

# 施氮制度对燕麦||豌豆间作体系产量及种间竞争力的影响

张丽睿<sup>1</sup>,柴继宽<sup>1</sup>,赵桂琴<sup>1</sup>,吕英<sup>2</sup>,王苗苗<sup>1</sup>,孙雷雷<sup>1</sup>

(1. 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研究中心,甘肃 兰州 730070;2. 内蒙古自治区草原工作站,内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:**于2019年在甘肃省通渭县以燕麦||豌豆间作和燕麦单作为研究对象,在总施氮量相同且基肥占总施氮量20%的条件下,设不施氮(N0)、氮肥后移(N1:基肥20%+分蘖期追肥20%+开花期追肥60%)、拔节期前、后均匀配施(N2:基肥20%+分蘖期追肥30%+开花期追肥50%)和氮肥前移(N3:基肥20%+分蘖期追肥40%+开花期追肥40%)4个施氮制度,探讨不同氮处理对燕麦//豌豆间作体系产量及其种间关系的影响。结果表明:燕麦//豌豆间作体系的地上生物量和籽粒产量均高于相应单作,基于地上生物量的LER在施氮处理下均大于1;籽粒产量计算所得的LER在所有处理下均大于1,间作优势明显。间作燕麦籽粒产量和地上生物量在N2处理下最大,分别为3 705.3 kg/hm<sup>2</sup>和8.53 t/hm<sup>2</sup>,较N1和N3分别增产5.11%和22.48%,18.47%和22.03%。间作豌豆在N1处理(分枝期追肥20 kg N/hm<sup>2</sup>)下籽粒产量最高(2 073.7 kg/hm<sup>2</sup>)。间作系统中燕麦相对豌豆的种间竞争力随生育期和施氮处理呈先增后减的变化趋势,拔节期时燕麦处于竞争劣势,随生育期的延长,燕麦逐渐恢复竞争优势,相对豌豆的全生育期平均竞争力均>0,为竞争优势植物。间作群体籽粒产量与燕麦相对豌豆的平均竞争力呈二次曲线关系,当竞争力为0.14时,利于间作群体高产。燕麦灌浆期是调控种间竞争力、提高产量的关键时期。

**关键词:**燕麦;豌豆;间作;施氮处理;种间竞争力

**中图分类号:**S512.6;S529 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2022)04-0106-09

**DOI:**10.13817/j.cnki.cyycp.2022.04.014



燕麦(*Avena sativa*)为一年生禾本科饲草,具有适应性强,草产量高,适口性好等特点,为家畜所喜食,广泛种植于我国北方冷凉地区,常单作或与其他豆科植物混播、间作<sup>[1]</sup>。豌豆(*Pisum sativum*)是冷凉地区

的主要豆科作物之一,粗蛋白含量较高,常与玉米(*Zea mays*)<sup>[2-3]</sup>、大麦(*Hordeum vulgare*)<sup>[4-5]</sup>和小麦(*Triticum aestivum*)<sup>[6]</sup>等作物间作以达到减施氮肥、提高产量和资源利用率的效果。间作是将生理、生态具有差异、占据不同生态位的植物组合在同一群体内,集约利用各种资源的高产高效种植模式<sup>[7]</sup>。其中禾豆间作因高产稳产、增加作物生产力的稳定性<sup>[8]</sup>等特性在生产实践中备受关注<sup>[9-10]</sup>。间作植物的种间互补和竞争关系是间作优势的决定因素<sup>[11-12]</sup>,而间作植物的种间关系主要取决于其生物学特性、资源供给量和供给方式。当间作植物占据不同生态位、资源供给量,且与作物需求契合度较高时,种间互补作用较强,间作优势明显<sup>[13]</sup>。在燕麦//大豆(*Glycine max*)、燕麦||绿豆(*Vigna radiate*)体系中,不施氮条件下的燕麦||

**收稿日期:**2021-09-23; **修回日期:**2021-12-02

**基金项目:**甘肃农业大学科技创新基金-盛彤笙创新基金资助(GSAU-STS-2018-21);财政部和农业农村部现代农业产业技术体系(CARS-07-C-1)资助;甘肃省重大专项(19ZD2NA002-31)资助。

**作者简介:**张丽睿(1996-),女,甘肃金昌人,硕士研究生。

E-mail:2447074098@qq.com

赵桂琴为通信作者。

E-mail:zhaogq@gsau.edu.cn

豆科植物间作体系基于籽粒产量计算所得的土地当量比均大于1,较间作有利于增产。种间关系燕麦||绿豆体系中以竞争为主;燕麦||大豆体系中以促进作用为主<sup>[14]</sup>。王妍<sup>[15]</sup>对紫花苜蓿(*Medicago sativa*)||燕麦体系的研究发现,间作产量均显著高于相应单作,紫花苜蓿为竞争优势植物,说明同一植物在不同间作体系下的竞争力随搭配植物的不同而不同。

氮素作为提高产量的主要因素之一,会影响间作体系中植物间的关系。禾豆间作体系中,豆科植物在生长发育前期需要少量氮素作为启动氮,供应过多会产生“氮阻遏”效应<sup>[16]</sup>,而高氮供应会促进禾本科植物的营养生长,从而影响种间关系<sup>[17]</sup>。低氮水平下,小麦||蚕豆(*Vicia faba*)间作降低了种间竞争强度,产量优势明显<sup>[18]</sup>。张妍等<sup>[19]</sup>对大麦间作豌豆在不施氮、中等施氮量和高施氮量下大麦相对竞争力与产量关系的研究表明,良好的资源竞争是间作提高群体产量、保证经济优势的重要原因。Reinhard<sup>[20]</sup>对燕麦||豌豆系统的研究表明,在额外施氮的间作处理中,燕麦强烈的竞争优势使得豌豆的产量构成因子受到抑制,导致豌豆减产。

