

DOI:10.11686/cyxb2025059

http://cyxb.magtech.com.cn

张译尹, 肖爱萍, 王斌, 等. 饲用高粱/拉巴豆混播模式下施氮量对草地生产力和能量利用效率的影响. 草业学报, 2026, 35(1): 40—52.

ZHANG Yi-yin, XIAO Ai-ping, WANG Bin, *et al.* Effect of nitrogen application on grass productivity and energy use efficiency in a mixed forage sorghum/lablab planting. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(1): 40—52.

饲用高粱/拉巴豆混播模式下施氮量对草地生产力和能量利用效率的影响

张译尹^{1,2,3**}, 肖爱萍^{1,4**}, 王斌^{1,2,3}, 王腾飞^{1,2,3}, 胡海英^{1,2,3}, 兰剑^{1,2,3*}

(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. 农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 宁夏银川 750021; 4. 宁夏回族自治区畜牧工作站, 宁夏银川 750021)

摘要:通过探讨混播模式下不同施氮水平对草地生产性能、经济效益、能量利用效率和生态效能指数的影响,可为氮素高效利用和生态可持续发展提供科学依据。于2021—2023年在宁夏大学四墩子草学野外科学研究基地开展田间定位试验,采用双因素试验设计,设置2个种植模式(SS:饲用高粱单播;SL:饲用高粱/拉巴豆混播)和4个施氮水平(N_0 :0 kg·hm⁻²; N_{90} :90 kg·hm⁻²; N_{180} :180 kg·hm⁻²; N_{270} :270 kg·hm⁻²)。结果表明:混播与氮素调控的协同效应显著提高了系统干草产量和粗蛋白产量,且在施氮量为180 kg·hm⁻²水平下表现出最优生产性能,干草产量(29.08 t·hm⁻²)和粗蛋白产量(2.62 t·hm⁻²)均达到最高,较饲用高粱单播模式平均提高了20.69%~23.86%和21.03%~26.89%。经济效益分析显示,在180 kg·hm⁻²施氮水平下饲用高粱/拉巴豆混播模式的年均净收入和净产出能量均为最高,较不施肥分别提高33.94%和21.32%,表现出良好的经济—能源协同效应。此外,饲用高粱/拉巴豆混播模式下施氮量为90 kg·hm⁻²时能量利用效率和能量生产力最高,分别为10.84和0.60 kg·MJ⁻¹,较不施肥分别提高了1.94%和1.95%。综合草地生产性能、经济效益、能量利用效率以及生态效能指数对不同种植模式进行可持续评价得出,混播结合施氮180 kg·hm⁻²处理下可持续指数最高(0.97)。因此,西北干旱区饲用高粱/拉巴豆混播种植系统的最佳施氮量为180 kg·hm⁻²,以相对较低的氮肥投入提高了牧草产量和农业系统的可持续性。

关键词:混播;氮肥;生产性能;生态效能指数;经济效益

Effect of nitrogen application on grass productivity and energy use efficiency in a mixed forage sorghum/lablab planting

ZHANG Yi-yin^{1,2,3**}, XIAO Ai-ping^{1,4**}, WANG Bin^{1,2,3}, WANG Teng-fei^{1,2,3}, HU Hai-ying^{1,2,3}, LAN Jian^{1,2,3*}

1. College of Forestry and Grassland, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Grassland and Pasture Engineering Research Center, Yinchuan 750021, China; 3. Key Laboratory for Model Innovation in Forage Production Efficiency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yinchuan 750021, China; 4. Ningxia Hui Autonomous Region Animal Husbandry Station, Yinchuan 750021, China

Abstract: The aim of this study was to determine the effects of different nitrogen application rates on grassland production performance, economic efficiency, energy use efficiency, and ecological efficiency index under mixed seeding conditions. The overall aim of our research was to provide a scientific basis for the efficient use of N fertilizer

收稿日期:2025-02-26;改回日期:2025-04-28

基金项目:国家自然科学基金项目(32201474),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(2021BBF02001)资助。

作者简介:张译尹(1998—),女,甘肃定西人,在读博士。E-mail: 2543378861@qq.com;肖爱萍(1984—),女,宁夏银川人,硕士。E-mail: ycdxap@126.com。 ** 共同第一作者 These authors contributed equally to this work.

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

to achieve environmentally sustainable development. We conducted a field trial in 2021–2023 at the Sidunzi Grass Field Science Research Base of Ningxia University. The experiment had a two-factor design with two cropping patterns (SS: forage sorghum monoculture; SL: forage sorghum/lablab mixed cropping) and four N application rates (N_0 : $0 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; N_{90} : $90 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; N_{180} : $180 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; N_{270} : $270 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). It was found that the synergistic effect of mixed seeding and nitrogen fertilization significantly increased the hay yield and crude protein yield of the system. The optimum production performance was obtained with the mixed crop fertilized with N at $180 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. This treatment had the highest hay yield ($29.08 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) and crude protein yield ($2.62 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$). These values were higher on average by 20.69%–23.86% and 21.03%–26.89%, respectively, compared with those in the other treatments and the control. An economic benefit analysis showed that the forage sorghum/lablab mixed planting fertilized with $180 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ N had the highest average annual net income and net energy output. The values for this treatment 33.94% and 21.32% higher, respectively, than those in the control (no fertilizer), demonstrating good economic-energy synergy effects. The forage sorghum/lablab mix with $90 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ N application had the highest energy use efficiency and energy productivity at 10.84 and $0.60 \text{ kg}\cdot\text{MJ}^{-1}$, respectively. These values were 1.94% and 1.95% higher than the respective values in the control. The sustainability of the different cropping patterns was evaluated on the basis of the forage yield, economic efficiency, energy use efficiency, and ecological efficiency index. The highest sustainability index (0.97) was obtained for the mixed crop with N application at $180 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Therefore, application of N fertilizer at $180 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ is the optimum level for the forage sorghum/lablab mixed cropping system in the Northwest Arid Zone. This treatment improves the forage yield and sustainability of the cropping system with relatively low N fertilizer inputs.

Key words: seed mixing; nitrogen fertilizer; production performance; eco-efficiency index; economic benefit

随着我国畜牧业的快速发展,饲草需求持续增加^[1]。在耕地资源有限的背景下,提高饲草产量成为保障畜牧业稳定发展的关键。氮素是作物生长的重要元素,通常在农业中施用氮肥来提高土地生产力^[2]。然而,过量的施氮导致未被作物吸收的氮素通过各种损失途径进入大气和水体,造成环境污染,威胁生态系统健康^[3]。作为农业大国,我国在人口增长带来的食物需求增加的同时,也面临着农业生产中能源投入(种子、肥料、灌溉和农药等)增加所带来的环境压力。此外,传统种植方式存在能源和化肥投入密集、环境质量下降、经济和生态效益低下等问题^[4]。因此,迫切需要探究出有效的管理措施取代传统的集约化能源投入,为低碳、绿色和可持续农业发展提供有力支撑。

多样化种植作为一种环境友好型管理策略,在降低能量投入和改善生态环境方面具有显著优势^[5]。其中,豆禾混播作为应用广泛的栽培模式,通过时空集约化种植可有效提高光能、水分和土壤养分利用效率,促进植物的生长,提升草地生产性能^[6]。并且,在混播系统中,豆科作物的生物固氮作用不仅能减少氮肥施用,还能提高土壤肥力,实现“以草养地”的良性循环,有利于农业生态可持续发展^[7–8]。Li等^[9]研究发现,在水稻(*Oryza sativa*)种植系统中,加入蚕豆(*Vicia faba*)可使净效益提高22%~94%。然而,现有的种植模式多样化通常会增加能源投入(如种子、劳动力和机械等),这些因素往往伴随着一些负面的环境影响,例如降低能源利用效率和增加温室气体排放^[10]。通过优化农业生产模式可以减少能量投入,同时提高30%的农作物产量^[11]。研究表明,用豆科作物代替冬小麦(*Triticum aestivum*)不仅可以维持水稻的产量,还可以显著降低氮污染,促进农业可持续生产^[12–13],因此,为了达到节能减排,以较低的投入替代较高的能耗,提高种植系统的能量利用效率尤为重要。

