

DOI:10.11686/cyxb2025253

http://cyxb.magtech.com.cn

孙波, 张均益, 白春艳, 等. 宁夏中部干旱区一年生饲草轮作系统生产效益分析. 草业学报, 2026, 35(6): 35—48.

SUN Bo, ZHANG Jun-yi, BAI Chun-yan, et al. Production benefit analysis of annual forage rotation systems in an arid area of central Ningxia. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(6): 35—48.

宁夏中部干旱区一年生饲草轮作系统生产效益分析

孙波^{1,2}, 张均益^{1,2}, 白春艳^{1,2}, 冯帆^{1,2}, 兰剑^{1,2}, 邓建强^{1,2*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏草业工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021)

摘要:与传统单播模式相比,将混播系统纳入单播模式可以增加轮作作物多样性。然而,这种模式能否提高作物产量和经济效益仍需验证。此外,混播系统与单播模式在物质能量投入上的差异如何影响能量利用效率和温室气体排放目前仍不清楚。于 2023 和 2024 年通过开展大田定位试验,采用随机区组设计,分别设置 3 个处理[玉米单作(M)、甜高粱/拉巴豆-玉米(S/L-M)、饲用燕麦/毛苕子-玉米(O/V-M)],对其进行了产量(鲜草和干草产量)、经济效益(产值、成本与净收益)、能源效益(投入与产出和能量利用率)、温室气体排放(N₂O 排放量和排放强度)以及生态效能指数(EEI_{ET}和 EEI_{GHG})指标系统的观测与分析。结果表明:与 M 模式相比,采用轮作措施系统干草产量和经济效益分别提高了 157.1% 和 93.5%,同时物质能量投入也提高了 127.5%,其中人工投入与种子投入是主要驱动因素,分别增加了 67.5% 和 60.0%。然而,轮作措施虽提高了系统物质投入,但其能量利用效率也提高了 34.6%,进而温室气体排放强度降低了 211.8%。此外,与 O/V-M 模式相比,S/L-M 模式在系统产量和经济效益方面表现更优。由于物质能量利用效率的提升,该模式使温室气体排放强度降低了 15.4%,生态效能指数提高了 16.9%。采用甜高粱/拉巴豆-玉米(S/L-M)模式代替玉米单作模式不仅能有效缓解饲草短缺、显著提高系统产量和经济效益,还可提升物质能量利用效率,降低温室气体排放强度,可作为宁夏中部干旱农业可持续发展的推荐模式。

关键词:干旱区;轮作系统;混播;产量;生态效益

Production benefit analysis of annual forage rotation systems in an arid area of central Ningxia

SUN Bo^{1,2}, ZHANG Jun-yi^{1,2}, BAI Chun-yan^{1,2}, FENG Fan^{1,2}, LAN Jian^{1,2}, DENG Jian-qiang^{1,2*}

1. College of Forestry and Prataculturae, Ningxia University, Yinchuan, 750021, China; 2. Ningxia Grass and Animal Husbandry Engineering Technology Research Center, Yinchuan, 750021, China

Abstract: Compared with traditional monocropping systems, mixed cropping systems can increase crop diversity in rotations. However, whether this approach enhances crop yields and economic benefits remains to be verified. Furthermore, the impact of differing material and energy inputs between mixed cropping systems and monocropping systems on energy utilization efficiency and greenhouse gas emissions remains unclear. Field trials were conducted in 2023 and 2024 using a randomized block design with three treatments: [maize (*Zea mays*) monoculture (M)], [*Sorghum bicolor*/Lablab purpleus-maize (S/L-M)], and [*Avena sativa*/hairy vetch (*Vicia villosa*)-maize (O/V-M)]. Measurements and analyses were carried out to determine yield (fresh and dry forage yield), economic benefits (output value, costs, and net income), energy efficiency (input-output ratios and energy utilization rates), greenhouse gas emissions (N₂O emissions and emission intensity), and ecological efficiency indices [EEI_{ET}

收稿日期:2025-06-26;改回日期:2025-09-09

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(32201474)和宁夏全职引进高层次人才科研启动项目(2023BSB03028)资助。

作者简介:孙波(1998—),男,陕西榆林人,在读硕士。E-mail: 1152463939@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: dengjq2022@nxu.edu.cn

(economic ecological efficiency index) and EEI_{GHG} (greenhouse gas emissions ecological efficiency index)]. The results show that, compared with the M model, the S/L-M system increased yield and economic benefits by 157.1% and 93.5%, respectively, with material and energy inputs increased by 127.5%. Labor and seed inputs were the primary drivers of the increased material and energy inputs, being increased by 67.5% and 60.0%, respectively, in the cropping rotation system. However, while the rotation system increased material inputs, it also improved energy utilization efficiency by 211.8%, thereby reducing greenhouse gas emission intensity by 34.6%. Compared with the O/V-M system, the S/L-M system demonstrated superior performance in terms of both yield and economic benefits. Because of its enhanced material and energy utilization efficiencies, the S/L-M system reduced greenhouse gas emission intensity by 15.4% and increased the ecological efficiency index by 16.9%. These results show that replacing maize monoculture with the S/L-M model not only effectively alleviates forage shortages and significantly boosts system yield and economic benefits, but also enhances material and energy utilization efficiencies while reducing greenhouse gas emission intensity. Therefore, this model is recommended for the sustainable development of arid agriculture in central Ningxia.

Key words: arid region; rotation system; mixed sowing; yield; ecological benefits

牧草有效供给是草畜产业发展的基础^[1]。宁夏中部干旱区是北方农业区与天然草地牧区交接的过渡地带,也是我国畜牧业发展的重要组成部分。近年来,该区草食家畜饲养量呈逐年增长态势,牧草需求量增大,但受自然条件和种植技术水平的影响,牧草总量不足,限制了草畜产业进一步发展^[2]。据统计,该区饲草需求量达550万t,缺口为66万t^[3]。此外,该区处于毛乌素沙地和腾格里沙漠的边缘,降水少,蒸发强烈,加之种植管理水平不足,化肥使用不合理,导致饲草产量低而不稳^[4],还增加了温室气体排放风险^[5]。由此可见,探索绿色高效的牧草生产方式,对保障该区饲草供应稳定同时兼顾生态效应提升具有重要的现实作用。

实施轮作不仅能够改善土壤理化性质,还能提高作物的产量和稳定性^[6-7]。鲁鸿佩等^[8]研究发现,与小麦(*Triticum aestivum*)连续种植相比,分别将紫花苜蓿(*Medicago sativa*)和箭筈豌豆(*Vicia sativa*)与小麦进行轮作小麦产量可提高14.0%和12.0%。将豆禾混播模式纳入作物单播体系中构成轮作系统对作物产量提升也有明显促进作用,如与水稻(*Oryza sativa*)单播相比,采用黑麦草(*Lolium perenne*)/紫云英(*Astragalus sinicus*)混播和与水稻进行轮作系统产量可以提高15.1%^[9],这主要是由于紫云英能增加土壤氮素,促进黑麦草生长。然而,也有研究发现由于多年种植的苜蓿导致土壤水分亏缺,苜蓿-玉米(*Zea mays*)轮作系统中玉米产量下降^[10]。由此可见,不同轮作模式对各作物及系统产量影响存在差异,但有关一年生豆禾饲草作物混播与禾本科饲草单播组成的轮作系统产量表现仍需进一步研究。此外,轮作通过增加作物多样性也会提高物质能量投入^[11],例如,与小麦单播相比,采用小麦-箭筈豌豆轮作后由于箭筈豌豆种子、化肥等物质投入提高,导致其系统物质能量投入提高了51.5%^[12]。然而,黄国勤^[13]却发现实施轮作措施可以优化作物对土壤养分的利用结构,使各种元素均衡,降低作物生产对化肥的需求。实施轮作措施后物质能量投入的差异通常造成能量利用效率和温室气体排放量发生改变^[14-16],这主要源于不同作物组合对能量等资源的转化效率差异和生物化学过程改变导致的温室气体排放通量变化;例如,与水稻-休闲模式相比,采用水稻-豆科作物轮作不仅减少系统能量投入,还能提高能量利用效率,降低温室气体排放^[17],这主要是因为豆科作物具有生物固氮作用,可减少氮肥的使用,从而降低因肥料生产和施用带来的能量消耗和温室气体排放^[18]。然而,与单作相比,将一年生饲草豆禾混播模式纳入饲草单作系统增加物质能量投入后其能量利用效率以及温室气体排放潜力如何尚不清楚。

