

马铃薯豆类间作复合系统氮素吸收利用特性研究

满本菊¹,王建鹏¹,刘吉利²,吴娜¹

(1.宁夏大学农学院,宁夏 银川 750021; 2.宁夏大学环境工程研究院,宁夏 银川 750021)

摘要:为减缓宁夏南部山区马铃薯连作障碍,本试验于 2020 年 3—10 月采用随机区组设计,设置单作蚕豆 (IB)、单作大豆 (IS)、单作马铃薯 (IP)、马铃薯间作大豆 (PS)、马铃薯间作蚕豆 (PB) 5 种不同种植模式,探究不同间作模式对马铃薯氮素含量、土壤氮素及产量的影响,以期为宁南山区农田生态系统的可持续发展提供理论依据。研究表明,间作整体上提高了马铃薯根、茎、块茎的氮素含量和分配比例,降低了叶部氮素含量和分配比例。PS 有效提高了土壤碱解氮和全氮含量,降低了铵态氮和硝态氮含量。碱解氮含量除苗期和成熟期外均以 PS 最高,现蕾期至块茎膨大期在 0~20、20~40、40~60 cm 土层分别较 IP 和 PB 高出 14.14%~26.19%、2.25%~24.59%、1.54%~29.18% 和 1.02%~3.45%、2.08%~2.85%、2.73%~3.23%;全氮除苗期外均为 PS 最高,现蕾期至成熟期在 0~20、20~40、40~60 cm 分别较 IP 和 PB 高出 8.00%~21.93%、15.46%~59.2%、19.44%~54.41%和 6.05%~14.48%、4.41%~36.23%、12.24%~28.08%;硝态氮从苗期至成熟期均为 PS 最低,在 0~20、20~40、40~60 cm 分别较 IP 和 PB 降低 30.37%~63.11%、15.92%~67.81%、31.93%~79.56%和 8.06%~63.11%、3.35%~67.81%、13.08%~35.18%;铵态氮从苗期至成熟期均为 PS 最低,在 0~20、20~40、40~60 cm 分别较 IP 和 PB 降低 14.21%~39.76%、31.69%~57.46%、44.09%~52.98%和 4.91%~37.25%、4.91%~37.59%、1.39%~37.51%。隶属函数分析结果为 PS 处理综合评价最优,且其土地当量比最大,种间竞争最小,在生产中宜推广的种植模式为马铃薯间作大豆。

关键词:马铃薯;间作;豆类;氮素利用;土地当量比

中图分类号:S365;S344.2 **文献标志码:**A

Study on nitrogen uptake and utilization characteristics
of potato and beans intercropping system

MAN Benju¹, WANG Jianpeng¹, LIU Jili², WU Na¹

(1.School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2.Institute of Environmental Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: Five different planting patterns of monocropping broad bean (IB), monocropping soybean (IS), monocropping potato (IP), potato intercropping soybean (PS) and potato intercropping broad bean (PB) were set up in a randomized block design from March to October in 2020 to explore the effects of different intercropping patterns on potato nitrogen content, soil nitrogen and yield in order to alleviate the obstacles of potato continuous cropping and provide a theoretical basis for the sustainable development of farmland ecosystem in the mountainous area of southern Ningxia. The results showed that intercropping increased the nitrogen content and distribution ratio of potato roots, stems and tubers, but decreased the nitrogen content and distribution ratio of potato leaves. PS effectively increased the contents of alkali-hydrolyzed nitrogen and total nitrogen, but decreased the contents of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen. The content of alkali-hydrolyzable nitrogen was the highest except at seedling and mature stage. Compared with IP and PB, they were 14.14%~26.19%, 2.25%~24.59%, 1.54%~29.18% and 1.02%~3.45%, 2.08%~2.85% and 2.73%~3.23% higher from bud stage to tuber expansion at 0~20, 20~40 cm and 40~60 cm, respectively. PS was the highest for total nitrogen except at seedling stage. Compared with IP and

PB at 0~20, 20~40 cm and 40~60 cm, they were 8.00%~21.93%, 15.46%~59.2%, 19.44%~54.41% and 6.05%~14.48%, 4.41%~36.23%, 12.24%~28.08%, respectively. The nitrate nitrogen was the highest in PS from seedling stage to maturity stage. At 0~20, 20~40 cm and 40~60 cm, they were 30.37%~63.11%, 15.92%~67.81%, 31.93%~79.56% lower than IP, and 8.06%~63.11%, 3.35%~67.81%, 13.08%~35.18% lower than PB. PS was the highest in ammonium nitrogen from seedling stage to maturity stage. At 0~20, 20~40 cm and 40~60 cm, they were 14.21%~39.76%, 31.69%~57.46%, 44.09%~52.98% and 4.91%~37.25%, 4.91%~37.59%, 1.39%~37.51% higher than IP and PB, respectively. The results of membership function analysis showed that the PS treatment had the best comprehensive evaluation, the land equivalent ratio was the largest, and the interspecific competition was the least. The planting mode suitable for popularizing in production was potato intercropping soybean.

