

DOI: 10.11686/cyxb2024057

http://cyxb.magtech.com.cn

赵雅姣, 刘晓静, 蔺芳. 适宜于黄土高原半干旱区豆禾饲草间套作组合的筛选. 草业学报, 2025, 34(3): 97-110.

ZHAO Ya-jiao, LIU Xiao-jing, LIN Fang. Selection of intercropping combinations suitable for alfalfa and Poaceae forages in semi-arid areas of the Loess Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(3): 97-110.

适宜于黄土高原半干旱区豆禾饲草间套作组合的筛选

赵雅姣, 刘晓静*, 蔺芳

(甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃省草业工程实验室, 中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为筛选黄土高原半干旱区适宜种植的饲草间套作组合,于2016-2019年在甘肃省兰州市采用田间试验方法对紫花苜蓿与玉米、甜高粱、燕麦和小黑麦进行间套作,并探究间套作下饲草的生产特性及土地利用特征。研究发现,紫花苜蓿/玉米间套作和紫花苜蓿/甜高粱间套作下的干草产量显著大于紫花苜蓿单作;在2018和2019年时,紫花苜蓿/燕麦间套作和紫花苜蓿/小黑麦间套作下的干草产量和粗蛋白产量分别显著大于燕麦单作和小黑麦单作。同时,紫花苜蓿与甜高粱(玉米)间套作时的群体产量和群体粗蛋白产量明显大于其他种植模式。另外,玉米、燕麦(除种植第2年)和小黑麦在间套作下其粗蛋白含量较其单作显著升高;紫花苜蓿表现相反。4种间套作组合中,土地当量比、区域时间等价率和农田利用效率均大于1;4种禾本科牧草的侵占力均大于0,竞争比率均大于1。其中,紫花苜蓿/小黑麦间套作的土地当量比、区域时间等价率和农田利用效率最高。综上,在西北半干旱区进行饲草间套作种植,以生产性能为目标时,推荐紫花苜蓿/玉米(甜高粱)间套作;以土地利用为目标时,推荐紫花苜蓿/小黑麦间套作。

关键词:间套作;饲草;生产性能;土地利用;筛选

Selection of intercropping combinations suitable for alfalfa and Poaceae forages in semi-arid areas of the Loess Plateau

ZHAO Ya-jiao, LIU Xiao-jing*, LIN Fang

College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory Pratacultural Ecosystem, Ministry of Education, Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-US Center for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China

Abstract: The research aimed to screen suitable intercropping combinations of forage in semi-arid areas of the Loess Plateau. From 2016 to 2019, a field experiment was conducted in Lanzhou, Gansu province, involving intercropping alfalfa (*Medicago sativa*) with maize (*Zea mays*), sorghum (*Sorghum bicolor*), oat (*Avena sativa*) and triticale (*Triticale*). The experiment explored the production characteristics and land use characteristics of forage intercropping. It was found that the hay yield from alfalfa/maize intercropping and alfalfa/sorghum intercropping was significantly higher than that of monoculture alfalfa. In 2018 and 2019, hay yield and crude protein yield of alfalfa/oat intercropping and alfalfa/triticale intercropping were significantly higher than those of corresponding monocultures of gramineous forages. Also, group dry forage yield and crude protein yield of alfalfa/sorghum (maize) was higher than other planting patterns, and the crude protein yields of maize, oat (except the second year of planting) and triticale

收稿日期:2024-02-26;改回日期:2024-06-25

基金项目:国家自然科学基金(32171674),甘肃省重点研发计划项目(2020YF8 NA130)和甘肃省高校青年博士支持项目(2024QB-076)资助。

作者简介:赵雅姣(1990-),女,江苏铜山人,讲师,博士。E-mail: zhaoyj@gsau.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: liuxj@gsau.edu.cn

was significantly increased in intercropping systems compared with their monoculture; alfalfa exhibited the opposite pattern. In the four intercropping combinations, the land equivalent ratio, regional time equivalence rate and land utilization efficiency were all greater than 1; the aggressivity of the four gramineous forages was greater than 0, and the competition ratio was greater than 1 in each case. Among the studied intercropping combinations, the land equivalent ratio, regional time equivalence ratio and land utilization efficiency were the highest in alfalfa/triticale intercropping systems. In summary, to optimize yield, it is recommended to adopt alfalfa/maize and alfalfa/sorghum intercroppings; to optimize land use, it is recommended to adopt alfalfa/triticale intercropping.

Key words: intercropping; forage; production performance; land use; selection

黄土高原半干旱区日照充足(2000~3000 h),但年均降水短缺(300~400 mm),水分和光照资源的不平衡限制该地区作物的生长。通过间作套种(间套作)的种植方式可以充分利用作物时空生态位的互补以及生育期和养分需求的差异性,达到光、热、水和养分等资源高效利用的目的,是当地着力推广的种植技术^[1]。研究表明,间套作表现出单作无法比拟的优势,如增加生物多样性^[2],改善土地生产能力^[3],提高农田光温水利用效率^[4],同时具有明显的生物和经济产量优势^[5],能够在一定程度上实现用地养地相结合,是保持农业生产可持续发展的重要技术途径^[6]。在众多间套作组合中,豆科与禾本科作物的间套作尤为显著,豆科作物可通过根瘤固氮作用,促进禾本科作物的生长和生产力提升^[7]。因此,在黄土高原半干旱区进行豆科和禾本科作物的间套作具有更大的潜力。

间套作的突出特征是具有较高的产量和土地利用效率,它们是衡量间套作效应的重要指标。土地当量比是衡量产量和土地利用效率的重要指标^[8],研究认为多数间套作能够提高土地当量比,但不同地区、不同组合、不同带宽等均会导致土地当量比的变化,如花生(*Arachis hypogaea*)/谷子(*Setaria italica*)间作^[9]、豌豆(*Pisum sativum*)/玉米(*Zea mays*)间作^[10]、大豆(*Glycine max*)/玉米间作^[11]、花生/玉米间作^[12]等均提高了禾本科作物的产量,而豆科作物产量则不同程度下降,但间作模式下的土地当量比均有提高,表现出较强的间作优势。间套作中,不同作物间具有促进和竞争作用,即当一种作物对光照、水分和养分等资源竞争能力强于相邻作物时,处于竞争优势地位,而另一方处于竞争劣势地位。种间互补和竞争作用是间套作优势产生的重要决定因素,其中种间侵占力和竞争比率均能评价间套作系统中不同作物间的竞争强度^[13]。研究表明,大部分豆禾间套作系统中禾本科作物相对于豆科作物均表现出竞争优势^[14]。赵建华等^[15]对玉米/大豆间作进行研究,结果表明玉米竞争比率强于大豆;任家兵等^[16]在小麦(*Triticum aestivum*)/蚕豆(*Vicia faba*)间作中发现,小麦较蚕豆表现出明显的竞争优势和互利效应;Chen等^[17]研究发现大豆/玉米套作下,玉米具有更高的侵占力和竞争比率。因此,探究间套作系统中土地利用效率及植物间的竞争地位,可进一步了解间套作中的稳定性和优势性。

黄土高原半干旱区是我国农牧并重的地区,但因其耕地面积有限,人工饲草生产不能满足需求,通过豆科与禾本科饲草的间套作,可以有效提升生产潜力及土地利用效率^[15]。合理的豆禾饲草间套作组合可优化“时空效应”和“补偿效应”,促进饲草的增产增收^[18]。因此,如何在黄土高原半干旱区筛选出最适宜的豆科与禾本科饲草间套作组合以最大化地提高生产性能和土地利用效率,已成为当地急需解决的问题。为解决这一问题,本研究对黄土高原半干旱区主要种植的豆科饲草紫花苜蓿(*Medicago sativa*)与4种禾本科饲草玉米、甜高粱(*Sorghum dochna*)、燕麦(*Avena sativa*)和小黑麦(*Triticale*)进行间套作,通过对各间套作组合的生产性能、土地利用效率及竞争关系进行系统研究,旨在筛选出在黄土高原半干旱区最适宜的豆禾饲草间套作组合,以期为黄土高原半干旱区饲草间套作的增产效应和技术优化提供科学依据,并最终实现农业生产的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

试验于甘肃省兰州市进行(东经103°40',北纬36°03',海拔1525 m),该地处于西北半干旱区,为温带大陆性气候,年平均气温10.3℃,多年平均降水量360 mm,平均日照时数2600 h,无霜期180 d。当地土壤主要为灰钙

土, 试验种植前土壤 pH 为 8.23, 有机质含量为 $12.23 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮含量为 $0.81 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱解氮含量为 $81.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷含量为 $15.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾含量为 $118.12 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 供试材料

