

根系分隔方式对燕麦/豌豆间作产量及氮素固定和积累的影响

杜文盼, 柴继宽, 赵桂琴*, 杨莉, 张宁, 张建贵

(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:【目的】了解分析燕麦和豌豆间作系统中地下部互作对产量、氮素积累与固定的影响。【方法】设燕麦单作、豌豆单作、燕麦豌豆间作不隔根、尼龙网隔根和塑料膜隔根共5个处理, 探究了间作系统的产量及构成, 分析了各器官氮素积累以及氮素固定、结瘤固氮特性对根系分隔的响应。【结果】燕麦/豌豆间作不隔根和尼龙网隔根处理的土地当量比分别为1.16和1.08, 产量较单作分别提高了16.93%和9.05%; 塑料膜隔根处理的土地当量比为0.94, 不具产量优势。根系互作促进了燕麦株高及穗部的生长发育, 降低了豌豆单株荚数和单株粒重。在燕麦灌浆期, 不隔根的燕麦叶片和根部氮含量显著高于其他处理($P < 0.05$); 尼龙网隔根的豌豆豆荚和叶片氮含量最高, 而塑料膜隔根处理的根部氮含量较单作、不隔根和尼龙网隔根分别高21.54%、22.08%和120.51%; 尼龙网隔根的根瘤数、根瘤重及固氮酶活性较塑料膜隔根分别提高了84.62%、66.67%和81.16%, 较单作分别提高了54.84%、11.11%和122.22%。在燕麦成熟期, 不隔根的燕麦穗部、茎秆、叶片和根系的氮含量较塑料膜隔根处理分别高16.99%、68.01%、3.47%和14.18%; 尼龙网隔根处理的豌豆豆荚、茎秆和根部以及不隔根处理的叶片氮含量最高; 根瘤数及重量在各处理间由大到小依次为: 根系不分隔 > 尼龙网隔根 > 单作 > 塑料膜隔根, 而固氮酶活性的大小顺序正好相反。【结论】燕麦和豌豆间作的产量优势主要来自于地下部贡献。不隔根间作产量最高, 尼龙网隔根时的豌豆在结荚期能够固定更多的氮素, 增加自身器官及燕麦对氮的吸收和积累。燕麦旺盛的氮需求通过根系互作刺激并增加了豌豆对氮素的固定, 地下部根系互作是燕麦/豌豆间作增产的主要原因。

关键词: 燕麦; 豌豆; 根系分隔; 产量; 氮素吸收; 结瘤固氮

中图分类号: S544.9; S542 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2025)02-0141-10

DOI: 10.13817/j.cnki.cyyep.2025.02.016



间作是指在同一块地上, 将生育期较近的作物按一定比例分行或分带种植的一种方式^[1]。它利用不同作物之间生物学特性差异, 通过促进根系的生长, 提

高对养分、水分的吸收效率, 通过不同物种间的互作实现空间及时间的集约化利用^[2], 具有提高产量^[3]、改善牧草品质^[4]、减轻杂草及病虫害^[5]等诸多优势。合理的作物搭配是实现间作优势的关键, 其中豆科与禾本科间作研究报道较多^[6], 禾/豆间作的产量优势已经得到了普遍认可, 如玉米/大豆^[7]、玉米/箭筈豌豆^[8]、以及燕麦与绿豆、花生、大豆间作^[9]的研究都表明, 与单作相比, 间作明显提高了产量和品质。

间作优势是两种作物间的相互作用产生的, 包括地上作用和地下作用。为了适应不同的生长环境, 根系会通过调整自身的分布来竞争更多的养分和水

收稿日期: 2024-03-30; **修回日期:** 2024-04-20

基金资助: 张掖市揭榜挂帅项目(ZY2022JBGS01); 财政部和农业农村部国家燕麦荞麦产业技术体系(CARS-07-C)

作者简介: 杜文盼(1998-), 男, 甘肃庆阳人, 硕士研究生。

E-mail: 2136995485@qq.com

*通信作者, 研究方向为牧草种质资源及育种。

E-mail: zhaogq@gsau.edu.cn

分^[10]。因此,作物间的根系互作会对间作系统产生重要影响^[11]。对玉米与蚕豆^[12]、大豆^[13]和豌豆^[14]等间作互惠系统研究发现,产量的间作优势主要源于作物间地下部的相互作用。通过根系分隔可以模拟不同强度的根系互作,分析间作系统中根系对生产力的影响。不隔根时根系互作强度最大,间作作物能够进行养分与水分的竞争与交换,竞争优势作物可以得到更多的营养及空间;尼龙网隔根不仅降低了根系互作,而且根系之间没有了空间上的交叉和重叠,也减少了竞争;塑料隔根使两种根系之间没有任何交流,并且会一定程度上降低根系的水平生长空间^[15]。观察玉米/豌豆间作的产量变化^[16],发现3种分隔方式下,玉米的生物量大小顺序为不隔根>尼龙网隔根>塑料膜隔根>单作;而豌豆生物量的大小顺序为塑料膜隔根>不隔根>尼龙网隔根>单作。豆禾间作系统中,地下部互作促进了豆科作物的根瘤生长及活性,增加了共生固氮和氮素利用,然后通过根部互作转移至禾本科作物,提高了共生作物对氮素的吸收,从而产生间作优势^[17]。玉米/豇豆间作研究中,玉米的氮浓度均显著高于单作^[18-19];在燕麦/紫花苜蓿间作中发现种间根系互作越紧密,燕麦氮同化能力越强,更能促进紫花苜蓿结瘤固氮并将产生的氮素继续转移给燕麦,从而增强间作系统中种间氮营养的互补利用^[20]。

