

禾本科与豆科饲草作物间套作对饲草品质及氮素吸收影响的研究进展

侯岳¹ 王红亮¹ 李杰² 李春杰¹ 陈范骏¹

(¹ 中国农业大学资源与环境学院/国家农业绿色发展研究院/养分资源高效利用全国重点实验室, 100193, 北京; ² 杭锦旗现代农业发展中心, 015400, 内蒙古巴彦淖尔)

摘要 优质饲草的缺乏是当前制约饲草产业发展的瓶颈, 近年来, 国内外关于饲草高效种植模式的研究显著增多, 其中禾本科/豆科饲草作物间套作在提高饲草产量、品质和养分吸收利用方面具有明显的优势。但是, 不同间套作体系的增产提质效果和养分吸收优势因作物搭配存在差异。因此, 本文将禾/豆饲草间套作归纳为以麦类/豆科饲草为主的矮秆饲草间套作和以青贮玉米/豆科为主的高矮秆饲草间套作。结果表明, 矮秆饲草间作提高了麦类禾本科饲草的产量、品质和氮素吸收, 且提高了大部分豆科饲草的产量和品质; 高矮秆饲草间作中产量和品质表现为其中一种作物提高, 而另一种作物降低。同时从间作的地上、地下生态位补偿总结了饲草间套作提高产量、品质和氮素吸收利用的种间互作机制, 并提出了加强饲草种间互作机理的研究, 以及通过因地制宜筛选间作品种及优化条带布置等措施来实现禾、豆饲草产量和品质的协同提高, 以明确高产优质高效的饲草间套作体系适宜的作物搭配及其优势。

关键词 麦类饲草; 青贮玉米; 豆科饲草; 种间互作; 氮素吸收利用

随着经济的发展和人们生活水平的不断提高, 我国居民的膳食结构不断升级, 表现出主粮消费逐渐下降, 肉蛋奶类消费持续增加的特征^[1], 这也意味着畜牧养殖业发展面临着更加严峻的挑战。饲草产业是畜牧业发展的基础和保障, 近年来, 在“粮改饲”、“振兴奶业苜蓿发展行动”等农业供给侧结构性改革的推动下, 我国饲草种植面积不断增大, 但像紫花苜蓿和燕麦草等优质饲料仍然供不应求, 据有关数据统计^[2], 仅 2022 年 1-4 月, 我国进口苜蓿干草累计 53.2 万 t, 同比增长 27.4%; 进口燕麦干草累计 56.2 万 t, 同比增长 4.9%, 并且我国优级和特级苜蓿干草所占比例仅有 6.0%, 说明我国饲草需求无论是产量还是品质方面都存在很大缺口。因此, 为实现畜牧业可持续发展, 必须因地制宜推动饲草产业的发展, 建立多元化饲草生产体系, 发展高产、优质且资源高效的饲草种植模式。

间套作种植方式是我国传统农业的精髓, 指在同一地块于同一生长时期或某段时期内种植 2 种或 2 种以上作物, 目的是利用有限时间和空间收获更高的作物产量, 并降低生产不稳定性的风险^[3]。早在西汉《汜胜之书》中就已有关于瓜豆间

作的记载, 几千年来间套作种植已被广泛应用于粮食、经济和饲草等作物。饲草以收获营养体为目的, 且不同种类的饲草往往可同时收获并混合青贮和混合饲喂, 因此饲草间套作相比于粮食作物和经济作物更易于农田管理和收获。禾本科/豆科饲草间套作是最为常见的种植模式, 被认为是缓解草畜矛盾的可行途径。禾本科饲草含有较高的碳水化合物, 豆科饲草则富含蛋白质和多种维生素, 本身又有很强的生物固氮功能, 因此禾、豆饲草间作可提高其氮吸收及蛋白质含量, 实现单位面积混合饲草产量提升和品质互补^[4-6]。燕麦 (*Avena sativa* L.)、玉米 (*Zea mays* L.)、苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 等都是饲草间套作中常见的作物, 但是, 不同的饲草间套作体系在增产提质效果和养分吸收及利用优势方面存在差异。

因此, 本文将禾/豆饲草间套作归纳为以麦类/豆科饲草为主的矮秆饲草间套作和以青贮玉米/豆科为主的高矮秆饲草间套作, 并总结了该 2 类饲草间套作体系对饲草产量、品质和氮素吸收效率的影响及其种间互作机制, 以明确高产高效饲草间套作体系适宜的作物搭配及其优势, 为我国农牧交错区

作者简介: 侯岳, 主要从事饲草间套作与资源高效利用研究, E-mail: houyueuse@163.com

李春杰为通信作者, 主要从事间套作与资源高效利用研究, E-mail: li.chunjie@cau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD1900300)

收稿日期: 2024-04-26; 修回日期: 2024-07-07; 网络出版日期: 2025-01-27

发展饲草间套作绿色优质高效种植提供技术支撑和理论依据。

1 禾/豆饲草间套作的主要作物搭配类型及其对饲草产量和品质的影响

不同类型作物的搭配是间套作优势形成的基础，也是调控种间互作和实现间作优势的常用手段。在禾/豆饲草作物间套作中，根据作物植株特性可分为矮秆饲草作物间套作和高矮秆饲草作物间套作 2 种类型。

1.1 矮秆饲草作物间套作的土地利用效率及对饲草产量及品质的影响

在矮秆饲草间作体系中，禾本科饲草以燕麦、大麦（*Hordeum vulgare* L.）和黑麦（*Secale cereale* L.）等麦类为主，与其间作的豆科饲草主要有箭筈豌豆（*Vicia sativa* L.）、苜蓿、紫云英（*Astragalus*

sinicus L.）、红三叶（*Trifolium pratense* L.）等^[7-8]，研究区域主要分布在我国青藏高原、西藏河谷区、内蒙古农牧交错区等地。研究结果（表 1）表明，矮秆饲草作物间套作中，土地当量比（LER）均大于 1（1.07~1.76），说明该类体系具有较高的土地利用效率。禾本科饲草产量较单作均显著增加，单位面积产量提高 14.4%~116.4%，大部分结果表明间作提高了豆科饲草的产量，增产幅度为 6.1%~51.6%，然而，间作豆科饲草的增产幅度小于间作禾本科。例如，燕麦/箭筈豌豆间套作，燕麦均表现为增产，增产幅度为 17.2%~119.2%，并且大部分研究表明间作也提高了箭筈豌豆的产量，LER 可达 1.18~1.76。此外，在燕麦与苜蓿、大豆、豌豆等作物间作时，2 个作物的产量均大幅提高，较单作而言，燕麦/苜蓿的产量分别提高 14.4%和 6.8%；燕麦/大豆间作下燕麦和大豆的产量分别提

表 1 矮秆饲草作物间套作下土地利用效率及饲草作物产量及品质
Table 1 The land equivalent ratio and yield, quality of crop species in short forage intercropping

