植物学报 *Chinese Bulletin of Botany* 2023, **58** (1): 122–131, www.chinbullbotany.com
doi: 10.11983/CBB22176

·研究报告·

燕麦–绿豆间作效应及氮素转移特性

冯晓敏[1,2], 高翔[1], 臧华栋[2], 胡跃高[2], 任长忠[3], 郝志萍[1], 吕慧卿[1], 曾昭海[2*]

[1]山西农业大学/山西省农业科学院高粱研究所, 榆次 030600; [2]中国农业大学农学院, 农业农村部农作制度重点实验室, 北京 100193; [3]白城市农业科学院, 白城 137000

摘要 为探究燕麦(*Avena sativa*)–绿豆(*Phaseolus radiatus*)间作效应及氮素转移特性, 在不施氮肥的大田试验条件下, 设置3种种植模式(燕麦单作、绿豆单作和燕麦–绿豆间作), 采用传统挖根法和^{15}N同位素标记法进行研究。结果表明, 间作系统中燕麦侵袭力强于绿豆, 绿豆生长受到抑制。整个生育期, 间作燕麦地上部干物质积累量比单作增加14.9%–33.1%, 2年成熟期间作燕麦的氮素积累量比单作分别提高53.1%和44.8%; 间作减少了开花结荚期绿豆氮素积累量和根瘤重量, 降低了绿豆的固氮效率, 绿豆的固氮效率2年平均降低23.7%, 生物固氮量平均减少11.66%。间作绿豆向燕麦的氮素转移率2年平均值达31.7%, 氮素转移量为212.16 kg·hm^{-2}。燕麦–绿豆间作降低了开花结荚期绿豆的根瘤固氮酶活性和固氮效率, 但绿豆体内氮素转移增加了燕麦对氮素的吸收利用, 实现了地上部与地下部生长的相互调节和促进, 优化了农田生态系统的氮素管理。

关键词 燕麦–绿豆间作, 根瘤固氮, ^{15}N同位素标记, 氮素吸收, 氮素转移

冯晓敏, 高翔, 臧华栋, 胡跃高, 任长忠, 郝志萍, 吕慧卿, 曾昭海 (2023). 燕麦–绿豆间作效应及氮素转移特性. 植物学报 **58**, 122–131.

间作是我国传统农业生产中重要的多元种植模式, 与单一种植相比, 间作具有明显的产量优势。禾本科与豆科作物间作, 通过增加农田生物多样性, 增加群体产量和农田土地生产力, 最大限度地发掘作物对有限农业资源的利用潜力(蔡倩等, 2022)。禾本科–豆科间作模式在我国广泛应用, 如玉米(*Zea mays*)–绿豆(*Phaseolus radiatus*)间作(焦念元等, 2008)、甘蔗(*Saccharum officinarum*)–绿豆间作(He et al., 2018)、黍子(*Panicum miliaceum*)–绿豆间作(Gong et al., 2020)、棉花(*Gossypium* spp.)–绿豆间作(Liang et al., 2020)、燕麦(*Avena sativa*)–蚕豆(*Vicia faba*)间作(何纪桐等, 2022)、燕麦–紫花苜蓿(*Medicago sativa*)间作(汪雪等, 2021b)、燕麦–大豆(*Glycine max*)间作以及燕麦–花生(*Arachis hypogaea*)间作(马怀英等, 2021)。在禾本科与豆科间作系统中, 豆科作物与根瘤菌(*Rhizobium*)形成根瘤固定大气氮, 从而减少氮肥施用, 被认为是农业可持续发展的重要模式之一(郭丽琢等, 2012)。禾本科与豆科间作系统中, 豆科作物的生物固氮作用降低了植株对土壤氮素的需求, 有利于植株对氮素的合理利用, 不仅能在减少氮肥施入的条件下增加作物产量和提高作物品质, 而且间作栽培模式所带来的经济和生态效益也非常突出。同时, 豆科作物向禾本科转移一定量的氮素, 禾本科作物对氮的竞争作用使豆科作物根瘤量得以增加, 从而提高了豆科作物的固氮效率(Chapagain and Riseman, 2014)。

氮素在作物体内的转移直接影响作物的产量及氮肥利用率, ^{15}N同位素示踪技术可显示作物生育时期氮素在各器官的转移, 真实反映作物对氮肥的吸收利用情况, 同时指示植株氮素利用率及氮素转移。但此种受益程度在豆科作物品种间和作物组合间存在很大差异。本课题组采用^{15}N同位素标记法研究发现, 燕麦–花生间作共生期间, 燕麦对资源的利用始终处于优势, 间作提高了燕麦的氮素积累量, 花生向燕麦

收稿日期: 2022-07-31; 接受日期: 2022-10-30
基金项目: 国家现代农业产业技术体系(No.CARS-07-B-5)、山西省来晋工作科研项目(No.SXBYKY2022069)和杂粮种质资源创新与分子育种国家(筹)课题(No.202204010910001-30)
* 通讯作者。E-mail: zengzhaohai@cau.edu.cn

发生氮素转移(冯晓敏等, 2015b)。研究发现大麦(*Hordeum vulgare*)–豌豆(*Pisum sativum*)间作系统中, 豌豆体内的氮素有11%转移到大麦植株(Chapagain and Riseman, 2014)。在不同氮肥处理下, 花生体内的氮素分别有9.93%、5.65%、4.22%转移到水稻(*Oryza sativa*)植株(褚贵新等, 2003)。利用^{15}N自然丰度法研究发现, 在豌豆–大麦间作系统中, 豌豆固氮效率为55.1%–66.7%, 大麦氮素积累量的1.9%–11.1%来源于豌豆生物固氮(Hauggaard-Nielsen et al., 2009)。