燕麦(*Avena sativa*)是我国温带地区主要的一年生禾本科粮饲兼用作物,也是北方冷凉地区禾豆间作研究的主要对象,豌豆也是冷凉地区的主要豆科作物之一,二者间作可以显著提高产量和品质^[21]。但其增产的原因、地下部互作的机理尚不明确。对间作系统中根系互作的研究主要集中在玉米^[22]、小麦^[23]、大豆^[24]等主要粮食作物上。因此,本试验以燕麦豌豆间作模式为例,采用大田试验的方法,研究根系分隔方式对燕麦豌豆产量、氮素吸收和豌豆结瘤固氮特性的影响,探讨禾豆间作中地下部互作在增产中的作用。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地位于通渭县华家岭镇老站村(105°01' E, 35°23' N),该地属于温带半干旱季风型气候,海拔2 242 m,年平均气温7.5℃,冬季最低气温一般在-20℃左右,夏季最高气温在30℃左右,年温差较大。

无霜期120~170 d,年均降水量380 mm,年日照时数2 100~2 400 h,年蒸发量1 500 mm。种植前土壤理化性质为:有机质含量2.74 g/kg、全氮含量0.91 g/kg、有效磷含量2.00 mg/kg、速效钾含量232.01 mg/kg、速效氮含量130.25 mg/kg。

1.2 试验材料

供试材料为燕麦(陇燕3号)和豌豆(定豌3号),均由甘肃农业大学草业学院提供。

1.3 试验设计

试验采用完全随机区组设计,设燕麦单作(OM)、豌豆单作(PM)、燕麦豌豆间作不隔根(I)、燕麦豌豆间作尼龙网隔根(NS)和燕麦豌豆间作塑料膜隔根(PS),共5个处理。塑料膜为0.12 mm农用塑料棚膜,尼龙网的孔径为400目,隔根长度都为5 m,深为0.5 m。每处理重复3次。

燕麦条播,单作时行距20 cm,播种量200 kg/hm²;豌豆穴播,单作时行距为20 cm,株距为20 cm。燕麦与豌豆间作模式中,种植比例为6:4,即6行燕麦和4行豌豆,播量、行距和株距同单作。燕麦与豌豆的行间距为20 cm,带幅分别为120 cm和80 cm,小区面积30 m²(6 m×5 m),走道0.5 m。基施磷肥P₂O₅ 75 kg/hm²,不施氮肥。

1.4 测定指标和方法

1.4.1 产量及其构成因子 燕麦成熟期,在每小区中间行取4个1 m样段,豌豆成熟期在每小区中间行随机取20株,均齐地刈割,称取鲜重,然后带回实验室。两个燕麦样段及10株豌豆在105℃下杀青30 min后于75℃烘至恒重,称取干重,测定地上生物量。剩下的样品风干后测定籽粒产量。

燕麦收获前每小区随机取中间行的10个单株用于考种。

株高:用卷尺测量从地面到植株最顶端的绝对高度,取平均值。

穗长:用游标卡尺测定穗轴基部到穗顶的长度,取平均值。

小穗数:计数单株主穗的小穗数,取平均值。

主穗粒数及粒重:计数单株的主穗粒数,风干后分别对单株的主穗进行脱粒,用天平称取主穗粒重,取平均值。

千粒重:脱粒后待籽粒自然干燥,随机数100粒称

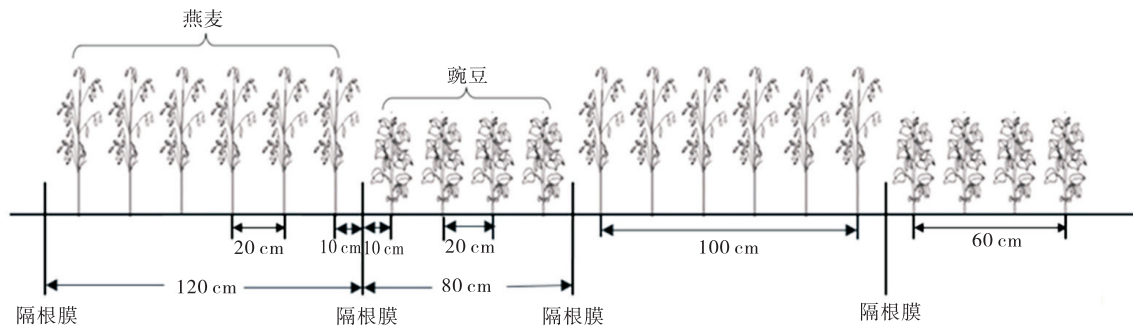


图 1 燕麦豌豆种植示意图

Fig. 1 Schematic diagram of oat and pea planting

重,重复 3 次,取平均值,再乘以 10,即得千粒重。

豌豆收获前每小区随机取中间行的 10 个单株用于考种。

株高:测量方法同燕麦。

单荚粒数及粒重:计数单荚粒数,待风干后分别对单株的每一豆荚分别脱粒,用天平称取单荚的粒重,取平均值。

单株荚数及粒重:计数单株荚数,待风干后分别对单株脱粒称重。

百粒重:随机数 100 粒称重,重复 3 次,取平均值。

收获指数:收获指数=籽粒产量(kg/hm²)/植株地上部生物量(kg/hm²)×100%

1.4.2 土地当量比 土地当量比(LER)是衡量间作优势的重要指标,计算公式^[25]为:

$$LER = La + Lb$$

$$La = (Yoi/Yos); Lb = (Yli/Yls)$$

式中:Yoi和Yli分别指在间作总面积上燕麦和豆科作物的产量。Yos和Yls分别指单作燕麦和豆科作物的产量。

1.4.3 种间相对竞争力 种间相对竞争力(Aggressivity)指间作系统中一种作物相对于另一种作物对水分、养分等与产量形成有关资源的竞争能力,计算公式^[26]为:

$$Aol = Yoi / (Yos \times Po) - Yli / (Yls \times Pl)$$

式中:Aol指燕麦相对于豌豆的竞争能力。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,Po和Pl分别指燕麦和豌豆占间作体系总面积的比例。当Aol>0,表明燕麦的竞争能力强于