间作体系 Intercropping system	土地 当量比 LER	相比于单作的变化 Changes compared to single cropping (%)														文献 Reference
		产量 Yield		粗蛋白 CP		粗灰分 Ash		粗脂肪 EE		中性洗涤纤维 NDF		酸性洗涤纤维 ADF		相对饲喂价值 RFV		
		禾本科 Cereal	豆科 Legume	禾本科 Cereal	豆科 Legume	禾本科 Cereal	豆科 Legume	禾本科 Cereal	豆科 Legume	禾本科 Cereal	豆科 Legume	禾本科 Cereal	豆科 Legume	禾本科 Cereal	豆科 Legume	
燕麦/箭筈豌豆 Oat/common vetch	1.76	+83.5	+51.6	—	—	—	—	—	—	-4.5	+2.8	+2.9	+2.5	+3.4	-3.5	[9]
	1.19	+17.2	+23.4	+24.0	+9.7	—	—	+4.5	+13.5	—	—	—	—	—	—	[10]
	1.66	+116.4	+16.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[11]
	—	+12.9		+50.9	—	—	—	—	—	-5.4		+10.0		+2.0		[12]
	1.19	+73.8	-16.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[13]
	1.18	+17.2	+39.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[14]
燕麦/苜蓿 Oat/alfalfa	1.07	+30.2	-9.0	+9.6	-2.4	-2.3	+1.6	+2.0	-5.8	-3.8	+2.3	-3.7	+2.8	+6.1	-3.5	[15]
	1.11	+14.4	+6.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[16]
	1.08	+24.7	-8.7	+5.8	-4.6	-7.4	-3.6	+5.7	-0.7	-4.2	-2.3	-5.9	+0.8	+7.6	+2.0	[17]
燕麦/大豆 Oat/soybean	1.56	+24.7	+34.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[18]
	1.24	+19.8	+28.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[15]
燕麦/绿豆 Oat/mung bean	1.18	+24.8	+10.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[15]
燕麦/豌豆 Oat/pea	1.20	+29.0	+6.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[19]
	1.27	—	—	+34.0		+7.7		+13.2		—		—		—		[20]
黑麦/箭筈豌豆 Rey/common vetch	1.27	+47.0	+18.0	+5.8	-10.5	—	—	—	—	+4.4	-7.4	+4.0	+17.9	-6.3	+1.2	[21]
小黑麦/苜蓿 Triticale/alfalfa	1.11	+35.1	-6.2	+3.7	-2.0	-1.5	+1.1	+0.4	-4.7	-3.5	+1.5	-2.5	+2.2	+5.0	-2.5	[22]
	1.09	+24.1	-0.5	7.4	0.5	-5.9	-2.0	+7.3	+0.7	-9.3	-3.9	-4.6	+1.7	+12.7	-4.4	[17]
大麦/豌豆 Barley/pea	—	-6.6		+8.3		-10.9		+2.8		-2.0		-4.5		+4.1		[23]

$LER = LER_C + LER_L = Y_{C,I} / Y_{C,M} + Y_{L,I} / Y_{L,M}$ ，式中， LER_C 、 LER_L 分别表示饲草间作中禾本科、豆科饲草的偏土地当量比， $L_{C,I}$ 、 $L_{C,M}$ 、 $L_{L,I}$ 、 $L_{L,M}$ 分别表示间作、单作禾本科饲草产量以及间作、单作豆科饲草产量。 $LER > 1$ ，说明间套作提高了土地生产力； $LER < 1$ ，则降低了土地生产力。下同。
 $LER = LER_C + LER_L = L_{C,I} / L_{C,M} + L_{L,I} / L_{L,M}$ ， LER_C and LER_L denote the partial land equivalent ratio of cereal/legume forage intercropping. $L_{C,I}$, $L_{C,M}$, $L_{L,I}$, $L_{L,M}$ denote intercropping and monocropping cereal forage yields and intercropping and monocropping legume forage yields, respectively. $LER > 1$ indicates that intercropping improves land productivity, while $LER < 1$ reduces land productivity. The same below.

高 19.8%~24.7%、28.2%~34.5%。

就营养品质而言，间作明显提高了禾本科饲草的粗蛋白（CP）含量，对粗脂肪（EE）、粗灰分（Ash）、中性洗涤纤维（NDF）、酸性洗涤纤维（ADF）等品质指标也均有影响。燕麦、小黑麦与苜蓿间作均增加了禾本科饲草的粗蛋白和粗脂肪含量，降低了粗灰分、酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量，提高了相对饲喂价值，而苜蓿则呈现出相反的结果（表 1）。燕麦/箭筈豌豆间作中，2 个作物粗蛋白含量分别提高 24.0%和 9.7%，粗脂肪含量分别提高 4.5%和 13.5%。在大麦与不同的豆类饲草间作的体系中，饲草的可消化干物质和粗蛋白含量均高于大麦单作，其中大麦/蚕豆（*Vicia faba* L.）、大麦/羽扇豆和大麦/豌豆间作的粗蛋白含量分别比单作大麦高 64%、27%和 55%^[24]，大麦/紫云英间

作也增加了大麦的蛋白质含量^[25]。

1.2 高矮秆饲草作物间套作的土地利用效率及对饲草产量及品质的影响

高秆和矮秆饲草作物合理搭配种植可以形成良好的通风透光条件，提高复合群体对光能的利用效率^[26]，该类型间套作应用最为广泛，高秆禾本科饲草作物主要有玉米、高粱（*Sorghum bicolor* L.）等，与其间作的常见矮秆豆科饲草作物有苜蓿、野豌豆、拉巴豆（*Dolichos lablab* L.）等。高矮秆饲草间套作体系主要分布在东北农牧区、华北平原和河西灌区等地。由表 2 可知，高矮秆饲草作物间套作的 LER 均大于 1（1.01~1.93），说明具有明显的土地利用优势。大部分高矮秆饲草间作体系表现出禾本科饲草产量增加，而豆科饲草产量下降，但也有部分玉米/苜蓿间作模式表现出相反结果。

表 2 高矮秆饲草作物间套作下土地利用效率及饲草作物产量及品质
Table 2 The land equivalent ratio and yield, quality of crop species in tall/short forage intercropping