吉林白城地区属于典型的农牧交错带, 燕麦的成功引入可发挥残茬优势, 减少冬春季节因地表裸露导致的空气扬尘。但对该区域燕麦的研究主要集中在种质资源评价、光合特性、水肥生理、抗逆性及饲用价值等方面(王旭等, 2009; Neugschwandtner and Kaul, 2014; 冯晓敏等, 2015a), 而燕麦能否通过对土壤氮的竞争影响绿豆的固氮作用, 绿豆所固定的空气氮能否向燕麦发生转移, 进而提高资源利用效率等报道甚少。前人对绿豆的研究多集中于种质资源(沈颖超等, 2022)及光合特性(纪祥龙等, 2022)等, 而绿豆固氮特征及其在间作系统中氮素利用和转移规律研究较少。为此, 本研究以燕麦–绿豆间作系统为研究对象, 在大田设计微区试验, 利用^{15}N同位素标记技术, 测定单作和间作系统中绿豆的根瘤固氮酶活性和固氮量, 探讨单作和间作对氮素吸收利用效率的影响, 旨在阐明不施氮肥条件下间作系统中绿豆的固氮能力与氮素吸收利用效率的关系, 为充分挖掘豆科固氮潜力、评价间作体系中绿豆对燕麦氮营养的贡献以及优化间作系统的氮素营养提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于吉林省白城市农业科学院(45°37'N, 122°48'E), 该区气候类型属温带大陆性季风气候, 年均降水量407.9 mm, 年均日照时数2 919.4小时, 年均气温4.9°C, 无霜期157天。供试土壤为砂壤土, 耕层为0–20 cm。土壤主要理化性质: pH6.9, 有机质含量为13.30 g·kg^{-1}, 全氮1.85 g·kg^{-1}, 碱解氮117.40 mg·kg^{-1}, 有效磷95.90 mg·kg^{-1}, 有效钾93.30 mg·kg^{-1}。前茬作物为燕麦。

1.2 试验设计

本试验采用随机区组设计, 共设3个处理, 包括燕麦单作、绿豆单作和燕麦–绿豆间作, 小区面积36 m^2 (6 m×6 m), 每处理重复4次。为保证绿豆充分结瘤, 种子用根瘤菌(购自宁夏诺德曼公司)拌种。各处理均不施用氮肥, 施基肥55 kg·hm^{-2} P_2O_5, 45 kg·hm^{-2} K_2O, 4.5 kg·hm^{-2} $FeSO_4$, 1.0 kg·hm^{-2} H_3BO_3, 1.5 kg·hm^{-2} Na_2MoO_4。单作燕麦条播, 播种量为150 kg·hm^{-2}, 行距30 cm。单作绿豆播种行距50 cm, 株距8 cm, 穴留2株。间作体系中种植比例为3:2 (3行燕麦间作2行绿豆), 燕麦和绿豆间距40 cm, 间作行距和播种量同单作(图1)。

供试燕麦品种为白燕2号, 绿豆品种为白绿8号, 均由白城市农业科学院提供。燕麦与绿豆同时播种, 播种时间为每年5月, 燕麦和绿豆的收获时间分别为8月和9月。常规田间管理。在每个小区设置1个微区, 单作燕麦微区的面积为0.54 m^2 (0.9 m×0.6 m), 单作绿豆微区面积为0.8 m^2 (1.0 m×0.8 m), 燕麦和绿豆间作微区为1.52 m^2, 每个微区四周用塑料膜隔离, 种植深度为40 cm。^{15}N同位素标记(丰度为10.02%)用量约为13.5 kg·hm^{-2} N (Neumann et al., 2007)。

1.3 采样与测定

1.3.1 种间相对竞争力

种间相对竞争力是衡量一种作物相对于另一种作物资源竞争能力大小的指标(Willey, 1979)。

$$A_{om}=Y_{oi}/(Y_{om}\times P_o)-Y_{mi}/(Y_{om}\times P_m)$$

式中, A_{om}表示燕麦相对于豆科作物的竞争能力。P_o

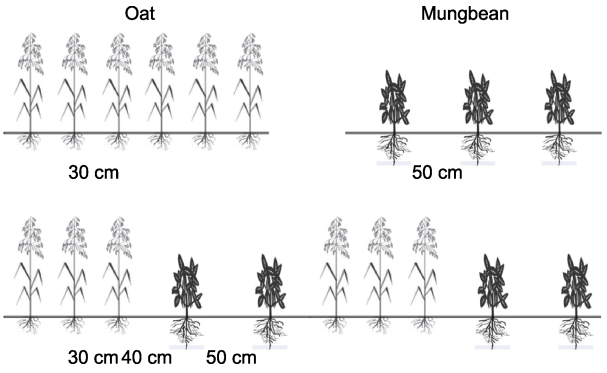

图1 燕麦–绿豆间作田间示意图

Figure 1 Schematic diagram of oat–mungbean intercropping in the field

和P_m分别表示燕麦和豆科作物在间作体系总面积中的占比。A_{om}>0表明燕麦的竞争能力强于豆科作物，A_{om}<0表明燕麦的竞争能力弱于豆科作物。

1.3.2 燕麦和绿豆生物量和氮素含量

分别在燕麦的拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期采集40 cm样段；取绿豆3穴(即6株)，去除根系及杂草，于105°C下杀青30分钟，80°C烘干至恒重，称量干物质重量。将样品粉碎后，采用H_2SO_4-H_2O_2消煮，凯氏定氮法测定样品氮浓度。

1.3.3 根瘤的数量和重量

在绿豆开花结荚期，各处理随机选取6株，分离地上部和地下部，掘取30 cm (长)×30 cm (宽)×30 cm (深)的土体，装入尼龙网袋，清洗根系、收集根瘤并计数。用吸水纸吸干根瘤表面水分，称重。