Keywords: potato; intercropping; beans; nitrogen utilization; land equivalent ratio

间作是降低农业生产环境成本、提高农田生产力、实现农业可持续发展的重要手段^[1-2]。相关研究表明合理的间作模式能高效利用时间和空间资源,促进作物对养分的吸收^[3]。近年来,随着产业结构的调整,马铃薯成为了宁夏南部山区提高经济效益的优势作物,种植面积的不断扩大和多年连作导致马铃薯病虫害愈加严重、产量和品质不断下降^[4-5]。而间作是解决这些问题的有效措施。

豆科作物参与的间作种植模式广泛分布在世界各地,在改良土壤质量、促进农业可持续发展方面发挥了重要作用^[6-7]。豆科作物具备生物固氮功能,可减少作物对土壤养分的过度消耗,也能将固定的氮贡献给相邻作物以增加氮的来源^[8],对减少氮肥投入、减轻农业环境污染具有重要意义^[9]。大量研究表明豆科作物和禾本科作物间作可以促进作物对光、温、水、气、热等资源的利用,从而有效提高作物产量,同时也可以有效抑制病虫害的频繁发生,有利于农田生态系统的稳定^[10-12]。李越等^[13]研究表明,马铃薯和蚕豆间作可以在一定程度上通过改善根系微生物环境而减少马铃薯连作障

碍。汪春明等^[14]在马铃薯间作蚕豆的研究中发现,间作模式丰富了土壤微生物群落结构,这有利于改善马铃薯连作栽培的根际微生态环境,从而减缓马铃薯连作障碍。有关马铃薯间作豆类对马铃薯氮素含量及土壤氮素影响的研究有限,对这一间作复合系统的作物氮素吸收规律和土壤氮素变化规律尚不明确。因此,本试验通过设置马铃薯与豆类不同的间作种植模式,探究不同间作模式对马铃薯氮含量、土壤氮素及产量的影响,以期为宁南山区马铃薯产业的可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2020 年 3—10 月在宁夏海原县树台乡大嘴村试验基地进行,其地理位置在 105°09′~106°10′ E, 36°06′~37°04′ N 之间。平均海拔高度为 2 166 m,年平均降水量为 286 mm,降水偏少,且季节分布不平衡,属于干旱半干旱带。无霜期为 149~171 d,年平均气温为 7℃,土壤类型为侵蚀黑垆土。试验地基础土样的理化性质如表 1 所示。

表 1 试验地基础土样理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of foundation soil samples

土层深度 Soil depth/cm	有机质 OM/(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	速效磷 Total P/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Avail N/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Avail K/(mg·kg ⁻¹)	pH
0~20	8.59	0.76	48.16	68.05	353.59	8.1

1.2 试验设计

马铃薯供试品种为青薯 9 号,大豆为新选 88,蚕豆为青海 9 号。试验设置 5 个处理,分别为单作蚕豆 (IB)、单作大豆 (IS)、单作马铃薯 (IP)、马铃薯间作大豆 (PS)、马铃薯间作蚕豆 (PB)。其中马铃薯单作为起垄覆膜种植,垄宽 60 cm,垄距 40 cm,垄上种植两行马铃薯,行距 30 cm,株距 40 cm,种植深度 20~25 cm,种植密度 50 025 株·hm⁻²。蚕豆单

作为等行距平种,行距 30 cm、株距 20 cm,种植密度为 16.5 万·hm⁻²。大豆单作为等行距平种,行距 30 cm、株距 15 cm,种植密度为 22.5 万株·hm⁻²。马铃薯间作大豆、马铃薯间作蚕豆行距均为 30 cm,种植行比均为 2:2。试验采用随机区组设计,每个处理设 4 个重复,共计 20 个小区,每个小区长 8 m,宽 6 m,小区面积 48 m²,过道宽 1.5 m,试验地周围设 2 m 保护行种植马铃薯。马铃薯、大豆和蚕豆于 5 月 2