饲用高粱(*Sorghum bicolor*)具有生物量大、含糖量高、营养价值丰富、适口性好、抗逆性强等优点^[14],在西北地区广泛种植^[15]。拉巴豆(*Dolichos lablab*)是一年生高品质豆科饲草,具有攀缘能力高、抗逆性强、耐阴性高等特点,常与青贮玉米(*Zea mays*)或饲用高粱混播^[16]。然而,目前大多数研究只注重于混播模式或施肥对饲草产量、品质等表观指标的影响,而忽略了混播模式下的经济效益、能量投入以及生态环境的变化^[17]。因此,配置适宜的

施氮量是饲用高粱/拉巴豆混播系统增加饲草生产力、提高能量利用效率和促进农业生态可持续发展的关键。为此,在宁夏地区通过3年定位试验探究不同施氮量对饲用高粱单播和饲用高粱/拉巴豆混播系统生产力、经济效益、能量利用及生态效能指数的影响,确定环境友好和经济可持续的种植制度,以期为当地农业和畜牧业生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在宁夏大学四墩子草学野外科学研究基地(37°46'26" N, 107°26'16" E, 海拔1460 m)开展,该区域月平均降水量和温度如图1所示。该地属典型温带大陆性气候,四季分明,昼夜温差大,年均降水量229.5 mm,年均气温9.2 °C,年均无霜期163 d。高粱与拉巴豆的生长季节在5—9月,2021、2022和2023年生长季总降水量分别为122.2、269.9和182.9 mm,平均气温分别为21.3、20.9和20.6 °C。土壤类型为灰钙土,播种前测定0~30 cm土层土壤容重和孔隙度分别为1.39 g·cm⁻³和47.55%。土壤有机碳、全氮、速效磷和速效钾含量分别为5.97 g·kg⁻¹、0.82 g·kg⁻¹、12.72 mg·kg⁻¹和135.42 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计与田间管理

本研究采用裂区试验设计,设置饲用高粱单播(SS)和饲用高粱/拉巴豆混播(SL)两种种植模式为主区;设置4个施氮水平为副区,分别为0(N₀)、90(N₉₀)、180(N₁₈₀)和270 kg·hm⁻²(N₂₇₀)。试验共计8个处理,每个处理重复4次,随机区组排列,共32个小区,小区面积为70 m²(10 m×7 m),各小区之间设置1 m宽的隔离带。在播种前将磷酸二铵150 kg·hm⁻²(P₂O₅≥46%)、硫酸钾120 kg·hm⁻²(K₂O≥50%)和30%的氮肥(尿素,N≥46%)作为基肥翻入土壤中,剩余70%的氮肥在饲用高粱拔节期施用^[18]。为适应机械化发展,考虑农机农艺相结合,单作和间作均采用宽窄行种植模式,采用穴播方式播种,宽行70 cm,窄行30 cm,株距23 cm,拉巴豆种植在饲用高粱穴间(每穴2粒拉巴豆)。采用地面滴灌,滴头间隔25 cm,生长季灌水4次,2021年灌水330 mm,2022年灌水260 mm,2023年灌水260 mm。生育期内人工除草2次。饲用高粱与拉巴豆于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,2023年5月4日播种、9月16日收获。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 归一化植被指数和叶面积指数 归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI):采用Green Seeker(DELTRAN, Deland, FL, 美国)便携式光谱仪在饲草出苗后30、60、90、120 d以及收获期测定NDVI,每小区重复测定6次,取平均值。

叶面积指数(leaf area index, LAI):采用植物冠层分析仪(LAI-2000C, 北京莱阔生物科技有限公司)在饲草出苗后30、60、90、120 d以及收获期测定LAI(在日出或日落时测定,避免阳光直射),每个小区随机选择6个测定点,每个测定点在冠层上方记录3个散射辐射读数,在冠层下方收集4个读数。

1.3.2 干草产量和粗蛋白产量 干草产量:在每个小区内随机选取6个连续5穴进行测产(宽窄行取样数量一致),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重,最后换算为每hm²干草产量。利用全自动凯氏定氮仪(GK-600型, 山东菏泽)测定氮含量(g·kg⁻¹),氮含量乘6.25为粗蛋白含量。粗蛋白产量计算公式^[19]为:

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

1.3.3 经济效益分析 不同处理的年均净收入(average annual net income, NI, 元·hm⁻²)是总收入(total income, TI, 元·hm⁻²)减去总成本(total cost, TC, 元·hm⁻²)。总收入根据饲草产量计算得出,总成本如表1所示。

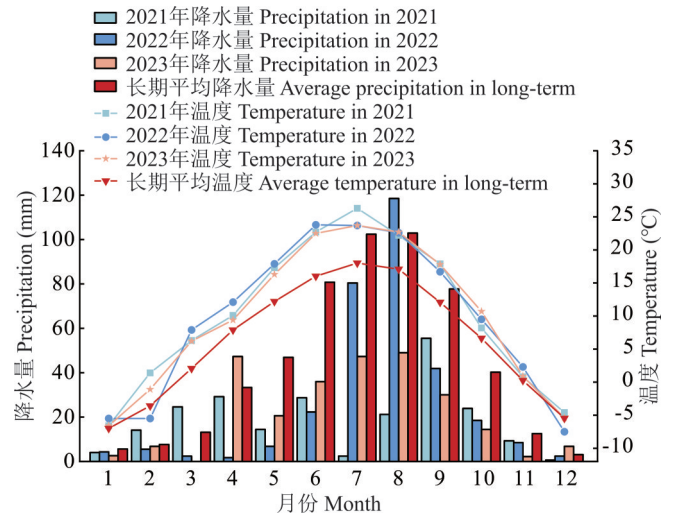


图1 2021–2023年试验区不同月份降水量和温度

Fig. 1 Precipitation and temperature in different months of the test area in 2021–2023

产投比(the ratio of income to cost, RIC)计算公式^[20]如下:

$$RIC = NI/TC$$

表 1 年平均(2021–2023 年)农业投入经济成本

Table 1 Annual average (2021–2023) economic cost of agricultural inputs

种植模式 Cropping patterns	施氮水平 Nitrogen application levels	投入成本 Input cost (yuan·hm ⁻²)							
		人工 Labor	拖拉机 Tractor	肥料 Fertilizer	农药 Pesticide	滴灌带 Drip irrigation tape	电费 Electricity bill	种子 Seed	总计 Total
SS	N ₀	2313.36	1985.04	858.00	909.36	750.24	251.28	720.00	7787.28
	N ₉₀	2313.36	1985.04	1344.24	909.36	750.24	251.28	720.00	8273.52
	N ₁₈₀	2313.36	1985.04	1830.48	909.36	750.24	251.28	720.00	8759.76
	N ₂₇₀	2313.36	1985.04	2316.72	909.36	750.24	251.28	720.00	9246.00
SL	N ₀	2431.44	2309.76	858.00	763.92	750.24	243.36	2947.68	10304.40
	N ₉₀	2431.44	2309.76	1344.24	763.92	750.24	243.36	2947.68	10790.64
	N ₁₈₀	2431.44	2309.76	1830.48	763.92	750.24	243.36	2947.68	11276.88
	N ₂₇₀	2431.44	2309.76	2316.72	763.92	750.24	243.36	2947.68	11763.12

SS: 饲用高粱单播 Forage sorghum monoculture; SL: 饲用高粱/拉巴豆混播 Forage sorghum/lablab mixed cropping. 下同 The same below.