豌豆,当Aol<0,表明燕麦的竞争能力比豌豆弱。其余符号意义同上。

1.4.4 燕麦和豌豆各器官氮含量 分别在燕麦灌浆期(豌豆结荚期)和成熟期(豌豆成熟期)在各小区中间行随机取20株完整植株带回实验室,用自来水将根系冲洗干净,然后将燕麦的根、茎、叶和穗依次分离。豌豆分为根、茎、叶和豆荚。放置于105℃烘箱30 min杀青,之后调至65℃烘干至恒重,干样用小型粉碎机粉碎后过100目筛,用H₂SO₄~H₂O₂消煮,凯氏定氮法测定各器官的氮含量。

1.4.5 豌豆结瘤固氮特性的测定 豌豆开花结荚期、成熟期,在单作豌豆和间作豌豆中间行随机取5株,将地上部齐地刈割,地下部用铁锹挖出,将带土的根装入到尼龙网中用水浸泡,快速冲洗干净,泥水过网筛,收集有效根瘤(粉色及浅粉色根瘤),计数,用吸水纸将根瘤水分吸干,用天平称鲜重,之后将取得的根瘤装入瓶中,用于固氮酶活性的测定。固氮酶活性用乙炔还原法测定^[1]。

1.5 数据统计与分析

使用Excel 2010进行数据处理,利用IBM SPSS Statistics 22软件的单因素方差分析进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 根系分隔方式对燕麦豌豆产量及产量构成因子的影响

根系分隔方式对燕麦豌豆的籽粒产量有显著影响(表1)。不隔根处理的燕麦产量最高(3 531.83 kg/hm²),收获指数最大(38.73%),其产量较单作和塑料膜分别提高了36.53%和41.17%;尼龙网隔根与不隔根处理无明显差异。而豌豆单作的产量明显大于间作隔根处理(P<0.05),其收获指数和塑料膜隔

根无明显差异,但明显大于其他两个处理($P<0.05$)。

产量构成因素也受到了根系分隔方式的影响(表2)。间作不隔根处理的燕麦株高显著高于单作和塑料膜隔根处理($P<0.05$),与尼龙网隔根的株高无明显差异。尽管不隔根和尼龙网隔根处理的分蘖数、有效分蘖数多于单作,但差异并不显著。间作后不隔根处理的燕麦穗长(15.16 cm)、小穗数(16.50)、穗粒数(38.80)以及穗粒重(1.27 g)均为最大,其中穗长比尼龙网隔根、单作和塑料隔根分别高出8.84%、12.73%和14.58%;小穗数和穗粒数较尼龙网分隔、单作和塑料分隔分别多出10.30%和19.85%、16.36%和29.38%、17.58%和30.41%($P<0.05$)。千粒重在4个处理间未见显著变化。

豌豆株高以单作的为最高(60.46 cm),其次为塑料分隔(57.98 cm)、尼龙网隔根(51.64 cm),不隔根处理的株高最低,较单作降低了23.47%。单作和塑料膜隔根处理的单株荚数及单株粒重明显大于不隔根

和尼龙网隔根($P<0.05$)。单荚粒数塑料膜隔根处理的最小,较尼龙网隔根处理减小了13.33%。单荚粒重未发生显著变化。百粒重以单作的最大(18.48 g),其次为尼龙网隔根和不隔根处理,塑料膜隔根处理的最小(16.62 g)。

表1 不同根系分隔方式下的豌豆和燕麦产量
Table 1 Yields of peas and oat under different root separation methods

处理	籽粒产量/(kg·hm ⁻²)		收获指数/%	
	燕麦	豌豆	燕麦	豌豆
M	2 586.89 ^b	1 542.33 ^a	30.51 ^b	42.14 ^a
I	3 531.83 ^a	1 296.67 ^b	38.7 ^{3a}	29.88 ^c
NS	3 114.67 ^a	1 388.33 ^b	35.97 ^a	36.15 ^b
PS	2 501.83 ^b	1 379.17 ^b	32.16 ^b	40.56 ^a

注:同列不同小写字母代表同一作物在0.05水平有显著差异。M代表单作;I代表间作不隔根;NS代表尼龙网隔根;PS代表塑料膜隔根,下同。

表2 根系分隔方式对燕麦产量构成因子的影响
Table 2 Effects of root separation on components of oat yield

处理	株高/cm	分蘖数	有效分蘖数	穗长/cm	小穗数	穗粒数	穗粒重/g	千粒重/g
M	80.01 ^b	3.20 ^a	2.40 ^a	13.23 ^b	13.60 ^b	27.00 ^b	1.03 ^{bc}	31.47 ^a
I	85.54 ^a	4.00 ^a	2.90 ^a	15.16 ^a	16.50 ^a	38.80 ^a	1.27 ^a	30.73 ^a
NS	80.61 ^{ab}	3.50 ^a	2.70 ^a	13.82 ^{ab}	14.80 ^b	31.10 ^b	0.84 ^c	30.04 ^a
PS	78.53 ^b	3.40 ^a	2.40 ^a	12.95 ^b	13.80 ^b	27.40 ^b	1.06 ^{ab}	30.31 ^a