鉴于此,本研究于宁夏中部干旱区通过开展大田定位试验,将甜高粱(*Sorghum bicolor*)/拉巴豆(*Lablab purpureus*)和饲用燕麦(*Avena sativa*)/毛苕子(*Vicia villosa*)混播系统分别纳入玉米单作系统中,分析不同轮作模式下系统产量表现、能量利用效率和温室气体排放量,可为丰富该区饲草种植模式提供理论依据和技术途径。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2023—2024 年在宁夏盐池县宁夏大学草业教研基地(37°46'26" N, 107°26'16" E, 海拔 1380 m)开展。该地属于中温带大陆性气候, 年均降水量 289.4 mm, 且主要集中在 6—9 月, 年均潜在蒸发量 2131.8 mm, 雨热同期, 年均气温 7.8 °C, 年均无霜期 162 d。土壤类型为灰钙土, pH 值 8.5, 有机质 5.45 g·kg⁻¹, 碱解氮 29.75 mg·kg⁻¹, 速效氮 22.23 mg·kg⁻¹, 速效钾 113.21 mg·kg⁻¹, 速效磷 21.24 mg·kg⁻¹。

1.2 供试材料

本研究所选的甜高粱品种为“绿巨人”, 种子纯净度为 99.0%, 发芽率 98.0%, 千粒重 29.7 g, 是当地主要推广品种之一; 饲用燕麦品种为“喜韵”, 种子发芽率为 83.0%, 千粒重为 32.1 g, 高产优质, 生产大量饲草, 发展成为我国主要的牧草和青饲料; 毛苕子品种为“Villana”, 种子纯净度为 98.0%, 发芽率为 85.0%, 千粒重为 22.7 g, 可以适应多种气候条件, 耐寒能力较强, 为适合喂牛羊的优质饲料; 拉巴豆品种为“润高”, 种子纯净度为 98.0%, 发芽率为 85.0%, 千粒重为 189.5 g; 以上 4 种作物均来源于北京百斯特草业有限公司。玉米品种为“太育 9 号”, 种子纯净度为 97.0%, 发芽率 93.0%, 千粒重 41.1 g, 来源于山西太育种业有限公司, 也是当地主要推广品种之一。

1.3 试验设计与田间管理

采用随机区组设计, 以饲用燕麦、玉米、拉巴豆和毛苕子作为试验材料。试验共设置 2 个轮作模式处理, 分别是燕麦/毛苕子-玉米(O/V-M, 1 年 1 作); 甜高粱/拉巴豆-玉米(S/L-M, 1 年 1 作); 1 个粮食连作, 玉米连作(M, 1 年 1 作)(图 1)。

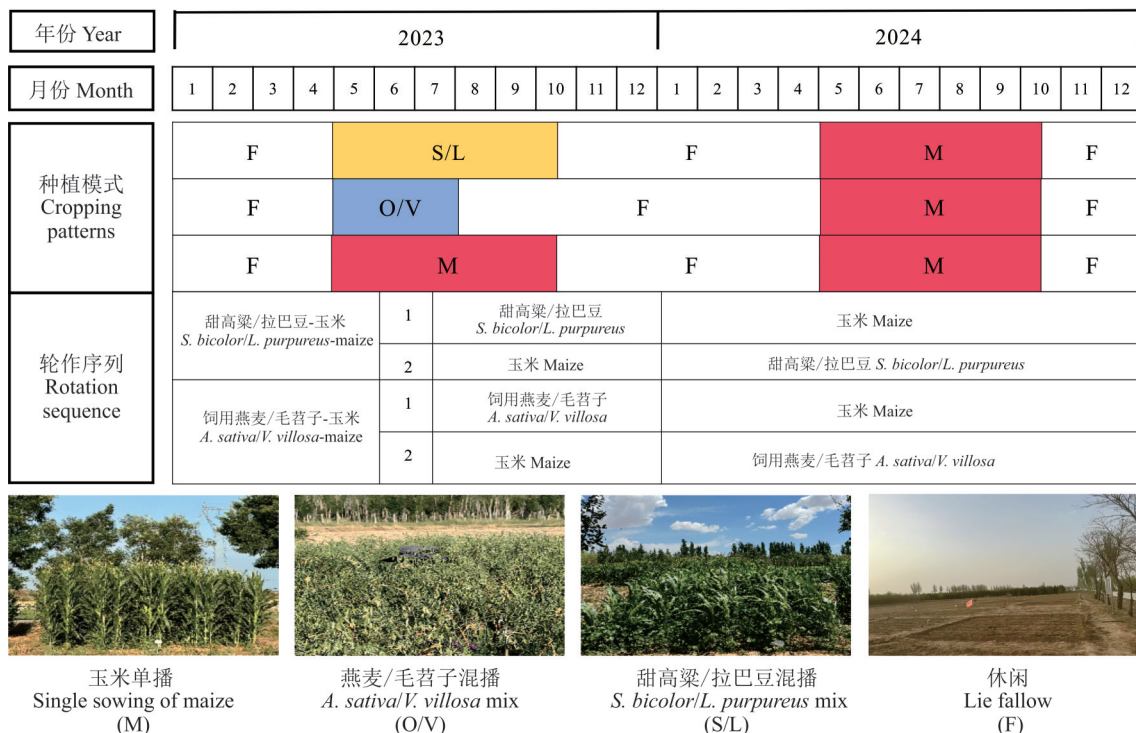


图 1 2023—2024 年不同轮作模式下各作物轮作序列概况

Fig. 1 The crop rotation system during experimental period in 2023—2024

O: 饲用燕麦 *A. sativa*; V: 毛苕子 *V. villosa*; S: 甜高粱 *S. bicolor*; L: 拉巴豆 *L. purpureus*; M: 玉米 Maize. 下同 The same below.

为了保证各作物在每年均能出现, 分别设计两个不同的时间序列, 甜高粱/拉巴豆-玉米的序列 1 和序列 2, 表示 2023 和 2024 年分别种植甜高粱/拉巴豆和玉米, 饲用燕麦/毛苕子-玉米的序列 1 和序列 2 表示 2023 和 2024 年分别种植饲用燕麦/毛苕子和玉米(图 1)。共有 2 个轮作模式×2 个序列+1 个粮食单作=15 个小区, 3 次重复, 每

个小区间隔 1 m, 小区面积为 30 m² (5 m × 6 m)。作物田间管理信息详见表 1。单播甜高粱施尿素 (含 N ≥ 46%) 270 kg · hm⁻², 甜高粱/拉巴豆混播施尿素 (含 N ≥ 46%) 180 kg · hm⁻², 尿素 (含 N ≥ 46%) 分两次施 (播种前施 40% 作为基肥, 拔节期施 60% 作为追肥), 过磷酸钙 (含 P₂O₅ ≥ 46%) 150 kg · hm⁻² 和硫酸钾 (含 K₂O ≥ 52%) 120 kg · hm⁻² 作为基肥在播种前施入。单播饲用燕麦施尿素 (含 N ≥ 46%) 225 kg · hm⁻², 饲用燕麦/毛苕子混播施尿素 (含 N ≥ 46%) 150 kg · hm⁻², 尿素 (含 N ≥ 46%) 分两次施 (播种前施 30% 作为基肥, 拔节期施 70% 作为追肥), 过磷酸钙 (含 P₂O₅ ≥ 46%) 120 kg · hm⁻² 和硫酸钾 (含 K₂O ≥ 52%) 90 kg · hm⁻² 作为基肥在播种前施入。施用的肥料分别为尿素、过磷酸钙和硫酸钾。作物生长季内采用地面滴灌, 滴灌带间隔 60 cm, 滴头间隔 30 cm。2023 年燕麦全生育期灌溉 4 次, 甜高粱灌溉 6 次。每次灌水 840 m³ · hm⁻²; 2024 年燕麦全生育期灌溉 5 次, 甜高粱灌溉 7 次。每次灌水 720 m³ · hm⁻²; 各处理均装有水表用于控制灌溉量。每次播种前, 用小型旋耕机 (宗申 1WG4. 0-95FQ-ZC3, 重庆) 将所有的小区进行翻耕, 深度为 30 cm 左右, 然后对每个小区进行耙平、起垄等操作。试验地两年间田间管理保持一致。