1.3.4 能量数据计算 不同处理的能量投入(energy input, EI, MJ·hm⁻²)包括种子、人工、柴油、机械、化肥、农药、塑料薄膜、滴灌带和电力等(表 2)。每个组成部分的能量投入值是用生产投入量乘以相应的能量当量系数得出(表 2)。饲用高粱干物质产量(forage sorghum dry matter yield)和拉巴豆干物质产量(forage lablab dry matter yield)的能量当量系数均为 18 MJ·kg⁻¹^[22]。

表 2 年平均(2021–2023 年)农业生产投入量

Table 2 Average annual (2021–2023) agricultural production inputs

投入来源 Input source	SS (MJ·hm ⁻²)				SL (MJ·hm ⁻²)				能量当量系数 Energy equivalent coefficient	参考文献 References
	N ₀	N ₉₀	N ₁₈₀	N ₂₇₀	N ₀	N ₉₀	N ₁₈₀	N ₂₇₀		
人工 Human labor	192.8	192.8	192.8	192.8	202.6	202.6	202.6	202.6	1.96 MJ·h ⁻¹	[21]
燃料 Fuels	90.0	90.0	90.0	90.0	95.4	95.4	95.4	95.4	56.31 MJ·L ⁻¹	[21]
机械 Farm machinery	37.5	37.5	37.5	37.5	45.0	45.0	45.0	45.0	332 MJ·h ⁻¹	[21]
氮肥 Chemical fertilizer-N	0	90	180	270	0	90	180	270	60.6 MJ·kg ⁻¹	[21]
磷肥 Chemical fertilizer-P ₂ O ₅	150	150	150	150	150	150	150	150	11.1 MJ·kg ⁻¹	[21]
钾肥 Chemical fertilizer-K ₂ O	90	90	90	90	90	90	90	90	6.7 MJ·kg ⁻¹	[21]
农药 Pesticide	0.75	0.75	0.75	0.75	0.63	0.63	0.63	0.63	120 MJ·kg ⁻¹	[21]
滴灌带 Drip irrigation belt	75	75	75	75	75	75	75	75	76 MJ·kg ⁻¹	[21]
电费 Electricity bill	838	838	838	838	812	812	812	812	11.93 MJ·Wh ⁻¹	[21]
高粱种子 Forage sorghum seed	18	18	18	18	18	18	18	18	43.5 MJ·kg ⁻¹	[22]
拉巴豆种子 Lablab seed	0	0	0	0	49.5	49.5	49.5	49.5	23.8 MJ·kg ⁻¹	[22]

投入总能量(EI)计算公式^[23]如下:

$$EI = \sum_{i=1}^n EI_1 + EI_2 + \dots + EI_n$$

式中: EI₁、EI₂…EI_n代表上述不同输入成分的能量投入(MJ·hm⁻²)。

净产出能量(net energy output, NEO, MJ·hm⁻²)利用以下公式计算^[23]:

$$NEO = GEO - EI$$

式中:总产出能量(gross energy output, GEO, MJ·hm⁻²)是用干草产量乘以相应的能量当量系数计算得出^[23]。

能量生产力(energy productivity, ER)、能量获利能力(energy profitability, EP)、能量利用效率(energy efficiency, EE, kg·MJ⁻¹)和生态效能指数(eco-efficiency index, EEI, 元·MJ⁻¹)利用以下公式计算^[23]:

$$ER = GEO/EI$$

$$EP = NEO/EI$$

$$EE = DM/EI$$

$$EEI = NI/EI$$

式中:DM表示干草产量(dry matter)。

1.3.5 可持续评价 通过对不同处理的干草产量、粗蛋白产量、经济利润、净能源产出、能量生产力和生态效能指数进行综合评价,构建了可持续评价指数^[24](sustainability evaluation index, SEI)。SEI值越大,种植系统越环保、可持续性越强。

$$\alpha_1 x_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{\max}} \quad \left(\begin{array}{l} i = 1, 2, 3, \dots, 8 \\ j = 1, 2, 3 \end{array} \right) \text{或}$$

$$\alpha_2 x_{ij} = \frac{x_{\min}}{x_{ij}} \quad \left(\begin{array}{l} i = 1, 2, 3, \dots, 8 \\ j = 4, 5, 6 \end{array} \right)$$

式中: α_1 代表各处理值除以同一指标所有处理中的最大值; α_2 代表同一指标所有处理中的最小值除以各处理值。 x_{ij} 表示第*i*行×第*j*列的数据标准化值($0 < \alpha x_{ij} \leq 1$); x_{ij} 为种植模式*i*与评价指标*j*的实际值; x_{\max} 与 x_{\min} 为每个评价指标的最大值与最小值。

$$\beta x_{ij} = \frac{1}{\alpha_1 x_{ij}} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\alpha_1 x_{ij} - \alpha_2 x_{ij})^2} \quad \left(\begin{array}{l} i = 1, 2, 3, \dots, 8 \\ j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \end{array} \right)$$

式中: βx_{ij} 为标准化系数; m 为种植模式*i*或评价指标*j*的最大值。

$$SEI = \sum_{j=1}^m \left(\alpha x_{ij} \times \frac{\beta x_{ij}}{\sum_{j=1}^m \beta x_{ij}} \right) \quad \left(\begin{array}{l} i = 1, 2, 3, \dots, 8 \\ j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \end{array} \right)$$

1.4 数据处理与分析

采用Excel 2016软件进行数据整理,利用SPSS Statistics 27.0软件进行方差分析,Duncan法进行多重比较,检验差异显著性($P < 0.05$)。以种植模式、氮处理为固定因子,采用双因素方差分析探讨不同处理间干草产量、粗蛋白产量、年均净收入、产投比、总产出能量、净产出能量、能量利用效率、能量生产力、能量获利能力和生态效能指数。使用Origin 2021作图。

2 结果与分析

2.1 种植方式和施氮量对归一化植被指数的影响

2021—2023年不同种植模式及施氮水平下饲草群体NDVI的差异分析结果(图2)表明,整个生育期内,NDVI呈上升趋势。混播提高了饲用高粱/拉巴豆群体NDVI,2021、2022和2023年混播处理较单播分别提高9.95%、10.45%和9.41%。混播下不同施氮处理之间相互比较,在2021年饲用高粱/拉巴豆生长120 d时, N_{180} 处理下NDVI比 N_0 增加2.84%,2022年增加2.40%,2023年增加1.41%。且饲用高粱/拉巴豆混播3年均均在 N_{180} 处理下NDVI达到最大值,且与 N_0 处理之间差异达到显著水平($P < 0.05$)。

2.2 种植方式和施氮量对叶面积指数的影响

2021—2023年不同种植模式及施氮水平下饲草群体叶面积指数(LAI)的变化结果(图3)表明,不同生长季内饲草群体LAI动态变化基本一致,均呈上升趋势。饲用高粱/拉巴豆混播处理可提高LAI值,2021、2022和2023年全生育期平均比饲用高粱单播增加7.37%、9.35%和7.94%。混播不同施氮处理之间相互比较,2021年在饲

