



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

杨金虎,李立军,张艳丽,渠佳慧,韩冬雨,赵鑫瑶

(内蒙古农业大学 农学院,呼和浩特 010019)

摘 要 为研究内蒙古科尔沁沙地水分和养分高效利用的饲用作物栽培模式,于2020—2021年在中国科学院西北奈曼沙漠化研究站开展大田试验。在燕麦灌浆期刈割后进行饲草复播,复播设置种植模式及施肥处理双因素试验,3种植模式分别为单作燕麦(‘蒙燕1号’,SO),单作箭筈豌豆(SV),2行燕麦与4行箭筈豌豆间作(IOV);4种施肥处理分别为不施肥(N),施化肥(磷酸二铵,C,150 kg/hm²),施生物有机肥(润泽生物有机肥,O,900 kg/hm²),有机肥和无机肥配施(生物有机肥+磷酸二铵,G,全量配施),探讨间作与施肥对复种燕麦、箭筈豌豆饲草养分累积、产量及水分利用的影响。结果表明:间作与施肥可显著增加饲草产量,2020年和2021年G处理较N处理鲜草产量显著提高74.0%和63.5%,干草产量显著提高55.4%和57.0%;燕麦箭筈豌豆间作系统的土地当量比大于1,表明该间作模式提高土地生产力,具有土地利用优势。间作与施肥显著增加0~60 cm土层的土壤含水量;有机肥与无机肥配施提高作物水分利用效率,整体表现为SO>IOV>SV。燕麦箭筈豌豆间作系统的养分优势主要体现在饲草氮累积量的增加,而磷钾累积量则低于单作燕麦,高于单作箭筈豌豆;2020年和2021年G处理下的燕麦间作箭筈豌豆的饲草氮累积量分别比N、C、O处理增加152.2%、21.7%、47.1%和119.8%、17.6%、41.2%。综合分析得出有机肥与无机肥配施处理是最适宜的燕麦与箭筈豌豆间作施肥方式。

关键词 间作;施肥;产量;水分利用率;养分累积量

间作是中国传统农业生产中非常重要的一种多元种植技术,能够使作物在相同的土地面积上收获到较高的经济产量,使其充分利用水、肥、气、热等自然资源,增加经济效益和生态效益^[1-4]。燕麦草具有抗寒、抗旱、饲用营养价值高等优点^[5],箭筈豌豆茎叶柔软,营养丰富,具有较强的耐旱、耐贫瘠以及抗逆性,可通过生物固氮作用抑制土壤退化并改善土壤结构^[6]。前人诸多研究表明间作比单作具有明显的产量优势^[7-9]。Li等^[10]发现禾豆间作系统可以表现出明显的产量优势。金花菜与燕麦播种比例为2:1时,其土地当量比为1.80^[11]。王燕超^[12]研究表明,燕麦与春箭筈豌豆的间作比例1:1,间作距离为20 cm时,在灌浆期(结荚期)和成熟期的饲草产量达最高,系统整体表现最优。Iqbal等^[13]研究表明,高粱与豇豆混播后,其混合草产量比相应的单作产量提高

了30%和117%。马乃娇^[14]研究表明,在化肥处理下,油菜燕麦间作混播比例为RO 7:3时其干鲜草产量最高,且化肥>有机肥>不施肥。同时,间作还可以提高作物的水分利用效率,在小麦与玉米间作系统内作物水分利用效率的研究中发现,间作与单作相比显著增加了小麦和玉米各生育期对水的吸收利用^[15]。杨玲等^[16]研究发现,玉米和大豆间作增加了土壤含水量,提升了其水分利用效率。合理的利用间作种植技术还可以增加氮、磷和钾的吸收利用效率^[17-19],在不同施肥条件下,硬粒小麦和菜豆间作,氮素累积量间作均高于单作^[18]。间作在营养吸收上也具有优势^[20-23],主要表现在饲草养分吸收量的增加和营养品质的提高^[24]。李隆等^[20]在小麦/大豆间作中的研究发现,在该模式中间作优势的主要原因是养分累积量的增加,而非非利用效率的提高。由此可见,

收稿日期:2022-06-15 修回日期:2022-09-04

基金项目:内蒙古科技重大专项(2019ZD003)。

第一作者:杨金虎,男,硕士研究生,从事饲用作物间作研究。E-mail:yjh0019@emails.imau.edu.cn

通信作者:李立军,男,博士,教授,博士生导师,主要从事耕作制度与农业生态研究。E-mail:imaullj@163.com

饲草间作栽培在产量、水分利用以及养分累积上具有一定的优势,必将会成为助力中国农区畜牧业发展的多元种植技术。

科尔沁沙地位于内蒙古农牧交错带的东部。近年来,该地区水资源短缺问题日益严峻,其中河流径流量减少了 95%,而农业灌溉用水量始终占总水量的 80% 以上^[25]。随着该地畜牧业的快速发展,以青贮玉米为主的饲草已经不能满足农户的需求^[26],高效、优质型饲草才是现代农牧业发展的趋势。因此,合理利用水资源,优化农业种植结构,才是符合该地区农牧业协调发展的主要途径。目前,在科尔沁沙地开展饲草间作的研究还比较少,并未得出统一的结论,且施肥处理对燕麦箭筈豌豆间作的饲草养分累积,水分利用效率等方面的影响还不明确。所以,本试验针对科尔沁沙地水资源短缺且利用率低,种植结构与饲草种类单一等问题,对饲用燕麦刈割后复播饲草的间作方案进行研究,探讨不同施肥处理对燕麦与箭筈豌豆间作在饲草养分累积、产量以及水分利用

方面的影响,旨在改善科尔沁沙地种植结构和提高饲草产量和水分利用效率,为科尔沁沙地发展适水型饲草种植模式提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2020—2021 年在内蒙古自治区通辽市奈曼旗中国科学院奈曼沙漠化研究站试验田(120°41'E,42°54'N)进行。试验区位于科尔沁沙地南缘,属温带半干旱大陆性气候,年平均降水量 366 mm(图 1),降水集中在 6—8 月,年蒸发量 1 935 mm,年均气温 6.5 °C,≥10 °C 积温在 3 000 °C 以上,无霜期 150 d^[27]。试验地土壤为风沙土,2020 年试验前耕层(0~20 cm)土壤养分基本情况为:pH 8.17、碱解氮 53.90 mg/kg、速效磷 13.25 mg/kg、速效钾 104.60 mg/kg、有机质 7.65 g/kg、全氮 0.51 g/kg、全磷 0.39 g/kg、全钾 20.61 g/kg。

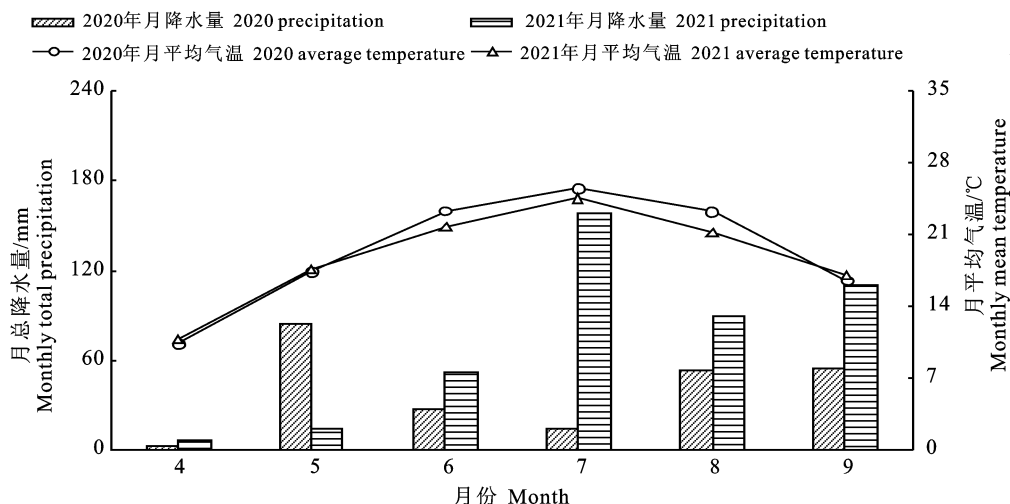


图 1 试验地 2020—2021 年作物生育期内降水量和月平均气温

Fig. 1 Precipitation and monthly mean temperature during crop growth period in tested site from 2020–2021