表 1 试验期间不同种植模式下作物管理

Table 1 Crop management under different cropping patterns during the experimental period

作物 Crop	播种日期 Sowing date (年-月-日 Year-month-day)	收获日期 Harvesting date (年-月-日 Year-month-day)	播种量 Sowing rate (kg · hm ⁻²)	播种方法 Sowing method	种植行距 Rowing space (cm)
甜高粱 <i>S. bicolor</i>	2023-4-9 2024-4-20	2023-9-22 2024-9-25	30.0	穴播 Hole seeding	70/30
饲用燕麦 <i>A. sativa</i>	2023-4-9 2024-3-27	2023-7-7 2024-7-8	180.0	条播 Drill seeding	30
拉巴豆 <i>L. purpureus</i>	2023-4-9 2024-4-20	2023-9-22 2024-9-25	49.5	穴播 Hole seeding	70/30
毛苕子 <i>V. villosa</i>	2023-4-9 2024-3-27	2023-7-7 2024-7-8	45.0	条播 Drill seeding	30
玉米 Maize	2023-4-20 2024-4-22	2023-9-9 2024-9-26	35.0	穴播 Hole seeding	70/30

1.4 测定指标及方法

1.4.1 产量 于各作物收获期进行取样, 在每个小区内对作物进行齐地面刈割并进行全区测产。甜高粱取样时采用样方法, 因单穴株数更多, 且株间生长一致性低于玉米, 能更充分保障样本代表性, 每个小区随机选取 3 个样方, 样方面积为 1.8 m² (3.0 m × 0.6 m); 燕麦采用样段法, 每个小区随机选取 3 个 50 cm 样段, 每个样段或样方相间 1 m。玉米采用按株取样, 因单株生长更为均匀, 按株取样则更为直接高效, 在每个小区内随机取 6 株植株进行齐地面刈割, 取样面积为 0.6 m² (0.5 m × 1.2 m)。将所采集的植物样品先称其鲜草重量, 采用烘干法在 105 °C 下杀青 30 min 后在 65 °C 烘干至恒重, 称其干草重量, 最后分别计算鲜草和干草产量。

1.4.2 经济效益 2023—2024 年试验期间, 每年作物市场价格主要通过查询中华粮网数据平台 (<http://datacenter.cngrain.com>) 和中国农业信息网 (<http://www.agri.cn/>) 获得 (表 2)。作物生产投入成本主要包括人工、种子、肥料、除草剂、杀虫剂和耕作等方面, 而肥料投入成本包括尿素和过磷酸钙肥料; 耕作投入方面主要包括机械燃料、维修和保养设备等。每个轮作模式下系统的经济收益为毛收入与生产成本之间的差值。

表 2 2023—2024 年不同轮作模式下各作物市场价格概况

Table 2 The market price of each crop under different rotation system in 2023—2024 (CNY · kg⁻¹)

项目 Item	2023	2024
玉米 Maize	2.68	2.30
甜高粱 <i>S. bicolor</i>	13.20	14.10
拉巴豆 <i>L. purpureus</i>	8.42	9.79
饲用燕麦 <i>A. sativa</i>	6.45	7.25
毛苕子 <i>V. villosa</i>	5.55	6.28

1.4.3 能源效益 本研究中根据不同轮作模式下各作物能量投入情况和作物能量产出,进行能量效率分析。通过计算各作物物质投入(主要包括肥料、种子、农药、燃料、人工和机械动力等方面)和干物质产量,然后将各项作物生产所需物质投入和干物质产量分别通过能量系数进行相应转化,从而得到不同轮作模式下系统能量投入和产出。各能量系数详情见表 3。

表 3 农业生产活动中用于计算能量当量的转换系数

Table 3 Conversion coefficient used to calculate energy equivalent in agricultural production activities^[19-31]

项目 Item	类别 Category	单位 Unit	能量系数 Energy conversion coefficient (MJ)	材料生产排放系数 Emission coefficient from production of materials (kg CO ₂ e·unit ⁻¹)	材料使用排放系数 Emission coefficient from materials use (kg CO ₂ e·unit ⁻¹)	参考文献 Reference
投入 Input	成年男性>18岁 Adult male>18 years	h	1.96	—	0.035	[19]
	成年女性>18岁 Adult females>18 years	h	1.57	—	0.035	[19]
	柴油 Diesel oil	L	56.31	53.27	3.320	[20]
	拖拉机 Tractors	h	332.00	3.32	—	[20]
	氮肥 Nitrogen fertilizer	kg	60.60	0.81	4.960	[21]
	磷肥 Phosphate fertilizer	kg	11.10	0.11	—	[22]
	杀虫剂 Insecticide	kg	120.00	—	—	[23]
	玉米种子 Maize seeds	kg	15.10	—	—	[24]
	饲用燕麦种子 <i>A. sativa</i> seeds	kg	15.50	—	—	[25]
	甜高粱种子 <i>S. bicolor</i> seeds	kg	17.35	—	—	[26]
	拉巴豆种子 <i>L. purpureus</i> seeds	kg	14.20	—	—	[27]
	毛苕子种子 <i>V. villosa</i> seeds	kg	14.50	—	—	[27]
产出 Output	玉米干物质 Maize dry matter	kg	18.00	—	—	[28]
	饲用燕麦干物质 <i>A. sativa</i> dry matter	kg	16.30	—	—	[29]
	甜高粱干物质 <i>S. bicolor</i> dry matter	kg	17.80	—	—	[30]
	拉巴豆干物质 <i>L. purpureus</i> dry matter	kg	18.30	—	—	[31]
	毛苕子干物质 <i>V. villosa</i> dry matter	kg	20.20	—	—	[31]

本研究中,净能量、能量产投比、人工能量投入获利能力、能量利用效率和能量获利能力主要通过以下公式计算^[32]:根据市场价格将作物的经济产量转换为甜高粱当量产量(*S. bicolor* equivalent yield, WEY),用于比较不同轮作模式下的系统生产力。

$$\text{净能量} = \text{能量产出} - \text{能量投入} \quad (1)$$

$$\text{能量产投比} = \text{能量产出} / \text{能量投入} \quad (2)$$

$$\text{人工能量投入获利能力} = \text{能量产出} / \text{人工能量投入} \quad (3)$$

$$\text{能量利用效率} = \text{当量产量} / \text{能量投入} \quad (4)$$

$$\text{能量获利能力} = \text{净能量} / \text{能量投入} \quad (5)$$

1.4.4 温室气体排放量和生态效能指数 本研究中,考虑的温室气体主要包括 CO₂和 N₂O^[33-35]。在 100 年时间尺度下,CO₂和 N₂O 分别使用增温潜势因子 1 和 265 转化为 CO₂当量^[36]。CO₂排放量主要来源于肥料、种子、农药和干物质产量等,采用 CO₂转换系数计算获得。而 N₂O 排放量主要来自土壤中添加的氮肥(kg N₂O·a⁻¹),计算公式如下^[37]:

$$\text{N}_2\text{O 排放量}(\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}) = \text{氮投入量} \times 0.01 \times \frac{11}{7} \quad (6)$$

温室气体排放强度(greenhouse gas intensity, GHGI)通过将温室气体排放量与系统产出的比值来估算:

$$GHGI = GHGs / Y \quad (7)$$

式中:GHGI单位为 $\text{kg CO}_2\text{e} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。GHGs是温室气体排放量,单位为 $\text{kg CO}_2\text{e} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。Y是单位面积的产量,单位为 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