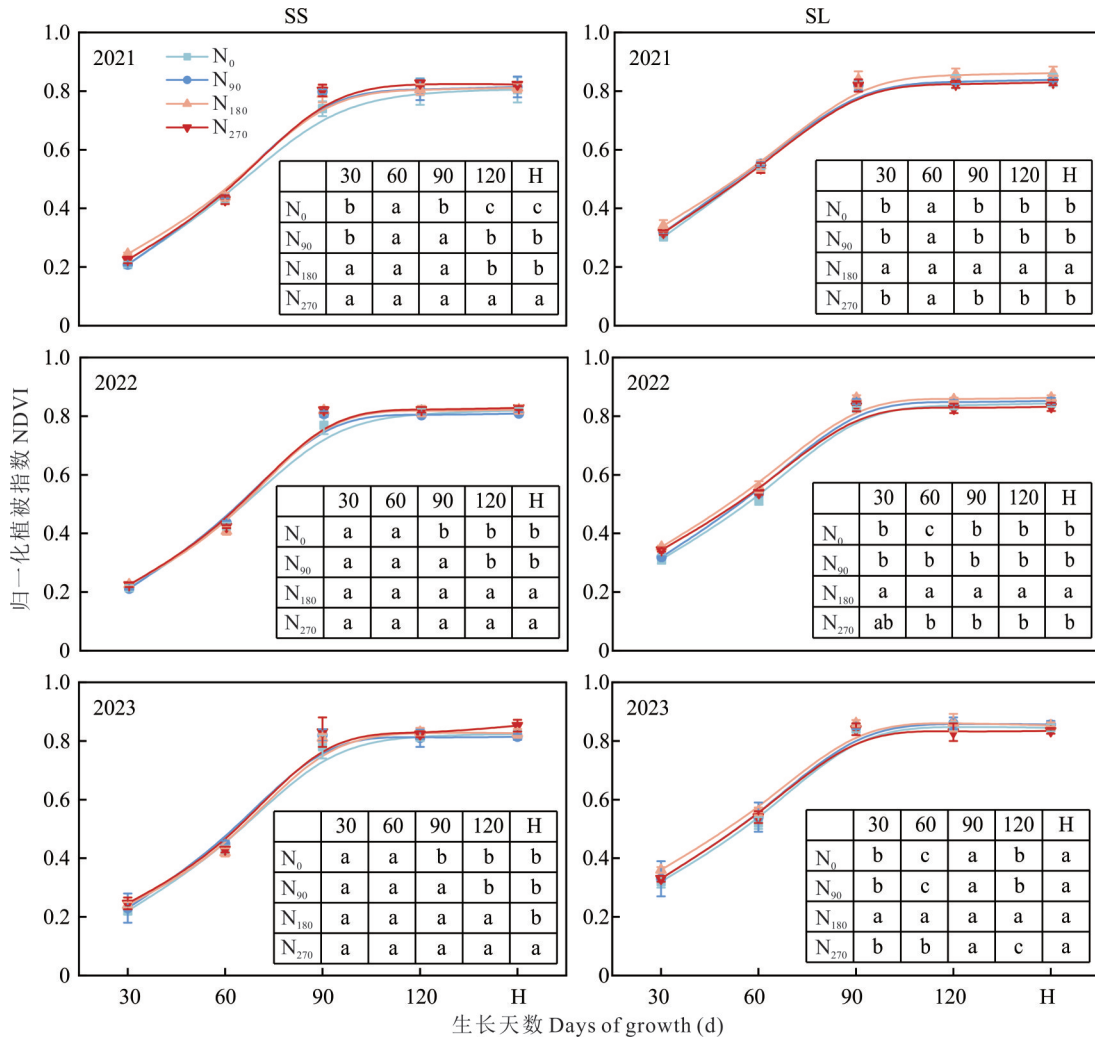


图 2 不同种植模式及施氮水平对归一化植被指数的影响

Fig. 2 Effects of different cropping patterns and nitrogen application levels on normalized difference vegetation index (NDVI)

SS: 饲用高粱单播 Forage sorghum monoculture; SL: 饲用高粱/拉巴豆混播 Forage sorghum/lablab mixed cropping. H: 表示截至收获期的生长天数, 2021、2022 和 2023 年收获期的生长天数分别为 127、123 和 134 d. The number of growing days until harvest is 127, 123, and 134 days for the 2021, 2022, and 2023 harvests, respectively. 下同 The same below.

草生长 120 d 时, N₉₀、N₁₈₀ 和 N₂₇₀ 处理的 LAI 值分别比 N₀ 增加 1.96%、5.57% 和 1.75%, 2022 年分别比 N₀ 增加 4.07%、5.48% 和 3.67%, 2023 年分别比 N₀ 增加 2.79%、6.89% 和 5.83%, 其中 N₉₀、N₁₈₀ 和 N₂₇₀ 与 N₀ 处理之间差异均达到显著水平 ($P < 0.05$)。由此可见, N₁₈₀ 处理提高饲草群体 LAI 值的幅度最大。

2.3 种植方式和施氮量对干草产量和粗蛋白产量的影响

种植模式和施氮处理均显著影响饲草生产力 ($P < 0.05$, 图 4)。3 年试验结果表明, 饲用高粱与拉巴豆混播明显提高了草地总生产性能, 2021—2023 年干草产量较单播分别提高 15.68%、13.89% 和 14.33%, 粗蛋白产量分别提高 25.71%、25.96% 和 23.43%。混播处理下, 就干草产量而言, 在不同施氮水平下, 3 年试验结果均在 N₁₈₀ 处理下达到最高, 分别为 28.12、28.58 和 30.53 t·hm⁻², 与 N₀ 处理相比, 2021—2023 年干草产量分别提高 21.13%、23.86% 和 20.69%。从粗蛋白产量可以看出, 3 年在 N₁₈₀ 处理下均达到最高, 且与 N₀ 处理差异显著 ($P < 0.05$)。与 N₀ 相比, 2021 年施氮处理的粗蛋白产量提高了 18.88%~26.89%, 2022 年提高了 13.11%~25.81%, 2023 年提高了 11.90%~21.03%。

2.4 种植方式和施氮量对经济效益的影响

种植模式和施氮水平对年均净收入和产投比有显著影响 ($P < 0.05$, 图 5)。3 年平均结果表明, 混播较单播年

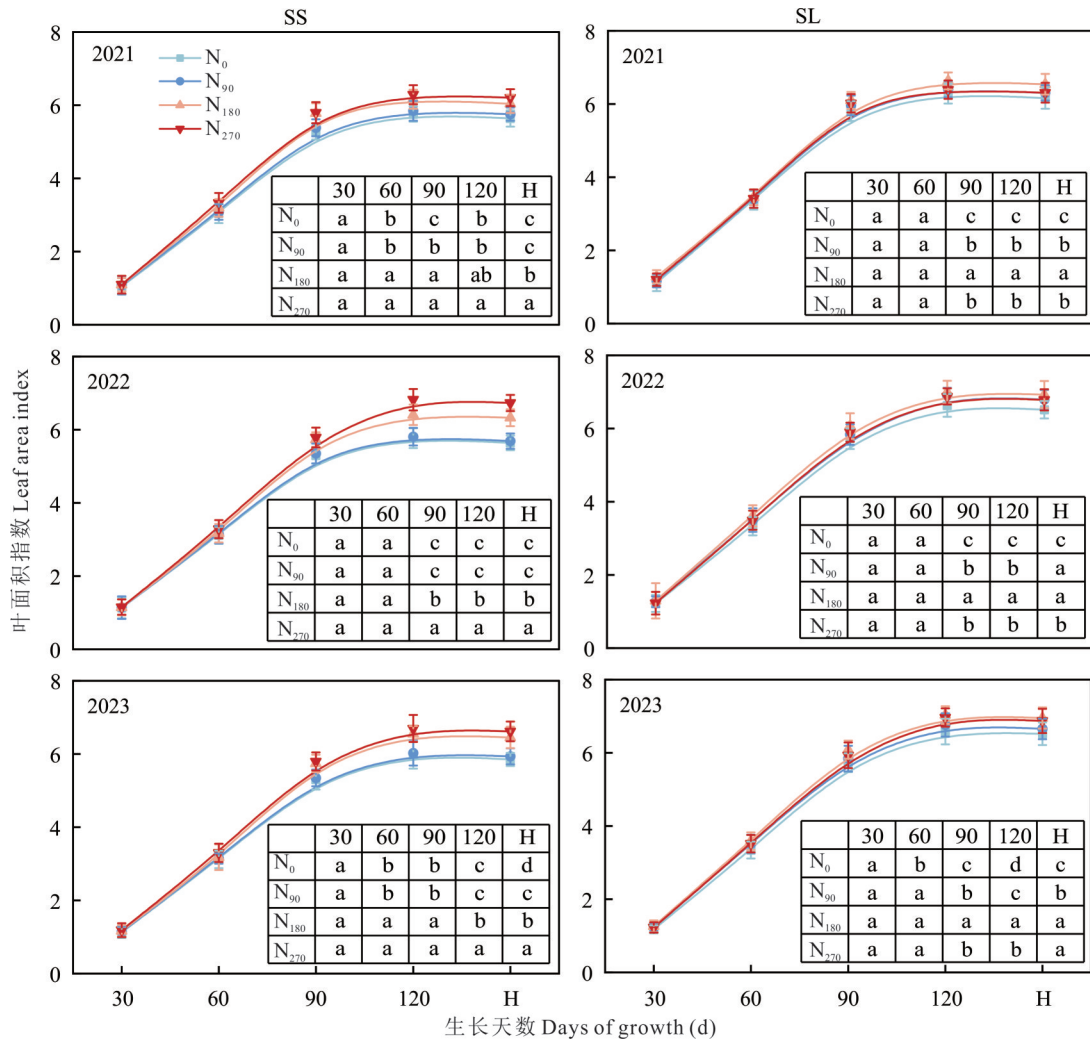


图3 不同种植模式及施氮水平对叶面积指数的影响

Fig. 3 Effects of different cropping patterns and nitrogen application levels on leaf area index