1.2 试验设计

本试验于 2020、2021 年进行,为双因素随机区组设计。设种植模式及施肥处理两个因素,种植模式为燕麦箭筈豌豆间作(IOV,其中间作燕麦为 IO,间作箭筈豌豆为 IV)、燕麦单作(SO)、箭筈豌豆单作(SV);施肥处理设 4 个水平,分别为不施肥(N),施化肥(C,150 kg/hm²),施有机肥(O,900 kg/hm²),有机肥和无机肥配施(G,全量配施),12 个处理,重复 3 次,共 36 个小区,小区面积 4 m×5 m=20 m²。

供试作物分别为燕麦(‘蒙燕 1 号’),箭筈豌豆(‘克劳沃’,北京生态科技有限公司提供)。供试肥料分别为:磷酸二铵(N+P₂O₅≥64%),生物有机肥(有机质≥45%)。试验于 7 月 5 日—10 日在第一茬燕麦(灌浆期)刈割后播种,燕麦播种量为 150 kg/hm²,箭筈豌豆播种量为 120 kg/hm²,燕麦 2 行,箭筈豌豆 4 行,行距均为 25 cm(图 2)。试验采用均一化处理,单作与间作的作物种植密度和肥料施入量相同。种肥同施,肥料一次性施入,后期不追肥。于 9 月 21 日—26

日(燕麦抽穗期或箭筈豌豆盛花期)收获。农事管

理均参照当地常规进行。

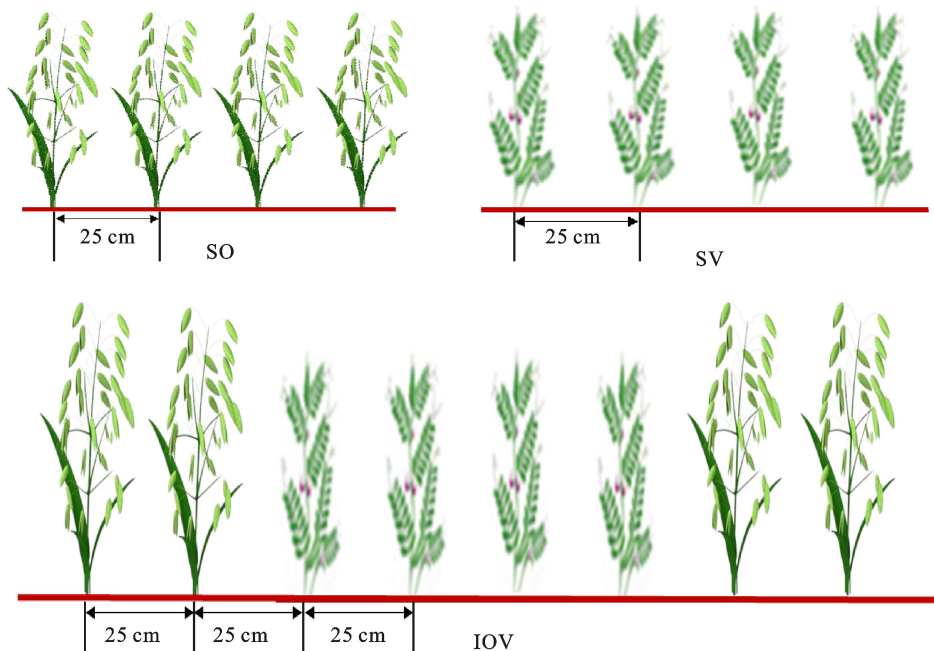


图 2 燕麦和箭筈豌豆间作田间种植模式

Fig. 2 Planting patterns of oats and vicia sativa in field

1.3 样品采集与方法

土壤样品采集与测定方法:土壤含水量采用土钻法,土壤体积质量采用环刀法。分别在播种前和复播作物收获时采集。单作在每个小区随机选取 3 处样点(包括行内和行间),间作在每个小区中两种作物的行内选取 1 处样点,行间选取 1 处样点,分别以 20 cm 为 1 层,采集 0~100 cm 土壤样本,3 处样点土壤混合后按四分法将土壤样品存放于铝盒内,用于含水量的测定。在每个小区测定土壤含水量的对应土层及样点分别测土壤体积质量并计算均值。

植株样品采集与测定方法:前茬燕麦于灌浆期刈割测产,随机选取 5 个 1 m×1 m 的样方齐地刈割,称得植株鲜质量,并计算鲜草产量。复播饲草于收获时采集植株样本,单作选取 3 个 1 m×1 m 的样方齐地刈割,称质量计算鲜草产量,并保留 10 株小样;间作选取 4 行作物(V)的中间行和边行,2 行作物(O)的边行各 1 m 的样段,齐地刈割,分别称质量计算鲜草产量,并分别保留 10 株小样。将上述植株小样称量鲜质量后,分别于 105 ℃杀青 30 min,85 ℃烘干至恒质量后,称量植株干质量,根据鲜干比计算干草产量。将干草小样全株粉碎后,于自封袋内保存,用于饲草养分含量分析。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 饲草产量及养分含量 产量测定采用称量法、烘干法;植株全氮采用凯氏定氮法测定;植株全磷采用钼锑抗比色法测定;植株全钾采用火焰光度计法测定;植株氮磷钾养分累积量(kg/hm²)=生物产量×植株氮磷钾养分含量。

1.4.2 土壤指标 土壤含水量和土壤体积质量采用烘干法测定。

1.4.3 土地当量比 土地当量比(land equivalent ratio, LER)用于评价间作系统相对于单作系统收益,是衡量间套作产量优势的指标^[28],用以下公式计算:

$$LER = Y_{io}/Y_{so} + Y_{iv}/Y_{sv}$$

式中, Y_{so} 为燕麦单作的地上生物量, Y_{sv} 为箭筈豌豆单作的地上生物量, Y_{io} 为燕麦间作的地上生物量, Y_{iv} 为箭筈豌豆间作的地上生物量,当 $LER > 1$ 时,说明具有间作优势,土地利用率高;当 $LER < 1$ 时,说明没有间作优势。

1.4.4 水分利用效率 $ET = P + I + (W1 - W2)$;式中, ET 为作物生育期实际耗水量, P 为生育期降水量, I 为灌水量, $W1$ 为播种前期土壤贮水量, $W2$ 为收获末期土壤贮水量。土壤贮水量(W , mm)=土壤质量含水量(%)×土壤体积质量(g/cm³)×土层深度(cm)×10。

$WUE [kg/(hm^2 \cdot mm)] = Y/ET$; 式中, WUE 为作物水分利用效率, Y 为作物产量。根据试验区实际情况, 地下水补给量、径流量、深层渗漏量均忽略不计。