相比于单作的变化 Change compared to sole crops (%)																	文献 Reference
间作体系 Intercropping system	土地 当量比 LER	产量 Yield		粗蛋白 CP		粗灰分 Ash		粗脂肪 EE		中性洗涤纤维 NDF		酸性洗涤纤维 ADF		相对饲喂价值 RFV			
		禾本科	豆科	禾本科	豆科	禾本科	豆科	禾本科	豆科	禾本科	豆科	禾本科	豆科	禾本科	豆科		
		Cereal	Legume	Cereal	Legume	Cereal	Legume	Cereal	Legume	Cereal	Legume	Cereal	Legume	Cereal	Legume		
青贮玉米/拉巴豆 Silage maize/ lablab bean	—	+21.1	—	+18.0	—	+15.1	—	+11.5	—	-3.0	—	+2.0	—	+2.6	—	[27]	
青贮玉米/秣食豆 Silage maize/ fodder soybean	—	+8.9	—	+23.5	—	+11.8	—	+2.9	—	-8.3	—	-2.6	—	+9.8	—	[28]	
	—	+41.8	—	+78.7	—	+16.6	—	+69.6	—	-9.7	—	-11.2	—	+17.2	—	[29]	
青贮玉米/苜蓿 Silage maize/ alfalfa	1.34	-31.5	—	+30.7	—	—	—	—	—	+6.8	—	+4.7	—	-7.6	—	[30]	
玉米/苜蓿 Maize/alfalfa	1.46	-2.1	+106.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[31]	
	1.59	-6.0	+132.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[32]	
	1.10	+19.3	-3.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[33]	
	1.02	+27.8	-17.0	+7.6	-5.6	-2.5	+2.9	+1.5	-6.5	-5.2	+5.1	-3.8	+5.7	+8.0	-7.4	[22]	
	1.12	-0.2	+15.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[34]	
玉米/大豆 Maize/soybean	1.05	+18.8	-9.4	+7.3	-11.0	-1.2	-5.9	+4.4	+1.1	-4.1	+5.3	-4.4	+5.1	+7.2	-7.0	[22]	
	1.62	+30.4	—	+39.1	—	-1.5	—	+5	—	-16.5	—	-0.8	—	+6.9	—	[35]	
	1.93	+143.8	+51.5	+26.6	—	—	—	—	—	-3.0	—	+12.0	—	+0.2	—	[36]	
玉米/豇豆 Maize/cowpea	1.11	+8.0	+14.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[37]	
甜高粱/苜蓿 Sweet sorghum/ alfalfa	—	—	—	+73.4	—	+6.2	—	-7.6	—	—	—	—	—	—	—	[38]	
甜高粱/拉巴豆 Sweet sorghum/ lablab bean	1.01	+25.7	-17.9	+1.1	-6.4	+1.9	-3.3	+2.2	-9.1	-3.3	+5.8	-1.6	+6.3	+4.5	-8.3	[22]	
	1.04	+17.6	-9.8	+4.8	-12.6	+0.4	-6.0	+8.0	+0.7	-4.2	+7.1	-3.1	+6.6	+6.6	-9.2	[17]	
甜高粱/拉巴豆 Sweet sorghum/ lablab bean	—	+29.3	—	+36.2	—	+19.7	—	+21.0	—	-7.2	—	-2.6	—	+9.6	—	[39]	

在玉米/拉巴豆间作中，拉巴豆为攀援型豆科饲草，该体系一般为添加式间作，对禾本科产量影响

较小，因此这类间套作的优势主要表现为混合饲草产量的提高，可提高 6.3%~41.8%，同时相比于禾

本科单作, 由于豆科作物较高的蛋白质含量补偿了禾本科饲草蛋白质含量短缺^[40-41], 该模式下混合饲草粗蛋白含量提高 15.4%~78.7%, 粗灰分含量提高 9.6%~19.7%, 粗脂肪含量提高 0.3%~69.6%, 并且降低了中性洗涤纤维含量, 进而提高相对饲喂价值。玉米/苜蓿间作具有较大的生产力优势, LER 可达 1.02~1.59, 因其多样的空间布局和苜蓿多年生的特性, 间作优势表现差异化较大, 但往往表现为一种作物产量大幅增加, 另一种作物产量降低, 研究^[42]表明, 玉米与宽行紫花苜蓿间作是最优间作模式。在品质方面, 与产量的变化趋势相似, 苜蓿粗蛋白含量最高可增加 132.3%, 同时该模式混合青贮时可溶性糖和乳酸含量也较单作玉米显著提高, 营养品质和发酵品质均达到较高水平^[43]。玉米/大豆 (*Glycine max* L.) 作青贮作物间作时, 土地当量比最高可达 1.93, 其中玉米产量大幅增加 (30.4%~134.8%), 粗蛋白、淀粉含量、相对饲喂价值等也高于玉米单作, 可作为改善饲料品质和提高青贮质量的饲草生产模式^[44-46]。玉米/豇豆 (*Vigna unguiculata* L.) 间作中, 2 个作物产量均有所提高, 并降低中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量, 间作提高了玉米的粗蛋白含量, 达 73.4%, 可减少饲喂过程中蛋白补充剂的投入^[47-48]。对于高粱间套作模式, 其 LER 为 1.01~1.04, 土地利用效

率较单作提高幅度不大, 但也是较为常见的饲料作物生产模式, 甜高粱/苜蓿间作中, 甜高粱产量提升 17.6%~25.7%, 粗蛋白、粗灰分、粗脂肪含量和相对饲喂价值均有所提高, 中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量降低; 而苜蓿产量和品质表现则相反^[17,22]。

综上所述, 在两类饲草间套作体系中, 矮秆饲草间作下禾本科与豆科饲草的产量均有所提升, 而高矮秆饲草间作可提高大部分禾本科饲草的产量, 却降低了部分豆科饲草的产量。在品质方面, 禾/豆饲草间套作主要增加了饲草作物的粗蛋白含量, 除粗蛋白外其他品质指标变化幅度较小。整体而言, 饲草间作对禾本科品质的提升要优于对豆科饲草品质的提升, 如何实现饲草间作中 2 种作物产量和品质协同增加、实现共赢依旧是未来研究的关键之一。

关于禾/豆饲草间作体系增产提质的机制研究主要关注于地上部时空生态位的补偿效应 (图 1)。一方面是由于植株株型的差异形成空间的补偿效应来提高光能的利用效率。例如, 以玉米为主的高低位作物配置, 高矮作物分别占据不同的空间, 使平面受光变成立体受光, 来增加作物对光能的截获, 并促进间作群体对光能的吸收^[49]。同时, 玉米作为高位禾本科作物, 消光系数较小, 有利于光能