表3 根系分隔方式对豌豆产量构成因子的影响
Table 3 Effects of root separation on pea yield components

处理	株高/cm	单株荚数	单株粒重/g	单荚粒数	单荚粒重/g	百粒重/g
M	60.46 ^a	4.60 ^a	4.48 ^a	5.60 ^{ab}	1.05 ^a	18.48 ^a
I	46.27 ^c	3.00 ^b	2.41 ^c	5.67 ^{ab}	1.00 ^a	17.56 ^{ab}
NS	51.64 ^b	3.00 ^b	2.97 ^{bc}	6.00 ^a	1.00 ^a	18.02 ^{ab}
PS	57.98 ^a	4.20 ^a	3.94 ^a	5.20 ^b	0.91 ^a	16.62 ^b

2.2 根系分隔方式对燕麦豌豆土地当量比的影响

不隔根和尼龙网隔根处理的土地当量比分别为1.16和1.08,较单作都具有产量优势,能够更有效地利用土地资源(图2)。塑料膜隔根处理的土地当量比为0.94,不具有间作优势。在不隔根、尼龙网隔根和塑料隔根处理中,燕麦的偏土地当量比分别为0.82、0.72和0.58,豌豆为0.34、0.36和0.36,间作体系中燕麦的产量贡献最大。

2.3 根系分隔方式对燕麦豌豆种间竞争力的影响

根系分隔方式对种间竞争力有显著影响(图3)。燕麦豌豆间作不隔根、尼龙网隔根和塑料膜隔根处理的种间竞争力分别为0.52、0.30和0.07,都大于0,说明在3个根系分隔处理中,燕麦都是竞争优势植物,相比于豌豆具有较强的资源竞争能力。

2.4 根系分隔方式对燕麦豌豆氮含量的影响

燕麦灌浆期体内的氮素都主要集中于叶片,其次为穗、茎秆和根(图4)。间作不隔根处理的燕麦叶片

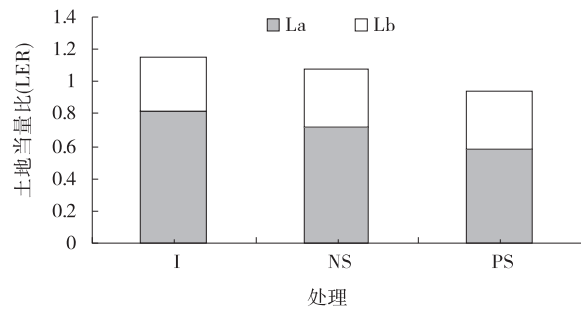


图2 根系分隔方式对间作土地当量比的影响

Fig. 2 Effect of root separation on equivalent ratio of intercropping land

注:La和Lb为燕麦与豌豆的偏土地当量比。图中I代表间作不隔根;NS代表尼龙网隔根;PS代表塑料膜隔根。

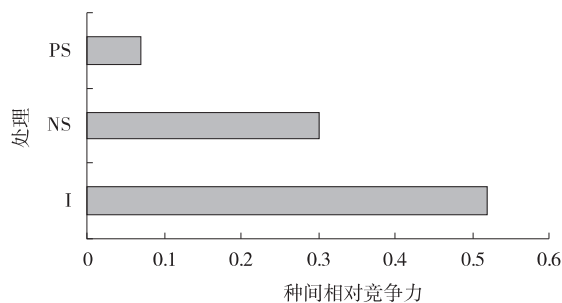


图3 根系分隔方式对种间竞争力的影响

Fig. 3 Effect of root separation on interspecific competitiveness

注:图中I代表间作不隔根;NS代表尼龙网隔根;PS代表塑料膜隔根。

和根的氮含量最大,较尼龙网隔根、塑料膜隔根和单作分别高 25.42% 和 19.93%、33.46% 和 23.96%、29.38% 和 23.98%。随着燕麦进入成熟期(图5),其他器官中的氮素会向种子转移,穗的氮含量最高,其次为叶片、根和茎,尼龙网隔根处理的燕麦各器官的氮含量均最高。与灌浆期相比,穗部氮含量增加了 16.88%~87.57%,叶片氮含量降低了 43.16%~72.68%,其他器官的氮含量也有不同程度的降低。

豌豆结荚期(图6),除间作不隔根处理外,其他处理下各器官氮含量均以叶片最高,其次为豆荚和根,茎秆的氮含量最低。尼龙网隔根的豌豆叶片和豆荚的氮含量分别高达 17.29 和 15.61 g/kg,其豆荚、茎秆和叶片的氮含量较塑料膜隔根处理分别提高了 11.76%、8.16% 和 19.90%,而根部氮含量降低了 54.60%;与不隔根处理相比,其茎秆氮含量降低了 18.75%、叶片增加了 19.07%、根系降低了 80.63%。不隔根处理下豌豆的茎秆氮含量最高。豌豆成熟期

(图7),相同种植模式下的豌豆各器官氮含量从大到小依次为叶片、豆荚、根和茎秆。尼龙网隔根的豌豆豆荚、茎秆和根的氮含量最大,不隔根处理的豌豆叶片的氮含量最大。在成熟期,间作系统中的作物所有器官的氮含量都高于相应单作。根系互作使豌豆、燕麦体内的氮含量都显著增加($P<0.05$),叶片的增幅最大。