可持续农业旨在通过降低物质能量投入,提高经济效益,本研究采用生态效能指数(eco-efficiency index, EEI)衡量各种植模式下的系统效益,主要通过以下公式计算^[38]:

$$\text{经济生态效能指数}(EEI_{\text{EI}}) = \text{经济收益} / \text{能源投入} \quad (8)$$

$$\text{温室气体排放生态效能指数}(EEI_{\text{GHG}}) = \text{经济收益} / \text{温室气体排放量}(GHGs) \quad (9)$$

1.5 数据处理与分析

利用 Microsoft Excel 2019 软件整理数据;采用 SPSS 25.0 统计软件进行方差分析(ANOVA)、多重比较(Duncan);用 Origin 2021 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同轮作模式下系统产量和经济效益分析

由表4所示,不同轮作模式下系统鲜草产量和干草产量均存在显著差异($P < 0.05$),与S/L-M模式相比,2023年,系统鲜草产量在M和O/V-M模式下分别降低了74.4%和36.6%,2024年则分别降低了81.0%和43.5%,2023年,系统干草产量在M和O/V-M模式下分别降低了70.8%和35.5%,2024年则分别降低了63.5%和30.2%;与M模式相比,2023年,系统鲜草产量在S/L-M和O/V-M模式下分别提高了291.4%和148.2%,2024年则分别提高了81.0%和196.9%;2023年,系统干草产量在S/L-M和O/V-M模式下分别提高了243.0%和121.2%,2024年则分别提高了173.6%和90.9%;与O/V-M模式相比,2023年,系统鲜草产量在M模式下降低了59.7%,S/L-M模式下提高了57.7%,2024年则在M模式下降低了47.6%,S/L-M模式下提高了43.3%,2023年,系统干草产量在M模式下降低了54.8%,S/L-M模式下提高了55.1%,2024年则在M模式下降低了47.6%,S/L-M模式下提高了43.3%。

由表5所示,不同轮作模式下系统总产值和净效益均存在显著差异($P < 0.05$)。与O/V-M模式相比,2023年,系统总产值、总成本和净效益在S/L-M模式下分别提高15.3%、16.5%和15.0%,2024年则分别提高了16.5%、16.2%和16.5%;与M模式相比,2023年,系统总产值、总成本、净效益和产投比在S/L-M模式下分别提高了88.1%、47.8%、95.2%和77.2%,2024年则分别提高了85.1%、36.7%、92.7%和76.4%;与2023年相比,2024年系统总产值、总成本和净效益在O/V-M模式下分别提高了14.1%、5.6%和15.5%;在M模式下分别提高了44.5%、27.8%和76.2%;在S/L-M模式下分别提高了15.3%、5.4%和16.9%。此外,与O/V-M模式相比,采用S/L-M模式能够提高系统经济效益15.8%。2023与2024年两年间,各系统人工投入一致,其经济效益无差异;M模式的种子投入最低,S/L-M模式最高;而S/L-M与O/V-M模式的种植总投入经济效益处于同一水平。

表4 2023–2024年不同轮作模式下作物产量

Table 4 Crop yield under different rotation systems in 2023–2024 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

年份 Year	轮作模式 Rotation system	鲜草产量 Fresh grass yield	干草产量 Hay grass yield
2023	O/V-M	144.55±0.72b	38.79±0.15b
	S/L-M	227.90±0.74a	60.17±0.16a
	M	58.23±0.17c	17.54±0.20c
2024	O/V-M	141.84±1.06b	48.39±0.28b
	S/L-M	251.18±0.82a	69.36±0.60a
	M	47.77±0.22c	25.35±0.16c
年份 Year		0.567	<0.004
轮作模式 Rotation system		<0.001	<0.001
年份×轮作模式 Year×rotation system		0.078	0.953

O: 饲用燕麦 *A. sativa*; V: 毛苕子 *V. villosa*; S: 甜高粱 *S. bicolor*; L: 拉巴豆 *L. purpureus*; M: 玉米 *Maize*。不同小写字母代表同一年内不同轮作模式之间具有显著差异($P < 0.05$)。Different lowercase letters represent significant differences among different rotation systems within the same year ($P < 0.05$)。下同 The same below.

表 5 2023–2024 年不同轮作模式下作物经济效益

Table 5 The economic benefits of crops under different rotation systems in 2023–2024 (CNY · hm⁻²)

年份 Year	轮作模式 Rotation system	总产值 Total out-put	总成本 Total input					净效益 Net benefits	产投比 Output input/
			种植 Planting	种子 Seed	化肥 Chemical fertilizer	人工 Labour cost	合计 Total		
2023	O/V-M	67874.40±2579.98b	5535	2551	1187	1036	10009.71	57864.70±2579.98b	6.78
	S/L-M	78226.23±2082.51a	5500	3752	1367	1036	11656.06	66570.17±2082.51a	6.71
	M	9295.80±1085.89c	1586	2428	1032	1036	6082.47	3213.33±1085.89c	1.53
2024	O/V-M	77416.85±4421.08a	5535	2814	1187	1036	10572.45	66844.40±4421.08a	7.32
	S/L-M	90170.19±7805.62a	5500	4377	1367	1036	12282.35	77887.84±7806.17a	7.34
	M	13433.78±860.79b	3209	2428	1097	1036	7770.67	5663.11±860.79b	1.73
年份 Year		0.021	—	—	—	—	—	0.036	—
轮作模式 Rotation system		<0.001	—	—	—	—	—	<0.001	—
年份×轮作模式 Year×rotation system		0.611	—	—	—	—	—	0.526	—

2.2 不同轮作模式下系统能量投入和利用效率

由图 2 可知,不同轮作模式下各作物组分能量投入占系统能量投入比例存在差异。作物的总能量投入为 11533~20369 MJ·hm⁻²。2023 年,玉米的总能量投入表现最高,分别比饲用燕麦和毛苕子高 12.6% 和 43.4%。毛苕子的种床准备能量投入分别比甜高粱和拉巴豆低 52.4% 和 4.1%。甜高粱的种子能量投入最低,分别比饲用燕麦、毛苕子降低了 90.0% 和 78.2%。与饲用燕麦和甜高粱相比,毛苕子的肥料能量投入最低,分别降低了

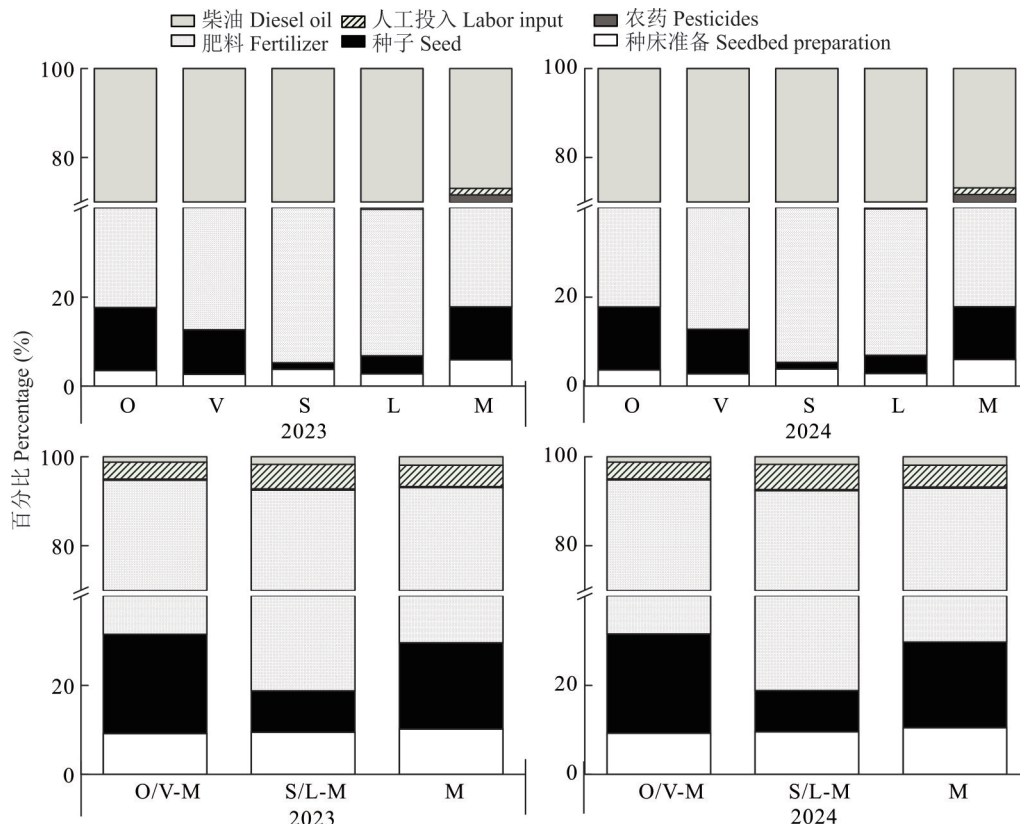


图 2 不同轮作模式下各组分能量投入分布情况

Fig. 2 The distribution of energy input of each component under different rotation systems