紫花苜蓿、玉米、甜高粱、燕麦和小黑麦的选用品种及来源如下(表1)。

表1 供试品种(系)来源

Table 1 Tested cultivars (lines) and origins

材料 Material	品种(系) Cultivar (line)	生育期 Growing period (d)	来源 Origin
紫花苜蓿 Alfalfa	LW6010	多年生 Perennial	甘肃农业大学草业学院 Gansu Agricultural University, College of Prataculture
玉米 Maize	KD-3	120	河南省农业科学院 Henan Academy of Agricultural Sciences
甜高粱 Sorghum	海狮 Sea lion	125	北京克劳沃 Beijing Clover Company
燕麦 Oat	海威 Haywire	100	北京克劳沃 Beijing Clover Company
小黑麦 Triticale	中饲 1048 Zhongsi 1048	236	河北省农业科学院 Hebei Academy of Agricultural Sciences
根瘤菌 <i>Bradyrhizobium japonicum</i>	中华根瘤菌 12531 <i>Sinorhizobium meliloti</i> 12531	—	甘肃农业大学草业学院 Gansu Agricultural University, College of Prataculture

1.3 试验设计

试验为 2017—2019 年连续 3 年的田间小区试验, 采用完全随机区组设计, 设置紫花苜蓿/玉米间套作(alfalfa/maize intercropping, A/M)、紫花苜蓿/甜高粱间套作(alfalfa/sorghum intercropping, A/S)、紫花苜蓿/燕麦间套作(alfalfa/oat intercropping, A/O)、紫花苜蓿/小黑麦间套作(alfalfa/triticale intercropping, A/T)4 种组合以及紫花苜蓿单作(monoculture alfalfa, MA)、玉米单作(monoculture maize, MM)、甜高粱单作(monoculture sorghum, MO)、燕麦单作(monoculture oat, MO)和小黑麦单作(monoculture triticale, MT)5 种单作, 每种种植模式重复 3 次, 共 27 个小区, 每个小区面积为 $4.8 \text{ m}\times 5.0 \text{ m}=24.0 \text{ m}^2$, 每个小区之间用 70 cm 小田埂分开, 种植总面积为 648 m^2 , 试验区域总面积为 850 m^2 。各处理种植方式中, 紫花苜蓿的播量为 $15 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 条播, 行距 20 cm; 玉米和甜高粱的播量为 $60606 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$, 穴播, 行距 40 cm, 株距 40 cm; 燕麦的播量为 $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 条播, 行距 20 cm; 小黑麦的播量为 $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 条播, 行距 20 cm。4 种间套作模式中的紫花苜蓿和禾本科牧草的行数比采用的是生产上较为常见的比例, 即: 紫花苜蓿与玉米(或甜高粱)的行数比例为 4:2(4 行紫花苜蓿与 2 行玉米或甜高粱相邻间套作), 紫花苜蓿与小黑麦(或燕麦)的行数比例为 4:4(4 行紫花苜蓿与 4 行燕麦或小黑麦相邻间套作), 紫花苜蓿、玉米、甜高粱、燕麦和小黑麦在间套作中其种植面积均占各间套作组合中总面积的 50%。紫花苜蓿与玉米及甜高粱间套作的带宽为 1.6 m, 紫花苜蓿和小黑麦及燕麦间套作时的带宽为 1.6 m(图 1)。

根瘤菌液浸泡紫花苜蓿种子(OD_{600} 为 0.63~0.64, 浸泡 15 min)后于 2016 年 9 月 10 日进行种植, 4 种禾本科牧草种植时间见表 2。各小区的磷肥和钾肥于紫花苜蓿播种前及返青前一次性施入, 磷肥(P_2O_5)施量为 $105 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、钾肥(K_2O)施量为 $90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 田间常规管理。紫花苜蓿在初花期进行刈割, 一年刈割 5 茬; 玉米在吐丝期进行刈割, 甜高粱、燕麦和小黑麦在抽穗期进行刈割, 一年刈割 1 茬。紫花苜蓿及禾本科牧草种植及刈割时间见表 2。

1.4 测定指标

1.4.1 产量 将待测植株齐地面进行刈割, 并将其置于自然条件下风干, 待水分含量降至 20% 以下时, 称取其重量, 后根据种植面积计算出干草产量, 单位为 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。群体干草产量: 各小区内所有牧草混合的综合产量, 单位为 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。粗蛋白产量: 紫花苜蓿干草产量 \times 紫花苜蓿粗蛋白含量 \times 紫花苜蓿面积比率 $+$ 禾本科牧草干草产量 \times 禾本科牧草粗蛋白含量 \times 禾本科牧草面积比率^[19]。

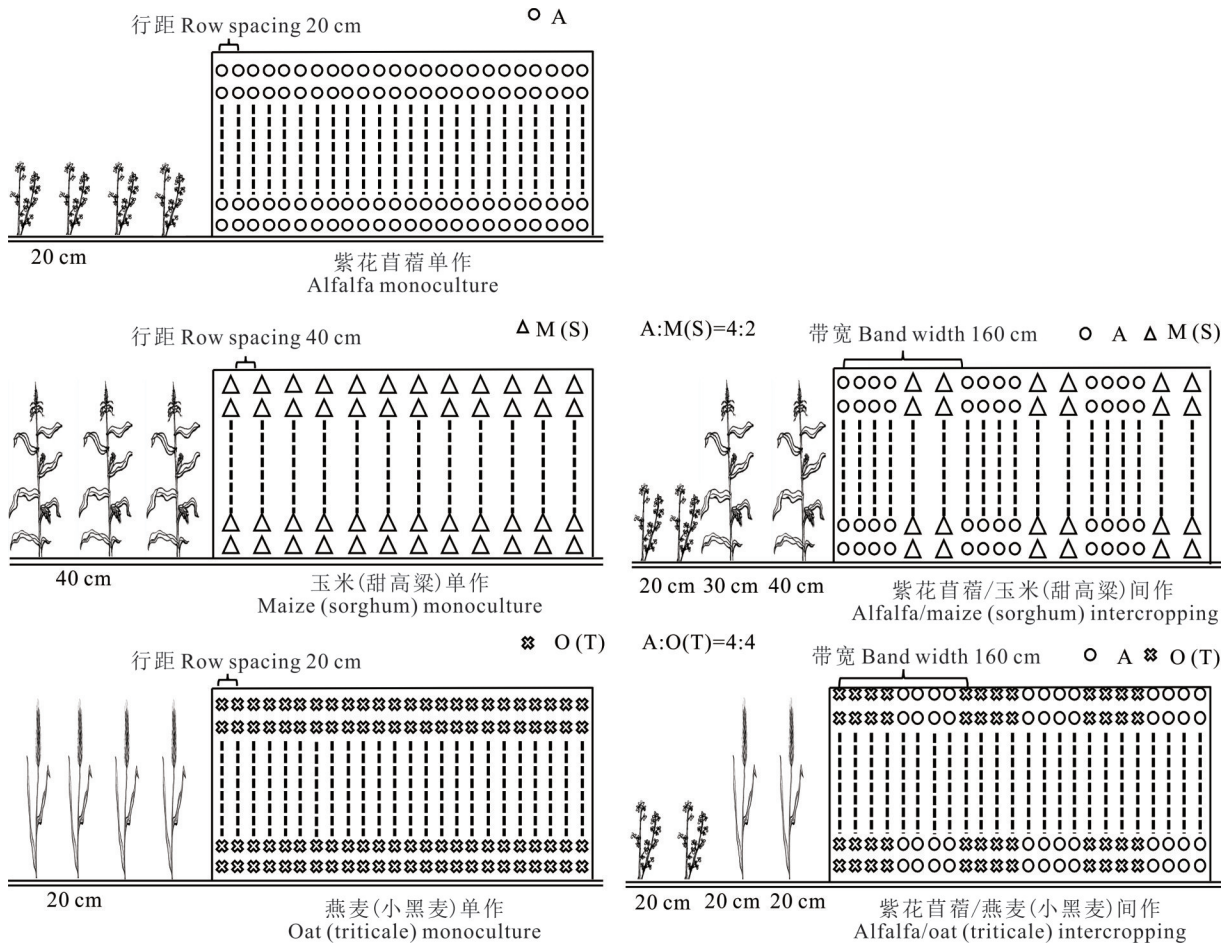


图1 种植设计

Fig. 1 Planting design

A: 紫花苜蓿 Alfalfa; M: 玉米 Maize; S: 甜高粱 Sorghum; O: 燕麦 Oat; T: 小黑麦 Triticale. 下同 The same below.