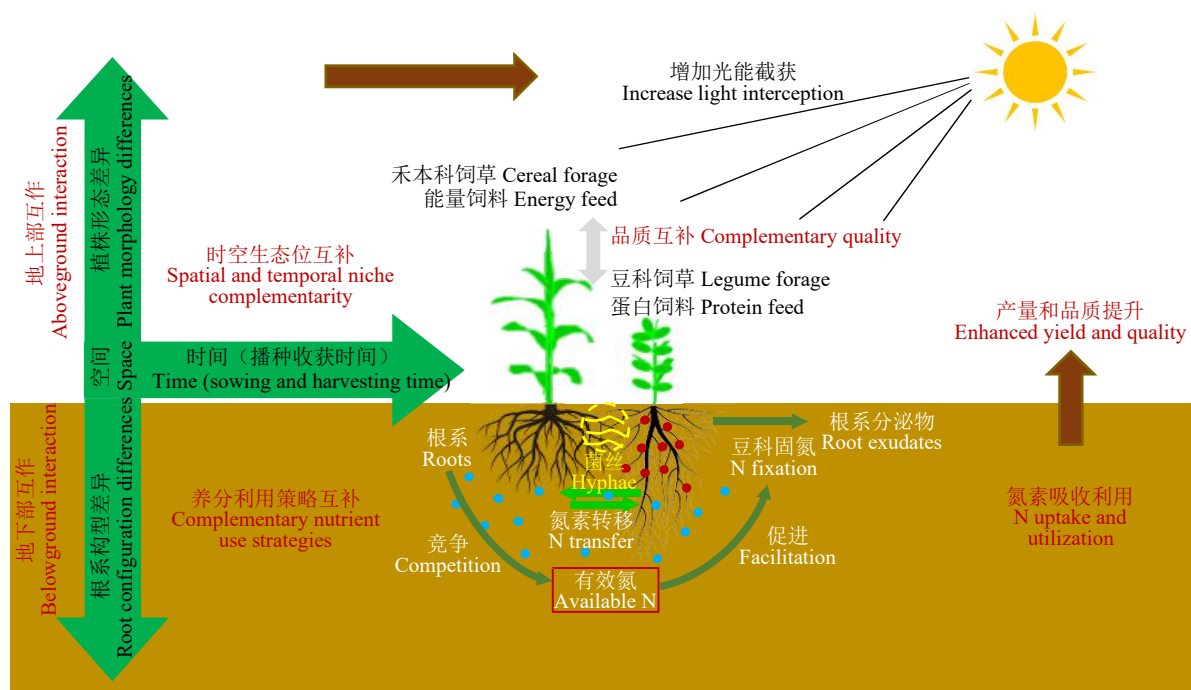


图 1 禾/豆饲草间套作提高产量、品质和氮素吸收利用的生态学机制

Fig.1 Ecological mechanisms of enhanced yield, quality, and N uptake and utilization by cereal/legume forage intercropping

投射到底层，而低位豆科作物消光系数较高，可使投射到底层的光能被充分吸收^[50]。例如，苜蓿虽然属于不耐阴植物，在夏季会长时间处于玉米的遮阴之下而影响产量^[51]，但可通过宽行苜蓿与玉米间作减少遮阴，并且轻度遮阴可减轻高温强光对苜蓿生长的抑制，有利于增加营养体生物量的积累^[52]。另一方面时间生态位分化也是导致地上部生物量增加的主要原因之一。综上分析结果表明，较大的时间生态位分化，即较短的共生期能显著增加间套作的土地当量比、补偿效应和净效应，因为缩短间作作物的共生期能减少不同作物在同一时期对于资源的竞争^[53-54]。在多年生饲草间套作中尤为明显，玉米收获之后苜蓿作为覆盖作物有较长的单独生长周期，甚至实现生长季节交错，从而占用更多的资源并充分发挥边行效应^[55]。

综合来看，在禾/豆饲草间套作中，选择不同茎秆高度的作物组合，并采取合理的条带布置和适合的定植比例才能充分发挥间作优势，相比传统间套作而言，多年生饲草间套作在时间因子上具有更多的选择性和研究潜力，但目前关于时间尺度上的研究仍较为匮乏，豆科饲草的刈割时间和生产年限显著影响饲草间套作系统的生产力，不同地区需通过长期定位试验确定理想的饲草间套作种植模式。

2 禾/豆饲草间套作对作物氮素吸收利用的影响

目前大部分饲草间套作研究主要集中在作物氮素吸收方面。本文计算了禾、豆饲草作物在间套作中氮素吸收量较单作体系的变化，不同体系对氮素的吸收能力表现出差异性，在间套作研究中常用氮素吸收当量比（NER）衡量间作体系的氮素吸收效率，当NER>1时，说明间作较单作提高了氮素吸收效率。结果（表3）显示，NER为0.96~1.59，大部分研究表明，合理的饲草作物组合能显著改善间作体系的氮素吸收。矮秆饲草间套作中，除燕麦/箭筈豌豆间作外，其他间作体系NER均大于1，其中，燕麦/箭筈豌豆间作体系的NER最高，可达1.23~1.45，在众多饲草间作体系中表现最好，燕麦/苜蓿、燕麦/绿豆、小黑麦/苜蓿的NER分别为1.01~1.19、1.12~1.17、1.01~1.06，小黑麦/羽扇豆、大麦/豌豆也具有较高的NER，分别为1.32和1.28；高矮秆饲草间套作中，大部分间作体系NER仍大于1，其中玉米/大豆的NER最高，为1.04~1.59，其次为玉米/苜蓿、高粱/苜蓿，分别为0.97~1.26和0.96~1.02。有研究表明饲用高粱/大豆间作也能提升氮素吸收效率，NER为1.24。综合来看，两类饲草间套作体系的间作NER

表 3 饲草作物间套作的氮素吸收效率及对饲草作物氮素吸收量的影响
Table 3 The nitrogen uptake efficiency and the effects to N uptake of crop species in forage intercropping

间作类型 Intercropping type	间作体系 Intercropping system	氮素吸收当量比 NER	氮素吸收量相比于单作的变化 N uptake change compared to single cropping (%)		文献 Reference
			禾本科 Cereal	豆科 Legume	
矮秆饲草间套作 Short forage intercropping	燕麦/箭筈豌豆	1.23	+59.2	+11.4	[58]
	燕麦/箭筈豌豆	1.39	+77.3	-38.5	[59]
	燕麦/箭筈豌豆	1.31	+97.8	-36.0	[60]
	燕麦/箭筈豌豆	1.45	+57.9	+86.1	[25]
	燕麦/箭筈豌豆	1.44	+128.1	-39.3	[26]
	燕麦/箭筈豌豆	1.42	+54.8	+36.9	[61]
	燕麦/苜蓿	1.19	+21.6	+16.6	[16]
	燕麦/苜蓿	1.03	+14.0	-4.6	[62]
	燕麦/苜蓿	1.01	+7.6	-6.6	[17]
	燕麦/绿豆	1.17	+23.1	+11.7	[63]
	燕麦/绿豆	1.12	+31.7	-11.2	[64]
	燕麦/豌豆	1.02	+2.9	+1.4	[20]
	燕麦/豌豆	0.96	+21.4	-29.6	[65]
	小黑麦/苜蓿	1.06	+18.2	-2.6	[62]
	小黑麦/苜蓿	1.01	+8.9	-7.8	[17]
	小黑麦/羽扇豆	1.32	+105.6	-40.3	[66]
	大麦/豌豆	1.28	+70.8	-14.4	[67]

续表 3 Table 3 (continued)

间作类型 Intercropping type	间作体系 Intercropping system	氮素吸收 当量比 NER	氮素吸收量相比于单作的变化 N uptake change compared to single cropping (%)		文献 Reference
			禾本科 Cereal	豆科 Legume	
高矮秆饲草间套作 Tall/short forage intercropping	玉米/苜蓿	1.03	+12.1	-3.0	[62]
	玉米/苜蓿	0.97	+5.1	-11.7	[17]
	玉米/苜蓿	1.26	-1.4	+60.2	[57]
	玉米/苜蓿	1.19	-15.0	+60.8	[34]
	玉米/苜蓿	—	+8.6	-1.6	[30]
	玉米/苜蓿	—	+84.5	—	[68]
	玉米/苜蓿	—	+13.0	—	[69]
	玉米/大豆	1.08	+30.3	-20.2	[70]
	玉米/大豆	1.04	+7.8	-0.4	[71]
	玉米/大豆	1.59	+68.4	+49.9	[72]
	玉米/大豆	1.08	+6.2	+10.0	[73]
	玉米/大豆	—	+20.4	-16.3	[74]
	高粱/苜蓿	1.02	+11.4	-4.5	[62]
	高粱/苜蓿	0.96	+5.3	-13.4	[17]
	高粱/苜蓿	—	+21.3	-1.2	[75]
	高粱/大豆	1.24	+64.4	-16.8	[76]