均净收入提高了7.82%，而产投比降低了16.71%。在不同施氮水平下，与 N_0 相比，单播模式下 N_{90} 、 N_{180} 、 N_{270} 的年均净收入分别增加了5.92%、15.42%、18.45%，混播模式下 N_{90} 、 N_{180} 、 N_{270} 的年均净收入分别增加了23.81%、33.94%和20.35%。此外，在 N_{270} 处理下，单播模式的产投比达到最高。在 N_{180} 处理下，混播模式的产投比达到最高，较 N_0 、 N_{90} 、 N_{270} 分别提高29.85%、8.18%、11.31%，且与 N_0 处理差异显著($P < 0.05$)。

2.5 种植方式和施氮量对能量利用的影响

在能量投入方面，使用机械的能源输入占总能源使用量的比例最高(30.8%)，其次依次为电费(19.9%)、氮肥(16.8%)、滴灌带(11.7%)、燃料(11.1%)、磷肥(3.4%)、拉巴豆种子(2.4%)、高粱种子(1.6%)、钾肥(1.2%)、人工(0.8%)、农药(0.2%)。SL较SS模式施氮显著增加了能量投入，其中 N_{90} 、 N_{180} 、 N_{270} 较 N_0 分别增加了11.9%、21.3%、28.9%(图6)。

种植模式和施氮水平对总产出能量和净产出能量有显著影响($P < 0.05$)，图7)。3年试验结果表明，混播模式的总产出能量和净产出能量分别比单播模式提高了14.62%和15.39%。在不同施氮水平下，单播模式中的 N_{270} 处理具有最高的总产出能量，较 N_0 、 N_{90} 、 N_{180} 分别增加了14.46%、7.96%和1.81%，而在混播模式中， N_{180} 处理的总产出能量最多，较 N_0 、 N_{90} 、 N_{270} 分别增加了21.85%、5.32%和7.27%。此外，单播模式在 N_{270} 处理具有最高的净产出能量。而在混播模式中， N_{90} 、 N_{180} 、 N_{270} 较 N_0 分别增加了15.93%、21.32%和10.80%。此外，种植模式、施氮以及其交互作用对能量生产力、能量获利能力和能量利用效率均有显著影响($P < 0.05$)。结果表明，混播模式

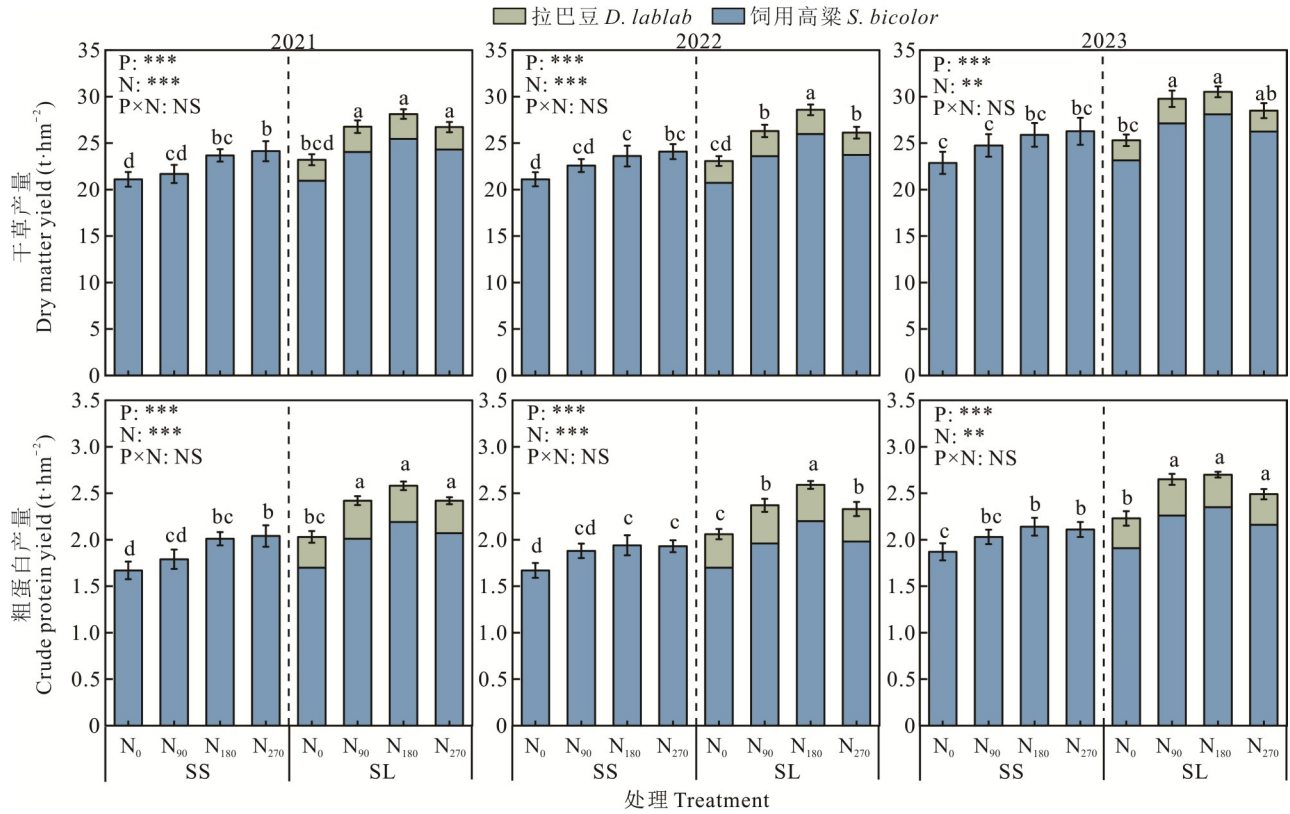


图 4 不同种植模式及施氮水平对干草产量和粗蛋白产量的影响

Fig. 4 Effects of different cropping patterns and nitrogen application levels on dry matter yield and crude protein yield

P: 种植模式 Cropping patterns; N: 施氮水平 Nitrogen application levels; P×N: 种植模式与施氮水平交互作用 The interaction between cropping patterns and nitrogen application levels. 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$). *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$. 下同 The same below.