燕麦作为我国冷凉地区的重要饲草,和豌豆间作是否有利、氮肥对其间作产量和种间关系的影响如何,目前尚不明确。因此本研究拟通过比较不同施氮处理下燕麦与豌豆间作的产量及其种间关系,确定间作群体的最佳施氮处理,为通过调节施氮制度优化间作系统的种间关系与产量提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验于2019年在甘肃省定西市通渭县华家岭乡老站村(E 105°01', N 35°23')进行,海拔2 242 m,年平

均气温3.4℃,无霜期140 d,年均降水量500 mm,日照时数2 100~2 430 h,≥0℃年积温2 530℃。试验地土壤全氮含量2.3 g/kg、速效氮含量141.39 mg/kg、速效磷含量38.52 mg/kg、速效钾含量136.92 mg/kg、土壤pH值7.92、有机质含量4.67%。

### 1.2 供试材料

供试燕麦品种为‘陇燕3号’,豌豆品种为‘定豌3号’,均由甘肃农业大学草业学院提供。

### 1.3 试验设计

采用种植模式和施氮制度两因素随机区组设计,种植模式为单作豌豆(P)、单作燕麦(O)、燕麦间作豌豆(P/O);氮肥施量按照当地习惯,设为100 kg/hm<sup>2</sup>。设4个施氮处理:N0为不施氮,N1为氮肥后移:总施氮量的20%为基肥、燕麦分蘖期/豌豆分枝期追肥20%,燕麦开花期追肥60%;N2为拔节期前后均匀配施:总施氮量的20%为基肥、燕麦分蘖期/豌豆分枝期追肥30%,燕麦开花期追肥50%;N3为氮肥前移:总施氮量的20%为基肥、燕麦分蘖期/豌豆分枝期追肥40%,燕麦开花期追肥40%。为防止“氮阻遏”,豌豆仅在分枝期追施一次氮肥。单作豌豆的施肥按照N:P为1:0.75的比例,即75 kg/hm<sup>2</sup>(纯P)全部作为基肥施用。全生育期无灌溉。共12个处理,每处理3次重复(表1)。

单、间作燕麦行距按当地习惯设为20 cm,播种量200 kg/hm<sup>2</sup>;单、间作豌豆行距设为20 cm,播种量262.5 kg/hm<sup>2</sup>。燕麦与豌豆间作比例为6:4,即6行燕麦和4行豌豆,带幅分别为120 cm和80 cm(图1)。小区面积28 m<sup>2</sup>(7 m×4 m),小区间走道1.0 m,燕麦与豌豆同时播种。

### 1.4 测定指标及方法

1.4.1 地上生物量 分别于燕麦拔节期(豌豆孕蕾

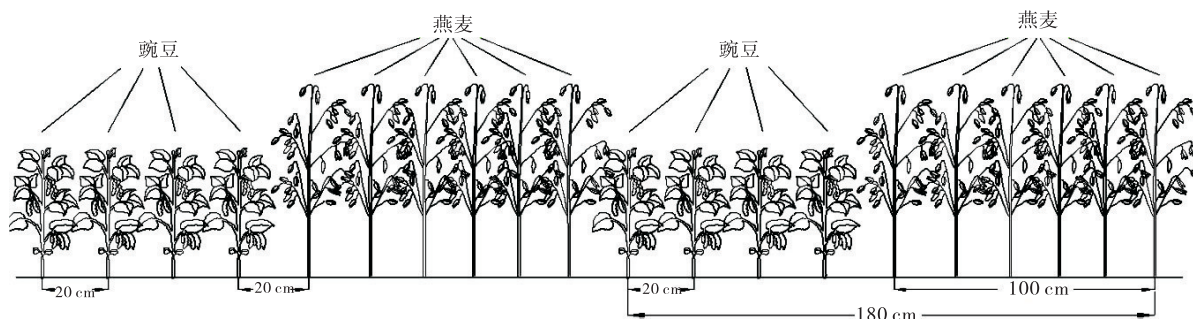


图1 燕麦豌豆间作种植结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of oat/pea intercropping

表1 试验设计  
Table 1 Experiment design

种植模式	处理	施氮制度	基肥/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	追肥/(kg·hm <sup>-2</sup> )		总施氮量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
				分蘖/分枝期	开花期	
单作燕麦(O)	ON0	N0	0	0	0	0
	ON1	N1	20	20	60	100
	ON2	N2	20	30	50	100
	ON3	N3	20	40	40	100
单作豌豆(P)	PN0	N0	0	0	0	0
	PN1	N1	20	20	0	40
	PN2	N2	20	30	0	50
	PN3	N3	20	40	0	60
燕麦豌豆 间作 (O/P)	OPN0	N0	0	0	0	0
	OPN1	N1	20	20	60	100
	OPN2	N2	20	30	50	100
	OPN3	N3	20	40	40	100

期)、抽穗期(豌豆结荚期)、灌浆期(豌豆绿熟期)和成熟期(豌豆成熟期)在各小区随机取1 m单行样段<sup>[21]</sup>,齐地刈割并测鲜重,再于105℃下烘30 min,转至80℃烘箱中烘至恒重,计算干重。3次重复。

1.4.2 籽粒产量 燕麦、豌豆成熟后全区收获、计产(除去取样植株所占面积),脱粒晾晒后称重,计算籽粒产量和收获指数<sup>[22]</sup>。

$$\text{收获指数} = \text{籽粒产量} / \text{生物产量} \quad (1)$$

1.4.3 土地当量比(land equivalent ratio, LER)

$$\text{LER} = (\text{Yip} / \text{Ysp}) + (\text{Yio} / \text{Yso}) \quad (2)$$

式中Yip和Ysp分别表示豌豆在间作、单作时的地上部干物质质量,Yio和Yso分别表示燕麦在间作、单作时的地上部干物质质量,当LER>1.0时,表示有间作优势,当LER<1.0时表现间作劣势<sup>[19]</sup>。