氮素吸收当量比 $NER = NER_C + NER_L = N_{C,I}/N_{C,M} + N_{L,I}/N_{L,M}$ ，式中， NER_C 、 NER_L 分别表示饲草间作中禾本科、豆科饲草的偏氮素吸收当量比， $N_{C,I}$ 、 $N_{C,M}$ 、 $N_{L,I}$ 、 $N_{L,M}$ 分别表示间作、单作禾本科饲草氮素吸收量，间作、单作豆科饲草氮素吸收量， $NER > 1$ ，说明间套作提高了氮素吸收效率， $NER < 1$ ，则降低了氮素吸收效率；氮素吸收量变化为间作禾本科和豆科饲草相比单作氮素吸收量增加或降低的百分比。
In the equivalent ratio of N uptake: $NER = NER_C + NER_L = N_{C,I}/N_{C,M} + N_{L,I}/N_{L,M}$, NER_C and NER_L denote the equivalent ratio of partial N uptake of cereal/legume forage intercropping. $N_{C,I}$, $N_{C,M}$, $N_{L,I}$, $N_{L,M}$ denote the equivalent ratio of N uptake of cereal in intercropping and monoculture, and legumes in intercropping and monoculture, respectively. $NER > 1$ indicates that intercropping increased nitrogen uptake efficiency, while $NER < 1$ indicates decreasing nitrogen uptake efficiency; change in nitrogen uptake was the percentage increase or decrease in nitrogen uptake in intercropped cereal and legume forages compared to monocropping.

均大于 1 或接近 1，说明饲草间作较单作能显著提升氮素吸收效率或能保持与单作相当的氮素吸收效率，可以作为减少系统氮素投入的有效手段。

为明确间作体系中不同作物的氮素吸收量变化，进一步比较了禾本科和豆科饲草氮素吸收量的变化，物种间的竞争影响作物氮素吸收，一般禾本科作物在种间竞争中占有优势地位^[56]。矮秆饲草间套作中，禾本科饲草氮素吸收量较单作均显著增加，增幅为 2.9%~128.1%，而大部分豆科饲草氮素吸收量较单作而言降低，降幅为 2.6%~39.3%（表 3）；高矮秆饲草间套作中，除了部分玉米/苜蓿间作体系之外，其他间作体系仍表现为禾本科饲草氮素吸收量较单作显著增加，氮素吸收量提高 5.1%~68.4%，而大部分间作豆科饲草的氮素吸收量较单作则表现为小幅降低或无明显变化（表 3）。在玉米/苜蓿间作中，苜蓿是优势物种^[50]，苜蓿对玉米氮素的竞争是导致玉米减产的主要原因，然而间作苜蓿的氮素吸收量较单作显著增加，弥补了玉米氮素吸收和产量的降低^[57]。综上，禾/豆饲草间套作氮素吸收量往往表现为一种作物升高，另一种作物降低，但由于升幅大于

降幅，因此较单作能显著提高氮素的吸收效率，且主要是由于间作禾本科氮素吸收效率的提高所导致的，间作豆科的氮素吸收效率不受间作影响，当然也有部分间作体系表现为禾本科和豆科饲草氮素吸收均显著增加，例如燕麦/箭筈豌豆、玉米/大豆等已被广泛应用于饲草生产的间作体系，通过大量研究已找到能够实现间作中 2 种作物氮素吸收均提升的作物配置或种植模式。此外，结合间作氮素吸收效率及不同作物的氮素吸收量变化，矮秆饲草间套作较高矮秆饲草间套作能更加稳定地实现氮素吸收效率提升，且氮素吸收增幅更大，作物的产量和品质也表现出类似的趋势。

对于禾/豆饲草间套作提高氮素吸收效率及利用的机制研究主要集中在种间地下部根系生态位的补偿作用（图 1）。一方面是作物根系构型和空间分布的补偿作用。“深根系”与“浅根系”的搭配可以充分利用地下生态位补偿，缓解地下竞争，促进物种共存。如在玉米/苜蓿间作体系中，2 种作物在根系构型上有着显著差异，玉米属于浅根系植物，冠根较多，且多分布在 0~40 cm 土层，苜蓿属于深根系植物，侧根较多，展现出更强的

侵占力，多分布在 0~60 cm 土层^[42]，二者间作可充分利用不同土层，改善相对固定养分的获取^[77]，提高间作体系总的养分吸收^[78]。此外，间作可以改变根系构型并影响生物量的分配^[79]，例如，燕麦/苜蓿间作有利于作物根系生长发育及根系活力的提高^[80]，有利于对氮素的吸收。另一方面是不同作物养分利用策略的补偿作用。豆科饲草的固氮作用和禾本科对土壤氮的强烈竞争发生协同作用^[9]，即禾本科饲草对氮素的竞争刺激了豆科饲草的结瘤固氮，同时又有一部分氮素转移给禾本科饲草利用，提高间作体系的氮素吸收，进而增加了间作体系的饲草产量和蛋白质含量^[81]。此外，豆科饲草可直接或间接将氮素转移给相邻作物，饲草间套作与其他作物间作相比往往株距较小，有利于根系延伸和交互，根系互作越紧密则种间氮素转移越活跃，转移途径概括如下，通过根系分泌的一些小分子物质或菌根网络的连接作用实现氮素转移^[82-83]，例如玉米/苜蓿间作中苜蓿向玉米转移氮素途径受不同施氮水平的影响，在缺氮土壤中，氮素的转移主要靠丛枝菌根真菌对氮素进行转移，而在施氮土壤中主要靠根系分泌物对氮素进行转移^[32]。根际沉积氮也是禾/豆饲草氮素转移的途径之一，饲草根系具有较多的脱落物，通过根、根瘤、细小根系的分解和矿化的物质实现氮素转移^[58-59]。

综上，与传统粮食作物间套作相比，地下部禾/豆饲草间套作对资源的高效吸收利用得益于饲草自身特性和生长发育特点，首先豆科饲草因其具有固氮能力强、根系发达、抗逆性强等生物学特性，在促进养分吸收和产量形成方面发挥了重要作用；此外，部分饲草作物利用其多年生的特点和收获利用方式的不同，表现出不同的养分吸收规律和根系分布特征，为饲草间套作种植模式的探索和系统生产力的提高提供了更多的可能性。