1.3.4 根瘤固氮酶活性

利用乙炔还原法测定根瘤固氮酶活性(Bellenger et al., 2014)。在开花结荚期采集根瘤，洗净并称重后立即装入50 mL三角瓶中，加反口胶塞。用注射器注入5 mL乙炔，于27°C无光条件下反应1小时，抽出5 mL反应后气体注入25 mL真空玻璃瓶中，倒置，待测。抽取100 μL待测气体，用GC14B (FID)型气相色谱仪测定乙烯含量。测定条件：柱温80°C，进样口温度100°C，检测器温度150°C，载气(氮气)流量50 mL·min^{-1}，氢气流量50 mL·min^{-1}，空气流量500 mL·min^{-1}。

1.3.5 植株^{15}N丰度

分别称取茎叶和籽粒0.2 g，将5 mL H_2SO_4、0.15 g $CuSO_4$和1.5 g K_2SO_4加入装有样品的消煮管中，摇匀后放置过夜，消煮至清亮，冷却后直接蒸馏。将馏出液浓缩至3 mL，用Isoprime100同位素质谱仪测定^{15}N丰度。每个处理设4次重复。

1.3.6 计算方法

植株^{15}N原子百分超(atom% excess，A%E)=标记植株^{15}N丰度–对照植株^{15}N丰度。

绿豆固氮百分率(%NDFA) (褚贵新等，2003)和绿豆固氮量的计算公式如下：

%NDFA (单作绿豆)=(1–A%E单作绿豆/A%E单作燕麦)×100;

%NDFA (间作绿豆)=(1–A%E间作绿豆/A%E间作燕麦)×100;

绿豆固氮量=绿豆植株含氮量×%NDFA/株。

绿豆向燕麦的氮转移(%N transfer) (%NTFL) (Neumann et al., 2009)和氮转移量的计算公式如下：

绿豆向燕麦的氮转移(%NTFL)=1–A%E间作燕麦/A%E单作燕麦;

氮转移量(g·plant^{-1})=(1–A%E间作燕麦/A%E单作燕麦)×总氮含量(间作燕麦)。

1.4 统计分析

采用Microsoft excel 2010软件处理数据。用SPSS 13.0软件进行统计分析。利用单因素方差分析法(One-way ANOVA)和Duncan检验(Duncan's multiple range tests, P<0.05)进行样本间差异显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 种间相对竞争

间作系统中的2种作物存在种间促进与竞争关系。当一种作物对资源和养分等的竞争能力超过其邻居作物时，表现为其中一种作物生长受到抑制。在籽粒产量方面，2013年和2014年燕麦–绿豆间作A_{om}值大于0，分别为0.82和0.65 (图2)，表明燕麦的侵袭力强于绿豆，使绿豆生长受到抑制。这是由于在燕麦–绿豆间作系统中，燕麦与绿豆所占的生态位差异较大，整个生育期燕麦的株高一直高于绿豆，导致燕麦获得更

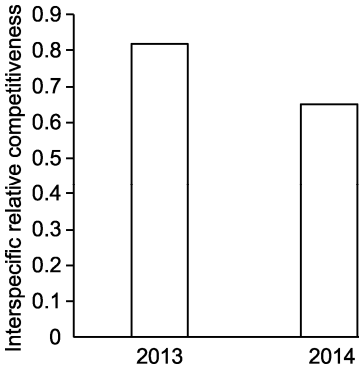

图2 燕麦–绿豆间作系统种间相对竞争力

Figure 2 Interspecific relative competitiveness of oat–mung-bean intercropping system

多的光热资源及土壤养分和水分, 削弱了绿豆获取光照的能力, 使绿豆生长受到抑制。

2.2 间作对作物干物质积累的影响

随着生育进程的推进, 燕麦和绿豆的地上部干物质积累量呈现逐渐增加的趋势(图3)。与单作燕麦相比, 间作提高了燕麦地上部干物质的积累量, 2013年和2014年整个生育期间作燕麦地上部干物质积累量比单作分别提高21.5%–33.1%和14.9%–25.4%, 且在拔节期到成熟期呈现显著差异(P<0.05) (图3A)。然而, 间作对绿豆干物质积累的影响与燕麦有所不同, 与单作相比, 间作降低了抽穗期和成熟期绿豆干物质的积累量, 2013年和2014年成熟期间作绿豆的干物质积累量与单作相比分别下降15.5%和23.8%, 呈现显著差异(P<0.05) (图3B)。以上结果表明, 燕麦和绿豆间作能够促进燕麦生长, 但在一定程度上抑制了绿豆生长。

随着生育进程的推进, 燕麦和绿豆的干物质氮素积累表现为逐渐增加的趋势, 在成熟期达到最大值(图4)。与单作相比, 间作显著提高了成熟期燕麦的氮素积累量(P<0.05), 2013年和2014年分别增加53.1%和44.8%, 但降低了绿豆地上部氮素的积累量, 且在抽穗期后呈现显著差异(P<0.05)。