1.4.4 种间相对竞争力(Aggressivity, A)

$$\text{Aop} = \text{Yio} / (\text{Yso} \times \text{Zio}) - \text{Yip} / (\text{Ysp} \times \text{Zip}) \quad (3)$$

式中,Aop为燕麦相对于豌豆的竞争力,Yip和Ysp分

别表示豌豆在间作和单作时的地上部干物质质量,Yio和Yso分别表示燕麦在间作和单作时的地上部干物质质量,Zio和Zip分别表示燕麦和豌豆的在间作中所占的面积比例。Aop>0表明燕麦竞争力大于豌豆,Aop<0则表明豌豆竞争力大于燕麦<sup>[18]</sup>。

## 1.5 数据处理

采用Excel 2007进行数据整理、分析与作图,用SPSS 23.0软件进行方差分析、多重比较、回归检验和相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 施氮制度对间作系统地上生物量的影响

施氮制度和种植模式对燕麦、豌豆地上生物量的影响达到显著( $P<0.05$ )或极显著( $P<0.01$ )水平。二者的互作对燕麦抽穗期、豌豆灌浆期和成熟期地上生物量的影响也极显著( $P<0.01$ ) (表2)。

表2 不同处理下燕麦、豌豆地上生物量的方差分析

Table 2 Variance analysis of above ground biomass of oat and pea under different treatments

因素	F值							
	地上部生物量							
	拔节期		抽穗期		灌浆期		成熟期	
	燕麦	豌豆	燕麦	豌豆	燕麦	豌豆	燕麦	豌豆
种植方式	195.63**	19.49**	122.77**	36.42**	241.41**	389.86**	86.74**	451.01**
氮水平	10.50**	9.56**	15.24**	4.52*	26.78**	15.74**	4.18*	19.81**
种植方式×氮水平	2.05	2.86	5.43**	1.61	2.50	8.00**	2.10	9.29**

注:\*\*表示差异极显著( $P<0.01$ );\*表示差异显著( $P<0.05$ )

将单作燕麦、豌豆地上生物量换算成与间作同等面积的生物量,单作燕麦地上生物量随生育期的推进持续增加,到成熟期达到最大,在 N0、N1、N2 和 N3 水平下分别为 5.82、6.00、6.48 和 5.91 t/hm<sup>2</sup>(表 3)。单作燕麦拔节期的地上生物量随第 1 次追肥量的增加而增加,在 N3 处理下达到最大(1.43 t/hm<sup>2</sup>),较 N0、N1 和 N2 处理分别提高 24.35%、9.16% 和 4.38%;抽穗期,灌浆期和成熟期则在 N2 水平下获得最大生物量,较不施氮处理分别增加了 48.47%、29.40% 和 11.34%。单作豌豆的地上生物量也随着生育期的推进而增加,各时期均表现为 N2>N1>N3>N0。拔节期,单作豌豆在 N2 水平下地上生物量为 0.94 t/hm<sup>2</sup>,较不施氮处理增加了 62.07% ( $P<0.05$ );而抽穗期 N2 处理的地上生物量为 1.98 t/hm<sup>2</sup>,较 N0、N1 和 N3 分别增加了 62.30%、14.45% 和 26.92%;成熟期 N2

处理的地上生物量也显著高于 N0、N1 和 N3(分别增加了 46.67%、22.87% 和 32.38%, $P<0.05$ )。

在燕麦豌豆间作体系中,燕麦占地 60%,豌豆占地 40%。各生育期,除拔节期 N3 处理外,相同占地面积下间作燕麦的地上生物量均高于相应的单作(表 3),成熟期在 N0、N1、N2 和 N3 处理下较相应单作的地上生物量分别增加了 11.68%、20.00%、31.64% 和 18.27%。间作燕麦地上生物量均随第 1 次追肥量的增加先增后减,在 N2 处理下达到最大,分别较 N0、N1 和 N3 水平灌浆期高 63.82%、14.49% 和 27.33%,在成熟期高 31.23%、18.47% 和 22.03%。间作豌豆在灌浆期 N0、N1 和 N3 水平下的地上生物量小于相应单作,分别降低了 18.97%、2.16% 和 4.25%,其他生育时期均高于相应单作。各时期间作豌豆在不同氮水平下的地上生物量均表现为 N2>N1>N3>N0。