3 总结和展望

综合文献报道，矮秆饲草间作体系中，间作提高了麦类禾本科饲草的产量、品质和氮素吸收效率，且提高了与之间作的大部分豆科饲草作物的产量和品质；对于高矮秆饲草间作体系，间作提高了其中一种饲草作物的产量和品质，但是降低了另一种饲草作物的产量和品质。较粮食作物而言，饲草作物间套作因其生长状态及形态特征表现出不同

的生态位竞争和养分吸收规律，但在该方面的研究结果仍然比较模糊，缺乏界定标准，应开展粮食作物和饲草作物间作试验横向对比，进一步加强饲草作物间套作地上和地下部互作机理方面的研究；同时应进一步整合分析，量化不同类型饲草间套作的优势，系统评价其生态及社会经济效益，才能为种植制度改革和畜牧业可持续发展提供理论依据。

此外，禾/豆饲草间套作已成为优质饲草生产的重要方向之一，尤其有利于改善饲草的蛋白质含量，一是不同作物之间实现蛋白质产量的加和；二是豆科饲草的固氮作用以及豆禾作物之间的氮素转移直接影响着饲草间套作系统的氮素收益，进而影响饲草蛋白质产量。从这 2 个角度出发，建议选择具有较高蛋白质含量和较强固氮能力的饲草作物或品种进行间作，从而保证饲草间套作产量和品质优势最大化。当前，不同豆科饲草和禾本科饲草之间的氮素转移规律及数量还不够明确，需重点关注多年生饲草间作时在不同生长年限的种间互作机制及豆科饲草的根瘤固氮作用。另外如何在生产实践中保持稳定的固氮效率，以及通过优化生产措施来提高饲草间套作的氮素利用效率等方面需要更多的研究，需因地制宜结合当地饲草需求调控间作品种搭配和条带布置等关键因素实现禾本科和豆科饲草的产量平衡。

矮秆饲草作物间套作广泛分布在生态环境较差的高寒和干旱地区，而在农牧交错区主要选择以青贮玉米为主的高矮秆饲草作物间套作则具有较大的生产潜力。在高低位作物配置间作中，遮阴是导致豆科饲草产量不稳定的主要因素之一，可采用宽条带间作、筛选适应性品种、采用生长调节剂等措施来减少遮阴造成的影响。此外，因饲草具有较强的适应性，在轻度盐碱的地力条件下可选择耐盐碱饲草作物间套作种植，以提高边际土地的利用。纵观当前，生态循环农业背景下要求进一步推进种养结合，饲草种植首先是为养殖业服务，因此结合养殖粪污资源化利用推进有机肥还田可作为现阶段有关饲草作物间套作模式优化的研究重点，有机肥的使用是生态农业实践的主要组成部分，但目前关于间套作种植结合有机肥替代化肥的研究较少，可将动物与作物的时空多样化相结合，通过粪污出纳量、土壤肥力和养殖端饲草需求等因素确定有机肥替代率，并结合产量经济效益指标等发展区

域化饲草间套作种植, 长期实践形成完整的技术规程。传统的间套作研究更多关注于作物产量收益和养分资源利用等方面, 为提高农民间套作种植积极性, 农事操作难易和能否机械化等劳动力指标也应纳入饲草间套作系统评价体系。

参考文献

- [1] 郑海霞, 尤飞, 罗其友, 等. 面向 2050 年我国农业资源平衡与国际进口潜力研究. 中国工程科学, 2022, 24(1): 20-28.
- [2] 中商产业研究院. 2022 年 1-4 月中国牧草及饲料原料进口情况分析: 苜蓿干草进口量增长 27.4%. (2022-05-31) [2024-04-20]. <https://www.askci.com/news/chanye/20220531/0925151873640.shtml>.
- [3] 李隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 403-415.
- [4] Li Q Z, Sun J H, Wei X J, et al. Overyielding and interspecific interactions mediated by nitrogen fertilization in strip intercropping of maize with faba bean, wheat and barley. Plant and Soil, 2010, 339(1/2): 147-161.
- [5] Van der Werf W, Li C J, Cong W F, et al. Intercropping enables a sustainable intensification of agriculture. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2020, 7(3): 254-256.
- [6] Sun B R, Peng Y, Yang H Y, et al. Alfalfa (*Medicago sativa* L.)/maize (*Zea mays* L.) intercropping provides a feasible way to improve yield and economic incomes in farming and pastoral areas of northeast China. PLoS ONE, 2014, 9(10): e110556.
- [7] Dordas C A, Lithourgidis A S. Growth, yield and nitrogen performance of faba bean intercrops with oat and triticale at varying seeding ratios. Grass and Forage Science, 2011, 66(4): 569-577.
- [8] Javanmard A, Nasiri Y, Shekari F. Competition and dry matter yield in intercrops of barley and legume for forage. Albanian Journal of Agricultural Sciences, 2014, 13(1): 22-32.
- [9] Demie D T, Döring T F, Finckh M R, et al. Mixture×genotype effects in cereal/legume intercropping. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 846720.
- [10] Thompson D J, Stout D G, Moore T. Forage production by four annual cropping sequences emphasizing barley under irrigation in southern interior British Columbia. Canadian Journal of Plant Science, 1992, 72(1): 181-185.
- [11] Li Q, Zeng T, Hu Y, et al. Effects of soybean density and sowing time on the yield and the quality of mixed silage in corn-soybean strip intercropping system. Fermentation, 2022, 8(4): 140-154.
- [12] 向洁, 王富强, 郭宝光, 等. 西藏河谷区燕麦与箭筈豌豆混间作对产量和营养品质的影响. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018, 44(5): 555-564.
- [13] Li R, Zhang Z X, Tang W, et al. Effect of row configuration on yield and radiation use of common vetch-oat strip intercropping on the Qinghai-Tibetan plateau. European Journal of Agronomy, 2021, 128: 126290.
- [14] 渠佳慧, 王春梅, 吴鹏博, 等. 燕麦间作箭筈豌豆对饲草产量及土壤生物学性状的影响. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 5-13.
- [15] 马怀英, 王上, 杨亚东, 等. 燕麦与豆科作物间作的产量、经济效益与碳足迹分析. 中国农业大学学报, 2021, 26(8): 23-32.
- [16] 王妍. 紫花苜蓿 || 燕麦间作效应及氮素吸收机理研究. 长春: 东北师范大学, 2019.
- [17] 赵雅姣. 紫花苜蓿/禾本科牧草间作优势及其氮高效机理和土壤微生态效应研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
- [18] 王亚南, 乔月静, 范雅琦, 等. 燕麦与不同作物间作对土壤线虫群落结构及作物产量的影响. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(4): 505-515.
- [19] 张丽睿, 柴继宽, 赵桂琴, 等. 施氮制度对燕麦 || 豌豆间作体系产量及种间竞争力的影响. 草原与草坪, 2022, 42(4): 106-114.
- [20] Tsialtas I T, Baxevas D, Vlachostergios D N, et al. Cultivar complementarity for symbiotic nitrogen fixation and water use efficiency in pea-oat intercrops and its effect on forage yield and quality. Field Crops Research, 2018, 226: 28-37.
- [21] 王富强, 向洁, 郭宝光, 等. 拉萨河谷区箭筈豌豆和黑麦混、间播建植方式研究. 草业学报, 2018, 27(8): 39-49.
- [22] 藺芳, 刘晓静, 童长春, 等. 间作对不同类型饲料作物光能利用特征及生产能力的影响. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3452-3462.
- [23] Soufan W, Al-Suhaibani N A. Optimizing yield and quality of silage and hay for pea-barley mixtures ratio under irrigated arid environments. Sustainability, 2021, 13(24): 13621-13630.
- [24] 王旭, 曾昭海, 朱波, 等. 箭筈豌豆与燕麦不同间作混播模式对产量和品质的影响. 作物学报, 2007, 33(11): 1892-1895.
- [25] 渠佳慧. 燕麦与箭筈豌豆不同行比例间作对饲草产量及土壤性状的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- [26] Wang S, Chen G, Yang Y D, et al. Sowing ratio determines forage yields and economic benefits of oat and common vetch intercropping. Agronomy Journal, 2021, 113(3): 2607-2617.
- [27] 董姗. 密度和施氮对河西灌区青贮玉米/拉巴豆间作体系饲草产量、品质和水分利用的影响. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [28] Zhang H X, Shi W, Ali S, et al. Legume/maize intercropping and N application for improved yield, quality, water and N utilization for forage production. Agronomy, 2022, 12(8): 1777-1798.
- [29] 董志晓, 何润濠, 况鉴洋, 等. 成都平原青贮玉米间作拉巴豆对混合饲草产量及品质的影响. 草业科学, 2021, 38(8): 1587-1595.
- [30] 许瑞轩. 华北平原紫花苜蓿套作青贮玉米高产高效利用研究. 北京: 中国农业大学, 2021.
- [31] Zhang H L, Wang X Y, Gao Y Z, et al. Short-term N transfer from alfalfa to maize is dependent more on arbuscular mycorrhizal fungi than root exudates in N deficient soil. Plant and Soil, 2020, 446(1/2): 23-41.
- [32] 孙宝茹. 玉米/紫花苜蓿间作磷素高效吸收利用的根系—土壤互作机理. 长春: 东北师范大学, 2017.
- [33] Sun T, Li Z Z, Wu Q, et al. Effects of alfalfa intercropping on crop yield, water use efficiency, and overall economic benefit in the corn belt of Northeast China. Field Crops Research, 2018, 216: 109-119.
- [34] Zhang G G, Yang Z B, Dong S T. Interspecific competitiveness affects the total biomass yield in an alfalfa and corn intercropping system. Field Crops Research, 2011, 124(1): 66-73.
- [35] Soe Htet M N, Hai J B, Bo P T, et al. Evaluation of nutritive values through comparison of forage yield and silage quality of mono-cropped and intercropped maize-soybean harvested at two maturity stages. Agriculture, 2021, 11(5): 452-466.
- [36] Zeng T R, Wu Y S, Xin Y F, et al. Silage quality and output of different maize-soybean strip intercropping patterns. Fermentation, 2022, 8(4): 174-190.
- [37] Roohi M, Arif M S, Guillaume T, et al. Role of fertilization regime on soil carbon sequestration and crop yield in a maize-