50.0%和56.6%。此外,柴油能量投入各个作物之间相同,玉米的农药平均能量投入比其他作物高55.3%,而玉米的人工能量投入分别比饲用燕麦和毛苕子高35.0%和67.7%;2024年,玉米的总能量投入表现最高,分别比饲用燕麦和甜高粱高12.7%和16.3%。甜高粱的种子能量投入最低,分别比毛苕子、拉巴豆降低了77.7%和85.3%。此外,玉米的农药能量投入分别比饲养燕麦和甜高粱高21.18%和6.61%,而玉米的人工能量投入分别比饲用燕麦和毛苕子高35.5%和67.5%。

其次,不同轮作模式下各组分能量投入占系统能量投入比例也存在差异。与M模式相比,2023年,种床准备能量投入比例最高,为10.2%,分别比O/V-M和S/L-M模式提高了10.2%和6.9%,2024年,种床准备能量投入比例最高,为10.5%,分别提高了11.9%和8.8%。与O/V-M模式相比,2023年,种子能量投入比例分别比S/L-M和M模式提高了58.3%和13.2%,2024年则分别提高了58.5%和13.7%;与S/L-M模式相比,2023年,肥料能量投入比例表现最高,分别比O/V-M和M模式提高了13.7%和13.9%,2024年则分别提高了14.0%和14.1%。

由表6所示,不同轮作模式之间系统能量产出、能量产投比、人工能量投入能力获利能力、能量利用效率和能量获利能力均有差异。与O/V-M模式相比,2023年,系统能量产出、能量产投比、人工能量投入能力获利能力、能量利用效率和能量获利能力在M模式下分别显著降低了54.8%、62.7%、70.4%、61.5%和63.9%,2024年,则分别显著降低了47.6%、57.2%、67.3%、57.2%和58.0%;与S/L-M模式相比,2023年,系统能量产出和人工能量投入能力获利能力在M模式下分别显著降低了70.9%和72.8%,2024年,则分别显著降低了63.5%和65.9%。同时,与O/V-M模式相比,2023年,采用S/L-M模式能量利用效率提高56.5%,2024年则提高44.5%。

表6 不同轮作模式下能量利用与投入-产出情况

Table 6 Energy use and input-output relationship under different rotation systems

年份 Year	轮作模式 Rotation system	能量产出 Energy output (MJ·hm ⁻²)	能量产投比 Energy output-input ratio	人工能量投入能力获利 能力 Human energy use profitability	能量利用效率 Energy use efficiency (kg·MJ ⁻¹)	能量获利能力 Energy profitability (MJ·hm ⁻²)
2023	O/V-M	57.01±2.17b	55.11±2.09b	1440.50±63.39a	3.75±0.14b	54.11±2.09b
	S/L-M	88.46±2.35a	86.35±1.84a	1569.76±55.62a	5.87±0.13a	85.35±1.84a
	M	25.78±3.01c	20.56±2.42c	426.51±53.44b	1.40±0.16c	19.56±2.42c
2024	O/V-M	71.13±4.06b	68.68±3.49b	1828.28±111.60a	4.67±0.24b	67.68±3.49b
	S/L-M	101.96±8.83a	99.29±8.55a	1753.03±157.52a	6.75±0.58a	98.29±8.55a
	M	37.26±2.39c	29.40±1.92c	597.03±45.08b	2.00±0.13c	28.40±1.92c
年份 Year		<0.004	<0.004	0.006	<0.004	<0.004
轮作模式 Rotation system		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
年份×轮作模式 Year×rotation system		0.953	0.827	0.430	0.826	0.827

2.3 不同轮作模式下系统生态效能和温室气体排放量和排放强度

由表7所示,不同轮作模式下系统温室气体排放量(GHG_s)和温室气体排放强度(GHGI)均存在显著差异($P<0.05$),与M模式相比,2023年,系统GHG_s在S/L-M和O/V-M模式下分别降低了5.1%和17.8%,2024年,则分别降低了5.7%和18.3%,2023年,系统GHGI在S/L-M模式下降低了81.4%,O/V-M模式下提高了44.1%,2024年,则分别降低了66.1%和57.6%;与O/V-M模式相比,2023年,系统GHG_s在S/L-M和M模式下分别提高了15.4%和21.7%,2024年,则分别提高了15.4%和22.5%,2023年,系统GHGI在S/L-M和M模式下分别降低了87.1%和30.6%,2024年,则在S/L-M模式下降低了20.0%,M模式下提高了136.0%;与S/L-M模式相比,2023年,系统GHG_s在O/V-M模式下降低了13.4%,M模式下提高了5.4%,2024年,在O/V-M模式下降低了13.4%、M模式下提高了6.1%,2023年,系统GHGI在O/V-M和M模式下分别提高了

673.7% 和 236.8%，2024 年，则分别提高了 25.0% 和 195.0%。

由图 3 可知，不同轮作模式下系统经济生态效能率指数($E EI_{EI}$)和系统温室气体排放生态效能指数($E EI_{GHG}$)存在显著差异($P < 0.05$)，与 S/L-M 模式相比，2023 年，系统 $E EI_{EI}$ 在 M 和 O/V-M 模式下分别降低了 96.0% 和 13.8%，2024 年，则分别降低了 94.1% 和 15.0%，2023 年，系统 $E EI_{GHG}$ 在 M 模式下降低了 93.9%，O/V-M 模式下提高了 0.3%，2024 年，则分别降低了 91.0% 和 1.0%；与 M 模式相比，2023 年，系统 $E EI_{EI}$ 在 S/L-M 和 O/V-M 模式下分别提高了 96.0% 和 95.4%，2024 年，则分别提高了 94.1% 和 93.0%，2023 年，系统 $E EI_{GHG}$ 在 S/L-M 和 O/V-M 模式下分别提高了 93.9% 和 94.0%，2024 年，则分别提高了 91.0% 和 90.9%；与 O/V-M 模式相比，2023 年，系统 $E EI_{EI}$ 在 M 模式下降低了 95.4%，S/L-M 模式下提高了 16.1%，2024 年，则在 M 模式下降低了 93.0%，S/L-M 模式下提高了 17.6%，2023 年，系统 $E EI_{GHG}$ 在 M 和 S/L-M 模式下分别降低了 94.0% 和 0.3%，2024 年，则在 M 模式下降低了 90.9%，S/L-M 模式下提高了 1.0%。

表 7 不同作物轮作模式下系统温室气体排放量和温室气体强度
Table 7 Greenhouse gas emissions and greenhouse gas intensity of the system under different crop rotation systems ($kg CO_2e \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)

年份 Year	轮作模式 Rotation system	温室气体排 放量 GHGs	温室气体排放 强度 GHGI
2023	O/V-M	529.91±4.95c	1.47±0.04a
	S/L-M	611.69±5.29b	0.19±0.00c
	M	644.87±2.89a	1.02±0.12b
2024	O/V-M	529.91±4.95c	0.25±0.01b
	S/L-M	611.69±5.29b	0.20±0.02b
	M	648.89±4.10a	0.59±0.04a
年份 Year		0.731	<0.001
轮作模式 Rotation system		<0.001	<0.001
年份×轮作模式 Year×rotation system		0.884	<0.001

GHGs: 温室气体排放量 Greenhouse gas emissions; GHGI: 温室气体排放强度 Greenhouse gas intensity.