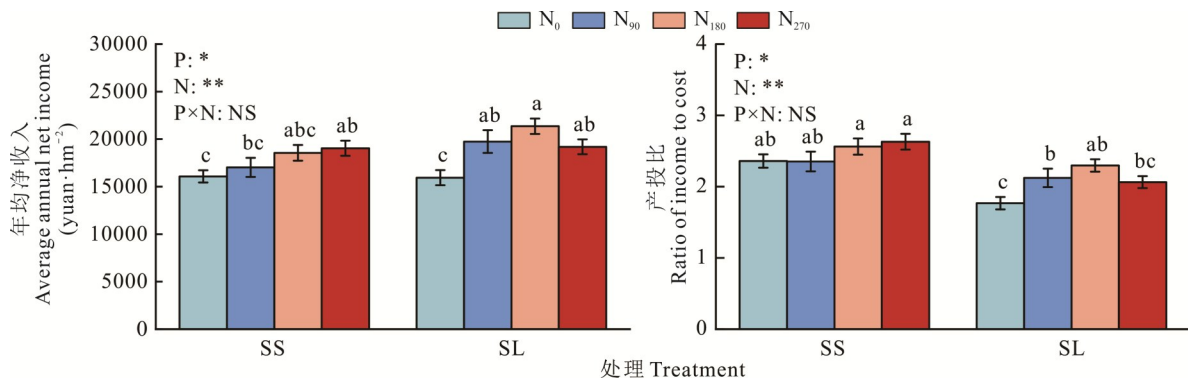


图 5 不同种植模式及施氮水平对 3 年 (2021–2023 年) 平均经济效益的影响

Fig. 5 Effects of different cropping patterns and nitrogen application levels on annual average (2021–2023) economic performance

的能量生产力、能量获利能力和能量利用效率较单播模式分别提高了 5.74%、6.42% 和 5.74%。在不同施氮水平下,单播模式的能量生产力、能量获利能力和能量利用效率均在 N_0 达到最高,而混播模式的能量生产力、能量获利能力和能量利用效率均在 N_{90} 达到最高。生态效能指数受种植模式、施氮水平以及交互作用的影响。混播模式的生态效能指数较单播提高了 0.63%。在不同施氮水平下,单播模式下 N_0 的生态效能指数达到最大,较 N_{90} 、 N_{180} 、 N_{270} 分别提高了 8.45%、12.37%、22.06%,而混播模式下 N_{90} 的生态效能指数达到最大,较 N_0 、 N_{180} 、 N_{270} 分别提高了 9.07%、3.44%、20.25%。

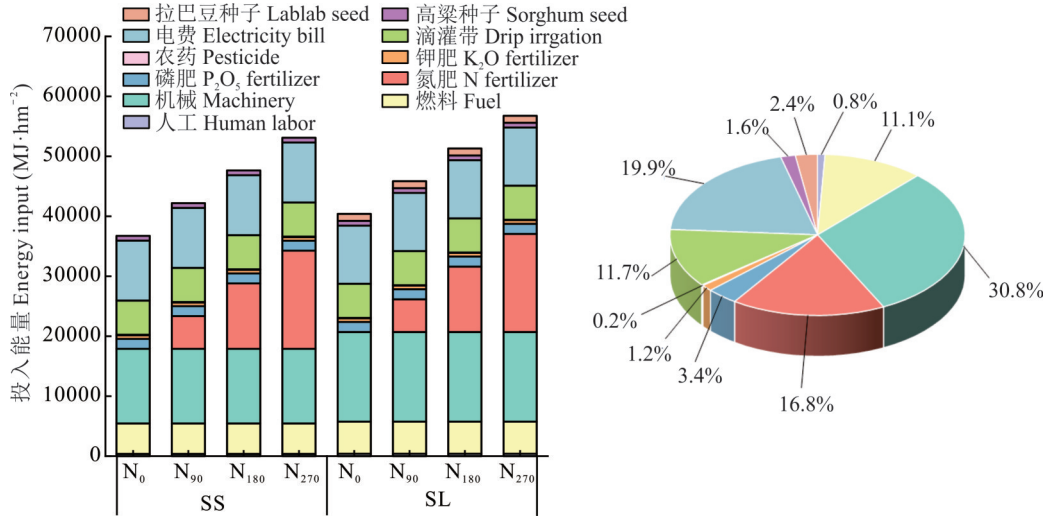


图6 不同种植模式及施氮水平下各组成部分的能量投入占比

Fig. 6 Percentage of energy input of each component under different cropping patterns and nitrogen application levels

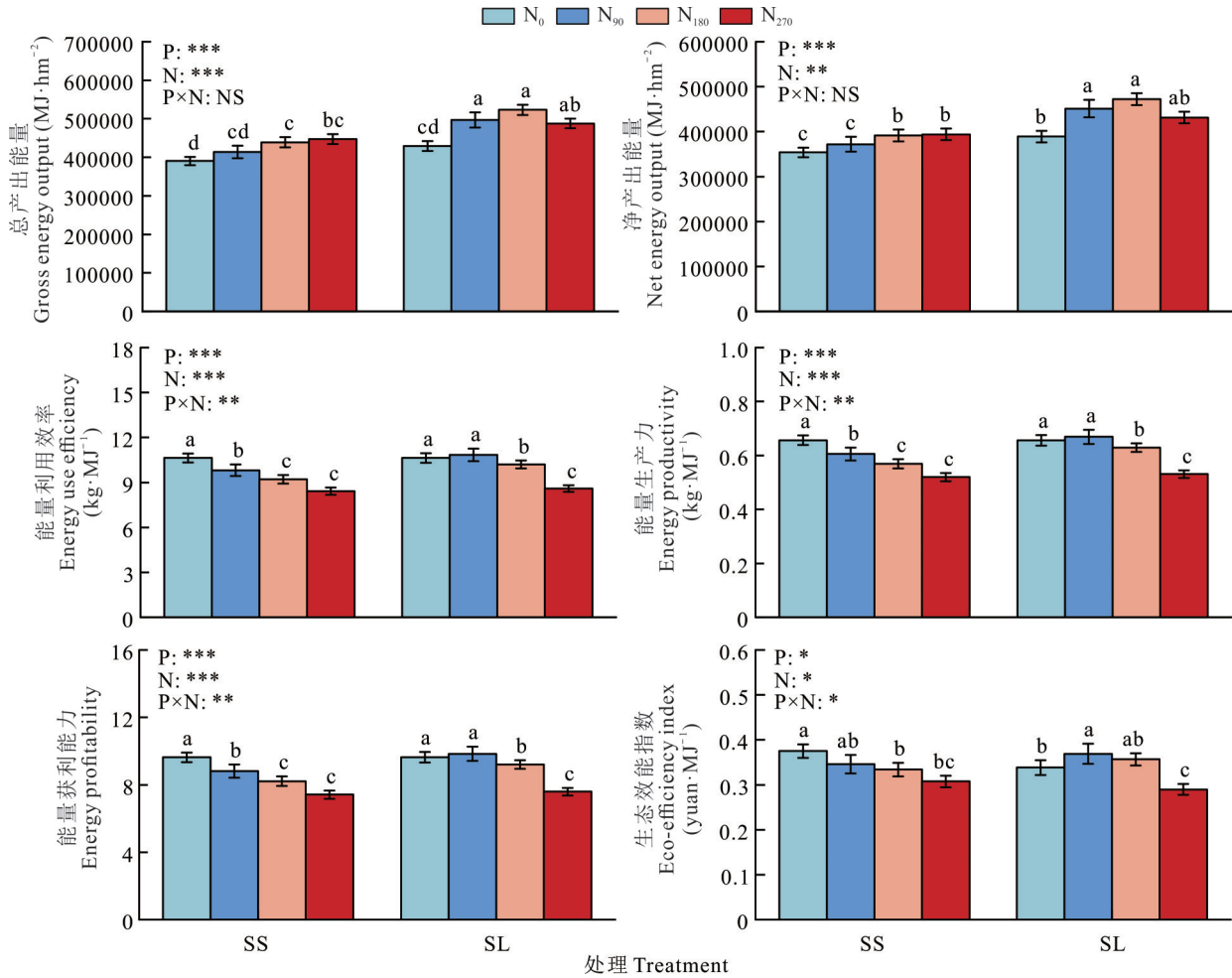


图7 不同种植模式及施氮水平对3年(2021–2023)平均能量利用的影响

Fig. 7 Effects of different cropping patterns and nitrogen application levels on average annual (2021–2023) energy utilization

