文东, 等. 施氮量对粮饲兼用玉米子粒产量和饲用品质的影响. *玉米科学*, 2020, 28(6): 148–153.
- [33] Jiang Z W, Liu G Y, An H Y, *et al.* Effects of planting density and nitrogen application on forage yield, quality and nitrogen use efficiency in a maize/forage soybean intercropping system. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(7): 157–171.  
蒋紫薇, 刘桂宇, 安昊云, 等. 种植密度与施氮对玉米/秣食豆间作系统饲草产量、品质和氮肥利用的影响. *草业学报*, 2022, 31(7): 157–171.
- [34] Shen X T, Deng X, Li M Y, *et al.* Comparative study of production performance and nutritional value of *Sorghum dochna* varieties in rainfed areas in Ningxia, China. *Pratacultural Science*, 2022, 39(6): 1235–1244.  
沈笑天, 邓雪, 李满有, 等. 宁夏雨养区饲用甜高粱品种的生产性能和营养价值. *草业科学*, 2022, 39(6): 1235–1244.
- [35] Zaituniguli·K E B, Tuerxun·T E H, Tu Z D, *et al.* Effects of fertilization on growth and yield of continuously cropped sweet sorghum. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(8): 81–92.  
再吐尼古丽·库尔班, 吐尔逊·吐尔洪, 涂振东, 等. 长期不同施肥处理对连作高粱生长规律及产量的影响研究. *草业学报*, 2020, 29(8): 81–92.
- [36] Wang B. Effects of mixed cropping ratio and NPK fertilization production performance and soil physical and chemical properties of *Sorghum bicolor*/*Dolichos lablab* grassland. Yinchuan: Ningxia University, 2022.  
王斌. 混播比例与氮磷钾肥配施对甜高粱/拉巴豆草地生产性能和土壤理化性质的影响. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [37] Li Q, Chen J, Wu L, *et al.* Belowground interactions impact the soil bacterial community, soil fertility, and crop yield in maize/peanut intercropping systems. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(2): 622.
- [38] Stomph T, Dordas C, Baranger A, *et al.* Designing intercrops for high yield, yield stability and efficient use of resources: Are there principles. *Advances in Agronomy*, 2020, 160(1): 1–50.