成熟期时,尼龙网隔根的燕麦和豌豆全株氮含量达到了最大值,分别为 21.48 和 53.06 g/kg;燕麦全株氮含量较单作、不隔根和塑料隔根处理分别提高了 32.59%、17.18% 和 18.87%,豌豆较单作、不隔根和塑料隔根处理分别高 24.47%、11.87% 和 11.31%。

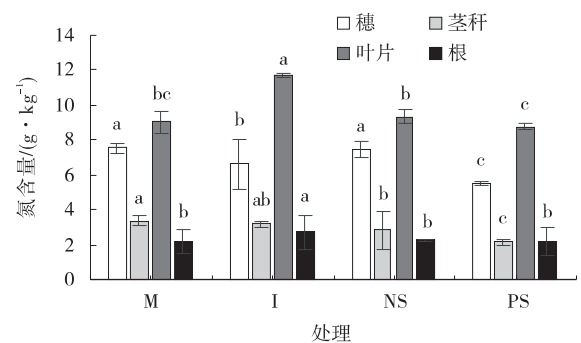


图4 根系分隔方式对灌浆期燕麦氮含量的影响

Fig. 4 Effects of root separation on nitrogen content of oat at grout stage

注:同一时期下不同小写字母代表不同处理之间相同器官的氮含量有显著差异($P<0.05$),下同。

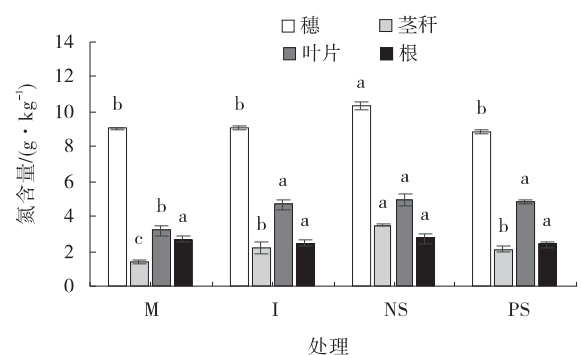


图5 根系分隔方式对成熟期燕麦氮含量的影响

Fig. 5 Effects of root separation on nitrogen content of Oat at maturity

2.5 根系分隔方式对豌豆结瘤固氮特性的影响

豌豆结荚期,不隔根和尼龙网隔根处理下的豌豆根瘤数、根瘤重以及固氮酶活性明显高于单作和塑料膜隔根的豌豆($P<0.05$)(表4)。其中,不隔根较塑料膜隔根处理分别提高了 88.46%、66.38% 和

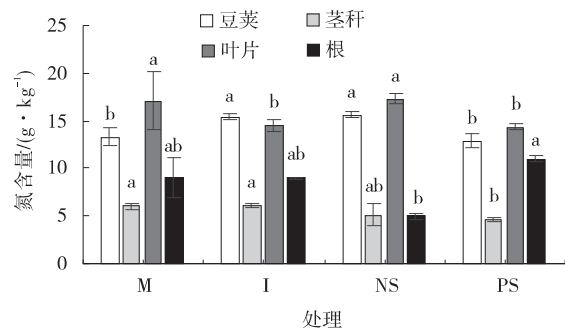


图6 根系分隔方式对结荚期豌豆氮含量的影响

Fig. 6 Effect of root separation on nitrogen content of peas at pod stage

43.12%，较分别单作提高了 58.06%、8.38% 和 75.56%。尼龙网隔根的豌豆根瘤数、根瘤重、固氮酶活性较塑料隔根处理分别提高了 84.62%、66.67% 和 81.16%，较单作分别提高了 54.84%、11.11% 和 122.22%。而在成熟期，不隔根处理的根瘤数及根瘤重比尼龙网隔根、单作和塑料膜隔根分别提高了 17.39% 和 39.81%、58.82% 和 94.84%、119.05% 和 41.18%，但固氮酶活性明显低于其他处理 ($P<$

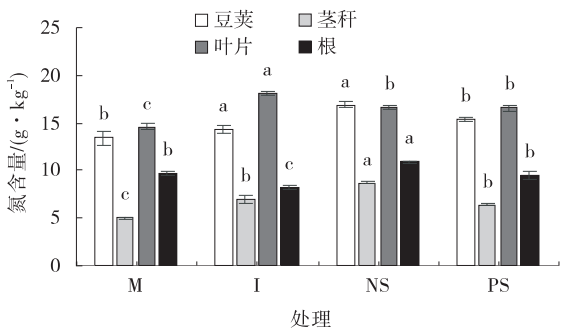


图7 根系分隔方式对结荚期豌豆氮含量的影响

Fig. 7 Effect of root separation on nitrogen content of peas at pod stage

0.05)，较尼龙网隔根、单作和塑料膜隔根处理分别降低了 18.53%、42.99% 和 55.02%。

豌豆从结荚到成熟，单作的根瘤数有所增加，根瘤重降低，固氮酶活性明显提高 ($P<0.05$)；不隔根的根瘤数及重量分别增加了 10.20% 和 57.89%，而尼龙网隔根处理的无明显变化，但两个处理的固氮酶活性都明显降低 ($P<0.05$)；塑料膜隔根处理的根瘤重和固氮酶活性在成熟期较结荚期分别增加了 25.00% 和 181.52%，但根瘤数显著降低 ($P<0.05$)。

表4 根系分隔方式对豌豆结瘤固氮特性的影响

Table 4 Effect of root separation on nodule nitrogen fixation characteristics of peas