1.5 数据分析

采用 Microsoft excel 2016 进行数据处理和图表绘制; 采用 SPSS 26.0 统计软件进行方差分析, Duncan's 法进行多重比较 ($\alpha=0.05$)。各指标数据均为 3 个重复的“平均值±标准误”。

2 结果与分析

2.1 不同处理对复种燕麦、箭筈豌豆饲草产量的影响

由表 1 可知, 不同施肥处理和种植模式及二者的交互作用对 2020 年燕麦间作箭筈豌豆的饲草产量有极显著的影响 ($P<0.01$)。SOG 处理的鲜干草产量最高, 分别为 $23.58 t/hm^2$ 和 $6.93 t/hm^2$ 。不同种植模式下的饲草产量以 SO 的产量最高, 表现为 $SO>IOV>SV$ 。不同施肥处理下的混合饲草鲜草产量为 $9.92\sim 17.26 t/hm^2$, 其中 G 处理的混合饲草鲜草产量显著高于其他

处理 ($P<0.05$); N 处理的混合饲草鲜草产量最低, G 处理较 N 处理提高 74.0%; 混合饲草的干草产量为 $2.80\sim 4.35 t/hm^2$, G 处理的干草产量最高, 为 $4.35 t/hm^2$, 较 N 处理提高 55.4%。除 C 处理外, G 处理较其他处理均显著提高饲草干草产量 ($P<0.05$)。不同施肥处理与种植模式对 2021 年饲草产量有极显著的影响 ($P<0.01$), 二者的交互作用对饲草产量无显著影响。这可能是由于 2021 年 7—9 月雨热同期, 更有助于饲草的干物质积累, 增加饲草产量, 使二者的交互作用无显著影响。2021 年在不同种植模式下的饲草产量与 2020 年表现一致。SOG 处理的鲜干草产量最高, 分别为 $26.11 t/hm^2$ 和 $8.37 t/hm^2$ 。不同施肥处理下的混合饲草鲜草产量为 $13.07\sim 22.03 t/hm^2$, 其中 G 处理的混合饲草鲜草产量最高为 $22.03 t/hm^2$, 较 N、C、O 处理分别提高 63.5%、9.9% 和 23.7%; 混合饲草的干草产量为 $3.98\sim 6.25 t/hm^2$, N 处理的干草产量最低为 $3.98 t/hm^2$, G 处理的干草产量最高为 $6.25 t/hm^2$, 较 N 处理增产 57.0%。

表 1 不同处理下复种燕麦、箭筈豌豆的饲草产量

Table 1 Yield of common oats and vicia sativa under different treatments

处理 Treatment		鲜草产量/(t/hm^2) Yield of fresh grass		干草产量/(t/hm^2) Yield of hay grass	
F	P	2020	2021	2020	2021
N	SO	15.02 ± 0.45 e	18.69 ± 0.59 de	3.68 ± 0.51 d	4.78 ± 0.64 def
	SV	6.08 ± 0.10 i	8.52 ± 1.63 g	1.66 ± 0.03 g	2.44 ± 0.42 h
	IOV	9.92 ± 0.49 g	13.47 ± 0.38 f	2.80 ± 0.13 e	3.98 ± 0.01 efg
C	SO	21.50 ± 0.33 b	25.28 ± 1.69 ab	6.30 ± 0.30 a	6.63 ± 0.52 b
	SV	8.92 ± 0.10 h	15.49 ± 1.09 ef	2.25 ± 0.94 fg	3.74 ± 0.22 fg
	IOV	15.16 ± 0.45 e	20.04 ± 0.12 cd	4.34 ± 0.06 c	5.74 ± 0.69 bcd
O	SO	20.75 ± 0.15 c	23.06 ± 1.89 abc	5.26 ± 0.53 b	6.03 ± 1.37 bc
	SV	8.55 ± 0.05 h	13.44 ± 0.97 f	2.13 ± 0.06 fg	3.16 ± 0.27 gh
	IOV	13.97 ± 0.39 f	17.81 ± 0.59 de	3.60 ± 0.23 d	4.95 ± 0.17 cde
G	SO	23.58 ± 0.70 a	26.11 ± 5.17 a	6.93 ± 0.62 a	8.37 ± 0.99 a
	SV	10.40 ± 0.56 g	16.99 ± 1.33 de	2.28 ± 0.16 ef	3.81 ± 0.23 fg
	IOV	17.26 ± 0.37 d	22.03 ± 0.44 bc	4.35 ± 0.16 c	6.25 ± 0.53 b
P 值 P-value F		2610.17**	82.75**	372.26**	78.18**
P		459.43**	34.12**	60.92**	23.92**
P×F		18.45**	0.10 ns	10.434**	1.84 ns

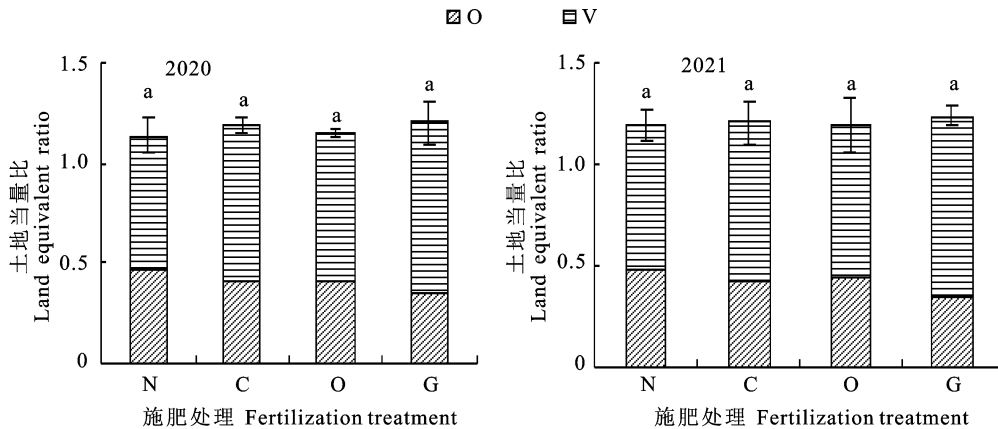
注: 同一列数据后不同小写字母表示各处理间差异显著性 ($P<0.05$), 在方差分析中 *, ** 分别代表 P 在 0.05 和 0.01 水平下的差异显著, ns 代表差异不显著, 下同。

Note: Different lowercase letters following data within the same columns indicate significant differences ($P<0.05$). In the analysis of variance, * and ** indicate the significant difference between P at the level of 0.05 and 0.01, respectively. NS represents the not significant difference, the same below.