表2 不同年份各牧草的种植及刈割时间(年-月-日)

Table 2 Planting and mowing times of different pastures in different years (Year-month-day)

年份 Year	作物类型 Cropping system	种植日期 Planting date	第1次刈割 First mowing	第2次刈割 Second mowing	第3次刈割 Third mowing	第4次刈割 Fourth mowing	第5次刈割 Fifth mowing
2017	紫花苜蓿 Alfalfa	2016-9-10	2017-5-15	2017-6-20	2017-7-20	2017-8-26	2017-10-8
	玉米 Maize	2017-5-15	—	—	—	2017-8-26	—
	甜高粱 Sorghum	2017-5-15	—	—	—	2017-8-26	—
	燕麦 Oat	2017-3-23	—	2017-6-20	—	—	—
	小黑麦 Triticale	2017-3-23	—	2017-6-20	—	—	—
2018	紫花苜蓿 Alfalfa	—	2018-5-12	2018-6-12	2018-7-12	2018-8-20	2018-10-5
	玉米 Maize	2018-5-8	—	—	—	2018-8-20	—
	甜高粱 Sorghum	2018-5-8	—	—	—	2018-8-20	—
	燕麦 Oat	2018-3-15	—	2018-6-12	—	—	—
	小黑麦 Triticale	2018-3-15	—	2018-6-12	—	—	—
2019	紫花苜蓿 Alfalfa	—	2019-5-8	2019-6-10	2019-7-8	2019-8-13	2019-9-26
	玉米 Maize	2019-5-2	—	—	—	2019-8-13	—
	甜高粱 Sorghum	2019-5-2	—	—	—	2019-8-13	—
	燕麦 Oat	2019-3-12	—	2019-6-10	—	—	—
	小黑麦 Triticale	2019-3-12	—	2018-6-12	—	—	—

1.4.2 营养品质 粗蛋白(crude protein, CP)含量采用凯氏定氮法进行测定;酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)、中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)含量采用滤袋技术改进的范氏酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维法进行测定^[20]。

1.4.3 土地当量比(land equivalent ratio, LER) 可衡量间套作中的土地利用优势^[21], LER的计算公式为:

$$LER = PLER_a + PLER_g = \frac{Y_{ia}}{Y_{ma}} + \frac{Y_{ig}}{Y_{mg}}$$

式中: $PLER_a$ 和 $PLER_g$ 分别代表紫花苜蓿和禾本科牧草在间套作下的偏土地当量比; Y_{ia} 和 Y_{ig} 分别代表间套作下紫花苜蓿和禾本科牧草的全年干草产量; Y_{ma} 和 Y_{mg} 分别代表单作下紫花苜蓿和禾本科牧草的全年干草产量。当 $LER > 1$, 表示相同的土地面积上间套作的产量高于单作, 具有间套作优势; 当 $LER < 1$, 表示间套作体系降低了资源利用效率, 具有间套作劣势; LER 的值越大, 产量优势越明显。

1.4.4 侵占力(aggressivity, A) 可用来表征禾本科作物相对于紫花苜蓿的竞争能力^[21], A的计算公式为:

$$A = \frac{Y_{ig}}{Y_{mg} \times Z_g} - \frac{Y_{ia}}{Y_{ma} \times Z_a}$$

式中: Z_a 和 Z_g 分别代表紫花苜蓿和禾本科牧草间套作时其面积所占的比例。当 $A > 0$ 时, 表示禾本科牧草竞争能力强于紫花苜蓿; 若 $A < 0$ 时, 表示禾本科牧草竞争能力弱于紫花苜蓿; 系数绝对值愈大, 竞争能力愈强。

1.4.5 竞争比率(competitive ratio, CR) 可以用来评定间套作系统中不同物种的竞争能力大小。CR弥补了 LER 中未能考虑种植比例的缺陷, 能够较好地衡量物种竞争能力, 优于侵占力和相对拥挤系数^[21], CR的计算公式如下:

$$CR = \frac{PLER_g}{PLER_a} \times \frac{Z_a}{Z_g}$$

式中: 当 $CR > 1$ 时, 表明禾本科牧草的竞争能力强于紫花苜蓿, 当 $CR < 1$ 时, 则反之。

1.4.6 区域时间等价率(regional time equivalence rate, ATER) 是在土地当量比(LER)的基础上, 将牧草的生长周期纳入考量^[21]。当 $ATER > 1$ 时, 表示间套作较单作具有土地区域时间资源利用优势; 当 $ATER < 1$ 时, 表示劣势。

$$ATER = \frac{(\frac{Y_{ia}}{Y_{ma}} \times T_a) + (\frac{Y_{ig}}{Y_{mg}} \times T_g)}{T}$$

式中: T 、 T_a 和 T_g 分别表示间套作系统生长天数、紫花苜蓿生长天数、禾本科牧草生长天数。

1.4.7 农田利用效率(land utilization efficiency, LUE) 指在一定的农业生产条件下, 单位面积的农田在单位时间内所能产生的农业产出的数量和质量, 用于评价农田的综合利用效率^[21]。当 $LUE > 1$ 时, 表示间套作下的农田利用效率高于单作; 当 $LUE < 1$ 时, 则相反。

$$LUE = \frac{LER + ATER}{2}$$

1.5 数据分析

使用 Excel 2007 进行试验数据整理及作图, 采用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析(ANOVA), 采用 Origin 进行图形的制作。

2 结果与分析

2.1 间套作对产量的影响

2.1.1 干草产量 2017—2019年, 紫花苜蓿/玉米间套作和紫花苜蓿/甜高粱间套作下干草产量较紫花苜蓿单作均极显著提高了 44.39% 和 65.45%, 但极显著低于玉米单作和甜高粱单作($P < 0.01$, 图 2)。紫花苜蓿/燕麦间套作在不同种植年份下的干草产量均极显著高于燕麦单作, 但极显著低于紫花苜蓿单作($P < 0.01$)。紫花苜蓿/小黑麦间套作在 2018 和 2019 年干草产量均分别显著大于小黑麦单作($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。3 年间, 紫花