处理	结荚期			成熟期		
	根瘤数	根瘤重/g	固氮酶活性/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	根瘤数	根瘤重/g	固氮酶活性/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)
M	31 ^{Ab}	0.18 ^{Aa}	4.50 ^{Bd}	34 ^{Ac}	0.16 ^{Bc}	12.26 ^{Ab}
I	49 ^{Ba}	0.19 ^{Ba}	7.90 ^{Ab}	54 ^{Aa}	0.30 ^{Aa}	6.99 ^{Bd}
NS	48 ^{Aa}	0.20 ^{Aa}	10.00 ^{Aa}	46 ^{Ab}	0.22 ^{Ab}	8.58 ^{Bc}
PS	26 ^{Ac}	0.12 ^{Bb}	5.52 ^{Bc}	21 ^{Bd}	0.15 ^{Ac}	15.54 ^{Aa}

注：不同大写字母代表同一处理同一指标不同时期之间在 0.05 水平差异显著，不同小写字母代表同一时期不同处理之间在 0.05 水平差异显著。

3 讨论

间作优势形成的原因可分为地上部和地下部两方面，地下部根系通过影响土壤中营养交换和根系互作进而影响产量。沈荔花^[27]的研究中塑料膜隔根处理的玉米量高于单作玉米。本研究中，燕麦籽粒产量由高到低为不隔根>尼龙网隔根>单作>塑料膜隔根，原因可能是不同作物间作地下部与地上部对产量贡献率不同^[28]。塑料膜隔根时，两种作物只有地上部互作而没有地下部互作，当地上部产量贡献较高的时候，塑料膜隔根处理的产量就高于单作，反之则低于

单作^[29]。本研究中，塑料膜隔根处理的土地当量比小于 1，就说明了这一点。其次，塑料膜隔根会一定程度缩小边行作物根系的生长空间，影响根系发育，从而影响产量^[30]。豌豆籽粒产量由高到低依次为单作>尼龙网隔根>塑料隔根>间作不隔根，这与陈国栋^[31]的研究结果相同。当不隔根时，燕麦与豌豆的根系互作强度最大，能够进行营养物质与水分的竞争与交换，燕麦的竞争相对于豌豆较强，因此可以竞争到更多的生长空间和营养物质，因而此处理下燕麦的产量最高，豌豆的最低。尼龙网隔根时，虽然降低了根系互作，但是根系之间没有了空间上的交叉和重叠，也

减少了竞争,处于竞争劣势的豌豆在水肥交流的同时有更大的生长空间,而塑料膜隔根使两种根系之间没有任何互动,也减小了边行作物根系的水平生长空间。因此,尼龙网隔根处理的豌豆产量高于塑料膜隔根处理。冯晓敏^[32]的研究中,燕麦与绿豆间作增加了燕麦的小穗数、穗粒数及单株粒重,燕麦/大豆间作增加了大豆的株荚数、单荚粒重、株荚粒重及百粒重。这与本试验结果有所差异,间作显著增加了燕麦的株高、穗长、小穗数、穗粒数及穗粒重,但明显降低了豌豆的株高、单株荚数及粒重。这可能是因为不同的作物其生长发育特性不同,与燕麦间作后其增产的途径也会有所差异,其次豌豆的荚数偏少,可能是收获的时间较迟,一些豆荚掉落导致,并且环境因素也有一定的影响^[33]。

植物体内氮素会随生长发育的时期而发生变化^[34]。在燕麦灌浆期(豌豆结荚期),两种作物的叶片氮含量显著大于其他器官,到了成熟期,植株叶片、茎秆和根系的氮含量都有一定程度的降低,其中叶片的降幅最大,为 50.87%~68.39%。而燕麦穗部氮含量显著增加,体内的氮向种子转移,而豌豆各器官的氮含量无明显变化。这与赵雅姣^[35]的研究结果相似,随着燕麦/紫花苜蓿间作系统中燕麦的生长发育,其茎叶和根系中积累的氮逐渐降低,而紫花苜蓿茎叶、根系的氮含量变化不大。在根系分隔处理中,燕麦灌浆期不隔根处理的穗部氮含量较塑料膜隔根增加了 20.41%,而茎秆、叶片和根系的氮含量都明显高于尼龙网和塑料膜隔根处理,说明根系互动强度越大,竞争优势植物可获得的氮素营养更多。豌豆结荚期尼龙网隔根处理的豆荚、茎秆及叶片的氮积累量较塑料膜隔根处理分别增加了 11.7%、8.89% 和 19.90%;根部的氮积累量却降低了 54.60%;与不隔根相比,其豆荚和茎秆氮含量无明显差异,叶片氮含量增加了 19.77%,根系的氮含量降低了 80.63%。豆科作物虽然可以固定氮素,但其固定的氮素只占自身需求氮素的 50%~65%,仍需补充外源氮来满足自身生长的需求,而本试验未施用氮肥,所以豌豆固定的氮素一部分转移至地上,另一部分被竞争力强的燕麦吸收,因此留在根系的氮较少^[36]。