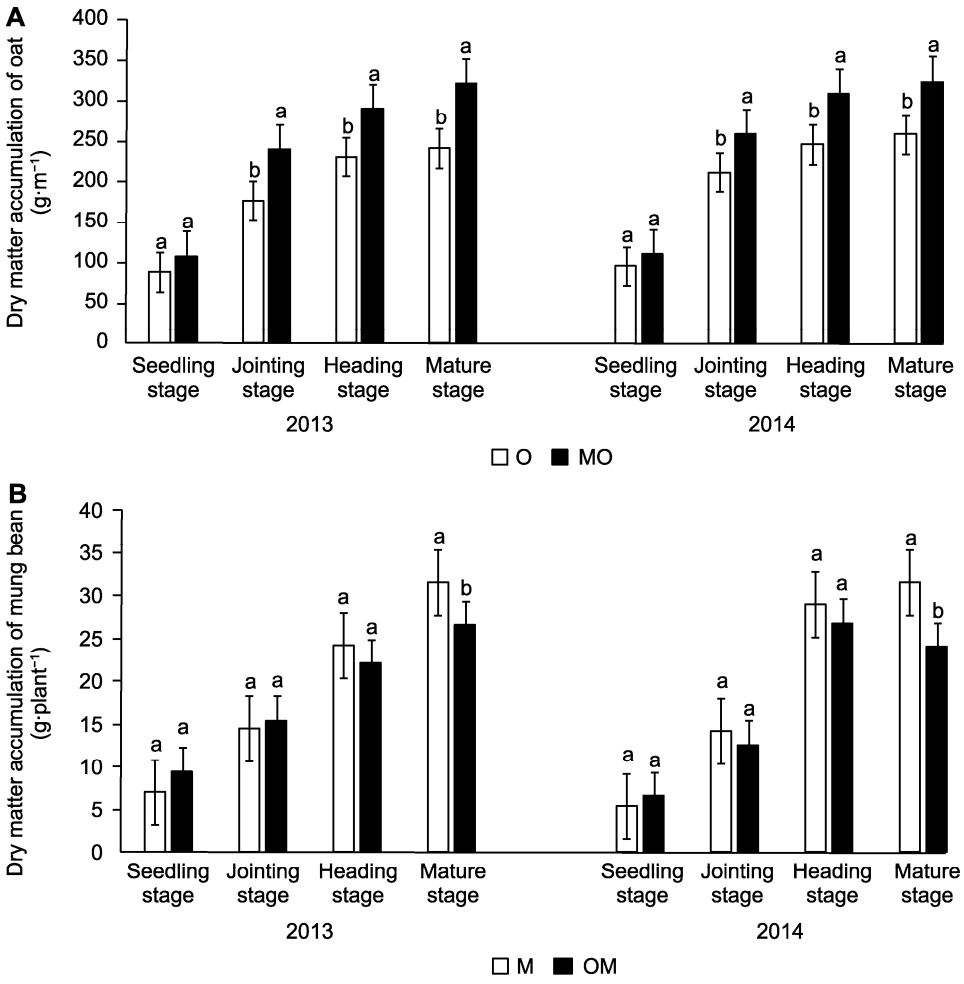

图3 不同种植方式下燕麦**(A)**和绿豆**(B)**各生育期地上部干物质的积累量

O: 单作燕麦; M: 单作绿豆; MO: 与绿豆间作的燕麦; OM: 与燕麦间作的绿豆。不同小写字母表示各处理间差异显著(P<0.05)。

Figure 3 Dry matter accumulation amount of oat **(A)** and mungbean **(B)** in different growing stage under different cropping mode

O: Oat monocropping; M: Mungbean monocropping; MO: Oat intercropped with mungbean; OM: Mungbean intercropped with oat. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments (P<0.05).

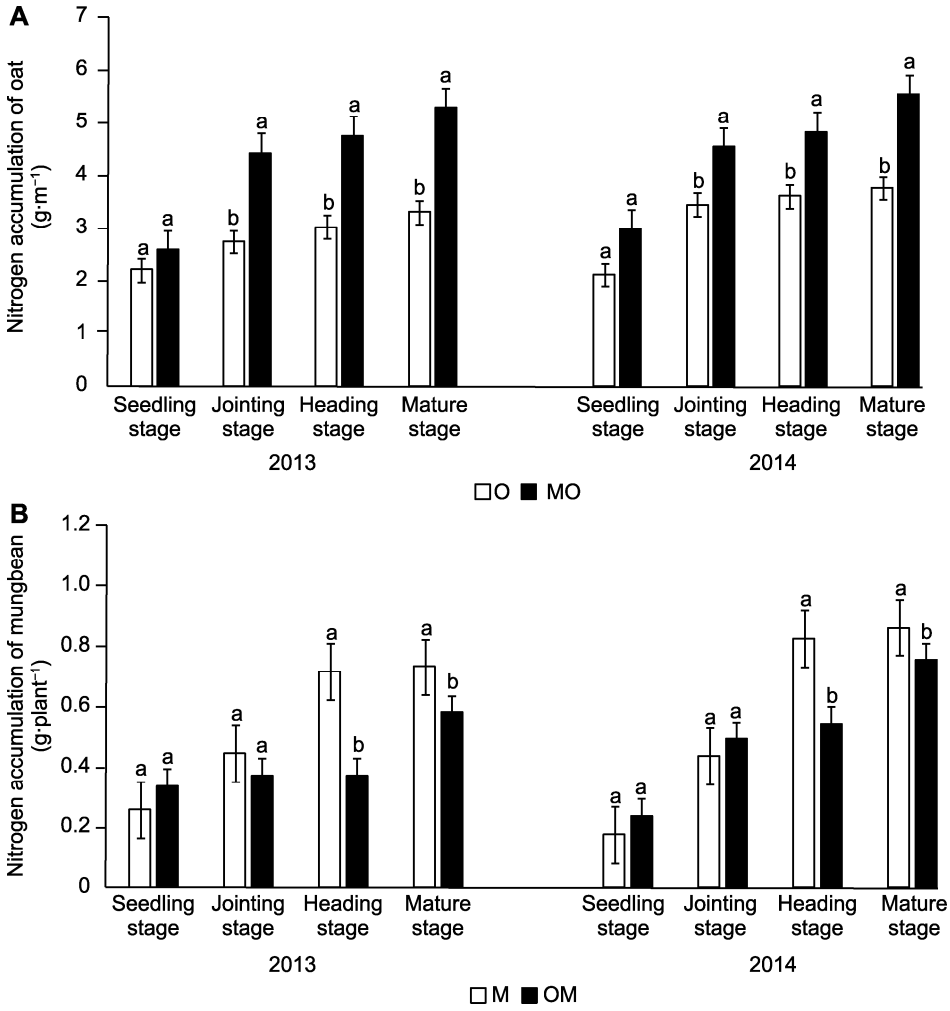

图4 间作对燕麦**(A)**和绿豆**(B)**地上部干物质氮素积累的影响
O、M、MO和OM同图3。不同小写字母表示各处理间差异显著(P<0.05)。

Figure 4 Effect of the intercropping on nitrogen accumulation of oat **(A)** and mungbean **(B)**
O, M, MO, and OM are the same as in Figure 3. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments (P<0.05).