2.2 不同施肥处理对燕麦间作箭筈豌豆土地当量比的影响

土地当量比是衡量间作系统土地生产力的重要指标,2 a 试验结果表明(图 3),燕麦间作箭筈豌豆具有明显的产量优势,在不同施肥处理下,其土地当量比均大于 1。其中,有机肥与无机肥配施下土地当量比最高,2 a 分别为 1.20 和 1.24,较其他施肥处理下的土地当量比提高 1.7%~5.3%,但不同施肥处理之间均未达到显著性差

异。2020 年,不同施肥处理下箭筈豌豆的偏土地当量比分别为 0.68、0.78、0.74、0.85,占比分别为 60.0%、66.1%、64.3%、71.0%;2021 年,不同施肥处理下箭筈豌豆的偏土地当量比分别为 0.72、0.79、0.76、0.89,占比分别为 60.5%、65.3%、63.3%、71.8%;表明在燕麦间作箭筈豌豆模式中,箭筈豌豆产量对间作优势的贡献大于燕麦,因此结合施肥增加间作箭筈豌豆的饲草产量,能够提高土地生产力。



不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同

Different lowercase letters indicate significant difference under different treatments ($P < 0.05$), the same below

图 3 不同施肥模式下燕麦间作箭筈豌豆的土地当量比

Fig. 3 Equivalent ratio of vicia sativa in oat intercropping under different fertilization modes

2.3 不同处理对复种燕麦/箭筈豌豆土壤含水量的影响

通过燕麦与箭筈豌豆间作系统的土壤水分分布图可以看出(图 4),在 0~100 cm 的土壤垂直分布层次内,随着土壤土层深度的增加,其土壤含水量表现出先增加后降低的趋势,呈倒“V”字形。比较 2020 年和 2021 年土壤水分分布情况后得出,间作对 0~40 cm 的土层水分影响较为明显,对 40~100 cm 的土层水分影响较小。有机肥与无机肥配施下,0~40 cm 燕麦和箭筈豌豆间作系统的含水量最高,2 a 均值分别为 6.40%、6.14%。间作系统不同施肥处理下 0~40 cm 土壤含水量均值较单作燕麦分别提高 41.1%、35.3%、58.5%和 56.8%,较单作箭筈豌豆分别提高 16.1%、2.7%、22.2%和 44.0%,说明在 0~40 cm 是水分消耗较为激烈的区域,其中单作燕麦比单作箭筈豌豆的水分消耗更强。间作结合施肥可以显著增加 0~40 cm 土层的土壤含水量,供作物生长需要,减少水分流失,提高作物产量。

2.4 不同处理下复种燕麦/箭筈豌豆水分利用效率比较

由图 5 可知,在均一化的处理下,不同施肥处理可以影响种植模式的水分利用效率。2 a 间,总体上均表现为 $SO > IOV > SV$,且 SOG 处理的水分利用效率显著高于其他处理($P < 0.05$),分别为 28.23 kg/(hm²·mm)和 24.36 kg/(hm²·mm),较 IOVG 处理的水分利用效率增幅为 9.48%~9.55%。而燕麦和箭筈豌豆间作在不同施肥处理下显著高于单作箭筈豌豆($P < 0.05$),2 a 间 IOVN、IOVC、IOVO 和 IOVG 分别比相同处理的单作箭筈豌豆平均增加 9.5%、16.17%、16.45%、36.04%。

2.5 不同处理下饲草养分累积量的比较

2.5.1 不同处理下饲草氮累积量的比较 由图 6 可知,2020—2021 年燕麦与箭筈豌豆间作系统的饲草氮累积量均高于单作燕麦和单作箭筈豌豆。2020 年,燕麦与箭筈豌豆间作在 G 处理的饲草氮累积量均显著高于其他施肥处理($P <$

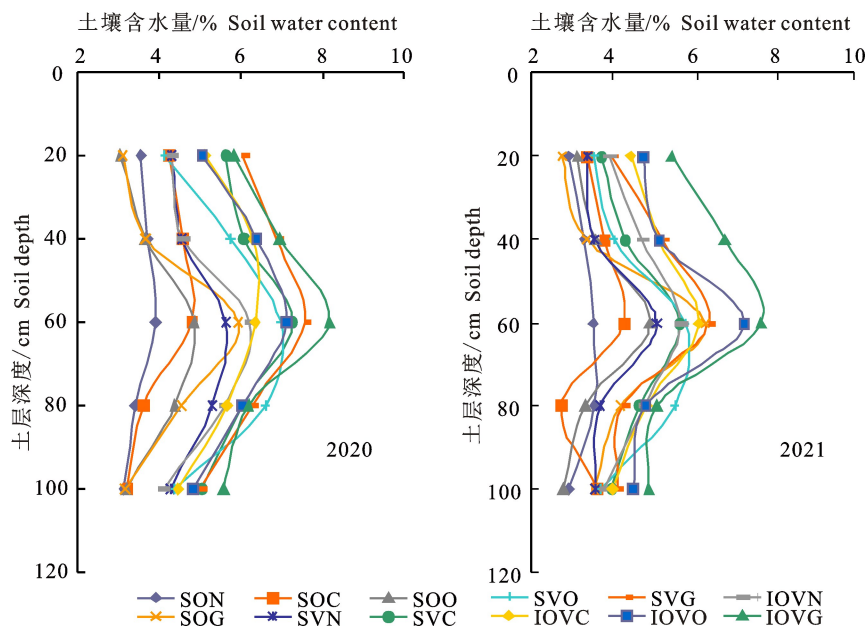


图4 不同处理下复种燕麦、箭筈豌豆的土壤含水量

Fig. 4 Soil water content of common oats and vicia sativa under different treatments

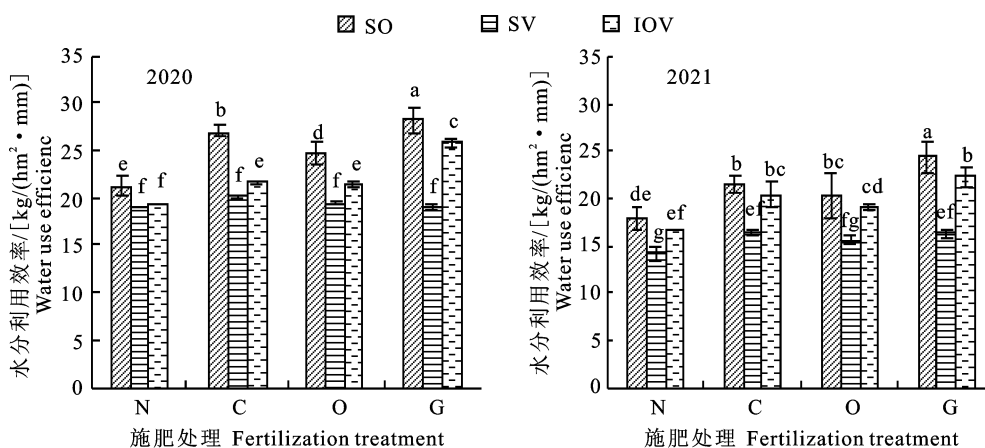


图5 不同处理下复种燕麦、箭筈豌豆水分利用效率比较

Fig. 5 Comparison of water use efficiency of common oats and vicia sativa under different treatments

0.05), 分别比 N、C、O 处理提高 152.2%、21.7%、47.1%; 单作燕麦在 G 处理的饲草氮累积量均显著高于其他施肥处理 ($P < 0.05$), 分别比 N、C、O 处理提高 162.1%、17.3%、51.3%; 单作箭筈豌豆在 G 处理的饲草氮累积量最高 48.2%~56.3%, 间作箭筈豌豆较单作箭筈豌豆降低 2.3%~22.1%。2021 年, 燕麦与箭筈豌豆间作在 G 处理的饲草氮累积量均显著高于其他, 但与 C 处理差异不显著 ($P > 0.05$), 分别比 N、C、O 处理提高 115.7%、16.4%、48.1%。在不同种植模式下, 燕麦与箭筈豌豆间作系统的饲草氮累积量显著高于单作燕麦和单作箭筈豌豆 ($P <$