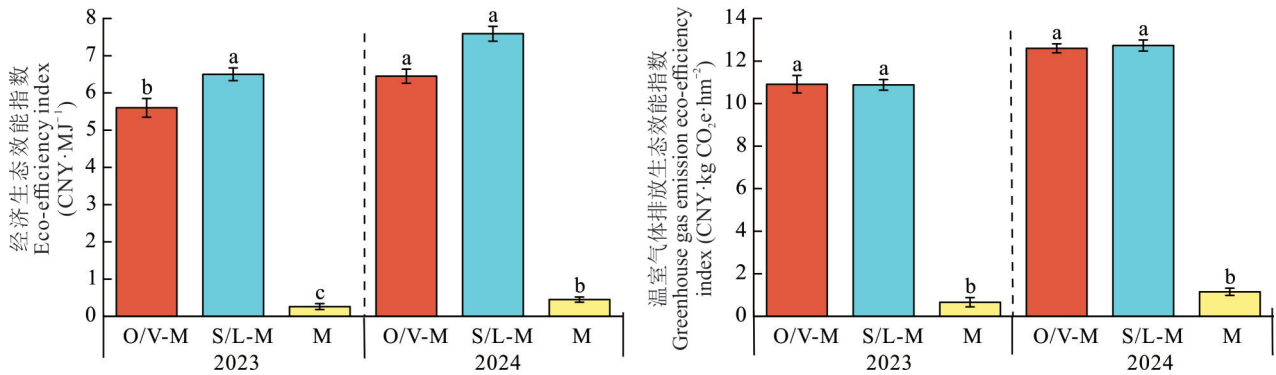


图 3 不同轮作模式下系统生态效能指数

Fig. 3 System ecological efficiency index under different rotation systems

不同小写字母代表同一年内不同轮作模式之间具有显著差异($P < 0.05$)。Different lowercase letters represent significant differences among different rotation systems within the same year ($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 不同轮作系统对作物产量和经济效益的影响

作物轮作是提高资源利用效率和产量的重要种植方式^[39]。本研究发现与玉米单作相比，采用甜高粱/拉巴豆和饲用燕麦/毛苕子混播分别纳入单作体系后，系统干草产量较玉米单作平均显著提高 157.1% (表 4)。该模式不仅表现出显著的产量优势，还体现出种间互作对资源协同的增强效应。其增产机制主要源于豆科与禾本科作物在生态位上的互补：豆科作物通过生物固氮为禾本科提供氮素，而禾本科作物则通过根系分泌物促进磷活化，从而形成“氮—磷”双向互补机制，显著提升系统生产力^[40]。例如，Wahbi 等^[41]等采用小麦—蚕豆 (*Vicia faba*) 轮作系统研究发现，豆科作物 (蚕豆) 在生长前期可通过生物固氮为禾本科作物 (小麦) 提供氮素；而禾本科作物在后

期则通过根系分泌物促进豆科对氮的吸收,形成种间双向互补作用。同时,不同轮作模式下其系统产量表现存在明显差异^[42]。与饲用燕麦/毛苕子-玉米轮作系统相比,甜高粱/拉巴豆-玉米轮作模式下其系统产量提高了32.9%(表4),这主要是由于甜高粱/拉巴豆生育期相对较长(当地通常在9月下旬收获),而饲用燕麦/毛苕子生育期相对较短(当地通常在7月初收获),延长了作物的光合有机物积累周期^[43]。此外,实施轮作措施还能促进系统经济效益提升^[44]。本研究表明,与玉米单作相比,不同轮作模式下的系统经济效益平均提高了93.5%(表5)。这主要是因为轮作系统所带来的作物产量显著增加,而产量作为农业经济回报的核心要素,直接影响了最终的经济效益^[45]。此外,轮作还可能通过提高资源利用效率、降低单位面积生产成本,进一步促进产量优势向经济增益的转化,从而全面提升了系统的综合经济效益。不同轮作模式下其系统经济效益也存在明显差异^[46]。与饲用燕麦/毛苕子-玉米轮作系统相比,甜高粱/拉巴豆-玉米轮作模式下系统经济效益提高了15.8%(表5),这主要是由于各作物种子市场价格存在差异^[47],由表2可知,与饲用燕麦相比,甜高粱市场价格平均提高了50.0%;与毛苕子相比,拉巴豆市场价格平均提高了35.0%。

3.2 不同轮作系统对作物能量投入和温室气体排放的影响

轮作在提高作物多样性的同时,往往伴随物质与能量投入的增加^[48]。本研究表明,与玉米单作相比,不同轮作模式下其系统能量投入显著提高了42.3%(表6),这主要归因于轮作系统作物种类的增多,导致在人力、肥料、种子及农药等方面的物资与管理投入相应上升^[49]。例如,邓建强^[12]研究也发现在陇东旱塬区实施轮作后由于作物种子、化肥等物质投入提高,导致其系统物质能量投入提高了51.5%。此外,不同轮作模式下其系统能量投入也存在明显差异^[16]。与饲用燕麦/毛苕子-玉米轮作系统相比,甜高粱/拉巴豆-玉米轮作模式下其系统中肥料和人工能量投入比例表现最高(图2)。由图2可知,与饲用燕麦作物相比,甜高粱肥料和人工能量投入分别提高了15.1%和40.5%;与毛苕子相比,拉巴豆肥料和人工能量投入分别提高了15.1%和41.2%。例如,王斌等^[50]指出,甜高粱作为高光效C₄作物,其快速的生物量积累导致对氮素的需求显著高于C₃作物,因此需增加氮肥投入以维持其生长潜力,本研究中甜高粱肥料投入高于饲用燕麦的结果与该结论一致。另一方面,拉巴豆虽具固氮能力,但其根瘤菌固氮效率在特定环境条件下有限,尤其在干旱胁迫下更为明显,因此需通过增施磷肥以促进根系发育与结瘤效能,本研究中拉巴豆在干旱环境下对磷肥响应显著的结果与之相吻合^[51]。此外,实施轮作也会导致温室气体排放量发生改变^[52]。本研究中,与玉米单作相比,将豆禾混播系统纳入玉米单作后其系统温室气体排放平均降低了34.6%(表7),这一显著减排效应主要源于系统物质能量利用效率的平均提升(表6),具体体现在氮、磷等肥料养分在作物间的协同利用增强,减少了因肥料损失导致的N₂O等温室气体排放。同时,轮作系统通过延长地表植被覆盖时间,不仅改善了田间微气候,还降低了土壤有机质的分解速率,从而减少了CO₂的释放^[53]。例如,贾雪杰等^[53]采用烟(*Nicotiana tabacum*)稻轮作提高了氮肥利用率,土壤N₂O排放降低30.1%。此外,不同轮作模式下其系统温室气体排放表现存在明显差异^[54]。与饲用燕麦/毛苕子-玉米轮作系统相比,甜高粱/拉巴豆-玉米轮作模式下系统中温室气体排放提高了15.4%(表7),这主要是由于甜高粱作为高生物量C₄作物对氮素需求较高,而拉巴豆的生物固氮量及其释放时序难以完全匹配甜高粱的氮素需求,从而导致土壤中氮素转化过程加剧,尤其是硝化和反硝化作用增强,促进了氮氧化物等温室气体的产生与排放^[55]。