表 3 燕麦、豌豆不同生育时期的地上生物量

Table 3 Above ground biomass of oat and pea at different growth periods

t/hm<sup>2</sup>

处理	拔节期			抽穗期			灌浆期			成熟期		
	燕麦	豌豆	总生物量	燕麦	豌豆	总生物量	燕麦	豌豆	总生物量	燕麦	豌豆	总生物量
ON0	1.15 <sup>b</sup>	-		2.29 <sup>c</sup>	-		4.83 <sup>c</sup>	-		5.82 <sup>c</sup>	-	
ON1	1.31 <sup>ab</sup>	-		3.06 <sup>cd</sup>	-		5.78 <sup>cd</sup>	-		6.00 <sup>c</sup>	-	
ON2	1.37 <sup>ab</sup>	-		3.40 <sup>bc</sup>	-		6.25 <sup>bc</sup>	-		6.48 <sup>bc</sup>	-	
ON3	1.43 <sup>ab</sup>	-		2.76 <sup>cde</sup>	-		5.43 <sup>cde</sup>	-		5.91 <sup>c</sup>	-	
PN0	-	0.58 <sup>d</sup>		-	1.22 <sup>d</sup>		-	2.76 <sup>de</sup>		-	3.15 <sup>e</sup>	
PN1	-	0.85 <sup>bc</sup>		-	1.73 <sup>bc</sup>		-	3.78 <sup>abc</sup>		-	3.76 <sup>cd</sup>	
PN2	-	0.94 <sup>ab</sup>		-	1.98 <sup>ab</sup>		-	4.26 <sup>ab</sup>		-	4.62 <sup>b</sup>	
PN3	-	0.78 <sup>cd</sup>		-	1.56 <sup>c</sup>		-	3.19 <sup>cd</sup>		-	3.49 <sup>cde</sup>	
O/PN0	1.19 <sup>b</sup>	0.68 <sup>cd</sup>	1.86 <sup>c</sup>	2.64 <sup>de</sup>	1.22 <sup>d</sup>	3.85 <sup>b</sup>	4.92 <sup>de</sup>	2.32 <sup>e</sup>	7.24 <sup>d</sup>	6.50 <sup>bc</sup>	3.24 <sup>de</sup>	9.74 <sup>c</sup>
O/PN1	1.42 <sup>ab</sup>	0.97 <sup>ab</sup>	2.39 <sup>ab</sup>	3.85 <sup>ab</sup>	1.90 <sup>ab</sup>	5.75 <sup>a</sup>	7.04 <sup>b</sup>	3.70 <sup>bc</sup>	10.74 <sup>b</sup>	7.20 <sup>b</sup>	3.98 <sup>c</sup>	11.19 <sup>b</sup>
O/PN2	1.65 <sup>a</sup>	1.16 <sup>a</sup>	2.81 <sup>a</sup>	4.19 <sup>a</sup>	2.02 <sup>a</sup>	6.21 <sup>a</sup>	8.06 <sup>a</sup>	4.52 <sup>a</sup>	12.57 <sup>a</sup>	8.53 <sup>a</sup>	5.32 <sup>a</sup>	13.85 <sup>a</sup>
O/PN3	1.43 <sup>ab</sup>	0.84 <sup>bc</sup>	2.27 <sup>bc</sup>	3.13 <sup>cd</sup>	1.50 <sup>c</sup>	4.63 <sup>b</sup>	6.33 <sup>bc</sup>	3.06 <sup>cd</sup>	9.40 <sup>c</sup>	6.99 <sup>b</sup>	3.70 <sup>cd</sup>	10.69 <sup>b</sup>

注:单作地上生物量为相应间作物同等面积下的换算值;同列不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。下同

## 2.2 施氮制度对间作系统籽粒产量和收获指数的影响

种植模式和施氮制度对燕麦、豌豆籽粒产量的方差分析表明,二者对籽粒产量的影响均达到极显著水平( $P<0.01$ ),但其交互作用则无明显影响( $P>0.05$ )(表 4)。

相同占地面积不同施氮制度下,燕麦//豌豆间作显著提高了燕麦籽粒产量(表 5)。在 N0、N1、N2 和 N3 水平下,与相应单作处理相比,间作燕麦籽粒产量分别增加了 13.56%、22.01%、21.56% 和 17.25%,平

表 4 不同处理下燕麦、豌豆籽粒产量的方差分析

Table 4 Variance analysis of grain yield of oat and pea under different treatments

因素	F 值	
	燕麦	豌豆
种植方式	85.70 <sup>**</sup>	124.49 <sup>**</sup>
氮水平	15.59 <sup>**</sup>	9.19 <sup>**</sup>
种植方式×氮水平	0.07	0.56

均增幅为 18.60%;与相应单作相比,间作豌豆籽粒产量也显著提高,分别增加了 26.95%、36.24%、33.67% 和 18.77%,可见间作对提高籽粒产量效果

显著。

同一种植模式不同施氮制度下,单作和间作燕麦籽粒产量均在 N2 处理下达到最大,分别为 3 048.1、3705.3 kg/hm<sup>2</sup>,与 N1 处理无显著差异( $P>0.05$ ),但显著高于 N3 和不施氮处理。单作和间作豌豆在 N1 水平下获得最大籽粒产量,分别为 1 522.1 kg/hm<sup>2</sup>和 2 073.7 kg/hm<sup>2</sup>。

收获指数是植株茎叶等营养器官积累的养分向籽粒转运能力的体现<sup>[23]</sup>。不同施氮制度下,间作燕麦、豌豆较相应单作的收获指数并无显著差异( $P>0.05$ ),同一种植模式不同施氮制度下,单、间作燕麦在 N1、N2 和 N3 水平下的收获指数也无显著差异( $P>0.05$ )(表 5)。

表 5 不同处理下燕麦、豌豆的籽粒产量、土地当量比和收获指数

Table 5 Yield, land equivalent rate and harvest index of oat and pea under different treatments

处理	籽粒产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )			LER	收获指数	
	燕麦	豌豆	总产		燕麦	豌豆
ON0	2259.2 <sup>c</sup>				0.39 <sup>b</sup>	
ON1	2889.1 <sup>b</sup>				0.48 <sup>a</sup>	
ON2	3048.1 <sup>b</sup>				0.47 <sup>a</sup>	
ON3	2580 <sup>bc</sup>				0.44 <sup>ab</sup>	
PN0		1028.0 <sup>d</sup>				0.33 <sup>b</sup>
PN1		1522.1 <sup>bc</sup>				0.41 <sup>ab</sup>
PN2		1384.8 <sup>cd</sup>				0.30 <sup>b</sup>
PN3		1285.7 <sup>cd</sup>				0.37 <sup>b</sup>
O/PN0	2565.5 <sup>bc</sup>	1305.0 <sup>cd</sup>	3870.5 <sup>b</sup>	1.19 <sup>a</sup>	0.40 <sup>b</sup>	0.40 <sup>ab</sup>
O/PN1	3525.0 <sup>a</sup>	2073.7 <sup>a</sup>	5598.7 <sup>a</sup>	1.28 <sup>a</sup>	0.49 <sup>a</sup>	0.52 <sup>a</sup>
O/PN2	3705.3 <sup>a</sup>	1851.0 <sup>ab</sup>	5556.3 <sup>a</sup>	1.26 <sup>a</sup>	0.44 <sup>ab</sup>	0.35 <sup>b</sup>
O/PN3	3025.1 <sup>b</sup>	1527.0 <sup>bc</sup>	4552.1 <sup>b</sup>	1.27 <sup>a</sup>	0.43 <sup>ab</sup>	0.41 <sup>ab</sup>