苜蓿/燕麦间套作下的干草产量较燕麦单作平均提高了28.85%，紫花苜蓿/小黑麦间套作干草产量较小黑麦单作平均提高了14.51%。

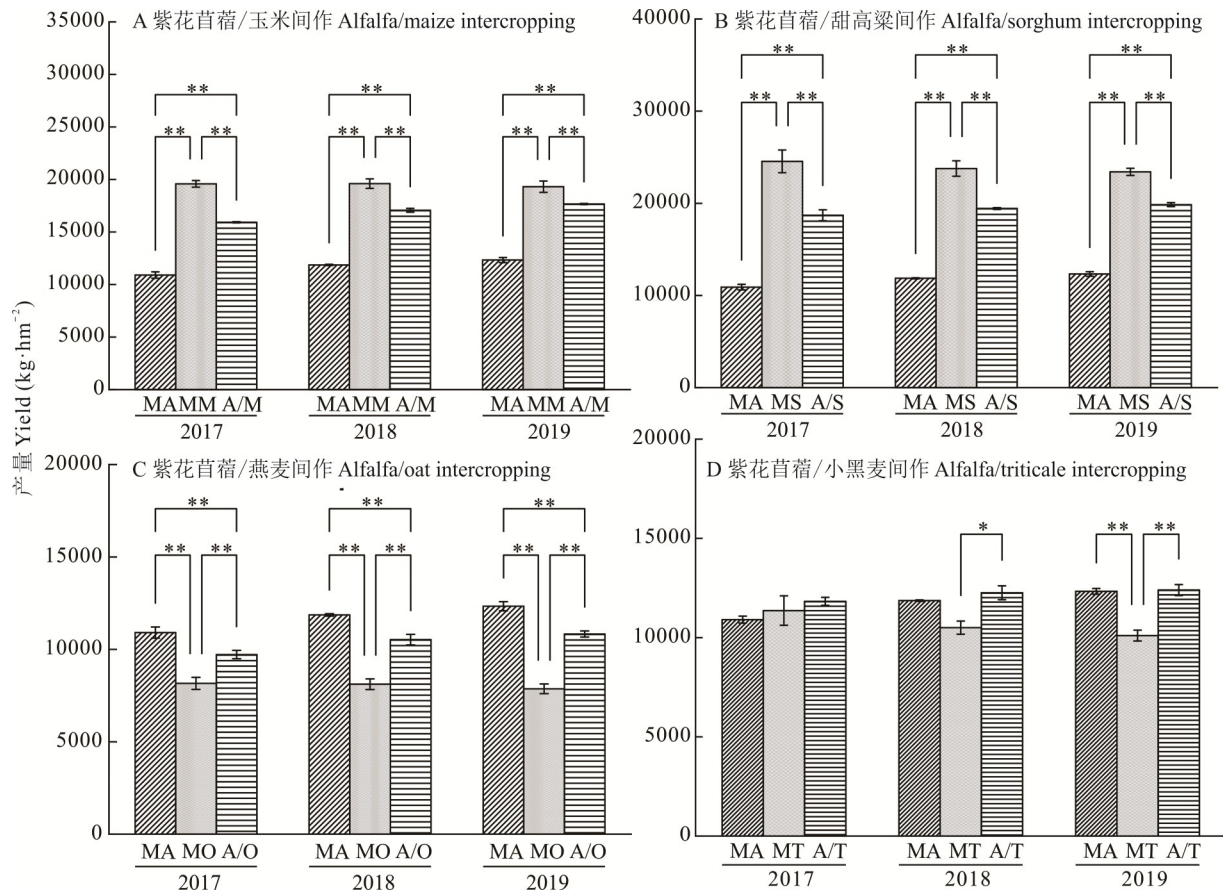


图2 不同种植模式的群体干草产量

Fig. 2 Group dry grass yield under different planting patterns

A/M, A/S, A/O, A/T, MA, MM, MS, MO 和 MT 分别代表紫花苜蓿/玉米间套作组合、紫花苜蓿/甜高粱间套作组合、紫花苜蓿/燕麦间套作组合、紫花苜蓿/小黑麦间套作组合、紫花苜蓿单作、玉米单作、甜高粱单作、燕麦单作和小黑麦单作。*代表差异显著 ($P < 0.05$), **代表差异极显著 ($P < 0.01$)。下同。A/M, A/S, A/O, A/T, MA, MM, MS, MO and MT represented alfalfa/maize intercropping, alfalfa/sorghum intercropping, alfalfa/oat intercropping and alfalfa/triticale intercropping, monoculture alfalfa, monoculture maize, monoculture sorghum, monoculture oat and monoculture triticale. * meant significant difference at 0.05 level, ** meant extremely significant difference at 0.01 level. The same below.

2.1.2 粗蛋白产量 由图3可知,紫花苜蓿/玉米间套作在种植第1年时,其粗蛋白产量显著高于紫花苜蓿单作,种植第2和第3年时其粗蛋白产量显著高于玉米单作 ($P < 0.05$)。紫花苜蓿/甜高粱间套作在种植前两年其粗蛋白产量与紫花苜蓿单作和甜高粱单作无显著差异,但在种植第3年其粗蛋白产量显著高于甜高粱单作 ($P < 0.05$)。紫花苜蓿/燕麦间套作粗蛋白产量在3年中均表现为显著低于紫花苜蓿单作,但显著高于燕麦单作 ($P < 0.05$)。紫花苜蓿/小黑麦间套作下其粗蛋白产量在3年种植中均显著高于小黑麦单作 ($P < 0.05$)。紫花苜蓿/玉米间套作、紫花苜蓿/甜高粱间套作、紫花苜蓿/燕麦间套作、紫花苜蓿/小黑麦间套作粗蛋白产量分别较玉米单作、甜高粱单作、燕麦单作和小黑麦单作平均提高了10.91%、5.54%、50.66%和31.69%。

2.2 间套作对营养品质的影响

2.2.1 粗蛋白含量 由表3可知,紫花苜蓿在间套作下其粗蛋白含量较其单作均极显著下降 ($P < 0.01$);玉米、燕麦(除种植第2年)和小黑麦在间套作下其粗蛋白含量较其单作显著升高 ($P < 0.05$);而甜高粱的粗蛋白含量在间套作和单作下差异不显著。

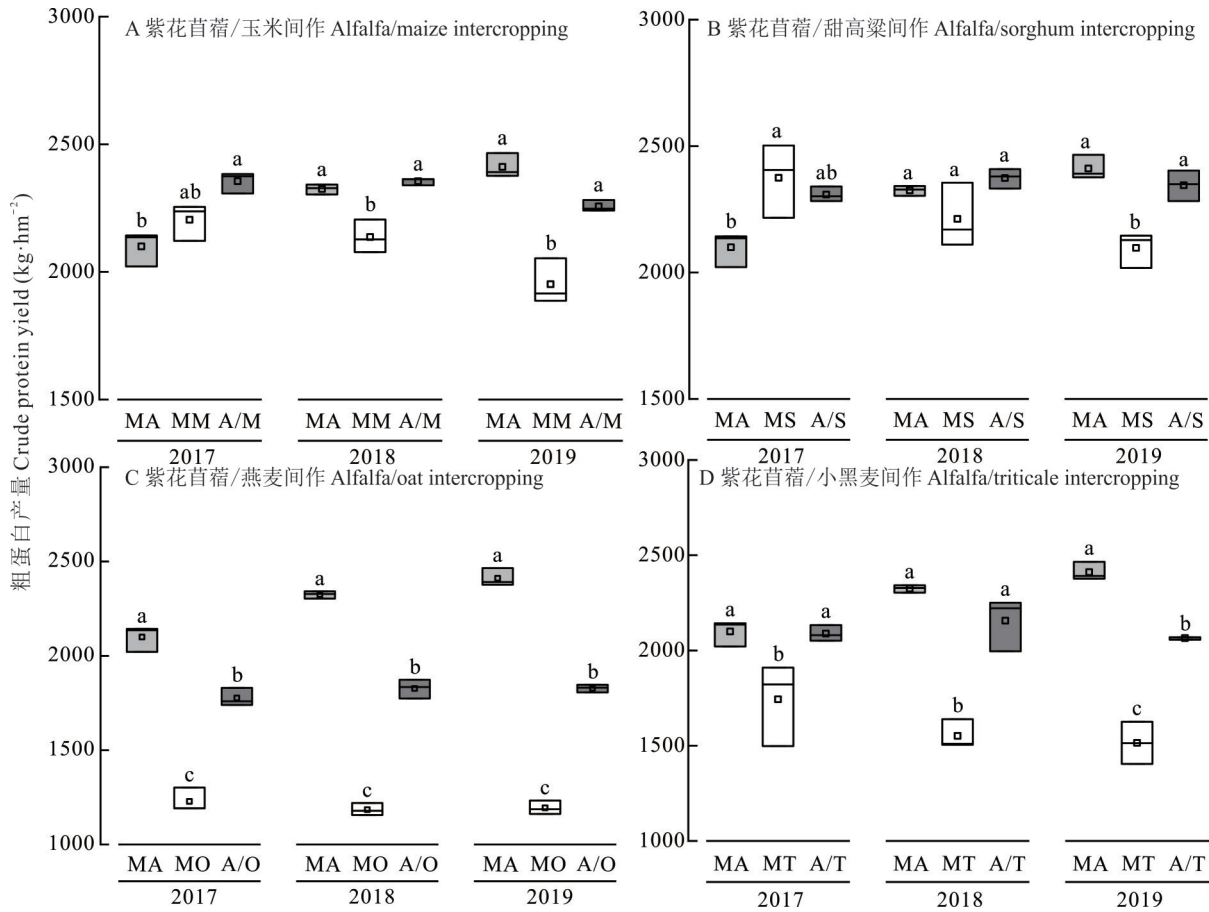


图 3 不同种植模式的群体粗蛋白产量

Fig. 3 Group crude protein yield under different planting patterns

不同字母表示同一年份下差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Different letters meant significant difference at 0.05 level in the same year. The same below.

表 3 不同种植模式下牧草的粗蛋白含量

Table 3 The crude protein content under different planting patterns (%)

年份 Year	组合 Combinations	紫花苜蓿/玉米间套作 Alfalfa/maize intercropping		紫花苜蓿/甜高粱间套作 Alfalfa/sorghum intercropping		紫花苜蓿/燕麦间套作 Alfalfa/oat intercropping		紫花苜蓿/小黑麦间套作 Alfalfa/triticale intercropping			
		种植模式 Planting patterns		紫花苜蓿 Alfalfa	玉米 Maize	紫花苜蓿 Alfalfa	甜高粱 Sorghum	紫花苜蓿 Alfalfa	燕麦 Oat	紫花苜蓿 Alfalfa	小黑麦 Triticale
		Alfalfa	Maize	Alfalfa	Sorghum	Alfalfa	Oat	Alfalfa	Triticale		
2017	单作 Monoculture	18.35±0.63	11.25±0.45	18.35±0.63	9.67±0.40	19.83±0.38	15.06±0.73	19.83±0.38	15.33±0.38		
	间套作 Intercropping	16.29±0.31	12.27±0.83	16.02±0.62	10.10±0.52	18.40±0.39	16.20±0.85	18.16±0.44	16.51±0.48		
	<i>P</i>	**	*	**	ns	**	*	**	*		
2018	单作 Monoculture	19.69±0.95	10.90±0.53	19.69±0.95	9.30±0.54	20.23±0.81	14.78±0.37	20.23±0.81	14.78±0.82		
	间套作 Intercropping	17.35±0.75	11.58±0.48	16.92±0.19	9.88±0.53	18.25±0.34	15.29±0.71	18.15±0.38	16.04±1.19		
	<i>P</i>	**	*	**	ns	**	ns	**	*		
2019	单作 Monoculture	19.56±0.63	10.11±0.45	19.56±0.63	8.96±0.50	19.93±0.65	15.05±0.27	19.93±0.65	15.24±0.34		
	间套作 Intercropping	17.74±0.56	10.83±0.52	17.51±0.77	9.34±0.33	18.44±0.50	15.96±0.62	18.24±0.32	16.16±0.83		
	<i>P</i>	**	*	**	ns	**	*	**	*		

注: *代表差异显著 ($P < 0.05$), **代表差异极显著 ($P < 0.01$), ns 代表差异不显著。下同。

Note: * meant significant difference at 0.05 level, ** meant extremely significant difference at 0.01 level. ns meant no significant difference. The same below.