4 结论

甜高粱/拉巴豆混播纳入玉米单播系统显著提高了饲草产量和经济效益,虽增加了人工、种子等方面物质能量投入,但能量利用效率明显提升,且降低了温室气体排放强度。与燕麦/毛苕子-玉米模式相比,采用甜高粱/拉巴豆-玉米模式能够提高系统产量和经济效益32.9%和15.8%;同时由于能量利用效率提高33.5%,温室气体排放强度降低15.4%,生态效能指数提高了16.9%。因此,在宁夏中部干旱区采用甜高粱/拉巴豆-玉米轮作模式进行饲草生产能够实现经济与生态效益的双赢,可为干旱区农业持续发展可提供高效且环保的种植模式选择。

参考文献 References:

[1] Wang J H, Li G, Yin M H, *et al.* Effects of regulated deficit irrigation on the soil environment and forage growth of mixed-

- species forage plantings in China's high-cold desert area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(1): 95–106.
- 汪精海, 李广, 银敏华, 等. 调亏灌溉对高寒荒漠区人工混播草地土壤环境与牧草生长的影响. *草业学报*, 2022, 31(1): 95–106.
- [2] The Central Committee of the Communist Party of China and the State Council. Opinions of the state council of the central committee of the communist party of China on improving the work of "agriculture, countryside and peasants". *Xinjiang Agricultural Mechanization*, 2019(2): 40–46.
- 中共中央国务院. 关于坚持农业农村优先发展做好“三农”工作的若干意见. *新疆农机化*, 2019(2): 40–46.
- [3] Gao T. Establish the strategic position of grass industry economic development and ecological management development status, existing problems and countermeasures of forage industry in Ningxia. *Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2023, 64(11): 36–39.
- 高婷. 确立草业经济发展和生态治理的战略地位—宁夏牧草产业发展现状、存在问题与对策. *宁夏农林科技*, 2023, 64(11): 36–39.
- [4] Xu Q, Tian X H, Du W H. Effects of mixed sowing of rye and common vetch on forage yield and nutrient quality in alpine pastoral areas. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(8): 49–59.
- 徐强, 田新会, 杜文华. 高寒牧区黑麦和箭筈豌豆混播对草产量和营养品质的影响研究. *草业学报*, 2021, 30(8): 49–59.
- [5] Zhang J R. Potato planting status and development in the ecological immigrant area of the central arid zone of Ningxia. *Seed Science and Technology*, 2018, 36(1): 11.
- 张景瑞. 宁夏中部干旱带生态移民区马铃薯种植现状及发展. *种子科技*, 2018, 36(1): 11.
- [6] Li W N, Li S, Guan H Y, *et al.* Effects of tillage methods and straw returning on soil physiochemical properties and enzyme activities in wheat-soybean rotation filed. *Soil*, 2024, 56(6): 1274–1282.
- 李文娜, 李爽, 关皓月, 等. 耕作方式和秸秆还田对麦—豆轮作田土壤理化特性和土壤酶活性的影响. *土壤*, 2024, 56(6): 1274–1282.
- [7] Olsen R J, Hensler R F, Attoe O J, *et al.* Fertilizer nitrogen and crop rotation in relation to movement of nitrate nitrogen through soil profiles. *Soil Science Society of America Journal*, 1970, 34(3): 448–452.
- [8] Lu H P, Sun A H. The effect of grass-crop rotation on crop yield increase. *Pratacultural Science*, 2003, 20(4): 10–13.
- 鲁鸿佩, 孙爱华. 草田轮作对粮食作物的增产效应. *草业科学*, 2003, 20(4): 10–13.
- [9] Zhou S R, Yu Y, Mao K, *et al.* Study on the economic and ecological benefits of monoculture and mixed legume-grass rotation with rice in paddy field. *Sichuan Grassland*, 1992(3): 2–8.
- 周寿荣, 余云, 毛凯, 等. 稻田单播和混播豆禾牧草与水稻轮作的经济生态效益研究. *四川草原*, 1992(3): 2–8.
- [10] Yang H S, Zhang Y Q, Yang S H, *et al.* Analysis of the spatial-temporal variation of soil nutrient of alfalfa-maize rotation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6): 127–130.
- 杨恒山, 张玉芹, 杨升辉, 等. 苜蓿轮作玉米后土壤养分时空变化特征分析. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 127–130.
- [11] Chen W. A comparative study on resource utilization and economic benefits of different cropping modes in hilly dry land of Sichuan Province. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2019.
- 陈伟. 四川丘陵旱地不同种植模式的资源利用及生态经济效益比较研究. 成都: 四川农业大学, 2019.
- [12] Deng J Q. Resources use under forage rape/common vetch-crop production system on the Longdong Loess Plateau. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- 邓建强. 陇东旱塬饲用油菜和箭筈豌豆与粮食作物轮作系统资源利用研究. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [13] Huang G Q. On the benefits of crop rotation. *Tillage and Cultivation*, 2008(4): 1–3.
- 黄国勤. 论作物轮作的效益. *耕作与栽培*, 2008(4): 1–3.
- [14] Guo Y X. Root-invasion fungi of alfalfa and wheat in the rotation system of grassland and field in the Loess Plateau. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2003.
- 郭玉霞. 黄土高原草田轮作系统中苜蓿与小麦的根部入侵真菌. 兰州: 甘肃农业大学, 2003.
- [15] Frank S, Havlik P, Stehfest E, *et al.* Agricultural non-CO₂ emission reduction potential in the context of the 1.5 °C target. *Nature Climate Change*, 2019(9): 66–72.
- [16] Yang X L, Xiong J R, Du T S, *et al.* Diversifying crop rotation increases food production, reduces net greenhouse gas emissions and improves soil health. *Nature Communications*, 2024, 15: 198. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44464-9>.
- [17] Huang J D. Differences and mechanism of yield, resource utilization efficiency and carbon footprint of different multiple cropping patterns in paddy fields in the middle reaches of the Yangtze River. Wuhan: Central China Agricultural University, 2023.

黄家达. 长江中游稻田不同复种模式产量、资源利用效率和碳足迹的差异及机理研究. 武汉: 华中农业大学, 2023.