## 2.3 燕麦 || 豌豆间作系统的种间相互作用

2.3.1 燕麦 || 豌豆间作的土地当量比 燕麦豌豆间作系统地上部干物质量的土地当量比,除灌浆期 N0 下间作体系小于 1 外,其余处理下 LER 均大于 1。燕麦拔节期 N0、N1、N2 和 N3 水平下 LER 分别为 1.08、1.11、1.21 和 1.03。燕麦抽穗期,LER 为 1.06~1.19。灌浆期 N0 处理下 LER<1。而其他氮处理下互补作用明显,均表现出间作优势。成熟期 LER 在各施氮处理下均大于 1, N0、N1、N2 和 N3 处理下分别为 1.08、1.14、1.25 和 1.13。土地利用效率随作物生育时期、施氮水平的不同略有不同,但在间作系统中配施适量氮肥可以提高间作优势和土地利用效率(图 2)。

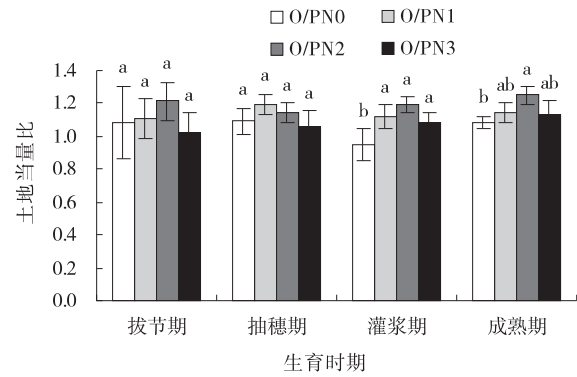


图 2 不同处理各生育时期下的土地当量比

Fig. 2 Land equivalent ratio under different treatments in each growth period

2.3.2 燕麦 || 豌豆间作的种间竞争力动态 4 种施氮制度下,随着生育时期的推进,燕麦相对于豌豆的竞争力呈先增后减的变化趋势,至燕麦灌浆期,其相对豌豆的竞争优势达到最大,分别为 0.18(N0),0.24(N1),0.23(N2)和 0.21(N3),此后逐渐下降。在燕麦、豌豆共生初期,燕麦相对于豌豆的竞争力在 4 个施氮制度下均小于 0。随着生育进程的推进,燕麦的竞争优势逐渐展现。不同施氮制度下, N2 处理全生育期燕麦相对于豌豆的平均竞争力最大,较 N0、N1 和 N3 分别高 93%、21% 和 35%(图 3)。

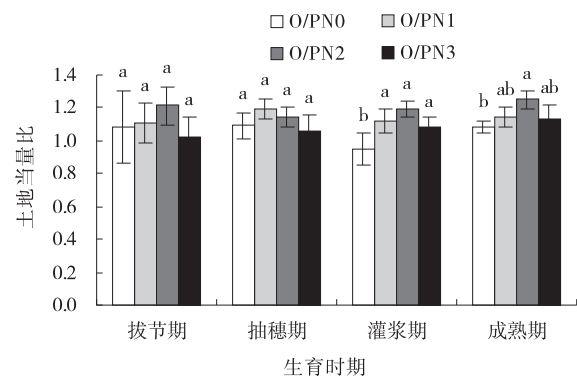


图 3 不同施氮处理下燕麦 || 豌豆间作体系中燕麦相对于豌豆的竞争力

Fig. 3 Dynamics of competitiveness of oat relative to pea in oat/pea intercropping systems under different nitrogen treatments

## 2.4 竞争力与间作群体草产量及籽粒产量的相关性

以燕麦相对于豌豆生育期竞争力的平均值为自变量,以间作复合群体的产量为因变量,研究竞争力和产量间的相关关系,发现复合群体产量与竞争力间呈显著的二次曲线关系( $y=-318\ 931.29x^2+92\ 362.81x-1\ 338.05, R^2=0.76$ )(图 4)。随着燕麦相对豌豆竞争力的增大,复合群体的产量呈先增后减

的趋势,即燕麦相对于豌豆的竞争力增大到一定限度时,复合群体的产量随相对竞争力的增大而下降。基于二次曲线可知,全生育期平均竞争力为0.14时,可获得最大混合籽粒产量。当燕麦相对于豌豆的竞争力大于0.14时,间作群体混合产量随之下降。

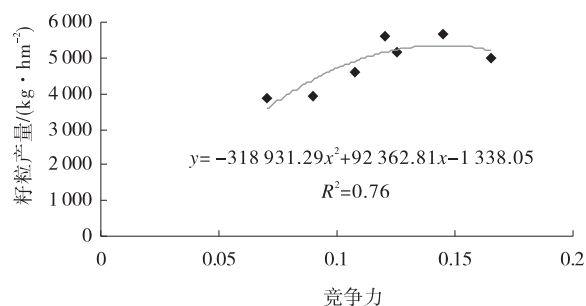


图4 燕麦相对于豌豆全生育期的平均竞争力与复合群体籽粒产量间的相关关系

Fig. 4 Relationships of the average competitiveness of oat to pea with grain yield of the intercropping system

4个生育时期燕麦对豌豆的竞争力与间作群体混合籽粒产量的相关性表明,生育前期的种间竞争力与生育后期的种间竞争力均呈正相关,且燕麦灌浆期的竞争力与间作群体混合籽粒产量呈显著正相关关系(表6)。