0.05), 增幅分别为 1.28~4.91 kg/hm²、11.9~39.1 kg/hm²; 但间作燕麦较单作燕麦降低施肥处理 ($P < 0.05$), 分别比 N、C、O 处理提高 119.8%、17.6%、41.2%; 单作燕麦在 G 处理的饲草氮累积量均显著高于其他施肥处理 ($P < 0.05$), 分别比 N、C、O 处理提高 106.5%、30.7%、46.0%; 单作箭筈豌豆在 G 处理的饲草氮累积量最高, 但与 C 处理差异不显著 ($P > 0.05$), 分别比 N、C、O 处理提高 123.9%、7.2%、47.3%。在不同种植模式下, 燕麦与箭筈豌豆间作系统的饲草氮累积量显著高于单作燕麦和单作箭筈豌豆 ($P < 0.05$), 增幅分别为 4.46~22.88

kg/hm²、17.77~37.56 kg/hm²;但间作燕麦较单作箭筈豌豆降低 7.7%~18.5%。
作燕麦降低 51.1%~53.6%,间作箭筈豌豆较单

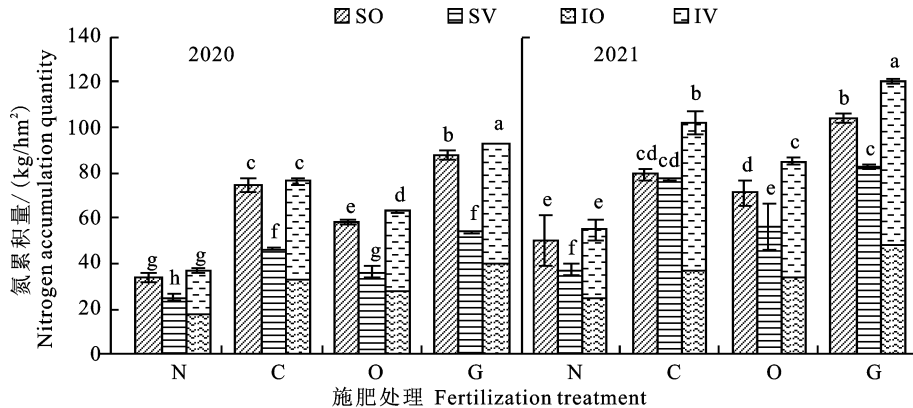


图 6 不同处理下饲草氮累积量的比较

Fig. 6 Comparison of nitrogen accumulation in forage under different treatments

2.5.2 不同处理下饲草磷钾累积量的比较 由图 7 和图 8 可知,燕麦和箭筈豌豆间作系统的饲草磷钾累积量显著高于单作箭筈豌豆 ($P < 0.05$),低于单作燕麦。2020 年,燕麦和箭筈豌豆间作种植模式中,G 处理的饲草磷累积量最高,较 N、C、O 处理的饲草磷累积量分别提高 84.5%、3.3%、30.8%;C 处理的饲草钾累积量最高,较 N、O、G 处理的饲草钾累积量分别提高 79.8%、26.1%、5.5%。2021 年,燕麦和箭筈豌豆间作种植模式中,G 处理的饲草磷累积量最高,较 N、C、

O 处理的饲草磷累积量分别提高 76.0%、12.1%、26.9%;C 处理的饲草钾累积量最高,较 N、O、G 处理的饲草钾累积量分别提高 81.4%、17.5%、13.1%。单作燕麦在 G 处理的饲草磷钾累积量显著高于其他施肥处理 ($P < 0.05$),而单作箭筈豌豆的饲草磷钾累积量在各施肥处理间的差异不显著 ($P > 0.05$)。2021 年各处理的磷钾累积量均高于 2020 年,可能是由于 2021 年复播时期的降水丰沛,光照充足,提高了作物对养分的吸收,从而提高了间作系统的养分累积量。

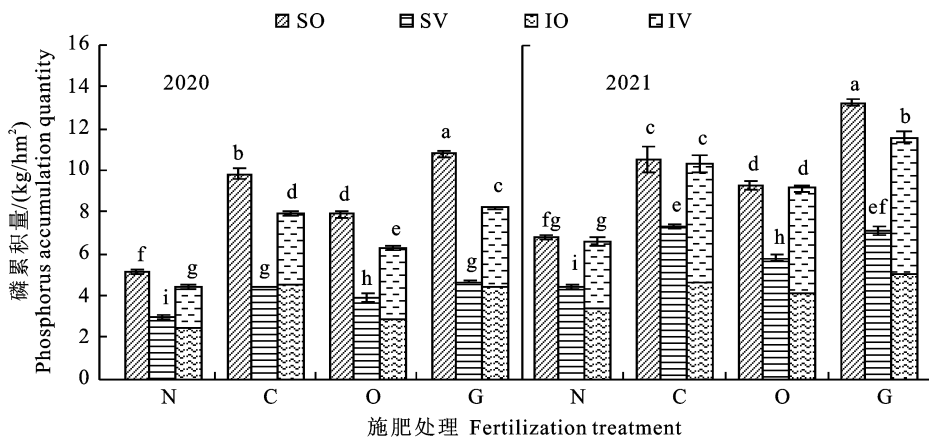


图 7 不同处理下饲草磷累积量的比较

Fig. 7 Comparison of phosphorus accumulation in forage under different treatments

3 讨论

3.1 施肥与间作模式对饲草产量和土地当量比的影响

在内蒙古东部沙质土壤地区,建立适水适肥、高效稳定的饲草间作系统已然成为发展种养结合

型农业生产的基础,而饲草产量的高低也成为当前最重要的一个因子。研究表明合理施肥与禾豆间作都是提高饲草产量比较有效的方式。在增产方面,前人对燕麦和箭筈豌豆间作比例、刈割时期、留茬高度等方面进行了诸多的研究^[29-32]。本研究在其基础上探讨了不同施肥处理对燕麦和箭

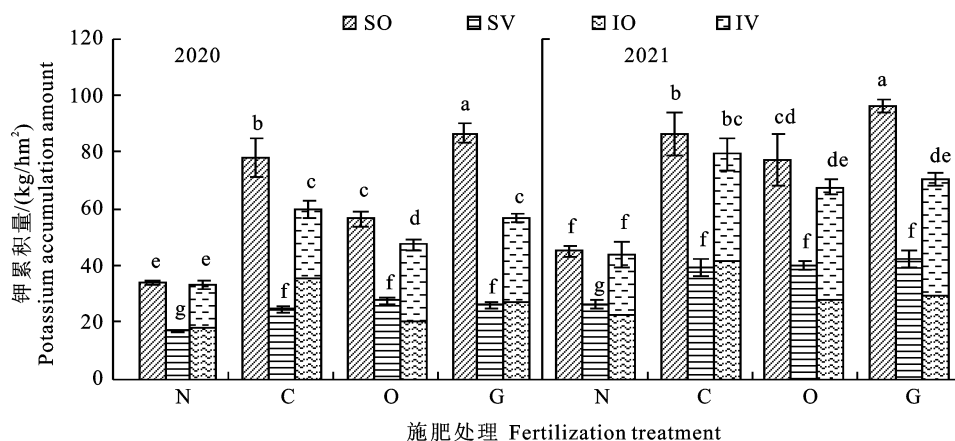


图8 不同处理下饲草钾累积量的比较

Fig. 8 Comparison of potassium accumulation in forage under different treatments

箭豌豆间作的饲草产量和土地当量比的影响,结果表明,有机肥和无机肥配施的饲草鲜干草产量最高。燕麦与箭豌豆2:4间作比例下,不同施肥处理的间作饲草产量均低于单作燕麦,但显著高于单作箭豌豆,这与渠佳慧^[29]在燕麦和箭豌豆不同行比例间作的研究结果较一致。间作系统中,每种作物的产量与该作物单作时的产量相比,并不能用来评价间作系统的优劣,需要用土地当量比(LER)评价。土地当量比可以反映该间作模式对环境资源的利用效率^[33]。本试验中,在不同施肥处理下的土地当量比均大于1,说明间作提高了土地的资源利用效率,这与前人的研究结果较类似^[34-35]。其中,有机肥和无机肥配施的土地当量比最高,2 a 分别为1.20和1.24。本试验结果显示,通过不同施肥处理,提高了箭豌豆在间作体系中的饲草产量,这与Gao等^[34]在豌豆/玉米带状间作中的研究结果较一致。在本试验中,一方面可能是因为箭豌豆具有间作优势,通过施肥增加的箭豌豆产量较燕麦多,所以间作体系的优势更显著;另一方面可能是利用了燕麦茎秆的支撑作用,有效避免箭豌豆草层的倒伏现象,使箭豌豆饲草产量得到提高。