2.2.2 酸性/中性洗涤纤维含量 由表 4 和表 5 可知,紫花苜蓿和玉米及甜高粱在 2017 年间套作时,紫花苜蓿 ADF 和 NDF 含量均较其单作显著增加;而 2019 年紫花苜蓿和燕麦间套作时,燕麦 ADF 和 NDF 含量均较其单作显著降低 ($P < 0.05$)。2019 年时,间套作小黑麦的 ADF 含量较其单作也显著降低 ($P < 0.05$)。

表4 不同种植模式下牧草的酸性洗涤纤维含量

Table 4 The acid detergent fiber content under different planting patterns (%)

年份 Year	组合 Combinations	紫花苜蓿/玉米间套作 Alfalfa/maize intercropping		紫花苜蓿/甜高粱间套作 Alfalfa/sorghum intercropping		紫花苜蓿/燕麦间套作 Alfalfa/oat intercropping		紫花苜蓿/小黑麦间套作 Alfalfa/triticale intercropping	
	种植模式 Planting patterns	紫花苜蓿 Alfalfa	玉米 Maize	紫花苜蓿 Alfalfa	甜高粱 Sorghum	紫花苜蓿 Alfalfa	燕麦 Oat	紫花苜蓿 Alfalfa	小黑麦 Triticale
2017	单作 Monoculture	34.23±0.49	44.69±1.53	34.23±0.49	44.14±2.14	32.14±1.88	38.23±1.86	32.14±1.88	37.98±1.38
	间套作 Intercropping	36.21±0.65	42.65±1.97	36.54±2.36	42.60±2.35	33.41±2.19	37.39±1.68	34.33±2.38	36.72±0.97
	<i>P</i>	*	*	*	ns	ns	ns	ns	ns
2018	单作 Monoculture	33.38±2.15	44.82±1.48	33.38±2.15	45.55±3.62	32.25±1.93	39.42±1.77	32.25±1.93	38.33±1.67
	间套作 Intercropping	34.98±0.59	43.75±3.61	35.64±1.33	44.33±4.17	33.18±1.88	36.30±1.85	33.44±1.75	36.49±1.71
	<i>P</i>	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns
2019	单作 Monoculture	32.10±2.00	45.81±3.48	32.10±2.00	47.26±3.70	31.40±1.60	38.36±1.69	31.40±1.60	36.64±1.36
	间套作 Intercropping	33.27±2.07	43.20±3.59	33.79±5.47	45.69±1.09	33.63±1.31	35.62±1.35	33.37±2.15	34.57±1.71
	<i>P</i>	ns	*	ns	ns	*	*	ns	*

表5 不同种植模式下牧草中性洗涤纤维含量

Table 5 The neutral detergent fiber content under different planting patterns (%)

年份 Year	组合 Combinations	紫花苜蓿/玉米间套作 Alfalfa/maize intercropping		紫花苜蓿/甜高粱间套作 Alfalfa/sorghum intercropping		紫花苜蓿/燕麦间套作 Alfalfa/oat intercropping		紫花苜蓿/小黑麦间套作 Alfalfa/triticale intercropping	
	种植模式 Planting patterns	紫花苜蓿 Alfalfa	玉米 Maize	紫花苜蓿 Alfalfa	甜高粱 Sorghum	紫花苜蓿 Alfalfa	燕麦 Oat	紫花苜蓿 Alfalfa	小黑麦 Triticale
2017	单作 Monoculture	45.25±3.47	62.49±2.42	45.25±3.47	64.41±4.20	42.43±1.36	49.36±1.86	42.43±1.36	46.55±3.67
	间套作 Intercropping	48.39±1.73	60.49±1.11	48.33±2.01	61.58±4.66	43.68±0.43	47.54±1.37	43.40±1.56	45.61±1.44
	<i>P</i>	*	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
2018	单作 Monoculture	43.43±4.08	63.32±4.01	43.43±4.08	65.32±4.04	41.48±2.04	48.60±1.94	41.48±2.04	47.33±1.72
	间套作 Intercropping	45.06±3.17	60.45±4.05	46.35±2.18	63.27±4.14	42.40±1.62	46.58±1.81	42.45±1.65	45.37±2.03
	<i>P</i>	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
2019	单作 Monoculture	42.65±2.59	63.76±4.79	42.65±2.59	67.31±3.60	41.32±1.73	49.40±1.67	41.32±1.73	47.63±2.91
	间套作 Intercropping	45.32±3.94	60.65±4.23	45.54±2.58	63.95±2.47	42.36±1.67	47.26±2.00	42.53±1.27	45.79±3.00
	<i>P</i>	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns

2.3 间套作对土地生产力的影响

2.3.1 土地当量比 由表6可知,3年试验期间,紫花苜蓿在4种植模式下的 $PLER_a$ 均小于0.5,而4种禾本科牧草的 $PLER_g$ 均大于0.5。4种间套作模式中, LER 均大于1,并且 LER 在紫花苜蓿/燕麦间套作和紫花苜蓿/小黑麦间套作下大于紫花苜蓿/玉米间套作和紫花苜蓿/甜高粱间套作。

2.3.2 区域时间等价率和农田利用效率 4种植模式在3年中的区域时间等价率和农田利用效率均大于1,其中紫花苜蓿/小黑麦间套作的区域时间等价率和农田利用效率最高(图4)。

2.3.3 侵占力和竞争比率 4种禾本科牧草的侵占力均大于0,竞争比率均大于1(图5)。在2017年时,紫花苜蓿/小黑麦间套作的侵占力显著小于其他间套作组合($P<0.05$);2018年时,4种间套作组合差异不显著;2019年时,紫花苜蓿/燕麦间套作侵占力和竞争比率显著大于紫花苜蓿/小黑麦间套作,紫花苜蓿/小黑麦间套作显著大于紫花苜蓿/玉米间套作和紫花苜蓿/甜高粱间套作($P<0.05$)。

表 6 4 种间套作模式的土地当量比评价

Table 6 Land equivalent ratio (LER) evaluation of 4 patterns of intercropping systems

年份 Year	种植模式 Planting patterns	紫花苜蓿偏土地当量比 Partial land-equivalent ratio of alfalfa ($PLER_a$)	禾本科牧草偏土地当量比 Partial land-equivalent ratio of gramineae forage ($PLER_g$)	土地当量比 Land equivalent ratio (LER)
2017	A/M	0.44±0.02b	0.57±0.01a	1.01±0.02a
	A/S	0.44±0.02b	0.57±0.05a	1.01±0.06a
	A/O	0.45±0.01b	0.59±0.03a	1.04±0.02a
	A/T	0.48±0.01a	0.58±0.05a	1.06±0.06a
2018	A/M	0.46±0.00bc	0.59±0.02a	1.05±0.02a
	A/S	0.46±0.01c	0.59±0.03a	1.05±0.02a
	A/O	0.47±0.01b	0.62±0.05a	1.08±0.04a
	A/T	0.48±0.00a	0.63±0.03a	1.11±0.04a
2019	A/M	0.46±0.01a	0.62±0.02a	1.08±0.02a
	A/S	0.46±0.01a	0.61±0.00a	1.07±0.02a
	A/O	0.45±0.01a	0.66±0.05a	1.12±0.05a
	A/T	0.47±0.01a	0.66±0.04a	1.12±0.04a

注：不同字母表示同一年份下差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters meant significant difference at 0.05 level in the same year.