表6 不同生育时期竞争力与籽粒产量的相关性

Table 6 Correlation coefficient of competitiveness of oat to pea at different growth period with grain yield of oat and pea in intercropping system

	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期	籽粒产量
拔节期	1	0.847	0.875	0.779	0.902
抽穗期		1	0.503	0.866	0.605
灌浆期			1	0.861	0.980*
成熟期				1	0.922
籽粒产量					1

### 3 讨论

#### 3.1 不同施氮制度下燕麦//豌豆间作的地上生物量及产量优势

间作通过植物占据不同生态位,在提高作物地上生物量<sup>[24]</sup>、产量<sup>[25]</sup>及资源利用率<sup>[26]</sup>方面的优势已被大量研究所证实,其中禾豆间作又以豆科植物的生物固氮而备受关注。本研究发现,燕麦//豌豆间作体系中,间作燕麦、豌豆成熟期地上生物量及籽粒产量均高于相应单作,说明二者间作能提高土地利用率,可能其形态特征及根系生长状态不同,与能更高效地利

用养分、水分和光等资源有关;也与二者对资源的需求互补有关<sup>[4]</sup>。在大麦//豌豆间作体系中,间作大麦、豌豆的收获指数较单作均有显著增加,而本试验中间作较相应单作的收获指数并无明显变化,这可能与植物种类有关<sup>[27]</sup>。

氮素作为限制植物产量的重要因素之一,合理施用可促进作物生长,提高产量<sup>[28]</sup>。较高的氮肥基施对禾本科植物分蘖成穗数有显著促进作用,但氮肥过多会使无效分蘖增多和徒长,增加倒伏和病虫害的发生几率,减少光合产物向籽粒的转运<sup>[29]</sup>。因此合理的氮肥运筹对提高植物产量、品质及氮素利用率至关重要<sup>[30]</sup>。马雪琴等<sup>[31]</sup>的研究表明,施氮量相同时,燕麦产量及地上生物量在分期施肥下均高于一次性基施。关于燕麦需肥时期的研究则表明,分蘖期之前需氮量较少,分蘖期到抽穗期需氮量增加<sup>[32]</sup>。开花期至成熟期干物质的生产、积累与植株生育后期衰老的矛盾及忽视后期追氮使旗叶叶绿素大量降解是限制小麦产量的重要因素<sup>[33-34]</sup>,因此在开花期追肥十分有必要。本试验中单、间作燕麦的地上生物量和产量在不同施氮制度下均表现为N2>N1>N3>N0,即分蘖期、开花期追肥量分别占总施氮量的30%和50%为燕麦最佳施氮制度,这与胡群等<sup>[35]</sup>、柯健等<sup>[36]</sup>提出的钵苗摆栽籼粳杂交稻基肥:穗肥应为6:4有所不同,可能与作物种类、生长特性与环境及氮素利用特性有关。玉米//豌豆间作系统增产的原因之一是氮肥后移,使玉米干物质高积累速率的持续时间延长<sup>[37]</sup>。单、间作豌豆的地上生物量在N2水平下最大,而籽粒产量在N1水平下最大,说明施20 kg/hm<sup>2</sup>的氨基肥和分枝期追氮施30 kg/hm<sup>2</sup>有利于豌豆地上干物质的积累,但不利于干物质向籽粒的转移。

#### 3.2 不同施氮制度下燕麦//豌豆间作的种间竞争力

土地当量比(LER)是评定间作是否具有优势的一个重要指标,可以反映间作的土地利用效率<sup>[24]</sup>。而侵袭力(Aggressivity, A)是用来评价间作系统中一种作物相对于相邻作物对阳光、水分、养分等生长所需资源的竞争能力<sup>[14]</sup>,燕麦相对豌豆的种间竞争力(Aop)大于0,表示间作系统中燕麦相对于豌豆具有竞争优势,反之,则表示豌豆更具有竞争优势,且种间相对竞争力(A)弥补了LER未考虑各作物占地面积的缺陷<sup>[24]</sup>。间作系统中,植物的根尖相互作用对养分吸

收的促进、产量形成的竞争—恢复效应、高效养分利用、对非高效养分的有效化等是通过植物竞争与互补提高产量和养分利用效率的主要原因<sup>[38]</sup>。在苜蓿与小黑麦(*Triticale hexaploide*)、燕麦、玉米、高粱(*Sorghum bicolor*)的4种间作模式中,苜蓿均表现出竞争劣势,禾本科植物处于竞争优势地位,且各间作模式下的LER均大于1,4种间作模式的产量效益高于单作<sup>[39]</sup>。小麦//蚕豆间作中,生长初期种间竞争占主导地位,导致LER小于1;生长中后期LER大于1,通过减轻小麦种内竞争,为间作产量和生物量优势奠定了基础<sup>[40]</sup>。燕麦与大豆的间作模式中,土地当量比大于1,表现出明显的间作优势<sup>[41]</sup>。本试验中,除燕麦灌浆期N0处理下的小于1之外,其余处理均大于1,与以上研究结果基本一致,说明间作较单作有明显优势。燕麦灌浆期不施氮条件下,以地上生物量计算所得的土地当量比小于1,可能是由于燕麦在抽穗—灌浆期进入旺盛生长<sup>[42]</sup>,需氮量较大,供氮量不足,且随着环境温度的逐渐升高,更适应高温环境的豌豆生长迅速,种间竞争加剧,使得间作群体的竞争大于互补作用,从而表现出劣势,说明生育进程及外界环境的变化会影响间作群体间的竞争作用<sup>[43]</sup>。