地下部互动能够提高禾豆间作系统中豆科作物

的结瘤能力^[37]。李娟^[16]研究发现,与单作相比,间作不隔根、尼龙网隔根、塑料膜隔根处理下豌豆的结瘤数分别增加了 120%、82.5% 和 22.5%。玉米/豌豆间作中,豌豆的结瘤质量表现为无隔根处理>尼龙网隔根>塑料膜隔根,结瘤数与结瘤质量变化一致^[38],表明同一间作体系中,种间根系相互作用越强,越有利于豌豆结瘤。这与本试验结果一致。当根系互动越紧密,燕麦对氮素竞争越多,豌豆可获取的氮素越少,促使豌豆根瘤皮层内 O₂ 的扩散增加,促进了根瘤的生长发育^[39]。而对于固氮能力,玉米/紫花苜蓿^[35]间作中,紫花苜蓿的固氮能力均表现为不隔根处理的最高,其次为尼龙网隔根,塑料膜隔根处理的最低,紫花苜蓿的固氮能力随根系互动的增强而增强。但是与本研究结果不同的是根系互动使豌豆后期固氮酶活性有所降低,其一可能是因为随着燕麦株高的增加,豌豆将光合产物优先分配于地上,以便截获更多的光能,从而抑制了地下根系的生长和固氮酶活性,同时弱光环境下地上部的同化能力下降,促进根瘤固氮酶合成和活性发挥的物质和能量减少,导致固氮酶活性降低^[39]。其二是在作物生长后期,由于燕麦对氮素的需求量减少,豌豆累积的大量氮素堆积在根系周围,造成“氮阻遏”现象而使固氮酶活性降低^[40]。

4 结论

1) 根系分隔对间作产量有显著影响。间作燕麦的产量随根系互动强度的增加而增加,豌豆在单作条件下产量最高。间作不隔根时增产显著,而塑料隔根不具产量优势。地下部根系互动是燕麦/豌豆间作增产的主要原因。

2) 根系分隔显著影响了氮素积累。根系完全互动虽可增产,但根系之间的竞争会影响氮素的积累。在成熟期,尼龙网隔根的燕麦和豌豆各器官以及全株氮素积累更多。

3) 生长前期,燕麦旺盛的氮需求通过根系互动刺激并增加了豌豆的结瘤能力和对氮素的固定,但是豌豆在成熟期的固氮能力却受到了抑制。

参考文献:

- [1] Willy R W. Intercropping is importance and research needs. Part II. Agronomy and research approaches [J]. Field Crops Abstract, 1979, 32: 73—85.

- [2] Vandermeer J H. The ecology of intercropping[M]. Cambridge:Cambridge University Press,1992:90—112.
- [3] 刘洋,孙占祥,白伟,等. 玉米大豆间作对辽西地区作物生长和产量的影响[J]. 大豆科学,2011,30(2):224—228.
- [4] Bhatti I H, Ahmad R, Jabbar A, *et al.* Competitive behaviour of component crops in different sesame—legume intercropping systems[J]. International Journal of Agriculture and Biology (Pakistan),2006,8(2):165—167.
- [5] Skelton L E, Barrett G W. A comparison of conventional and alternative agroecosystems using alfalfa (*Medicago sativa*) and winter wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Renewable Agriculture and Food Systems,2005,20(1):38—47.
- [6] 郑如昌,向宁,杨淑艳. 大麦蚕豆间作试验示范初报[J]. 大麦科学,1995(4):17—18.
- [7] 杨欢,周颖,陈平,等. 玉米—豆科作物带状间套作对养分吸收利用及产量优势的影响[J]. 作物学报,2022,48(6):1476—1487.
- [8] 韩钟英,赵财,胡发龙. 箭筈豌豆、玉米产量对间作和施氮水平的响应[J]. 中国农学通报,2021,37(25):11—16.
- [9] 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[J]. 中国农业大学学报,2021,26(8):23—32.
- [10] 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.
- [11] 杜青,陈平,付智丹,等. 不同结瘤品种与根系分隔对大豆光合特性、生物量及产量的影响[J]. 大豆科学,2016,35(3):428—435.
- [12] 李玉英,庞发虎,孙建好,等. 根系分隔和施氮对蚕豆/玉米间作体系根系分布和形态的影响[J]. 中国农业大学学报,2010,15(4):13—19.
- [13] 乔月彤. 间作和施氮对玉米、花生和大豆产量和氮素积累的影响[D]. 济南:山东师范大学,2022.
- [14] 王海银. 玉米间作豌豆的产量和水分利用效率在施氮量及田间结构下的响应[J]. 农业科技与信息,2016,483(10):66—68.
- [15] 陈平,杜青,庞婷,等. 根系互作强度对玉米/大豆套作系统下作物根系分布及地上部生长的影响[J]. 四川农业大学学报,2018,36(1):28—37+59.
- [16] 李娟,王文丽,赵旭,等. 根际分隔对玉米/豌豆间作种间竞争及豌豆结瘤固氮的影响[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(6):177—183.
- [17] 杨亚东,冯晓敏,任长忠,等. 燕麦 || 大豆、燕麦 || 绿豆系统种间互作对氮素吸收与结瘤固氮的影响[J]. 中国农业科学,2015(S1):32—39.
- [18] Li WX, Li L, Sun JH, *et al.* Effects of intercropping and nitrogen application on nitrate present in the profile of an Orthic Anthrosol in Northwest China [J]. Agriculture Ecosystems & Environment,2005,105(3):483—491.
- [19] Eaglesham M, Ayanaba A, Rao VR, *et al.* Short communication improving the nitrogen nutrition of maize by intercropping with cowpea [J]. Soil Biology Biochemistry,1981,13:169—171.
- [20] 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[J]. 草业学报,2021,30(8):73—85.
- [21] 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竞争力的影响[J]. 草原与草坪,2022,42(4):106—114.
- [22] 王瑞雪,冯瑞,苏丽珍,等. 根系分隔方式对间作玉米大豆根际红壤磷组分及磷吸收的影响[J]. 西南农业学报,2021,34(12):2604—2612.
- [23] 王一帆,殷文,胡发龙,等. 间作小麦光合性能对地上地下互作强度的响应[J]. 作物学报,2021,47(5):929—941.
- [24] 张雷昌,汤利,董艳,等. 根系互作对间作玉米大豆氮和磷吸收利用的影响[J]. 南京农业大学学报,2016,39(4):611—618.
- [25] 周宇. 关于玉米—大豆间作和施氮对玉米产量及农艺性状的影响分析[J]. 农民致富之友,2018,585(16):74.
- [26] 李兴龙,师尚礼,黄宗昌,等. 黄土丘陵区不同饲草混播模式对种间关系的影响[J]. 草地学报,2021,29(6):1318—1326.
- [27] 沈荔花,李娜,阮妙鸿,等. 间作隔根对玉米/大豆光合、产量及土壤理化性质的影响[J]. 福建农业学报,2020,35(11):1280—1288.
- [28] 李奇松,李家俊,叶江华,等. 玉米/豆科作物间作系统中不同互作因子对群体产量的影响[J]. 福建农业学报,2020,35(6):582—590.
- [29] 肖焱波,李隆,张福锁. 用同位素 ^{15}N 直接法和间接法研究小麦/蚕豆间作中根系相互作用对种间竞争及氮转移的影响[C]//贵州省自然科学优秀学术论文集. 2005:367—373.
- [30] 苗锐,张福锁,李隆. 玉米、小麦和大麦与蚕豆间作体系不同根系分隔方式对蚕豆结瘤的影响[J]. 植物学报,2009,44(2):197—201.