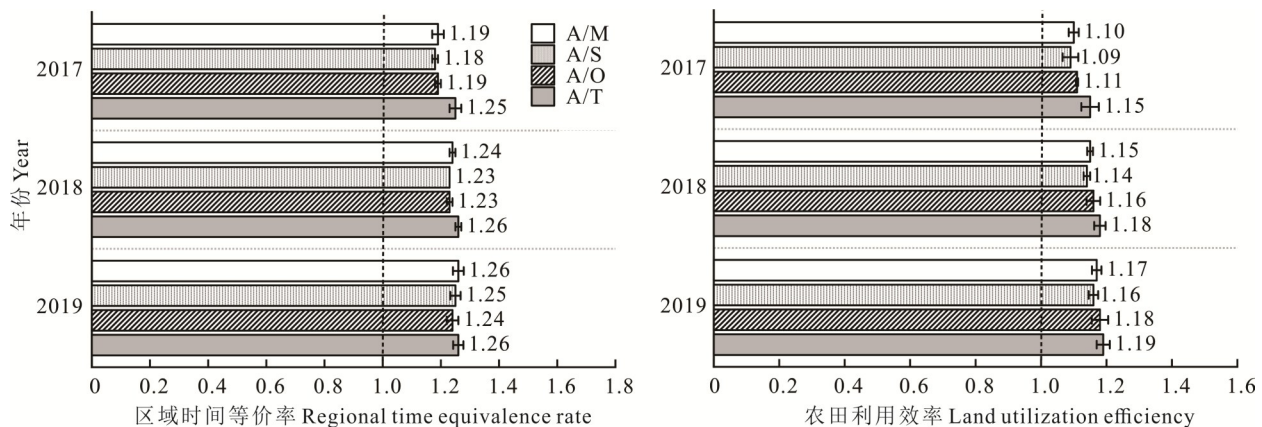


图 4 不同种植模式下的区域时间等价率和农田利用效率

Fig. 4 Regional time equivalence rate (ATER) and land utilization efficiency (LUE) for different planting patterns

3 讨论

间套作中作物的生育期、株型及生理生态等特性不同,其空间生态位也不同,进而对光、热、水、肥的竞争与利用不同,最终表现出不同的间套作优势^[22]。有研究认为多年生豆科饲草与一年生禾本科饲草间套作具有更高和更稳定的产量^[23]。本研究中,甜高粱单作时群体产量具有最大值($23.91 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),其次为玉米单作($19.50 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),这来源于甜高粱和玉米本身具有较高的生物量。这些结果表明,甜高粱和玉米在单作条件下的生长优势明显。具体而言,饲用玉米和饲用甜高粱的干草产量分别是紫花苜蓿干草产量的1.67和2.05倍,是燕麦干草产量的2.42和2.97倍,是小黑麦干草产量的1.83和2.25倍,这一差异凸显了玉米和甜高粱在生物量积累上的优势。在间套作模式中,紫花苜蓿/甜高粱间套作($19.33 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)和紫花苜蓿/玉米间套作($16.89 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)也显示出较高的干草产量,这可能是由于甜高粱和玉米在与紫花苜蓿间套作时能够充分利用资源并发挥其高生物量优势。相比之下,紫花苜蓿/燕麦间套作($10.36 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)和紫花苜蓿/小黑麦间套作($12.16 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)的干草产量相对较

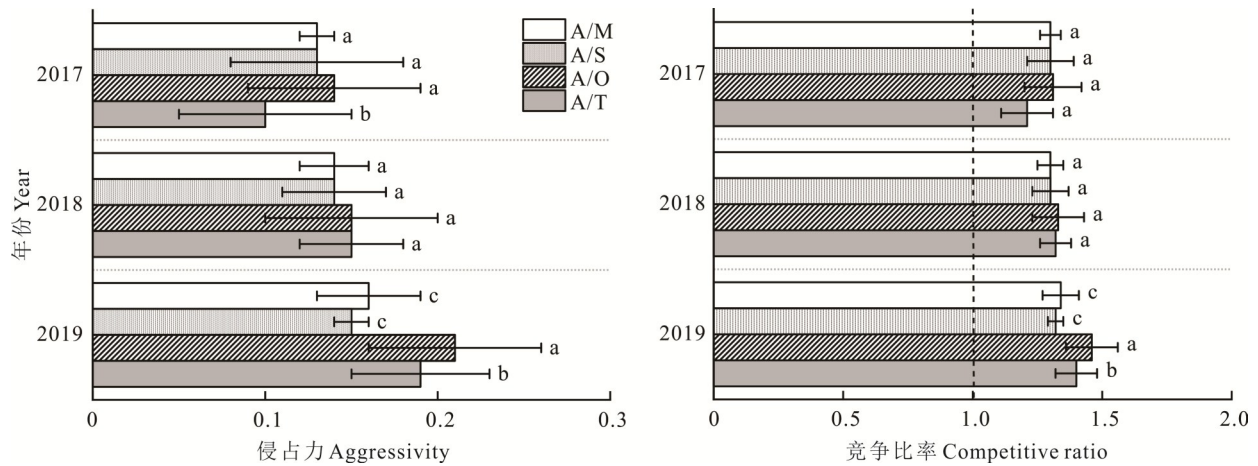


图5 不同种植模式下的侵占力和竞争比率

Fig. 5 Aggressivity (A) and competitive ratio (CR) for different planting patterns

低,可能是由于燕麦和小黑麦的生物量较低,限制了整体产量。这些结果表明,在黄土高原半干旱地区,甜高粱和玉米不仅在单作时表现出较高的生物量和产量优势,而且在间套作时也能够与紫花苜蓿形成高产的组合。因此,对于提高饲草产量和优化土地利用,紫花苜蓿/甜高粱间套作和紫花苜蓿/玉米间套作可能是较为理想的选择,这一发现对当地选择适宜的种植模式和提高饲草生产效益具有重要的参考价值。同时,在间套作条件下,相邻不同作物间的竞争和互补对群体产量起到重要作用^[24]。紫花苜蓿/燕麦间套作时,其干草产量显著低于紫花苜蓿单作,但显著高于燕麦单作,说明紫花苜蓿/燕麦间套作较燕麦单作具有产量优势;同时燕麦和紫花苜蓿间套作,由于紫花苜蓿较燕麦株高低,能够使燕麦接受更多的光照,进而可以竞争紫花苜蓿根系土壤的矿质养分和水分,让其更好的生长^[25]。紫花苜蓿/小黑麦间套作后其群体产量较紫花苜蓿单作和小黑麦单作均提高,说明紫花苜蓿/小黑麦间套作是一种高效组合,可以充分激发植物在有限土地上的生产潜力,同时提高紫花苜蓿和小黑麦的生物量。不同的间套作组合对饲草产量影响不同,原因是紫花苜蓿和禾本科饲草存在生态位时空分异,从而引起饲草种间互作效应(竞争与互补)程度不同所造成的系统生产力差异^[26]。为此,若单纯追求干草产量,4种间套作组合中建议选择紫花苜蓿/玉米间套作和紫花苜蓿/甜高粱间套作。

对于以营养体收获为目标的饲草来说,合理搭配不同饲草进行间套作种植来达到增加粗蛋白产量的目的具有重要意义^[27]。本研究表明,与紫花苜蓿、玉米、甜高粱单作相比,紫花苜蓿/玉米以及紫花苜蓿/甜高粱间套作在群体粗蛋白产量方面表现出较高水平。随着时间推移,玉米和甜高粱单作的粗蛋白产量逐渐下降,而紫花苜蓿单作的粗蛋白产量则逐渐升高,并在第3年显著超过甜高粱单作。出现这种现象主要是由于玉米和甜高粱作为耗地型饲草(对土壤养分需求较高、消耗较大的饲草),随着连作种植年限的增加,其对土壤养分的吸收和损耗也越大,因而其粗蛋白产量也越来越低;而紫花苜蓿作为养地型饲草(生长过程中不仅能满足自身的养分需求,还能通过某些生物学特性改善土壤肥力的饲草),其根瘤菌具有固氮作用,能够改善土壤肥力。紫花苜蓿与其他禾本科饲草间套作时,可以刺激紫花苜蓿的结瘤固氮,同时通过竞争减少对地力的损耗^[23]。因此,紫花苜蓿在间套作下的粗蛋白产量下降较慢。祝嘉慧等^[28]的研究也支持这一观点,他们认为大豆和玉米间作可以提高群体粗蛋白的产量。在其他一些研究中,虽然间套作种植模式具有密度、时空和补偿效应,但与单作相比,某些间套作模式并不存在产量优势,甚至可能导致减产^[29],这可能是由于不同作物间的竞争关系及管理方式不当所致^[30]。本研究的4种间套作组合中,紫花苜蓿/玉米和紫花苜蓿/甜高粱间套作的粗蛋白产量较高,达2320~2340 kg·hm⁻²;紫花苜蓿/小黑麦间套作次之,达2100 kg·hm⁻²;紫花苜蓿/燕麦间套作最低,为1810 kg·hm⁻²。因此,以收获粗蛋白产量为目标时,推荐选择紫花苜蓿/玉米间套作和紫花苜蓿/甜高粱间套作,以获得最大的粗蛋白产量值。