日播种,蚕豆和大豆于 8 月 24 日收获,马铃薯于 10 月 7 日收获。氮肥(尿素 256 kg · hm⁻²)、磷肥(过磷酸钙 90 kg · hm⁻²)、钾肥(硫酸钾 45 kg · hm⁻²)于翻地前一天结合整地撒施后翻耕入土(深度约 10 ~ 30 cm),在马铃薯苗期、中后期进行除草和相关田间管理。

1.3 测定指标与方法

分别于马铃薯苗期、现蕾期、块茎形成期、块茎膨大期和成熟期采取植株样品,用管形土钻在马铃薯单作、马铃薯大豆间作和马铃薯蚕豆间作行的中间行分层采集 0 ~ 60 cm(每 20 cm 为 1 层)土壤样品。

1.3.1 植株全氮的测定 在马铃薯苗期、现蕾期、块茎形成期、块茎膨大期和成熟期分部位分别取样用凯氏定氮法^[15]测定植株各部位的氮素含量。

1.3.2 土壤氮素的测定 在马铃薯苗期、现蕾期、块茎形成期、块茎膨大期和成熟期,分别采集 0~20、20~40、40~60 cm 的土壤样品,用碱解扩散法测定土壤碱解氮含量、比色法测定铵态氮含量、酚二磺酸比色法测定硝态氮含量、凯氏定氮法测定全氮含量^[15]。

1.3.3 收获测产、土地当量比、种间相对竞争力 收获期每小区实收 1 m²大豆和蚕豆进行测产,取考种样考察荚数、每荚粒数和百粒重。实收每小区全部马铃薯进行测产和考种,对每个小区的商品薯(≥0.075 kg)、大薯(≥0.1 kg)、中薯(0.1 kg>中薯≥0.05 kg)、小薯(<0.05 kg)分别计数、称重;用土地当量比(LER)作为衡量产量间作优势的指标,用种间相对竞争力(A)作为衡量马铃薯相对大豆和蚕豆对资源竞争能力大小的指标。

土地当量比和种间相对竞争力计算公式如下:
$$LER = Y_{ip}/Y_{sp} + Y_{is}/Y_{ss}$$
$$LER = Y_{ip}/Y_{sp} + Y_{ib}/Y_{sb}$$
式中, Y_{ip} 、 Y_{ib} 和 Y_{is} 分别代表间作中马铃薯、蚕豆和大豆的产量; Y_{sp} 、 Y_{sb} 和 Y_{ss} 分别代表单作马铃薯、蚕豆和大豆的产量。当 $LER > 1$,表明间作比单作的资源利用效率高;当 $LER < 1$,则单作比间作更有效利用资源。

$$A_{ps} = Y_{ip}/(Y_{sp} \times P_p) - Y_{is}/(Y_{ss} \times P_s)$$
$$A_{pb} = Y_{ip}/(Y_{sp} \times P_p) - Y_{ib}/(Y_{sb} \times P_s)$$
式中, A_{ps} 和 A_{pb} 分别为马铃薯相对于大豆和蚕豆的资源竞争力, P_p 、 P_s 和 P_b 分别为间作中马铃薯、大豆和蚕豆所占的土地面积比例,其他变量与上式含义相同。当 $A_{ps} > 0$ 表示马铃薯对资源的竞争力大于大豆; $A_{ps} < 0$,表示马铃薯对资源的竞争力小于大

豆,蚕豆同理。
1.3.4 隶属函数分析 采用模糊数学隶属函数法,利用各氮素吸收指标对马铃薯材料进行隶属函数平均值的计算,对其氮素吸收性进行评价;该平均值代表马铃薯氮素吸收性,数值越大表示对土壤氮素吸收越多。隶属函数值的具体计算方法如下:

若指标与吸收性呈正相关关系,则:
$$Z_{ij} = (X_{ij} - X_{imin})/(X_{imax} - X_{imin})$$
若指标与吸收性呈负相关关系,则:
$$Z_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{imin})/(X_{imax} - X_{imin})$$

式中: i 表示不同间作处理, j 表示氮素吸收指标, Z_{ij} 为供试马铃薯材料的氮素吸收性隶属函数值, X_{ij} 为各氮素指标的实际测量值, X_{imax} 为各氮素指标实际测定的最大值, X_{imin} 为各氮素指标实际测定的最小值。将隶属函数值进行累加,求得平均值。