2.3 间作对绿豆结瘤固氮的影响

间作降低了开花结荚期绿豆的根瘤重量，2013年和2014年分别降低34.9%和28.3%，差异显著(P<0.05)。间作降低了绿豆的单位质量固氮酶活性(表1)，2013年和2014年分别降低27.2%和25.1%，在2014年差异显著(P<0.05)。

固氮酶活性仅反映植株根瘤某一时刻的状态，受环境影响较大。而同位素稀释法可测定植株整个生育期的指标(表1)。2年数据表明，与单作相比，间作降低了成熟期绿豆的固氮效率，固氮率分别为6.3%和9.7%；且在2014年，与单作相比差异显著(P<0.05)。在绿豆生理成熟期，利用^{15}N同位素标记法测定了绿豆固氮量，结果表明，与单作相比，间作降低了绿豆的生物固氮量，2年分别降低20.93%和2.4%，且在2013年差异显著(P<0.05)。这是由于在绿豆与燕麦间作模式下，绿豆的生长受到严重限制，光合作用受抑制，尽管较单作具有较高的固氮效率，但因其干物质及氮素积累远低于单作绿豆，最终使其生物固氮量显著低于单作绿豆。

2.4 间作对绿豆氮素转移的影响

2013年和2014年间作燕麦的^{15}N吸收量均高于单作

燕麦, 且在2014年差异显著(P<0.05) (表2)。2013年和2014年间作燕麦从绿豆获得的氮量分别为215.28和209.04 kg·hm^{-2}, 燕麦从绿豆获得的氮量占其总氮素积累量的32.2%和31.2%。

2.5 讨论

2.5.1 不同作物种间作用与间作优势的关系

作物间作在利用空间和资源上产生竞争, 但由于间作体系对群体微环境的改变, 使得资源利用率提高, 进而产生互补, 因此竞争和互补同时存在(王利立等, 2016)。随着作物的生长, 二者的重要性随之改变(殷文等, 2015)。在整个生育期或某些重要生长期, 作物种间竞争大于互补时, 作物群体资源利用能力降低, 呈间作劣势; 反之, 群体对资源的利用能力增强, 呈间作优势(Ofori and Stern, 1987; 王利立等, 2016)。本研究中, 燕麦–绿豆间作群体在燕麦和绿豆共生期, 2年内燕麦–绿豆间作A_{om}值均大于0, 燕麦的资源竞争力强于绿豆, 使绿豆处于竞争劣势, 地上部氮素积累量降低, 生长受抑制。此外, 禾本科作物燕麦植株较高, 茎秆粗, 生长旺, 易对绿豆造成遮阴, 使绿豆不易获取阳光和空间资源, 这也是造成种间竞争差异的主要原因(Willey,1979)。间作体系下, 2种作物根系可以共同生长, 虽有竞争, 但总体表现为促进作用大于竞争。根系互作是平衡间作物种间竞争与互补的有效途径, 正是由于燕麦–绿豆间作体系存在地下互作, 使得间作群体表现为间作优势, 相似结论已有研究证实(秦亚洲等, 2015; 王利立等, 2016)。因此, 选用适宜的品种(如耐阴的绿豆品种)搭配, 可以互补或减少间作作物对生长资源的需求, 使得种间互利作用大于竞争关系, 进而提高生态资源利用效率, 增加间作作物群体产量。

表1 间作对绿豆结瘤固氮的影响

Table 1 Effect of intercropping on nodule and nitrogen fixation of mungbean

Year	Treatments	Weight of nodules (g)	Nitrogenase activity (nmol C_2H_2·h^{-1}·plant^{-1})	%NDFA	Biological nitrogen fixation (g·plant^{-1})
2013	M	3.29 a	1.64 a	66.23 a	19.68 a
	OM	2.14 b	1.48 a	62.04 a	15.56 b
2014	M	3.89 a	3.11 b	64.89 b	17.05 a
	OM	2.79 b	2.55 a	58.56 a	16.64 a

%NDFA: 固氮百分率。M和OM同图3。不同小写字母表示各处理间差异显著(P<0.05)。

%NDFA: Nitrogen fixation percentage. M and OM are the same as in Figure 3. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments (P<0.05).

表2 间作系统中氮素从绿豆向燕麦的转移

Table 2 Nitrogen translation from mungbean to oat in the intercropping system

Year	Treatments	^{15}N atom percent excess	^{15}N uptake (mg·plant^{-1})	%NTFL	N transfer (kg·hm^{-2})
2013	O	0.5720 b	0.36 a	–	–
	MO	0.7563 a	0.39 a	32.2	215.28
2014	O	0.6102 b	0.40 b	–	–
	MO	0.8010 a	0.54 a	31.2	209.04

%NTFL: 氮转移百分率。O和MO同图3。不同小写字母表示各处理间差异显著(P<0.05)。

%NTFL: %N transfer. O and MO are the same as in Figure 3. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments (P<0.05).

2.5.2 间作对作物氮素吸收和豆科作物根瘤固氮的影响

燕麦和绿豆间作系统中, 燕麦生物量和氮素积累量在整个生育期高于单作, 表明燕麦–绿豆共生期间, 间作群体表现为间作优势, 燕麦对氮素资源的利用在种间互作下得到增强。其原因, 一是绿豆根系腐烂分解释放养分, 被间作燕麦吸收利用(Hauggaard-Nielsen et al., 2009); 二是绿豆利用自身的共生固氮作用, 将固定的氮素直接转移给燕麦, Neumann等(2009)研究燕麦–豌豆间作也得出相似的结果; 三是在间作共生期内燕麦与绿豆根系互作逐渐增强, 且关系越来越紧密, 燕麦根系空间得到扩展, 有利于燕麦竞争到更多的资源, 包括更多的氮素(汪雪等, 2021a)。在燕麦–绿豆间作体系中, 绿豆对氮资源的利用处于劣势, 其地上部生物量、氮素积累量和根瘤重量均表现出下降趋势。研究表明, 间作提高了燕麦的净光合速率, 降低了绿豆的光合速率, 导致绿豆根系同化能力降低, 输送给地上部的营养物质和代谢能量减少, 限制了光合产物向生殖器官的转化(冯晓敏等, 2015b)。前人研究表明, 间作系统中处于高位的禾本科作物对低位的豆科作物形成遮阴作用, 使得豆科作物在弱光环境下为争取更多的光进行同化, 优先向地上部输送光合产物(刘卫国等, 2011), 这与本研究结果一致。但也有研究表明, 玉米–蚕豆和玉米–绿豆间作系统中, 根系互