- [18] Wei Y. Legume-rice rotations increase rice yields and carbon sequestration potential globally. *One Earth*, 2025, 8(2): 101170.
- [19] Yadav G S, Lal R, Meena R S, *et al.* Energy budgeting for designing sustainable and environmentally clean/safer cropping systems for rainfed rice fallow lands in India. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 158: 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.170>.
- [20] Nassiri S M, Singh S. Study on energy use efficiency for paddy crop using data envelopment analysis (DEA) technique. *Applied Energy*, 2009, 86(7/8): 1320–1325.
- [21] Kuswardhani N, Soni P, Shivakoti G P. Comparative energy input-output and financial analyses of greenhouse and open field vegetable production in West Java, Indonesia. *Energy*, 2013, 53: 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.032>.
- [22] Choudhary M, Rana K S, Bana R S, *et al.* Energy budgeting and carbon footprint of pearl millet-mustard cropping system under conventional and conservation agriculture in rainfed semiarid agro-ecosystem. *Energy*, 2017, 141: 1052–1058. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.136>.
- [23] Pahlavan R, Omid M, Akram A. The relationship between energy inputs and crop yield in greenhouse basil production. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2012, 14(6): 1243–1253.
- [24] Hatirli S A, Ozkan B, Fert C. Energy inputs and crop yield relationship in greenhouse tomato production. *Renewable Energy*, 2011, 36(11): 3217–3221.
- [25] Kumar R, Mishra J S, Rao K K, *et al.* Crop rotation and tillage management options for sustainable intensification of rice-fallow agro-ecosystem in eastern India. *Scientific Reports*, 2020, 10: 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67973-9>.
- [26] Cantero-Martinez C, O'Leary G J, Connor D J. Stubble retention and nitrogen fertilisation in a fallow-wheat rainfed cropping system. Soil water and nitrogen conservation, crop growth and yield. *Soil Tillage Research*, 1995, 34(2): 79–94.
- [27] Singh R J, Ghosh B N, Sharma N K, *et al.* Energy budgeting and energy synthesis of rainfed maize-wheat rotation system with different soil amendment applications. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 753–765. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.10.026>.
- [28] Rajaeifar M A, Akram A, Ghobadian B, *et al.* Energy economic life cycle assessment (LCA) and greenhouse gas emissions analysis of olive oil production in Iran. *Energy*, 2014, 66: 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.12.059>.
- [29] Bonjin K, Charles M N. Effect of oat particle size on energy and nutrient utilization in growing pigs. *Journal of Animal Science*, 2021(5): 99. <https://doi.org/10.1093/jas/skab134>.
- [30] Li F R, Gao C Y, Zhao H L, *et al.* Soil conservation effectiveness and energy efficiency of alternative rotations and continuous wheat cropping in the Loess Plateau of Northwest China. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2002, 91(1/2/3): 101–111.
- [31] Nagasa G D, Belete A. Review on nanomaterials and nano-scaled systems for topical and systemic delivery of antifungal drugs. *Journal of Multidisciplinary Healthcare*, 2022, 15: 1819–1840. <https://doi.org/10.2147/JMDH.S359282>.
- [32] Datta M, Yadav G S, Chakraborty S. Integrated nutrient management in groundnut (*Arachis hypogaea*) in a subtropical humid climate of north-east India. *Indian Journal of Agronomy*, 2014, 59(2): 322–326.
- [33] Yang X L, Gao W S, Zhang M, *et al.* Reducing agricultural carbon footprint through diversified crop rotation systems in the North China Plain. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 76: 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.063>.
- [34] Rajaeifar M A, Akram A, Ghobadian B, *et al.* Environmental impact assessment of olive pomace oil biodiesel production and consumption: A comparative lifecycle assessment. *Energy*, 2016, 106: 87–102. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.010>.
- [35] 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 and Environment*, 2002, 91(1/3): 217–232.
- [36] Maillard E, McConkey B G, Luce M S, *et al.* Crop rotation, tillage system, and precipitation regime effects on soil carbon stocks over 1 to 30 years in Saskatchewan, Canada. *Soil and Tillage Research*, 2018, 177: 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.001>.
- [37] Parihar C M, Jat S L, Singh A K, *et al.* Bio-energy, water-use efficiency and economics of maize-wheat-mungbean system under precision-conservation agriculture in semi-arid agroecosystem. *Energy*, 2017, 119: 245–256. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.068>.
- [38] Wang F, Yue Z Z, Zhao D Y, *et al.* Improving energy and GHG performance of the rice-wheat rotation system: a life-cycle analysis based on a large-scale behavior investigation. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120319. <https://doi.org/10.1016/>

- j. jclepro. 2020. 120319.
- [39] Shi L, Zhao Y, Lv L Y. Discussion on the development of grassland rotation in the agro-pastoral ecotone of China. *Agricultural Economy*, 2023(3): 29–31.
石亮, 赵艳, 吕林有. 我国农牧交错区草田轮作发展探讨. *农业经济*, 2023(3): 29–31.
- [40] Chen J H, Chen S T, He N Y, *et al.* Nuclear-encoded synthesis of the d1 subunit of photosystem II increases photosynthetic efficiency and crop yield. *Natural Plants*, 2020, 6: 570–580. <https://doi.org/10.1038/s41477-020-0629-z>.
- [41] Wahbi S, Prin Y, Thioulouse J, *et al.* Impact of wheat/faba bean mixed cropping or rotation systems on soil microbial functionalities. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1364. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01364>.
- [42] Bai W B, Zhang J H, Gao Z F, *et al.* Effects of different fertilization and cultivation methods on weed diversity in sorghum-maize rotation fields. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2024, 33(10): 1858–1871.
白文斌, 张建华, 高振峰, 等. 不同施肥与耕作方式对高粱-玉米轮作田杂草多样性的影响. *中国北方农业学报*, 2024, 33(10): 1858–1871.
- [43] Yang C H, Geng Y X, Fu X Z, *et al.* Effects of no tillage and crop rotation on yield and photosynthetic characteristics of wheat and maize in desert oasis of northwest China. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2022, 40(1): 11–19.
杨彩红, 耿艳香, 伏星舟, 等. 免耕轮作对西北荒漠绿洲小麦、玉米产量和光合特性的影响. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(1): 11–19.
- [44] Lu Y W, Li S G, Zhao Y, *et al.* Study on the yield and economic benefits of millet and mung bean rotation mode. *Anhui Agricultural Sciences*, 2024, 52(22): 29–33, 59.
鲁一薇, 李顺国, 赵宇, 等. 绿豆-谷子轮作模式的产量与经济效益研究. *安徽农业科学*, 2024, 52(22): 29–33, 59.
- [45] Zhu Z M, Wu G L, Huang M, *et al.* Effects of organic fertilizer instead of chemical fertilizer on potato yield and economic benefits in Pu'an County. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2025(5): 72–74.
朱正敏, 吴贵丽, 黄敏, 等. 有机肥替代化肥对普安县马铃薯产量及经济效益的影响. *现代农业科技*, 2025(5): 72–74.
- [46] Yang R, Geng S Y, Wang X Y. Differences of wheat yield and economic benefits between soybean-wheat and rice-wheat cropping under different nitrogen fertilization patterns in Jiangnan Plain, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(2): 441–448.
杨蕊, 耿石英, 王小燕. 江汉平原不同氮肥运筹模式下豆麦和稻/麦轮作系统小麦产量和经济效益差异. *应用生态学报*, 2020, 31(2): 441–448.
- [47] Qiu J, Wang S K, Jing Q, *et al.* Analysis and future prospects of supply and demand of Chinese corn seeds. *Grain, Oils and Food Science and Technology*, 2023, 31(6): 163–168.
邱军, 王术坤, 景琦, 等. 中国玉米种子供需形势分析与未来展望. *粮油食品科技*, 2023, 31(6): 163–168.
- [48] Yan J Y. Effect of phosphorus fertilizer rate on crop yield, phosphorus utilization and soil phosphorus transformation in a rice-oilseed rape rotation. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
闫金焱. 磷肥用量对水稻-油菜轮作系统作物产量与磷肥利用及土壤磷素转化的影响. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- [49] Yang Z P. Study on the difference of annual light energy resource utilization in different paddy-upland rotations. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2019.
杨志平. 不同水旱轮作模式周年光能资源利用的差异研究. 成都: 四川农业大学, 2019.
- [50] 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.
- [51] Yang B W, Liang X R, Qin M G, *et al.* Sustainability analysis of different upland-paddy rotation systems in the middle reaches of the Yangtze River based on energy efficiency and carbon efficiency. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(11): 2801–2817.
杨博文, 梁修仁, 秦明广, 等. 基于能量效率与碳效率的长江中游不同水旱轮作系统可持续性分析. *作物学报*, 2024, 50(11): 2801–2817.
- [52] Zheng M J, Li Y, Jia X L. Research progress and perspective of diversified rotation systems of main crops. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2021, 36(S1): 215–221.
郑孟静, 李岩, 贾秀领. 主要农作物多样化轮作制度研究进展及展望. *华北农学报*, 2021, 36(S1): 215–221.
- [53] Jia X J, You M H, Li D X, *et al.* Effect of reduced fertilizer application on yield and soil nutrients in a forage/tobacco rotation system. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2024, 42(1): 166–173.

- 贾雪杰, 游明鸿, 李达旭, 等. 减量施肥对牧草/烤烟轮作系统中产量和土壤养分的影响. 四川农业大学学报, 2024, 42(1): 166-173.
- [54] Lei Y H. Research on greenhouse gas emissions and water conservation and emission reduction models of wheat corn rotation system. Yangling: Northwest A & F University, 2024.
雷玉涵. 小麦-玉米轮作系统温室气体排放及节水减排模式研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- [55] Zhao S W, Wang Q, Pei Z Q, *et al.* Effects of humic acid and different amounts of biochar on the growth and nitrogen uptake of sweet sorghum in high nitrogen soil. Journal of Tianjin Agricultural University, 2019, 26(4): 5-8.
赵思文, 王茜, 裴志强, 等. 高氮土壤下腐植酸与不同量生物炭配施对甜高粱生长及氮素吸收影响研究. 天津农学院学报, 2019, 26(4): 5-8.