3.2 施肥与间作模式对饲草水分吸收利用的影响

降水量、土壤类型及耕作栽培方式等都会影响农田中的土壤水分分布。在间作系统中,由于搭配的间作作物在时空上对水分吸收利用存在互补效应,促使作物通过改善其耗水特性来维持自身生长发育^[36]。本研究发现,燕麦与箭豌豆间作的土壤含水量显著高于单作燕麦和单作箭豌豆,且单作燕麦土壤含水量低于单作箭豌豆。

这是因为本试验在燕麦的抽穗期和箭豌豆的盛花期收获饲草,此时是饲草对水分需求最关键的时期,燕麦的耗水特性要大于箭豌豆,从而使燕麦田耕作层土壤中的水分含量较低^[37]。同时,箭豌豆作为绿肥作物,其茎叶繁茂,生物量较大,在刈割前可以有效地减少水分无效蒸发,增加水分入渗,提高土壤含水量^[38];刈割后,由于绿肥还田具有增加土壤孔隙度、提高土壤持水力等作用,降低作物耗水,从而可以提高土壤含水量^[39]。高砚亮等^[28]在玉米和豆科作物间作中研究发现,玉米会吸收豆科作物条带的土壤水分,通过降低耗水型的禾本科作物对自身条带土壤水分的过度消耗来改善土壤水分利用环境,这与本研究结果一致。另外,间作系统有利于加速降水或灌溉后土壤水分的深层入渗,缩短土壤定常蒸发率阶段所经历的时间,从而有效降低间作群体土壤水分的无效损耗^[40],提高间作系统土壤含水量。本研究发现,土壤含水量的降低并不意味着水分利用效率是降低的。在相同施肥处理下,SO的水分利用效率是高于IOV和SV,但SO与IOV之间未表现出很大的差异,表明间作可通过改善自身的资源和环境状况,吸收比单作更少的水分以维持水的有效性和转化效率,并增加对间作产量效应的贡献率,从而提高水分利用效率。与其他施肥处理相比,有机肥和无机肥配施可提高农田土壤含水量以及作物水分利用效率,这与前人的研究结果类似^[41]。因此,燕麦和箭豌豆间作结合有机肥和无机肥配施在作物耗水方面表现更好,可有效改善土壤含水量,提高水分利用效率,对改善内蒙古东部沙质土壤地区农田土地生产力和作物水分利用效率具有重要意义。

3.3 施肥与间作模式对饲草养分累积量的影响

在间作系统中,养分累积优势体现为作物在时空上对资源的互补利用机制^[42]。李隆等^[20]研究表明,在小麦与大豆间作系统中,作物氮磷钾养分累积总量分别高出相应单作小麦和单作大豆加权的平均累积量 24%~39%、6%~27%、24%~64%。本研究结果表明,燕麦和箭筈豌豆间作较相应单作均降低了间作燕麦和间作箭筈豌豆中的饲草氮、磷、钾的累积量,但该间作系统提高了饲草氮素累积量,说明燕麦和箭筈豌豆间作系统的优势仅体现在氮素的累积量上,并不是利用效率的提高。前人研究结果表明,在小麦和蚕豆的间作体系中,禾本科小麦对土壤与肥料中的氮素的竞争能力更强,一方面使小麦的氮素营养得到很有效的补充,提高了小麦的产量;另一方面,随着土壤中氮素浓度的降低,也促进了蚕豆的结瘤固氮作用^[43]。豆科作物还可以固定大气中的氮气,来补充土壤中的氮素^[44],从而使整个间作系统的氮累积量明显增加。这种氮素利用来源上的生态位分离,是豆科与非豆科间作系统氮素补偿利用的主要机制^[45]。相关研究表明,禾本科和豆科作物间作时,也可提高作物的磷累积量^[46],当与鹰嘴豆^[47]、白羽扇豆^[48]等间套作时,磷的种间促进作用是显著的。而在作物钾累积量方面,只有部分的间作模式对钾的累积量有促进作用,与肥料类型及其遗传特性息息相关^[22]。因此,在本研究的基础上,进一步挖掘有机肥和无机肥配施量对燕麦和箭筈豌豆间作系统中豆科作物的固氮能力,促进土壤中难溶性磷的活化和钾离子的吸收利用,从而提高作物的养分累积量和养分利用率,使产量得到显著提高。

4 结 论

本研究结果表明,不同施肥处理下的饲草产量表现为 SO>IOV>SV;其中 G 处理与其他处理相比显著提高了饲草产量;2020—2021 年 G 处理的混合饲草鲜干草产量分别为 17.26 t/hm²、4.35 t/hm² 和 22.03 t/hm²、6.25 t/hm²;G 处理下土地当量比最高,2020—2021 年分别为 1.20 和 1.24;同时,在水分利用效率和饲草氮磷钾累积量上较其他处理都有所提高。燕麦和箭筈豌豆间作系统还增加 0~60 cm 土壤含水量,并且提高饲草氮累积量,2 a 间作氮累积量分别较单作燕麦和单作箭筈豌豆提高 1.28~4.91 kg/hm²、

11.90~39.10 kg/hm² 和 4.46~22.88 kg/hm²、17.77~37.56 kg/hm²。

因此,从提质增效和适水适肥综合分析,有机肥和无机肥配施模式下的燕麦与箭筈豌豆间作模式,适应于在该地区及相应类似地区推广。

参考文献 Reference:

- [1] 张亦涛,任天志,刘宏斌,等.玉米追氮对玉米//大豆间作体系产量和土壤硝态氮的影响及其后茬效应[J].植物营养与肥料学报,2016,22(1):104-110.
ZHANG Y T, REN T ZH, LIU H B, *et al.* Effect of top-dressing nitrogen of intercropped maize strip on intercropped crop yields and soil nitrate nitrogen as well as its residual effect[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(1):104-110.
- [2] 陈光荣,杨文钰,张国宏,等.薯/豆套作模式下不同熟期大豆品种的生长补偿效应[J].中国农业科学,2016,49(3):455-467.
CHEN G R, YANG W Y, ZHANG G H, *et al.* Compensation effect of different soybean varieties in potato/soybean intercropping system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(3):455-467.
- [3] LI Q Z, SUN J H, WEI X J, *et al.* Overyielding and inter-specific interactions mediated by nitrogen fertilization in strip intercropping of maize with faba bean, wheat and barley[J]. *Plant and Soil*, 2011, 339(1):147-161.
- [4] BILALIS D, PAPASTYLIANOU P, KONSTANTAS A, *et al.* Weed-suppressive effects of maize-legume intercropping in organic farming[J]. *International Journal of Pest Management*, 2010, 4(5):173-181.
- [5] 李振松.灌溉制度对科尔沁沙地苜蓿和燕麦生产性能的影响[D].北京:中国农业科学院,2019.
LI ZH S. Effect of irrigation regimes on production performance of alfalfa and oat in Horqin Sandy Land[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [6] 姚月华,唐宁,杨舒莹,等.箭筈豌豆淀粉理化及消化特性研究[J].中国粮油学报,2020,35(12):8-14,22.
YAO Y H, TANG N, YANG SH Y, *et al.* The physico-chemical and digestive properties of common vetch starch [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(12):8-14, 22.
- [7] 高阳,段爱旺,刘祖贵,等.间作种植模式对玉米和大豆干物质积累与产量组成的影响[J].中国农学通报,2009,25(2):214-221.
GAO Y, DUAN A W, LIU Z G, *et al.* Effect of intercropping pattern on dry matter accumulation and yield components of maize and soybean[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(2):214-221.
- [8] GHOSH P K. Growth, yield, competition and economics of groundnut/cereal fodder intercropping systems in the semi-arid tropics of India[J]. *Field Crops Research*, 2004, 88(2/3):227-237.
- [9] THIERFELDER C, CHEESMAN S, RUSINAMHODZI L. A comparative analysis of conservation agriculture systems;