作促进了豆科作物根瘤发育，根瘤重量增加(房增国等, 2005; 李玉英等, 2009)。根瘤因寄生组织中建成共生的固氮细菌而形成，它能够固定大气中的N_2，使得豆科作物有效地获得氮素。研究发现，间作可促进豆科作物根瘤固氮酶的合成，并增强单株固氮酶活性(左元梅等, 2003; 汪雪等, 2021a)。与上述研究结果相反，本研究表明，间作降低了绿豆单位质量的根瘤固氮酶活性，其原因是禾本科与豆科间作系统中，禾本科作物株高较高，使豆科作物处于遮阴逆境，故其光合速率降低，寄主向下运输的碳水化合物数量也随之减少，从而使得根瘤固氮酶活性下降(房增国, 2004)。Hu等(2017)在玉米–豌豆间作系统中，发现豌豆固氮效率提高了35%。Rusinamhodzi等(2006)研究玉米–豇豆(*Vigna unguiculata*)间作系统，表明间作豇豆固氮效率远高于单作。然而，在燕麦–绿豆间作系统中，虽然绿豆的固氮效率较高，但其植株较矮，如果长期受到遮阴，其固氮量就会低于单作绿豆。因此在间作系统中选择耐阴品种的绿豆，既可增加豆科作物的固氮量，又可增强种间互作，进而提高禾本科作物氮素积累。

2.5.3 间作系统中不同种间氮素的转移

凭借豆科作物的固氮能力，禾本科–豆科间作具有多方面优势，其中包括促进作物氮素利用(赵雅姣等, 2020)。Li等(2009)研究表明，禾本科–豆科间作体系中豆科作物固定氮素，并通过直接或间接的氮素转移供给禾本科作物生长。豆科作物固定氮素并向禾本科作物转移，被认为是豆禾间作系统中氮素高效利用的一种重要机制(刘卫国等, 2011)。一般认为，当禾本科–豆科间作体系中施氮水平较低时，可增加豆科作物的根瘤数量，提高豆科作物生物固氮能力(卢秉林等, 2021)。Chapagain和Riseman (2014)研究表明，豆科作物向禾本科作物转移一定量的氮素，禾本科作物对氮的竞争作用使豆科作物根瘤数量得以增加，从而提高豆科作物的固氮效率。本研究结果与此相反，原因可能是豆科作物所固定的氮通过残留物分解、根际沉积、根瘤破碎及枝叶脱落等使其残留在土壤中的种类和数量不同，导致地下根际固氮微生物的多样性和结构不同(董志新等, 2012)。^{15}N同位素稀释法可间接测定氮的表观转移，已被广泛应用(Ledgard, 1985; Van Kessel and Roskoski, 1988; 肖焱波, 2005; Xie et al., 2015)。2013年和2014年的研究结果表明，燕麦–绿豆间作系统中绿豆向燕麦发生了氮素转移，这与Zang等(2015)应用^{15}N同位素茎秆示踪标记技术研究燕麦–绿豆间作系统氮素转移所得结果相似。普遍认为，豆科作物向非豆科作物转移氮素可能有3种途径，一是间作体系组分间根系互作时发生的直接转移；二是土壤中残留的氮素在作物生长后期被当季非豆科作物吸收利用的间接转移；三是下一季作物吸收利用土壤中残留氮素的间接转移(柴强等, 2017)。其中第1种转移途径可能是豆科作物通过根系分泌数量可观的氮转化物(以NH_4^+、NO_3^-、氨基酸、细胞溶解物和脱落物等形态)沉积于作物根际，在土壤中迁移后被禾本科作物吸收和利用。前人对燕麦与其它作物以及绿豆与其它作物间作时的氮素转移规律也有研究。褚贵新等(2003)采用^{15}N叶片标记法研究水稻–绿豆间作系统中的氮转移，发现水稻–绿豆间作存在双向氮转移，但以绿豆向水稻氮转移为主。然而，在禾本科–豆科间作系统中，作物种类、不同物种间根系竞争力、不同作物的生物学特性和氮素利用特征以及土壤和环境因素均会对禾本科–豆科间作系统的氮素营养特性产生较大影响。因此，需要在不同区域进行多年定点试验，以获得更多数据。

3 结论

燕麦–绿豆间作系统中，作物种间根系相互作用，总体表现为促进大于竞争，绿豆向燕麦转移氮素，间作群体表现间作优势，燕麦的生物量和氮素积累量均显著增高。同时，禾本科与豆科间作系统中，禾本科作物株高较高，使豆科作物处于遮阴逆境，造成绿豆的根瘤重量、根瘤固氮酶活性、固氮效率、生物固氮量和生物量均有所降低。因此，在发挥禾本科与豆科间作优势的同时，要考虑到间作系统中作物品种的选择、水肥调控管理、作物空间布局以及种植密度等因素。只有科学优化种间互补、充分挖掘豆科作物的生物固氮潜力，才能实现作物对氮素的高效利用并减少化肥施用量，进而促进农业生态的可持续发展。

参考文献

蔡倩，孙占祥，王文斌，白伟，杜桂娟，张悦，张哲，冯晨，向午燕，赵凤艳 (2022). 辽西半干旱区玉米大豆间作对作物

产量及水分利用的影响. 中国农业气象 **43**, 551–562.