- cowpea intercropping system on low fertility soils. *Geoderma*, 2022, 428: 116152.
- [38] Azim A, Khan A G, Nadeem M A, et al. Influence of maize and cowpea intercropping on fodder production and characteristics of silage. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2000, 13 (6): 781-784.
- [39] 董志晓, 何润濛, 况鉴洋, 等. 成都平原甜高粱间作拉巴豆对混合饲草产量及品质的影响. *草地学报*, 2021, 29(7): 1578-1583.
- [40] Armstrong K L, Albrecht K A, Lauer J G, et al. Intercropping corn with lablab bean, velvet bean, and scarlet runner bean for forage. *Crop Science*, 2008, 48(1): 371-379.
- [41] Zaeem M, Nadeem M, Pham T H, et al. Corn-soybean intercropping improved the nutritional quality of forage cultivated on podzols in boreal climate. *Plants*, 2021, 10(5): 1015-1037.
- [42] Sun B R, Gao Y Z, Yang H J, et al. Performance of alfalfa rather than maize stimulates system phosphorus uptake and overyielding of maize/alfalfa intercropping via changes in soil water balance and root morphology and distribution in a light chernozemic soil. *Plant and Soil*, 2018, 439(1/2): 145-161.
- [43] Xu R X, Zhao H M, Liu G B, et al. Alfalfa and silage maize intercropping provides comparable productivity and profitability with lower environmental impacts than wheat-maize system in the North China plain. *Agricultural Systems*, 2022, 195: 103305-103317.
- [44] Fischer J, Böhm H, Heß J. Maize-bean intercropping yields in Northern Germany are comparable to those of pure silage maize. *European Journal of Agronomy*, 2020, 112: 125947.
- [45] Maw Ni Soe Htet. 玉米 (*Zea mays* L.) 与大豆 (*Glycine max*) 不同间作模式的资源利用率及饲草产量与饲料品质的研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [46] Kizilsimsek M, Gunaydin T, Aslan A, et al. Improving silage feed quality of maize intercropped with some legumes. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 2020, 7(1): 165-169.
- [47] Horvatić I, Svečnjak Z, Maćešić D, et al. Influence of intercropping maize with cowpea and fertilization with clinoptilolite on forage yield and quality. *Journal of Environmental Science and Engineering (B)*, 2018, 7(9): 337-343.
- [48] Uher D, Horvatic I, Jares D, et al. Influence of intercropping maize with cowpea on forage yield and quality. *Direct Research Journal of Agriculture and Food Science*, 2019, 7(4): 77-80.
- [49] 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.
- [50] Zhang G G, Zhang C Y, Yang Z B, et al. Root distribution and N acquisition in an alfalfa and corn intercropping system. *Journal of Agricultural Science*, 2013, 5(9): 128-142.
- [51] Lin C H, McGraw R L, George M F, et al. Shade effects on forage crops with potential in temperate agroforestry practices. *Agroforestry Systems*, 1998, 44(2): 109-119.
- [52] 覃凤飞, 崔棹茗, 魏明, 等. 越夏期遮阴对 3 个不同紫花苜蓿品种生长特性的影响. *草地学报*, 2014, 22(1): 101-106.
- [53] Li C J, Hoffland E, Kuyper T W, et al. Yield gain, complementarity and competitive dominance in intercropping in China: A meta-analysis of drivers of yield gain using additive partitioning. *European Journal of Agronomy*, 2020, 113: 125987.
- [54] Yu Y, Stomph T J, Makowski D, et al. A meta-analysis of relative crop yields in cereal/legume mixtures suggests options for management. *Field Crops Research*, 2016, 198: 269-279.
- [55] Wu K X, Jiang C H, Zhou S Y, et al. Optimizing arrangement and density in maize and alfalfa intercropping and the reduced incidence of the invasive fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in southern China. *Field Crops Research*, 2022, 287: 108637.
- [56] Wahla I H, Ahmad R I A Z, Ehsanullah A A, et al. Competitive functions of components crops in some barley based intercropping systems. *International Journal Agriculture & Biology*, 2009, 11 (1): 69-72.
- [57] 张华亮. 玉米/紫花苜蓿间作氮素高效吸收利用的根系—土壤互作机理. 长春: 东北师范大学, 2020.
- [58] 韩冬雨, 李立军, 赵鑫瑶, 等. 施氮对燕麦间作箭筈豌豆饲草产量和品质及水氮利用效率的影响. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2023, 51(10): 40-51.
- [59] 蒋海亮. 黄土旱塬区秋播燕麦与箭筈豌豆间作系统的生产力和资源利用研究. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [60] 柴继宽, 赵桂琴, 张丽睿, 等. 施氮及间作对燕麦干物质积累、分配和氮素吸收利用的影响. *中国草地学报*, 2023, 45(1): 88-98.
- [61] 杨金虎, 李立军, 张艳丽. 等. 科尔沁沙地燕麦间作箭筈豌豆与施肥对饲草养分累积、产量及水分利用的影响. *西北农业学报*, 2024, 33(1): 121-132.
- [62] 蔺芳. 紫花苜蓿/禾本科牧草间作提高其生产潜力和营养品质机理及家畜对其利用效果研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2019.
- [63] 钱欣, 臧华栋, 葛军勇, 等. 东北地区西部不同燕麦带状间作模式的产量及氮素吸收效应. *麦类作物学报*, 2017, 37(8): 1105-1111.
- [64] 冯晓敏. 燕麦 || 大豆、燕麦 || 绿豆系统生理生态机制研究. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [65] Cowell L E, Bremer E, Kessel C V. Yield and N₂ fixation of pea and lentil as affected by intercropping and N application. *Canadian Journal of Soil Science*, 1989, 69(2): 243-251.
- [66] Wysokiński A, Kuziemska B. The sources of nitrogen for yellow lupine and spring triticale in their intercropping. *Plant, Soil and Environment*, 2019, 65(3): 145-151.
- [67] Hauggaard-Nielsen H, Gooding M, Ambus P, et al. Pea-barley intercropping for efficient symbiotic N₂-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. *Field Crops Research*, 2009, 113(1): 64-71.
- [68] Nasar J, Shao Z, Arshad A, et al. The effect of maize-alfalfa intercropping on the physiological characteristics, nitrogen uptake and yield of maize. *Plant Biology*, 2020, 22(6): 1140-1149.
- [69] 许芳维. 不同密度玉米与苜蓿间作对玉米生产潜能的研究. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- [70] 刘均霞, 陆引罡, 远红伟, 等. 玉米/大豆间作条件下作物根系对氮素的吸收利用. *华北农学报*, 2008, 23(1): 173-175.
- [71] 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.
- [72] Raza M A, Feng L Y, Van der Werf W, et al. Optimum strip width increases dry matter, nutrient accumulation, and seed yield of intercrops under the relay intercropping system. *Food and Energy Security*, 2020, 9(2): e199.
- [73] Fu Z D, Li Z, Ping C, et al. Effects of maize-soybean relay intercropping on crop nutrient uptake and soil bacterial community. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(9): 2006-2018.
- [74] Wang G H, Sheng L C, Zhao D, et al. Allocation of nitrogen and