燕麦生育期竞争力平均值与间作群体混合产量呈显著的二次曲线关系,当燕麦相对于豌豆的竞争力达到某一固定值时,间作群体混合产量最大,可能是由于不同施氮制度对燕麦、豌豆种间竞争力的调控使得竞争优势作物产量增加,竞争劣势作物产量下降,因此可以通过调控施氮制度,观察竞争优势作物产量的增加能否弥补竞争劣势作物产量的损失,从而达到通过调控种间竞争力而进一步增产的目的,这与秦亚洲等<sup>[4]</sup>、张妍等<sup>[19]</sup>、王利立等<sup>[5]</sup>、殷文等<sup>[44]</sup>的研究结果一致。燕麦灌浆期的竞争力与间作群体混合籽粒产量呈显著正相关关系,因此燕麦灌浆期可作为通过调控种间竞争力而提高间作群体产量的关键时期。此时燕麦对营养物质需求量大,利用率高,配合适宜施氮制度调控种间相对竞争力可显著提高间作群体籽粒产量。

#### 4 结论

(1)燕麦//豌豆间作系统成熟期地上生物量和籽粒产量均高于相应单作,间作优势明显。间作配合适

宜施氮制度是获得高产的有效途径。分蘖期追肥 30 kg/hm<sup>2</sup>,开花期追肥 50 kg/hm<sup>2</sup>可使间作燕麦获得最大籽粒产量和地上生物量,间作豌豆在燕麦分蘖期追肥 20 kg/hm<sup>2</sup>的条件下籽粒产量最高。

(2)燕麦、豌豆间作的种间竞争力随生育时期和施氮制度呈动态变化,燕麦拔节期豌豆竞争优势明显,后期燕麦竞争优势逐渐增大。间作群体产量与燕麦相对豌豆的平均竞争力为 0.14 时,利于高产。燕麦灌浆期是调控种间竞争力、提高产量的关键时期。

#### 参考文献:

- [1] 陈恭,郭丽梅,任长忠,等. 行距及间作对箭筈豌豆与燕麦青干草产量和品质的影响[J]. 作物学报,2011,37(11): 2066—2074.
- [2] 赵建华,孙建好,李伟琦. 覆膜对玉米||豌豆作物生产力及种间互作的影响[J]. 干旱地区农业研究,2020,38(2): 164—169.
- [3] 高慧,朱倩,张荣,等. 不同种植密度下玉米与豌豆间作对群体总产量的影响[J]. 应用生态学报,2016,27(11): 3548—3558.
- [4] 秦亚洲,王利立,柴强,等. 大麦间作豌豆的种间竞争力及产量对施氮量的响应[J]. 农业现代化研究,2015,36(3): 482—487.
- [5] 王利立,朱永永,殷文,等. 大麦/豌豆间作系统种间竞争力及产量对地下作用和密度互作的响应[J]. 中国生态农业学报,2016,24(3):265—273.
- [6] 薛世通,董琦,董泽鹏,等. 施氮量对春小麦/豌豆间作生长、AMF 侵染率和春小麦产量的影响[J]. 河南农业科学,2020,49(4):22—28.
- [7] 杨娜娜. 旱区马铃薯燕麦间作高产机理研究[D]. 银川: 宁夏大学,2018.
- [8] 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[J]. 中国生态农业学报,2016,24(4): 403—415.
- [9] 崔雄维,吴伯志. 间作蔬菜研究进展[J]. 云南农业大学学报,2009,24(1):128—132.
- [10] 李志贤,冯远娇,杨文亭,等. 甘蔗间作种植研究进展[J]. 中国生态农业学报,2010,18(4):884—888.
- [11] Dapaah H K, Asafu—Agyei J N, Ennin S A, et al. Yield stability of cassava, maize, soya bean and cowpea intercrops[J]. Journal of Agricultural Science, 2003, 140(1): 73—82.
- [12] Ndakidemi P A. Manipulating legume/cereal mixtures to