柴强, 胡发龙, 陈桂平 (2017). 禾豆间作氮素高效利用机理及农艺调控途径研究进展. 中国生态农业学报 **25**, 19–26.

褚贵新, 沈其荣, 曹金留, 茆泽圣, 钟增涛, 赵龙 (2003). 旱作水稻与花生间作系统中的氮素固定与转移及其对土壤肥力的影响. 土壤学报 **40**, 717–723.

董志新, 孙波, 殷士学, 隋跃宇 (2012). 气候条件和作物对黑土和潮土固氮微生物群落多样性的影响. 土壤学报 **49**, 130–138.

房增国 (2004). 豆科/禾本科间作的氮铁营养效应及对结瘤固氮的影响. 博士论文. 北京: 中国农业大学. pp. 65–66.

房增国, 左元梅, 李隆, 张福锁 (2005). 玉米–花生混作对系统内氮营养的影响研究. 中国生态农业学报 **13**(3), 63–64.

冯晓敏, 胡跃高, 张卫建, 曾昭海 (2015a). 不同豆科作物与燕麦间作对燕麦产量、光合特性和根际固氮微生物*nifH*基因丰度的影响. 中国作物学会——2015年学术年会论文摘要集. 哈尔滨: 中国作物学会. pp. 222.

冯晓敏, 杨永, 任长忠, 胡跃高, 曾昭海 (2015b). 豆科–燕麦间作对作物光合特性及籽粒产量的影响. 作物学报 **41**, 1426–1434.

郭丽琢, 张虎天, 何亚慧, 柴强, 黄高宝 (2012). 根瘤菌接种对豌豆/玉米间作系统作物生长及氮素营养的影响. 草业学报 **21**, 43–49.

何纪桐, 马祥, 琚泽亮, 刘凯强, 赵继秀, 马小龙, 贾志锋 (2022). 高寒地区燕麦与蚕豆间作对作物生长发育及产量的影响. 草地学报 **30**, 2514–2521.

纪祥龙, 张吉立, 蒋雨洲, 王鹏 (2022). 施氮量对绿豆光合特性、磷钾素吸收利用及产量的影响. 黑龙江八一农垦大学学报 **34**(2), 1–9, 31.

焦念元, 赵春, 宁堂原, 侯连涛, 付国占, 李增嘉, 陈明灿 (2008). 玉米-花生间作对作物产量和光合作用光响应的影响. 应用生态学报 **19**, 981–985.

李玉英, 孙建好, 李春杰, 李隆, 程序, 张福锁 (2009). 施氮对蚕豆/玉米间作系统蚕豆农艺性状及结瘤特性的影响. 中国农业科学 **42**, 3467–3474.

刘卫国, 蒋涛, 佘跃辉, 杨峰, 杨文钰 (2011). 大豆苗期茎秆对荫蔽胁迫响应的生理机制初探. 中国油料作物学报 **33**, 141–146.

卢秉林, 车宗贤, 包兴国, 张久东, 曹卫东, 吴科生, 杨蕊菊, 崔恒 (2021). 不同氮肥减施量下玉米针叶豌豆间作体系的产量及效益. 植物营养与肥料学报 **27**, 1560–1570.

马怀英, 王上, 杨亚东, 冯晓敏, 曾昭海, 任长忠, 臧华栋, 胡跃高 (2021). 燕麦与豆科作物间作的产量、经济效益与碳足迹分析. 中国农业大学学报 **26**(8), 23–32.

秦亚洲, 王利立, 柴强, 殷文 (2015). 大麦间作豌豆的种间竞争力及产量对施氮量的响应. 农业现代化研究 **36**, 482–487.

沈颖超, 张志肖, 孙素丽, 王彦, 范保杰, 刘长友, 王珅, 苏秋竹, 时会影, 朱振东, 田静 (2022). 绿豆种质资源枯萎病抗性鉴定及抗性资源筛选. 植物遗传资源学报 **23**, 1660–1669.

王利立, 朱永永, 殷文, 郑德阳, 柴强 (2016). 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. 中国生态农业学报 **24**, 265–273.

王旭, 曾昭海, 朱波, 胡跃高, 林叶春, 陈恭, 芦金生, 袁喜兰 (2009). 燕麦与箭筈豌豆不同混作模式对根际土壤微生物数量的影响. 草业学报 **18**(6), 151–157.

汪雪, 刘晓静, 赵雅姣, 王静 (2021a). 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 **29**, 2258–2264.

汪雪, 刘晓静, 赵雅姣, 王静 (2021b). 根系分隔方式下紫花苜蓿/燕麦间作氮素利用及种间互馈特征研究. 草业学报 **30**(8), 73–85.

肖焱波, 李隆, 张福锁 (2005). 小麦/蚕豆间作体系中的种间相互作用及氮转移研究. 中国农业科学 **38**, 965–973.

殷文, 赵财, 于爱忠, 柴强, 胡发龙, 冯福学 (2015). 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 **41**, 633–641.

赵雅姣, 刘晓静, 童长春, 吴勇 (2020). 紫花苜蓿/玉米间作对紫花苜蓿结瘤固氮特性的影响. 草业学报 **29**, 95–105.

左元梅, 刘永秀, 张福锁 (2003). 与玉米混作改善花生铁营养对其根瘤形态结构及豆血红蛋白含量的影响. 植物生理与分子生物学学报 **29**, 33–38.

Bellenger JP, Xu Y, Zhang X, Morel FMM, Kraepiel AML (2014). Possible contribution of alternative nitrogenases to nitrogen fixation by asymbiotic N_2-fixing bacteria in soils. *Soil Biol Biochem* **69**, 413–420.

Chapagain T, Riseman A (2014). Barley-pea intercropping: effects on land productivity, carbon and nitrogen transformations. *Field Crops Res* **166**, 18–25.

Gong XW, Dang K, Lv SM, Zhao G, Tian LX, Luo Y, Feng BL (2020). Interspecific root interactions and water-use efficiency of intercropped proso millet and mungbean. *Eur J Agron* **115**, 126034.