- carbon is regulated by nodulation and mycorrhizal networks in soybean/maize intercropping system. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1901-1918.
- [75] 李海. 苜蓿与禾本科作物间混作增产机制. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005.
- [76] Baker C M, Blamey F P C. Nitrogen fertilizer effects on yield and nitrogen uptake of sorghum and soybean, grown in sole cropping and intercropping systems. *Field Crops Research*, 1985, 12: 233-240.
- [77] Gebru H. A review on the comparative advantages of intercropping to mono-cropping system. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 2015, 5(9): 1-13.
- [78] Wang L Y, Hou B C, Zhang D S, et al. The niche complementarity driven by rhizosphere interactions enhances phosphorus-use efficiency in maize/alfalfa mixture. *Food and Energy Security*, 2020, 9(4): e252.
- [79] Chen B J W, Xu C, Liu M S, et al. Neighbourhood-dependent root distributions and the consequences on root separation in arid ecosystems. *Journal of Ecology*, 2020, 108(4): 1635-1648.
- [80] 汪雪, 刘晓静, 赵雅姣, 等. 根系分隔方式下紫花苜蓿/燕麦间作氮素利用及种间互馈特征研究. *草业学报*, 2021, 30(8): 73-85.
- [81] 王新宇, 高英志. 禾本科/豆科间作促进豆科共生固氮机理研究进展. *科学通报*, 2020, 65 (增 1): 142-149.
- [82] Pirhofer-Walzl K, Rasmussen J, Høgh-Jensen H, et al. Nitrogen transfer from forage legumes to nine neighbouring plants in a multi-species grassland. *Plant and Soil*, 2012, 350(1/2): 71-84.
- [83] Frankow-Lindberg B E, Dahlin A S. N₂ fixation, N transfer, and yield in grassland communities including a deep-rooted legume or non-legume species. *Plant and Soil*, 2013, 370(1/2): 567-581.

Research Advances on the Effects of Cereal/Legume Forage Intercropping on Forage Quality and Nitrogen Uptake

Hou Yue¹, Wang Hongliang¹, Li Jie², Li Chunjie¹, Chen Fanjun¹

(¹College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University/National Academy of Agriculture Green Development/State Key Laboratory of Nutrient Use and Management, Beijing 100193, China; ²Modern Agricultural Development Center of Hangjin Rear Banner, Bayannur 015400, Inner Mongolia, China)

Abstract The primary issue preventing the forage sector from growing further at the moment is the scarcity of high-quality fodder. Studies on the production of fodder cropping systems with high yield, high quality, and high nutrient usage efficiency have proliferated in recent years. When compared to solitary crops, it has been demonstrated that intercropping cereals and legumes improves fodder productivity, quality, and nutrient utilization efficiency. The benefits of forage intercropping, however, differed depending on the species mix. Therefore, we classified the cereal/legume forage intercropping systems into two types. One is the short forage intercropping, which is mainly about wheat forage crops, the other is tall/short forage intercropping, which is mainly about silage maize intercropping. The results showed that the short forage intercropping increased the yield, quality and nitrogen uptake of wheat grass forage, and increased the yield and quality of most legume forage; the yield and quality of tall/short forage intercropping were increased in one crop and decreased in the other crop. At the same time, the interspecific interaction mechanism of forage intercropping to improve yield, quality and nitrogen uptake and utilization was summarized in terms of the aboveground and belowground ecological niche compensation of intercropping. It is proposed to strengthen the research on forage interspecific intercropping mechanism and to achieve synergistic increase in yield and quality of cereal and legume forage by screening intercropping varieties and optimizing the arrangement of strips according to local conditions. We aimed to clarify the suitable species combinations and advantages for the forages intercropping with high yield, high quality, and high nutrient efficiency.

Key words Wheat forage crops; Silage maize; Legume forage; Interspecific interaction; Nitrogen uptake and utilization