2.6 可持续评价

可持续评价指数受种植模式与施氮水平显著影响($P < 0.05$, 图8)。混播模式的可持续评价指数较单播显著提高了12.1%。在不同施氮水平下,单播模式N₁₈₀处理的可持续评价指数最高,较N₀、N₉₀、N₂₇₀分别提高4.8%、

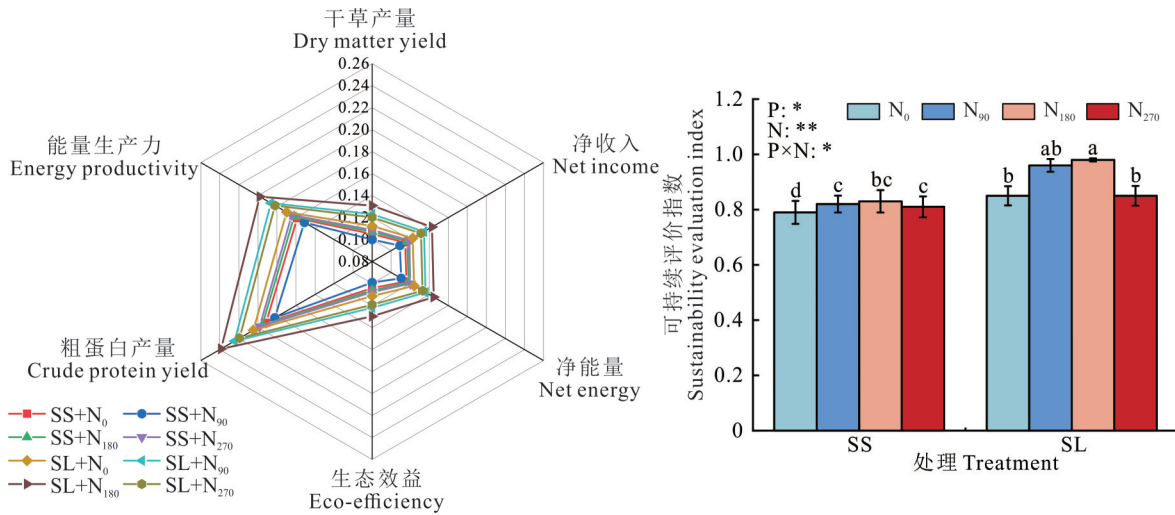


图 8 可持续评价指数

Fig. 8 Sustainability evaluation index

2.1%、3.2%。同样,在混播模式下, N_{180} 处理的可持续评价指数也达到最高,较 N_0 、 N_{270} 分别显著提高15.3%、14.5%。

3 讨论

3.1 饲用高粱/拉巴豆混播及施氮对草地生产性能及经济效益的影响

豆科饲草与禾本科饲草多样化种植能够在有限的耕地上消耗较少的资源而获得优于单作种植系统的产量,进而充分发挥产量优势^[25]。李亚娇等^[26]研究表明,青贮玉米与拉巴豆套种对干草产量有明显促进作用,较青贮玉米单播显著提高了29.1%。本研究结果表明,混播模式下饲用高粱干草产量和粗蛋白产量较单播分别提高了4.14%和7.68%。与前人研究结果吻合,混播系统中的饲用高粱较单播能够更好地获取养分,减少植株之间竞争,因此在混播系统中添加拉巴豆更有利于饲用高粱生长^[27-28]。此外,与单播饲用高粱相比,混播系统的总干草产量和粗蛋白产量分别提高了14.62%和24.99%,主要是因为混播系统中增加了拉巴豆,增加了群体叶面积指数,与单播相比,更高效地利用了光照资源,进而提高了草地生产力。氮作为促进饲草营养生长的重要元素,在豆/禾混播系统中,豆科作物可以通过养分共享促进禾本科作物生长,其中在土壤有效氮不足的情况下,豆禾间作的共生固氮是主要来源^[29]。Du等^[30]在玉米/大豆(*Glycine max*)间作中研究发现,施氮肥可使产量较单作提高34.2%,氮肥利用效率提高25.3%。在本研究中,增施氮肥可以显著提高饲草产量,与 N_0 相比,施氮处理的干草产量提高了13.60%~21.85%。然而,单播和混播系统生产力对施用氮肥的响应存在明显差异。其中饲用高粱单播结合施氮量为 $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理获得的干草产量最高,而在饲用高粱与拉巴豆混播方式下,施氮量为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理的干草产量达到最高,表明在混播系统中,拉巴豆促进了饲用高粱的氮营养,在减少氮肥投入的同时实现了高产。同样,施氮肥也能显著提高拉巴豆的干草产量和粗蛋白产量,在施氮量为 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时达到最大值(分别为 2.69 和 $0.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),这主要得益于拉巴豆能促进生物固氮,减少氮肥投入。然而,过高的氮施用量会对光合产物的形成产生负面影响,进而降低产量^[31]。从经济效益来分析,所有混播模式的年均净收入均值较所有单播模式提高了7.82%,其中在 N_{180} 水平下年均净收入达到最高($21356.49 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$)。虽然饲用高粱与拉巴豆混播模式的投入成本高于饲用高粱单播,但其产值的增加幅度远高于成本的增加。

3.2 饲用高粱/拉巴豆混播及施氮对能量利用效率的影响

本研究发现,所有混播处理的总产出能量与净产出能量均值较所有单播分别显著提高了14.62%和15.39%,在单播模式下, N_{270} 水平的总产出能量与净产出能量达到最高,而在混播方式下, N_{180} 水平的总产出能量与净产出能量达到最高,这主要取决于干草产量。Cai等^[32]也证明了产出能量与生产力成正比。能量生产力、能

量获利能力和能量利用效率对于评估种植系统是否节能和高产具有重要意义。Billore等^[33]研究表明,大豆与高粱间作的能源利用效率显著高于大豆单作。Singh等^[34]在小麦/玉米间作系统中施用50%无机肥+50%氮磷钾肥,其能量比、能量获利能力和能量生产力均达到最高。在本研究中,混播模式下施氮处理的能量生产力、能量利用效率、能量获利能力较单播模式分别显著提高了2.07%~9.65%、2.06%~9.66%、2.34%~10.71%。这主要是因为混播草地干草产量、总产出能量和净产出能量显著高于单播。在N₉₀处理下的能量生产力、能量利用效率、能量获利能力达到最高值,说明将拉巴豆引入混播系统,可以在低氮肥投入条件下保持较高的能量利用率。生态效能指数被广泛用于评价农业生产中能源和环境转化为产品的效率和经济回报。本研究发现,单播模式下的生态效能指数整体平均值高于混播模式,与Wang等^[29]的研究结果相反,主要原因是混播模式下的净利润增加幅度低于能量投入的增长率。另外,施氮量显著影响种植模式的生态效能指数,在单播模式下,不施氮肥的生态效能指数最高(0.43),而混播模式下施氮量为90 kg·hm⁻²时生态效能指数最高,因此,在生产实践中,可根据实际需求选择适宜的施氮量。

3.3 种植系统的可持续性评价

种植系统可持续对农业生产至关重要。前人对作物种植模式的可持续评估主要基于生产力、经济效益或土壤肥力变化等具体特征的单一指标量化,这可能限制了作物模式潜在效益的推广^[24]。因此,在考虑成本投入和经济效益的同时,权衡栽培管理制度的可持续性最终目标,应该基于社会效益和生态效益等多角度的评价。本研究从草地生产性能、经济效益、能量利用效率以及生态环境等主要方面对不同种植模式的生产可持续性进行综合评价,构建了可持续评价指数。结果表明,混播模式的可持续评价指数较单播显著提高了5.83%~18.18%,其中在N₁₈₀水平下混播处理的可持续评价指数达到最高(0.97),与饲用高粱单播相比,利用豆科牧草固氮原理将拉巴豆与饲用高粱混播后氮肥施用量减少了90 kg·hm⁻²,进一步说明在提高混播草地生产性能的同时,也减弱了因混播拉巴豆而提高的成本对系统经济效益的负面影响。