- [31] 陈国栋, 柴强. 根系分隔和供水水平对玉米间作豌豆产量和耗水特征的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(12): 25—30.
- [32] 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.
- [33] 李睿. 春箭筈豌豆—燕麦间作系统的生产力与资源利用效率[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [34] 张晓娜, 陈平, 杜青, 等. 玉米/大豆、玉米/花生间作对作物氮素吸收及结瘤固氮的影响[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(8): 1183—1194.
- [35] 赵雅姣, 刘晓静, 童长春, 等. 紫花苜蓿/玉米间作对紫花苜蓿结瘤固氮特性的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(1): 95—105.
- [36] 刘均霞. 玉米/大豆间作条件下作物根际养分高效利用机理研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2008.
- [37] Michele Monti, Antonio Pellicanò. Yield components and nitrogen use in cereal—pea intercrops in Mediterranean environment [J]. Field Crops Research, 2016, 196: 379—388.
- [38] 代晋. 供水和种间互作对玉米豌豆根系特性和水分利用的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2011.
- [39] 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[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
- [40] 董守坤, 刘丽君, 孙聪姝, 等. 利用 ^{15}N 标记研究氮素水平对大豆根瘤生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 985—988.

Effects of root separation on yield, nitrogen fixation and accumulation in oat/pea intercropping

DU Wen-pan, CHAI Ji-kuai, ZHAO Gui-qin*, YANG Li, ZHANG Ning,
ZHANG Jian-gui

(College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory for Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Grassland Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Centers for Grazing Land Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

Abstract: 【Objective】 In order to analyze the effects of subsoil interaction on yield, nitrogen fixation and distribution in oat and pea intercropping system. 【Method】 five treatments were set up: oat single cropping, pea single cropping, oat and pea intercropping without root separation, nylon net root separation and plastic film root separation, and the yield and composition of the intercropping system were investigated. The responses of nitrogen accumulation, nitrogen fixation, nodulation and nitrogen fixation to root separation were analyzed. 【Result】 The results showed that the soil equivalent ratio of oat/pea intercropping without root separation and nylon net separation were 1.16 and 1.08, and the yield was increased by 16.93% and 9.05% compared with single cropping. The soil equivalent ratio of plastic film root separation treatment was 0.94, which did not have yield advantage. Root interaction promoted the plant height and ear growth of oat, and decreased pod number per plant and grain weight per plant of pea. At the filling stage, the nitrogen content in the leaves and roots of oat without separate roots was significantly higher than that of other treatments ($P < 0.05$); The nitrogen content of pea pods and leaves with nylon mesh was the highest, while the nitrogen content of the root treated with plastic membrane was 21.54%, 22.08% and 120.51% higher than that of the single cropping, non-isolating and nylon mesh, respectively. The number of nodules, the weight of nodules and the activity of nitrogen-fixing enzyme in nylon mesh were increased by 84.62%, 66.67% and 81.16%, respectively, compared with plastic membrane, and 54.84%, 11.11% and 122.22% compared with monoculture. In the

mature stage of oat, the nitrogen content of panicle, stem, leaf and root of oat without root separation was 16.99%, 68.01%, 3.47% and 14.18% higher than that of plastic film separation, respectively. The nitrogen content of pea pod, stem and root treated with nylon mesh and leaf treated without root separation were the highest. The number and weight of root nodules in descending order were: root system was not separated > nylon mesh partition root > single production > the plastic membrane separated the roots, and the order of nitrogenase activity was reversed. **【Conclusion】** It can be seen that the yield advantage of oat and pea intercropping is mainly due to underground contribution. The highest yield was obtained when no root time was separated. The pea with nylon mesh could fix more nitrogen at pod stage and increase the nitrogen absorption and accumulation of its own organs and oat. The high nitrogen demand of oat was stimulated by root interaction and increased nitrogen fixation in peas. Root interaction in underground part was the main reason for the yield increase of oat/pea intercropping.

Key words: oats; peas; root separation; yield; nitrogen absorption; nodulation and nitrogen fixation

(责任编辑:刘建荣)