Hauggaard-Nielsen H, Gooding M, Ambus P, Corre-Hellou G, Crozat Y, Dahlmann C, Dibet A, von Fragstein P, Pristeri A, Monti M, Jensen ES (2009). Pea–barley

intercropping for efficient symbiotic N_2-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. *Field Crops Res* **113**, 64–71.

He TG, Su LR, Li YR, Su TM, Qin F, Li Q (2018). Nutrient decomposition rate and sugarcane yield as influenced by mungbean intercropping and crop residue recycling. *Sugar Tech* **20**, 154–162.

Hu FL, Zhao C, Feng FX, Chai Q, Mu YP, Zhang Y (2017). Improving N management through intercropping alleviates the inhibitory effect of mineral N on nodulation in pea. *Plant Soil* **412**, 235–251.

Ledgard SF, Freney JR, Simpson JR (1985). Assessing nitrogen transfer from legumes to associated grasses. *Soil Boil Biochem* **17**, 575–577.

Li SX, Wang ZH, Hu TT, Gao YJ, Stewart BA (2009). Nitrogen in dryland soils of China and its management. *Adv Agron* **101**, 123–181.

Liang JP, He ZJ, Shi WJ (2020). Cotton/mungbean intercropping improves crop productivity, water use efficiency, nitrogen uptake, and economic benefits in the arid area of Northwest China. *Agric Water Manage* **240**, 106277.

Neugschwandtner RW, Kaul HP (2014). Sowing ratio and N fertilization affect yield and yield components of oat and pea in intercrops. *Field Crops Res* **155**, 159–163.

Neumann A, Schmidtke K, Rauber R (2007). Effects of crop density and tillage system on grain yield and N uptake from soil and atmosphere of sole and intercropped pea and oat. *Field Crops Res* **100**, 285–293.

Neumann A, Werner J, Rauber R (2009). Evaluation of yield-density relationships and optimization of intercrop compositions of field-grown pea-oat intercrops using the replacement series and the response surface design. *Field Crops Res* **114**, 286–294.

Ofori F, Stern WR (1987). Cereal-legume intercropping systems. *Adv Agron* **41**, 41–90.

Rusinamhodzi L, Murwira HK, Nyamangara J (2006). Cotton–cowpea intercropping and its N_2 fixation capacity improves yield of a subsequent maize crop under Zimbabwean rain–fed conditions. *Plant Soil* **287**, 327–336.

Van Kessel C, Roskoski JP (1998). Row spacing effects on N_2-fixation, N-yield and soil N uptake of intercropped cowpea and maize. *Plant Soil* **111**, 17–23.

Willey RW (1979). Intercropping—its importance and research needs. Part II. Agronomy and research approaches. *Field Crop Abstr* **32**, 73–85.

Xie KY, Li XL, He F, Zhang YJ, Wan LQ, David BH, Wang D, Qin Y, Gamal MAF (2015). Effect of nitrogen fertilization on yield, N content, and nitrogen fixation of alfalfa and smooth bromegrass grown alone or in mixture in greenhouse pots. *J Integr Agric* **14**, 1864–1876.

Zang HD, Yang XC, Feng XM, Qian X, Hu YG, Ren CZ, Zeng ZH (2015). Rhizodeposition of nitrogen and carbon by mungbean (*Vigna radiata* L.) and its contribution to intercropped oats (*Avena nuda* L.). *PLoS One* **10**, e0121132.

Intercropping Effect and Nitrogen Transfer Characteristics of Oat–Mungbean Intercrop

Xiaomin Feng[1, 2], Xiang Gao[1], Huadong Zang[2], Yuegao Hu[2], Changzhong Ren[3], Zhiping Hao[1] Huiqing Lü[1], Zhaohai Zeng[2*]

[1]Institute of Sorghum Research, Shanxi Academy of Agricultural Sciences/Shanxi Agricultural University, Yuci 030600, China; [2]Key Laboratory of Farming System, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; [3]Baicheng Academy of Agricultural Sciences, Baicheng 137000, China

Abstract To explore the intercropping effect and nitrogen transfer characteristics of oat and mungbean, three planting patterns, oat monocropping, mungbean monocropping, oat–mungbean intercropping, were investigated with both root-digging method and ^{15}N isotope labelling method. The results showed that in intercropping system, oat displayed higher invasiveness than mungbean, whose growth was inhibited. The dry matter accumulation of oat shoot was 14.9%–33.1% higher in intercropping than in monoculture in the whole growing stages. Compared with monocropping, the nitrogen accumulation of oat at two year mature stages was increased by 53.1% and 44.8%, respectively. The intercropping system reduced nitrogen accumulation, nodule weight at flowering and pod stage, and nitrogen fixation efficiency of mungbean. The total nitrogen fixation efficiency of mungbean decreased by 23.7% and the biological nitrogen fixation decreased by 11.66% on average for two years. The nitrogen transfer rate of intercropped mungbean to oat reached 31.7%, and the nitrogen transfer amount was 212.16 kg·hm^{-2}. The oat–mungbean intercropping decreased nodule nitrogenase activity and nitrogen fixation efficiency of mungbean at flowering and pod stage, but nitrogen transfer in mungbean increased nitrogen uptake and utilization of oat, realized the mutual regulation and promotion between the growth of above and below ground, and meanwhile, optimized the nitrogen management system in farmland ecosystem.

Key words oat–mungbean intercrop, nodule N fixation, ^{15}N isotope labelling, N uptake, N transfer

Feng XM, Gao X, Zang HD, Hu YG, Ren CZ, Hao ZP, Lü HQ, Zeng ZH (2023). Intercropping effect and nitrogen transfer characteristics of oat–mungbean intercrop. *Chin Bull Bot* **58**, 122–131.

---

* Author for correspondence. E-mail: zengzhaohai@cau.edu.cn

(责任编辑: 白羽红)