- optimize the above and below ground interactions in the traditional African cropping systems [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2006, 525(25): 2526—2533.
- [13] Sekiya N, Yano K. Do pigeon pea and sesbania supply groundwater to intercropped maize through hydraulic lift?—Hydrogen stable isotope investigation of xylem waters [J]. *Field Crops Research*, 2004, 86(2-3): 167—173.
- [14] 冯晓敏. 燕麦||大豆, 燕麦||绿豆系统生理生态机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [15] 王妍. 紫花苜蓿||燕麦间作效应及氮素吸收机理研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2019.
- [16] Lahiri D, Khalid S, Sarkar T, *et al.* Pea—barley intercropping for efficient symbiotic N<sub>2</sub>-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems [J]. *Field Crops Research*, 2009, 113(1): 64—71.
- [17] Kessel C V, Hartley C. Agricultural management of grain legumes: has it led to an increase in nitrogen fixation? [J]. *Field Crops Research*, 2000, 65(2—3): 165—181.
- [18] 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[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(12): 1890—1900.
- [19] 张妍, 王利立, 柴强, 等. 施氮水平对大麦间作豌豆种间竞争的调控效应[J]. *农业现代化研究*, 2014, 35(03): 381—384.
- [20] Neugschwandtner R W, Kaul H P. Sowing ratio and N fertilization affect yield and yield components of oat and pea in intercrops. *Field Crops Research*, 2014, 155: 159—163.
- [21] 魏小星, 阿啟兰, 刘勇, 等. 青海东部农区不同饲用燕麦品种生产性能及营养品质的比较[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(6): 24—28.
- [22] 王斌, 聂督, 赵圆峰, 等. 水氮耦合对藜麦产量、氮素吸收和水氮利用的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(9): 87—94.
- [23] 冯亚阳, 史海滨, 李瑞平, 等. 膜下滴灌水氮耦合效应对玉米干物质与产量的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2018, 36(8): 750—755.
- [24] 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[J]. *草业科学*, 2020, 37(11): 2284—2292.
- [25] 韩建国, 马春晖, 毛培胜, 等. 播种比例和施氮量及刈割期对燕麦与豌豆混播草地草量和质量的影响[J]. *草地学报*, 1999, 7(2): 87—94.
- [26] 王林, 王琦, 张恩和, 等. 间作与施氮对秸秆覆盖作物生产力和水分利用效率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(8): 955—964.
- [27] 张作为, 史海滨, 李祯, 等. 不同生育时期非充分灌溉对间作作物产量构成因子及收获指数的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(4): 31—37+61.
- [28] 王乐, 张玉霞, 于华荣, 等. 氮肥对沙地燕麦生长特性及产量的影响[J]. *草业科学*, 2017, 34(7): 1516—1521.
- [29] 马迎辉, 王玲敏, 黄玉芳, 等. 氮肥运筹对冬小麦干物质累积、产量及氮素吸收利用的影响[J]. *华北农学报*, 2013, 28(1): 187—192.
- [30] 戴廷波, 孙传范, 荆奇, 等. 不同施氮水平和基追比对小麥籽粒品质形成的调控[J]. *作物学报*, 2005, 31(2): 248—253.
- [31] 马雪琴. 高寒牧区播期和氮肥对燕麦产量及其构成和氮素吸收利用与分配的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2007.
- [32] 田永雷, 张玉霞, 朱爱民, 等. 施氮对科尔沁沙地饲用燕麦产量及氮肥利用率的影响[J]. *草原与草坪*, 2018, 38(5): 54—58.
- [33] 于振文, 田奇卓, 潘庆民, 等. 黄淮麦区冬小麦超高产栽培的理论与实践[J]. *作物学报*, 2002, 28(5): 577—585.
- [34] 李姗姗, 赵广才, 常旭虹, 等. 追氮时期对强筋小麦产量、品质及其相关生理指标的影响[J]. *麦类作物学报*, 2008(3): 461—465.
- [35] 胡群, 夏敏, 张洪程, 等. 氮肥运筹对钵苗机插优质食味水稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. *作物学报*, 2016, 42(11): 1666—1676.
- [36] 柯健, 陈婷婷, 徐浩聪, 等. 控释氮肥运筹对钵苗摆栽籼粳杂交稻甬优1540产量及氮肥利用的影响[J/OL]. *作物学报*: 1—13[2021-03-08].
- [37] 胡发龙. 氮肥后移与玉米间作豌豆对土壤温室气体减排的协同效应[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.
- [38] 柴强, 胡发龙, 陈桂平. 禾豆间作氮素高效利用机理及农艺调控途径研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(1): 19—26.
- [39] 蔺芳, 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[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(10): 3452—3462.
- [40] 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[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4037—4046.



- [41] 乔月静,郭来春,葛军勇,等. 燕麦与豆科作物间作对土壤酶活和微生物量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2020,55(3):54-61.
- [42] 梁国玲,秦燕,魏小星,等. 青藏高原高寒区I-D燕麦品系饲草生产性能及品质评价[J]. 草地学报, 2018, 26(4):917-927.
- [43] 齐万海,柴强. 不同隔根方式下间作小麦玉米的竞争力及产量响应[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 31-34.
- [44] 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[J]. 作物学报, 2015, 41(4):633-641.

## Effect of nitrogen application on interspecific competition and yield of oat-pea intercropping system

ZHNAG Li-rui<sup>1</sup>, CHAI Ji-kuan<sup>1</sup>, ZHAO Gui-qin<sup>1</sup>, LV Ying<sup>2</sup>,

WANG Miao-miao<sup>1</sup>, SUN Lei-lei<sup>1</sup>

(1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecology System, Ministry of Education, Sino-U. S. Centers for Grazing Land Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China;

2. Grassland Working Station of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010020, China)

**Abstract:** This research was undertaken in 2019 in Tongwei County, Gansu Province. Under the same total nitrogen application, four different N application regimes were set, including N0: without N; N1: 20% basal N + 20% top dressing N at tillering stage + 60% top dressing N at flowering; N2: 20% basal N + 30% top dressing N at tillering + 50% top dressing N at flowering and N3: 20% basal N + 40% top dressing N at tillering + 40% top dressing N at flowering. The effect of different nitrogen treatment regime on the yield advantage and interspecific relationship of the oat/pea intercropping system were investigated. The results showed that both above ground biomass and grain yield of oat/pea intercropping system were higher than those of corresponding monoculture, and the LER based on above ground biomass was greater than 1 under N treatment. The LER calculated by grain yield was greater than 1 for all treatment, the intercropping advantage was obvious. The grain yield and above ground biomass of intercropped oat were the highest under N2 treatment, which were 3 705. 3 kg/hm<sup>2</sup> and 8. 53 t/hm<sup>2</sup>, respectively. When compared with those under N1 and N3 treatments, the grain yield and above ground biomass increased by 5. 11% and 22. 48%, 18. 47% and 22. 03%, respectively. . Intercropping pea had the highest grain yield (2073. 7 kg/hm<sup>2</sup>) under N1 treatment with top dressing 20 kg N/hm<sup>2</sup> at branching stage. In the intercropping system, the interspecific competitiveness of oat to pea increased first and then decreased with the growth period and nitrogen application. Oat was at a competitive disadvantage at the jointing stage, but restored its competitive advantage with the extension of the growth period. Its average competitiveness of the whole growth period relative to pea was greater than 0, and became a competitive advantage plant. There was a quadratic correlation between the grain yield of intercropped population and the average competitiveness of oat to pea. The high yield of intercropped population could be achieved at 0. 14 competitiveness. Grain filling period of oat was a critical period for regulating interspecific competitiveness and yield improvement.

**Key words:** oat; pea; intercroppin; nitrogen treatments; competitiveness.