豆科饲草与禾本科饲草间套作系统中,竞争关系往往能提高土地资源有效利用从而提高生产性能,土地当量比是作物种植方式对土地利用率进行客观和有效评价的指标^[31]。在4种间套作下紫花苜蓿偏土地当量比均小于

0.5,而4种禾本科牧草的偏土地当量比均大于0.5,说明4种禾本科牧草表现为间套作优势,而紫花苜蓿表现为间套作劣势。本研究4种间套作组合下的土地当量比均大于1,具有明显的产量优势,这与大部分间套作的研究结果一致^[10, 32-33]。同时,Yu等^[34]对已发表的间套作研究也发现,81%间套作组合土地当量比值均大于1,说明大多数间套作体系比单作具有更高的土地利用效率;也有部分间套作组合表现出相反规律,即并非所有的间套作组合均具有间套作优势,应对不同区域下的不同间套作组合进行产量、粗蛋白产量及间套作优势评价后再进行推广种植。区域时间等价率和农田利用效率可以定量说明由不同间套作方式所导致的饲草产量变化程度^[14]。本研究通过比较4种不同间套作组合,发现紫花苜蓿/燕麦以及紫花苜蓿/小黑麦间套作在区域时间等价率和农田利用效率方面表现出明显优势,均大于紫花苜蓿/玉米以及紫花苜蓿/甜高粱间套作,其原因可能是间套作体系中不同饲草的地上、地下生长状态和形态特征不同,从而可以更加有效地利用资源,如光、水分和养分等^[24]。本研究4种间套作组合的区域时间等价率和农田利用效率均大于1,这些结果进一步验证了间套作具有有效提高土地利用效率,并实现增产的潜力。因此,在黄土高原半干旱区以间套作优势为目标时,推荐紫花苜蓿/小黑麦间套作。

种间竞争是间套作优势发挥的重要决定因素^[35]。本研究中,4种禾本科饲草在3年的种植试验中侵占力均大于0,竞争比率均大于1,说明4种禾本科牧草在与紫花苜蓿间套作中均处于竞争优势地位,而紫花苜蓿处于竞争劣势地位,因而4种间套作组合中的禾本科饲草相对于紫花苜蓿具有更强的竞争能力,进而获得更多的生长资源。前人的研究中也发现大部分豆/禾间套作组合下,间套作可以促进禾本科作物的生长,如花生/谷子间作^[9]、小麦/蚕豆间作^[16]、玉米/大豆间作^[33]中的禾本科作物均具有更强的竞争能力。同时,2017年,紫花苜蓿/小黑麦间套作的竞争力最低;2018年,各间套作组合间的竞争关系趋于平衡,无显著差异;2019年,紫花苜蓿/燕麦间套作的竞争力最强。这些结果表明,不同间套作组合的竞争动态随着时间显著变化,这种变化可能与牧草的生长周期、资源利用效率及适应性有关^[36]。在间套作初期,小黑麦的竞争力较弱,但随着时间推移,其适应性和资源利用效率提高,竞争力逐渐增强;相对而言,燕麦在整个研究期间表现出较强的竞争力,可能是由于其快速生长和高资源利用效率。因此,选择适宜的间套作组合需要考虑饲草的长期竞争动态和资源利用效率。本研究发现,在间套作系统中,紫花苜蓿的粗蛋白含量显著下降,同时酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量增加,这与其单作相比表现出了不利的营养品质变化。4种禾本科饲草在间套作下则表现出相反的趋势,即粗蛋白含量提高,纤维含量降低。这种现象可以解释为在4种间套作组合中,紫花苜蓿处于竞争劣势地位,而禾本科饲草则处于竞争优势地位。由于竞争劣势,紫花苜蓿在共同生长的环境中面临较高的资源竞争压力,导致其生长速率减缓并且养分利用效率降低,从而使得其营养品质整体下降。相反地,禾本科牧草由于竞争优势,能够更有效地利用光、水分和养分资源,进而在间套作中表现出了更高的生长速率和更优越的营养品质。这也说明4种间套作组合中禾本科饲草产量和品质的提升以及紫花苜蓿产量和品质的下降,主要受到各种饲草在间套作系统中竞争能力差异的影响。因此,合理的间套作组合对于提高饲草生产效率和品质至关重要,特别是在资源竞争激烈的农业生产环境中。

本研究中,紫花苜蓿在间套作下其粗蛋白含量较其单作均显著下降,酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量均提高;而4种禾本科牧草表现相反。这是由于4种间套作组合中,紫花苜蓿均为劣势地位而禾本科牧草处于优势地位,进而紫花苜蓿生长及营养品质整体下降,4种禾本科牧草整体提高。因此,4种间套作组合中,禾本科饲草产量和品质的提升与紫花苜蓿产量及品质的下降主要由间套作系统中饲草竞争能力差异决定。

4 结论

种植3年中,紫花苜蓿与玉米、甜高粱间套作较紫花苜蓿单作显著提高了干草产量;同时,紫花苜蓿与燕麦、小黑麦间套作在干草产量和粗蛋白含量上较燕麦单作和小黑麦单作也表现出显著优势;此外,紫花苜蓿与燕麦间套作在竞争比率和侵占力方面显示出较大的潜力和优势。因此,对于西北半干旱区来说,如果以提高干草产量和粗蛋白产量为目标,推荐采用紫花苜蓿与玉米或紫花苜蓿与甜高粱的间套作组合;而如果以提高利用效率为目标,则推荐紫花苜蓿与燕麦间套作组合。

参考文献 References:

- [1] Li L. Intercropping enhances agroecosystem services and functioning: Current knowledge and perspectives. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(4): 403–415.
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.
- [2] Zhang D S, Du G J, Sun Z X, *et al.* Agroforestry enables high efficiency of light capture, photosynthesis and dry matter production in a semi-arid climate. *European Journal of Agronomy*, 2018, 94(1): 1–11.
- [3] Ren J H, Zhang L Z, Duan N Y, *et al.* Intercropping potato (*Solanum tuberosum* L.) with hairy vetch (*Vicia villosa*) increases water use efficiency in dry conditions. *Field Crops Research*, 2019, 240(6): 168–176.
- [4] Tang X M, Huang Z P, Wu H N, *et al.* Correlation and principal component analysis of the soil environmental factors in corn/peanut intercropping system. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(2): 223–230.
唐秀梅, 黄志鹏, 吴海宁, 等. 玉米/花生间作条件下土壤环境因子的相关性和主成分分析. *生态环境学报*, 2020, 29(2): 223–230.
- [5] Zhang Y, Duan Y, Nie J, *et al.* A lack of complementarity for water acquisition limits yield advantage of oats/vetch intercropping in a semi-arid condition. *Agricultural Water Management*, 2019, 225(9): 105778–105787.
- [6] Wang X C, Yang W Y. Review on relationship of source-sink and crop yield under shading stress in intercropping systems. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2019, 41(2): 292–299.
王兴才, 杨文钰. 基于间套作弱光胁迫下作物源库协调与产量研究进展. *中国油料作物学报*, 2019, 41(2): 292–299.
- [7] Xiao J X, Dong Y, Yin X H, *et al.* Wheat growth is stimulated by interspecific competition after faba bean attains its maximum growth rate. *Crop Science*, 2019, 59(1): 1–14.
- [8] Liu H, Zan Z M, Wang J T, *et al.* Effects of large-spike type maize on interspecific competition and intercropping advantage in maize-peanut intercropping system. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(9): 1368–1378.
刘涵, 咎志曼, 汪江涛, 等. 大穗型玉米对玉米||花生种间竞争与间作优势的影响. *中国生态农业学报*, 2023, 31(9): 1368–1378.
- [9] Li G Y, Cong X J, Li G Q, *et al.* Effect of sowing date of foxtail millet on crop productivity in foxtail millet/peanut intercropping system. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(5): 1008–1016.
李国瑜, 丛新军, 李国清, 等. 谷子播期对谷子/花生间作系统生产力的影响. *核农学报*, 2022, 36(5): 1008–1016.
- [10] Ren X L, Teng Y Y, Wang Y F, *et al.* Response of interspecific competition and complementarity of maize/pea intercropping to reduced tillage and high-density planting. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(6): 860–869.
任旭灵, 滕园园, 王一帆, 等. 玉米间作豌豆种间竞争互补对少耕密植的响应. *中国生态农业学报*, 2019, 27(6): 860–869.
- [11] Zhang Y T, Ren T Z, Liu H B, *et al.* Effect and mechanism of maize intercropping with soybean on reducing soil nitrogen residue in wheat-maize rotation. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(13): 2580–2590.
张亦涛, 任天志, 刘宏斌, 等. 玉米大豆间作降低小麦玉米轮作体系土壤氮残留的效应与机制. *中国农业科学*, 2015, 48(13): 2580–2590.
- [12] Wan R N, Sun Z X, Zhang L Z, *et al.* Border-row proportion determines strength of interspecific interactions and crop yields in maize/peanut strip intercropping. *Field Crops Research*, 2020, 253(4): 107819–107829.
- [13] Bai W L, Zhang M Y, Ren J B, *et al.* Simulation of crop growth curve and analysis of interspecific interaction in wheat and faba bean intercropping system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 4037–4046.
柏文恋, 张梦瑶, 任家兵, 等. 小麦/蚕豆间作作物生长曲线的模拟及种间互作分析. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4037–4046.
- [14] Ren Y Y, Wang Z L, Wang X L, *et al.* The effect and mechanism of intercropping pattern on yield and economic benefit on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(12): 4168–4177.
任媛媛, 王志梁, 王小林, 等. 黄土塬区玉米大豆不同间作方式对产量和经济收益的影响及其机制. *生态学报*, 2015, 35(12): 4168–4177.
- [15] Zhao J H, Sun J H, Chen L Z, *et al.* Growth and interspecific competition of crops as affected by maize row spacing in soybean/maize intercropping system. *Soybean Science*, 2019, 38(2): 229–235.
赵建华, 孙建好, 陈亮之, 等. 玉米行距对大豆/玉米间作作物生长及种间竞争力的影响. *大豆科学*, 2019, 38(2): 229–235.
- [16] Ren J B, Zhang M Y, Xiao J X, *et al.* Wheat and faba bean intercropping to improve yield and response to nitrogen. *Chinese*

- Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(12): 1890–1900.
- 任家兵, 张梦瑶, 肖靖秀, 等. 小麦||蚕豆间作提高间作产量的优势及其氮肥响应. 中国生态农业学报, 2020, 28(12): 1890–1900.
- [17] Chen P S, Chun L, Xiao M, *et al.* Yield advantage and nitrogen fate in an additive maize-soybean relay intercropping system. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 987–999.
- [18] Xue Y F, Xia H Y, Christie P, *et al.* Crop acquisition of phosphorus, iron and zinc from soil in cereal/legume intercropping systems: a critical review. *Annals of Botany*, 2016, 117(3): 363–377.
- [19] Wang L R, Wang W, Pu X J, *et al.* Comprehensive evaluation of production performance and feed quality of 19 alfalfa varieties in Qaidam Basin. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(10): 3136–3144.
- 王龙然, 王伟, 蒲小剑, 等. 柴达木盆地19个紫花苜蓿品种生产性能和饲用品质综合评价. 草地学报, 2023, 31(10): 3136–3144.
- [20] Liu X, Zhang X, Wang Y, *et al.* Soil degradation: a problem threatening the sustainable development of agriculture in northeast China. *Soil and Environment*, 2010, 56(2): 87–97.
- [21] Huang Z C, Shi S L, Wang R, *et al.* Effects of different forage crop intercropping patterns on aboveground biomass and competitiveness. *Pratacultural Science*, 2020, 37(11): 2284–2292.
- 黄宗昌, 师尚礼, 汪睿, 等. 不同饲草作物间作模式对地上生物量及竞争力的影响. 草业科学, 2020, 37(11): 2284–2292.
- [22] Jiang Z W, Liu G Y, An H Y, *et al.* Effects of planting density and nitrogen application on forage yield, quality and nitrogen use efficiency in a maize/forage soybean intercropping system. *Acta Pratacultural Sinica*, 2022, 31(7): 157–171.
- 蒋紫薇, 刘桂宇, 安昊云, 等. 种植密度与施氮对玉米/秣食豆间作系统饲草产量、品质和氮肥利用的影响. 草业学报, 2022, 31(7): 157–171.
- [23] Zhao Y J. Study on the advantage of alfalfa/gramineae forage intercropping and the mechanism of nitrogen efficiency and effect of soil microecological. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020.
- 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.
- [24] Zhang X N, Chen P, Pang T, *et al.* The effects of dry matter accumulation, distribution and yield in the maize/soybean and maize/peanut intercropping system. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2017, 35(4): 484–490.
- 张晓娜, 陈平, 庞婷, 等. 玉米/豆科间作种植模式对作物干物质积累、分配及产量的影响. 四川农业大学学报, 2017, 35(4): 484–490.
- [25] Wang X, Liu X J, Zhao Y J, *et al.* Effects of alfalfa/oat intercropping on carbon and nitrogen metabolism and matter accumulation of oat. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(10): 2258–2264.
- 汪雪, 刘晓静, 赵雅姣, 等. 紫花苜蓿/燕麦间作对燕麦碳、氮代谢及其物质积累的影响研究. 草地学报, 2021, 29(10): 2258–2264.
- [26] Dong N, Tang M M, Zhang W P, *et al.* Temporal differentiation of crop growth as one of the drivers of intercropping yield advantage. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 3110–3121.
- [27] Gil J. Multiple cropping systems. *Nature Food*, 2020, 1(10): 593.
- [28] Zhu J H, Song Q, Du W H. Productivity and nutritional quality of silage maize intercropped with soybean in dryland plateau area of east Gansu. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2024, 33(3): 1–13.
- 祝嘉慧, 宋谦, 杜文华. 陇东旱塬区禾||豆间作的生产性能及营养品质研究. 西北农业学报, 2024, 33(3): 1–13.
- [29] Liu G H, Guo Y P, Yi A M, *et al.* Research progress in the main technologies for alfalfa intercropping and their benefits in China. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2013, 6(11): 38–41.
- 刘贵河, 郭郁频, 易爱民, 等. 我国苜蓿主要间作技术及效益研究进展. 黑龙江畜牧兽医, 2013, 6(11): 38–41.
- [30] Wang Y F, Qin Y Z, Feng F X, *et al.* Synergistic effect of root interaction and density on yield and yield components of wheat/maize intercropping system. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(5): 754–762.
- 王一帆, 秦亚洲, 冯福学, 等. 根间作用与密度协同作用对小麦间作玉米产量及产量构成的影响. 作物学报, 2017, 43(5): 754–762.
- [31] Zhang L, Zhang N M, Zhang S Y, *et al.* Effects of AMF and intercropping on crop yield and soil nitrogen and phosphorus loss by runoff on slope farmland. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(22): 216–224.
- 张丽, 张乃明, 张仕颖, 等. AMF和间作对作物产量和坡耕地土壤径流氮磷流失的影响. 农业工程学报, 2019, 35(22): 216–224.
- [32] Liu Z, Meng W W, Nan Z W, *et al.* Effects of different planting modes on growth and yield formation of millet and peanut in

saline-alkali land. *Journal of Peanut Science*, 2019, 48(2): 31–37.

刘柱, 孟维伟, 南镇武, 等. 盐碱地不同种植模式对谷子花生生长发育及产量形成的影响. *花生学报*, 2019, 48(2): 31–37.

- [33] Cai Q, Sun Z X, Zheng J M, *et al.* Dry matter accumulation, allocation, yield and productivity of maize-soybean intercropping systems in the semi-arid region of western Liaoning Province. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(5): 909–920.
蔡倩, 孙占祥, 郑家明, 等. 辽西半干旱区玉米大豆间作模式对作物干物质积累分配、产量及土地生产力的影响. *中国农业科学*, 2021, 54(5): 909–920.
- [34] Yu Y, Stomph T J, Makowski D, *et al.* Temporal niche differentiation increases the land equivalent ratio of annual intercrops: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 2015, 184(9): 133–144.
- [35] Zhao J H, Sun J H, Li W Q. Effect of maize sowing date on yield and interspecific competition in soybean/maize intercropping system. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(11): 1634–1642.
赵建华, 孙建好, 李伟琦. 玉米播期对大豆/玉米间作产量及种间竞争力的影响. *中国生态农业学报*, 2018, 26(11): 1634–1642.
- [36] Yin W, Zhao C, Yu A Z, *et al.* Effect of straw returning and reduced tillage on interspecific competition and complementation in wheat/maize intercropping system. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(4): 633–641.
殷文, 赵财, 于爱忠, 等. 秸秆还田后少耕对小麦/玉米间作系统中种间竞争和互补的影响. *作物学报*, 2015, 41(4): 633–641.