4 结论

饲用高粱/拉巴豆混播结合适宜施氮可以显著提高饲草产量、增加经济收益、提高能量利用效率。综合3年试验结果,在施氮量180 kg·hm⁻²水平下,饲用高粱/拉巴豆混播的饲草产量(29.08 t·hm⁻²)、年均净收入(21356.49元·hm⁻²)、净产出能量(472084.19 MJ·hm⁻²)、可持续评价指数(0.97)达到最高。因此,饲用高粱/拉巴豆混播结合施氮量180 kg·hm⁻²模式是适应当地的饲草生产可持续种植模式。

参考文献 References:

- [1] 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.
- [2] Xiong Z Q, Zhang X X. Key role of efficient nitrogen application in low carbon agriculture. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1433—1440.
熊正琴, 张晓旭. 氮肥高效施用 in 低碳农业中的关键作用. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1433—1440.
- [3] Ding Y L, Zhao N N, Li M, *et al.* Carbon source/sink and carbon footprint estimation for field crop production and spatial characterization in northern Shaanxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(11): 4574—4583.
丁也璐, 赵娜娜, 黎明, 等. 陕北农田作物生产碳源/汇及碳足迹空间特征. *生态学报*, 2024, 44(11): 4574—4583.
- [4] Tongwane M I, Moeletsi M E. A review of greenhouse gas emissions from the agriculture sector in Africa. *Agricultural Systems*, 2018, 166(10): 124—134.
- [5] Gan Y T, Liang C, Chai Q, *et al.* Improving farming practices reduces the carbon footprint of spring wheat production. *Nature Communications*, 2014, 5(10): 5012.
- [6] Liu C, Cutforth H, Chai Q, *et al.* Farming tactics to reduce the carbon footprint of crop cultivation in semiarid areas. *Agronomy for Sustainable Development*, 2016, 36(4): 69.
- [7] Peng S B. Reflection on China's rice production strategies during the transition period. *Scientia Sinica (Vitae)*, 2014, 44(8): 845—850.

- [8] Dearing J A, Zhang K, Cao W D, *et al.* Who determines the trade-offs between agricultural production and environmental quality? An evolutionary perspective from rural eastern China. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2019, 17(5): 347–366.
- [9] Li C, Hoffland E, Kuyper T W, *et al.* Syndromes of production in intercropping impact yield gains. *Nature Plants*, 2020, 6(6): 653–660.
- [10] Chen X S, Wu S W, Nan L L, *et al.* Effects of fertilization on forage yield and quality of Legume-Gramineae mixtures in the Hexi Corridor region. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(6): 57–65.
陈孝善, 吴世文, 南丽丽, 等. 施肥对河西走廊豆禾混播草地产量及品质的影响. *中国草地学报*, 2024, 46(6): 57–65.
- [11] Wu G L, Liu Z H, Zhang L, *et al.* Effects of artificial grassland establishment on soil nutrients and carbon properties in a black-soil-type degraded grassland. *Plant and Soil*, 2010, 333(12): 469–479.
- [12] Xia L L, Xia Y Q, Li B L, *et al.* Integrating agronomic practices to reduce greenhouse gas emissions while increasing the economic return in a rice-based cropping system. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 231(9): 24–33.
- [13] Zhao X, Wang S Q, Xing G X. Maintaining rice yield and reducing N pollution by substituting winter legume for wheat in a heavily-fertilized rice-based cropping system of southeast China. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 202(4): 79–89.
- [14] Shcherbak I, Millar N, Robertson G P. Global metaanalysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N₂O) emissions to fertilizer nitrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(25): 199–204.
- [15] Schroll H. Energy-flow and ecological sustainability in Danish agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1994, 51(3): 301–310.
- [16] Nasso N O D, Bosco S, Bene C D, *et al.* Energy efficiency in long-term Mediterranean cropping systems with different management intensities. *Energy*, 2011, 36(4): 1924–1930.
- [17] Ma R S, Jiang C Z, Gao W, *et al.* Effects of slow-release N fertilizer on growth and water-and N-use efficiencies of forage sweet sorghum under three different irrigation regimes. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(10): 71–81.
马仁诗, 蒋丛泽, 高玮, 等. 不同水分条件下缓释氮肥对饲用甜高粱生长和水氮利用效率的影响. *草业学报*, 2023, 32(10): 71–81.
- [18] Wang B, Shi J M, Wang T F, *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.
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.
- [19] Marsalis M A, Angadi S V, Govea C. 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.
- [20] 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(1): 108755.
- [21] Liu X H, Xu W X, Li Z J, *et al.* The missteps, improvement and application of carbon footprint methodology in farmland ecosystems with the case study of analyzing the carbon efficiency of China's intensive farming. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(1): 1–7.
刘巽浩, 徐文修, 李增嘉, 等. 农田生态系统碳足迹法: 误区、改进与应用—兼析中国集约农作碳效率(续). *中国农业资源与区划*, 2014, 35(1): 1–7.
- [22] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2002, 91(1/3): 217–232.
- [23] Deng J Q, Ni H, Zhang Z X, *et al.* Designing productive, energy-efficient, and environmentally friendly production systems by replacing fallow period with annual forage cultivation on the Loess Plateau of China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 320(10): 128660.
- [24] Gou Z W, Yin W, Chai Q, *et al.* Analysis of sustainability of multiple cropping green manure in wheat-maize intercropping after wheat harvested in arid irrigation areas. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(7): 1319–1331.
苟志文, 殷文, 柴强, 等. 干旱灌区小麦间作玉米麦后复种绿肥的可持续性分析. *中国农业科学*, 2022, 55(7): 1319–1331.
- [25] Wang S, Li K L, Nie J W, *et al.* Economic benefits and carbon footprint of a spring mung bean-summer maize cropping system in the North China Plain. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(6): 910–919.

- 王上, 李康利, 聂江文, 等. 华北平原春绿豆-夏玉米种植模式经济效益和碳足迹评价. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(6): 910-919.
- [26] Li Y J, Ma P J, Wu J H, *et al.* Effects of interplanting with *Dolichos lablab* on agronomic traits and yield of two varieties of silage maize. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(9): 209-216.
- 李亚娇, 马培杰, 吴佳海, 等. 不同品种青贮玉米与拉巴豆套种对青贮玉米农艺性状及产量的影响. 草业学报, 2019, 28(9): 209-216.
- [27] Baxevanos D, Tsialtas I T, Dimitrios N V, *et al.* Cultivar competitiveness in pea-oat intercrops under Mediterranean conditions. *Field Crops Research*, 2017, 214(12): 94-103.
- [28] Nandi S, Maitra S, Shankar T, *et al.* Impact of intercropping of vegetable legumes in summer maize on productivity and competitive ability of crops. *Crop Research*, 2022, 57(3): 122-127.
- [29] Wang B, Deng J Q, Wang T F, *et al.* Optimizing nitrogen application rates to maximize productivity while reducing environmental risk by regulating nitrogen and water utilization in mixed cropping systems. *Agricultural Water Management*, 2024, 303(10): 109053.
- [30] 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. *The Crop Journal*, 2020, 8(1): 140-152.
- [31] Hu F, Zhao C, Feng F X, *et al.* Improving N management through intercropping alleviates the inhibitory effect of mineral N on nodulation in pea. *Plant & Soil*, 2017, 412(1/2): 235-251.
- [32] Cai S Y, Pittelkow C M, Zhao X, *et al.* Winter legume-rice rotations can reduce nitrogen pollution and carbon footprint while maintaining net ecosystem economic benefits. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195(10): 289-300.
- [33] Billore S D, Joshi O P. Effect of spatial arrangement of soybean and sorghum in intercropping on productivity and energy use efficiency. *Journal of Oilseeds Research*, 2005, 22(1): 194-196.
- [34] Singh R J, Ghosh B N, Sharma N K, *et al.* Energy budgeting and emergy synthesis of rainfed maize-wheat rotation system with different soil amendment applications. *Ecological Indicators*, 2016, 61(2): 753-765.