- benefits and challenges of rotations and intercropping in Zimbabwe[J]. *Field Crops Research*, 2012, 137: 237-250.
- [10] LI L, SUN J, ZHANG F, *et al.* Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: I. yield advantage and inter-specific interactions on nutrients[J]. *Field Crops Research*, 2001, 71(2): 123-137.
- [11] 江 舟, 陈 丰, 王东军, 等. 金花菜与燕麦间作对牧草产量与品质的影响[J]. 中国草地学报, 2020, 42(5): 127-135.
- JIANG ZH, CHEN F, WANG D J, *et al.* Effects of intercropping burr medic with oats on forage yield and quality[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(5): 127-135.
- [12] 王燕超. 春箭筈豌豆/燕麦间作对产量和营养成分的影响及作用机理[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- WANG Y CH. Effects of common vetch/oat intercropping on yield and nutrient components and its mechanism[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [13] IQBAL M A, HAMID A, HUSSAIN I, *et al.* Competitive indices in cereal and legume mixtures in a South Asian environment[J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111(1): 242-249.
- [14] 马乃娇. 盐碱地油菜燕麦混播结合施肥对饲草产量和土壤性状的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- MA N J. Effects of ixed sowing and application of rapeseed and oat on forage yield and soil characters in saline-alkali soil[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [15] MA L S, LI Y J, WU P T, *et al.* Recovery growth and water use of intercropped maize following wheat harvest in wheat/maize relay strip intercropping Science Direct[J]. *Field Crops Research*, 2020, 256: 10794.
- [16] 杨 玲, 郭 茹, 刘 洋, 等. 宁夏引黄灌区玉米间作和带状轮作模式对玉米水氮利用及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2022, 31(6): 1-11.
- YANG L, GUO R, LIU Y, *et al.* Effects of maize-soybean intercropping and strip rotation on water, nitrogen utilization and yield of maize in yellow river irrigated area of Ningxia[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2022, 31(6): 1-11.
- [17] 余常兵, 孙建好, 李 隆. 种间相互作用对作物生长及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 1-8.
- YU CH B, SUN J H, LI L. Effects of interspecific interactions on crop growth and nutrient uptake[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(1): 1-8.
- [18] MARIOTTI M, MASONI A, ERCOLI L, *et al.* Optimizing forage yield of durum wheat/field bean intercropping through N fertilization and row ratio[J]. *Grass and Forage Science*, 2012, 67(2): 243-254.
- [19] LI L, LI S M, SUN J H, *et al.* Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(27): 11192-11196.
- [20] 李 隆, 李晓林, 张福锁, 等. 小麦大豆间作条件下作物养分吸收利用对间作优势的贡献[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(2): 140-146.
- LI L, LI X L, ZHANG F S, *et al.* Uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium as related to yield advantage in wheat/soybean intercropping[J]. *Plant Nutr Fert*, 2000, 6(2): 140-146.
- [21] AF GEIJERSSTAM L, MRTENSSON A. Nitrogen fixation and residual effects of field pea intercropped with oats[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, 2006, 56(3): 186-196.
- [22] LITHOURGIDIS A S, VLACHOSTERGIOS D N, DORDAS C A, *et al.* Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea-cereal intercropping systems[J]. *European Journal of Agronomy*, 2011, 34(4): 287-294.
- [23] 赵 平, 郑 毅, 汤 利, 等. 小麦蚕豆间作施氮对小麦氮素吸收、累积的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 742-747.
- ZHAO P, ZHENG Y, TANG L, *et al.* Effects of N supply and wheat/faba intercropping on N uptake and accumulation of wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4): 742-747.
- [24] CHOWDHURY M K, ROSARIO E L. Comparison of nitrogen, phosphorus and potassium utilization efficiency in maize/mungbean intercropping[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1994, 122(2): 193-199.
- [25] 谢艾楠, 关 雪, 苗添升. 辽西河“量水而行”方案下通辽市用水思考[J]. 中国农村水利水电, 2021(9): 112-116, 123.
- XIE A N, GUAN X, MIAO T SH. Thoughts about water use of tongliao city under the scheme of “Carrying out program by measuring water” of Xiliaohe river[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(9): 112-116, 123.
- [26] 刘瑞香, 郭占斌, 马迎梅, 等. 科尔沁沙地不同品种藜麦的营养价值及青贮研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(12): 50-56.
- LIU R X, GUO ZH B, MA Y M, *et al.* Nutritional values of quinoa and its silage for different quinoa varieties planted in Horqin Sandy Land[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(12): 50-56.
- [27] 赵丽娅, 李元哲, 陈红兵, 等. 科尔沁沙地恢复过程中地上定植群落与土壤种子库特征及其关系研究[J]. 生态环境学报, 2018, 27(2): 199-208.
- ZHAO L Y, LI Y ZH, CHEN H B, *et al.* Relationship between soil seed banks characteristics and aboveground colonization community along natural restoration gradients in Horqin Sandy Land[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(2): 199-208.
- [28] 高砚亮, 孙占祥, 白 伟, 等. 辽西半干旱区玉米与花生间作对土地生产力和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(19): 3702-3713.
- GAO Y L, SUN ZH X, BAI W, *et al.* Productivity and water use efficiency of maize-peanut intercropping systems in the semi-arid region of western Liaoning province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(19): 3702-3713.
- [29] 渠佳慧. 燕麦与箭筈豌豆不同比例间作对饲草产量及土壤性状的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- QU J H. Effects of intercropping oat and common vetch on forage yield and quality and soil characteristics[D]. Ho-

- hhot; Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [30] 赵彩霞, 何文清, 胡跃高, 等. 低氮环境下燕麦与箭筈豌豆间混作与刈割时间对饲草产量及质量特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(5): 5-9.
- ZHAO C X, HE W Q, HU Y G, *et al.* Effect of intercropping or mixture and harvest time on forage yield and quality of oat and pea under low soil nitrogen environment[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(5): 5-9.
- [31] 曹仲华, 魏 军, 杨富裕, 等. 西藏山南地区箭筈豌豆与丹麦“444”燕麦混播效应的研究[J]. 西北农业学报, 2007, 16(5): 67-71.
- CAO ZH H, WEI J, YANG F Y, *et al.* Effects of the common vetch-oat mixture in the shannan region of Tibet[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2007, 16(5): 67-71.
- [32] ASSEFA G, LEDIN I. Effect of variety, soil type and fertiliser on the establishment, growth, forage yield, quality and voluntary intake by cattle of oats and vetches cultivated in pure stands and mixtures[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2001, 92(1/2): 95-111.
- [33] REN Y Y, WANG X L, ZHANG S Q, *et al.* Influence of spatial arrangement in maize-soybean intercropping on root growth and water use efficiency[J]. *Plant and Soil*, 2017, 415(1): 131-144.
- [34] GAO Y, DUAN A, QIU X, *et al.* Distribution and use efficiency of photosynthetically active radiation in strip intercropping of maize and soybean[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 102(4): 952-958.
- [35] LI R, ZHANG Z X, TANG W, *et al.* Common vetch cultivars improve yield of oat row intercropping on the Qinghai-Tibetan plateau by optimizing photosynthetic performance[J]. *European Journal of Agronomy*, 2020, 117: 126088.
- [36] 张风云, 吴普特, 赵西宁, 等. 间套作提高农田水分利用效率的节水机理[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1400-1406.
- ZHANG F Y, WU P T, ZHAO X N, *et al.* Water-saving mechanisms of intercropping system in improving cropland water use efficiency[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(5): 1400-1406.
- [37] SETIAWAN A N. Microclimate Dynamics In Sweet Corn Intercropping with Various Legumes[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2022, 985(1): 012013.
- [38] ANUGROHO F, KITOU M, NAGUMO F, *et al.* Potential growth of hairy vetch as a winter legume cover crops in subtropical soil conditions[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2010, 56(2): 254-262.
- [39] 马爱平, 崔欢虎, 亢秀丽, 等. 不同海拔夏闲期压青茬口对麦田水分及水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 249-255.
- MA A P, CUI H H, KANG X L, *et al.* Effects of green manuring rotations in summer fallow period on soil water and water use efficiency in wheat field in different altitude-regions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4): 249-255.
- [40] 宫香伟, 党 科, 李 境, 等. 糜子绿豆间作模式下糜子光合物质生产及水分利用效率[J]. 中国农业科学, 2019, 52(22): 4139-4153.
- GONG X W, DANG K, LI J, *et al.* Effects of different intercropping patterns on photosynthesis production characteristics and water use efficiency of proso millet[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(22): 4139-4153.
- [41] 裴雪霞, 党建友, 张定一, 等. 化肥减量配施有机肥对旱地小麦产量、品质和水分利用率的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 250-258.
- PEI X X, DANG J Y, ZHANG D Y, *et al.* Effects of chemical fertilizer reduction combined with organic fertilizer on the yield, quality, and water use efficiency of dry land wheat[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 250-258.
- [42] 张学洲, 李学森, 兰吉勇, 等. 氮磷钾施肥量对混播草地产量、品质和经济效益的影响[J]. 草原与草坪, 2014, 34(4): 56-60.
- ZHANG X ZH, LI X S, LAN J Y, *et al.* Effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on yield, quality and economic feature of mixture pasture[J]. *Grassland and Turf*, 2014, 34(4): 56-60.
- [43] XIAO Y B, LI L, ZHANG F S. Effect of root contact on interspecific competition and N transfer between wheat and faba bean using direct and indirect ^{15}N techniques[J]. *Plant Soil*, 2004, 262: 45-54.
- [44] JUSTES E, BEDOUSSAC L, DORDAS C, *et al.* The 4C approach as a way to understand species interactions determining intercropping productivity[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2021. doi: 10.15302/J-FASE-2021414
- [45] 唐明明, 董 楠, 包兴国, 等. 西北地区不同间套作模式养分吸收利用及其对产量优势的影响[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(5): 48-56.
- TANG M M, DONG N, BAO X G, *et al.* Effects of nutrient uptake and utilization on yield of intercropping systems in Northwest China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(5): 48-56.
- [46] 柏文恋, 郑 毅, 肖靖秀. 豆科禾本科间作促进磷高效吸收利用的地下部生物学机制研究进展[J]. 作物杂志, 2018(4): 20-27.
- BAI W L, ZHENG Y, XIAO J X. Below-ground biotic mechanisms of phosphorus uptake and utilization improved by cereal and legume intercropping-a review[J]. *Crops*, 2018(4): 20-27.
- [47] LI X F, WANG C B, ZHANG W P, *et al.* The role of complementarity and selection effects in P acquisition of intercropping systems[J]. *Plant Soil*, 2018, 422: 479-493.
- [48] DISSANAYAKA D M S B, MARUYAMA H, MASUDA G, *et al.* Interspecific facilitation of P acquisition in intercropping of maize with white lupin in two contrasting soils as influenced by different rates and forms of P supply[J]. *Plant and Soil*, 2015, 390(1): 223-236.

Effects of Oat Intercropping with Common Vetch and Fertilization on Forage Nutrient Accumulation, Yield and Water Utilization in Horqin Sandy Land

YANG Jinhui, LI Lijun, ZHANG Yanli, QU Jiahui,
HAN Dongyu and ZHAO Xinyao

(College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

Abstract In order to study the cultivation modes of forage crops for efficient utilization of water and nutrients in Horqin sandy land of Inner Mongolia, a field experiment was carried out in the Naiman Desertification Research Station of Northwest China, Chinese Academy of Sciences from 2020 to 2021. Forage reseeding was carried out after mowing at the filling stage of oats. The two-factor experiment of planting mode and fertilization treatment was set up. The three planting modes were single oat ('Mengyan 1', SO), single common vetch(SV), and two rows of oats and four rows of common vetch intercropping(IOV). The four fertilization treatments were no fertilization(N), chemical fertilizer(diammonium phosphate, C, 150 kg/hm²), bio-organic fertilizer(Runze bio-organic fertilizer, O, 900 kg/hm²), organic fertilizer and inorganic fertilizer (bio-organic fertilizer + diammonium phosphate, G, full application). The effects of intercropping and fertilization on nutrient accumulation, yield and water use of forage grass in multiple cropping oat and common vetch were discussed. The results showed that intercropping and fertilization could significantly increase forage yield. In 2020 and 2021, the fresh grass yield of G treatment was significantly increased by 74.0% and 63.5% compared with that of N treatment, and the hay yield was significantly increased by 55.4% and 57.0%. The land equivalent ratio (LER) of the oat and common vetch intercropping system was greater than 1, indicating that the intercropping mode improves land productivity and has land use advantages. Intercropping and fertilization significantly increased soil water content in 0—60 cm soil layer. The combination of organic fertilizer and inorganic fertilizer increased the water use efficiency of crops, and the overall performance was SO>IOV>SV. The nutrient advantage of oat and common vetch intercropping system was mainly reflected in the increase of forage nitrogen accumulation, while the accumulation of phosphorus and potassium was lower than that of monoculture oat and higher than that of monoculture common vetch. In 2020 and 2021, the forage nitrogen accumulation of oat intercropping common vetch under G treatment increased by 152.2%, 21.7%, 47.1% and 119.8%, 17.6%, 41.2%, respectively, compared with N, C and O treatments. Comprehensive analysis showed that the combination of organic fertilizer and inorganic fertilizer was the most suitable fertilization method for oat and common vetch intercropping.

Key words Intercropping; Fertilization; Yield; Water use efficiency; Nutrient accumulation

Received 2022-06-15

Returned 2022-09-04

Foundation item Special Project of Inner Mongolia Science and Technology(No. 2019ZD003).

First author YANG Jinhui, male, master student. Research area: forage crop intercropping. E-mail: yjh0019@emails.imau.edu.cn

Corresponding author LI Lijun, male, Ph. D, professor, doctoral supervisor. Research area: farming systems and agroecology. E-mail: imaulj@163.com

(责任编辑:顾玉兰 Responsible editor: GU Yulan)