1.3.5 数据处理 采用 Excel 2010 和 Origin 2018 进行数据分析,通过 Duncan 法进行显著性差异检验。

2 结果与分析

2.1 间作对马铃薯植株氮素积累和分配的影响

由图 1 可知,不同间作系统中马铃薯植株氮素积累量随生育时期的推进呈现上升的趋势,在成熟期达到最大,且各生育时期均表现为 PS 最高,除块茎膨大期外均显著高于其他处理,但由图 2 可知植株各部位氮素分配不均一,在各生育时期由于作物生长需要氮素发生转移使得在各部位占比不同。根部氮素在苗期、块茎膨大期和成熟期均表现为 PS>PB>IP,在现蕾期和块茎形成期表现为 PB>PS>IP。茎部氮素除成熟期外其他各生育时期均为 PS 最高,且 PS 在苗期、现蕾期、块茎形成期、块茎膨大期分别较 IP、PB 高出 16.39%和 41.63%、65.62%和 15.67%、36.35%和 172%、8.92%和 22.09%。叶部氮素在苗期和现蕾期时均表现为 IP 最高,成熟期表现为 PS 最高,块茎膨大期表现为 IP 最高,块茎形成期表现为 PB 最高。块茎氮素在块茎形成期表现为 PB>PS>IP,PB 分别较 IP、PS 高出 90.49%和 10.84%。在块茎膨大期和成熟期表现为 PS>PB>IP,PS 分别较 IP、PB 高出 72.66%、12.18%和 37.17%、22.19%。

2.2 间作对土壤碱解氮含量的影响

由图 3 可知,不同间作模式下,从苗期到成熟期各处理土壤碱解氮含量在 0~20 cm 土层均表现为最高,随着土层的深入其含量呈逐渐下降的趋势,在各生育时期各土层均为 PS 处理最高。除苗期和成熟期外均表现为 PS>PB>IP,且现蕾期 PS 在 0~20、

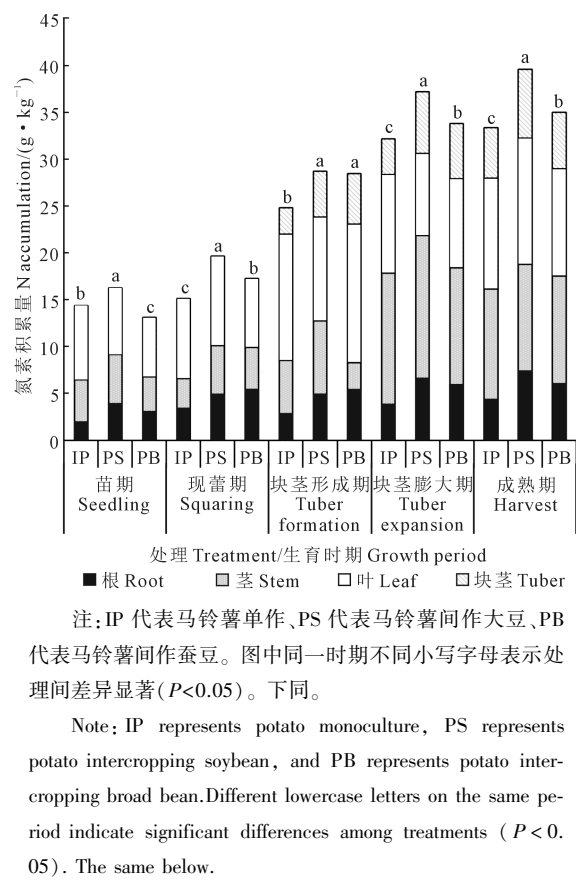


图 1 间作对马铃薯植株氮素积累量的影响

Fig.1 Effects of intercropping on nitrogen accumulation in potato plants

20~40、40~60 cm 土层分别较 IP 和 PB 高出 26.19%、2.25%、1.54%和 3.45%、2.08%、3.23%。块茎形成期 PS 在 0~20、20~40、40~60 cm 土层分别较 IP 和 PB 高出 20.56%、25.88%、12.52%和 1.02%、2.47%、2.78%。块茎膨大期 PS 分别在 0~20、20~40、40~60 cm 土层较 IP 和 PB 高出 14.14%、24.59%、29.18%和 1.35%、2.85%、2.73%。

2.3 间作对土壤铵态氮含量的影响

由图 4 可知,土壤铵态氮随土层的深入和生育时期的推进均呈现下降趋势,且均表现为 PS<PB<

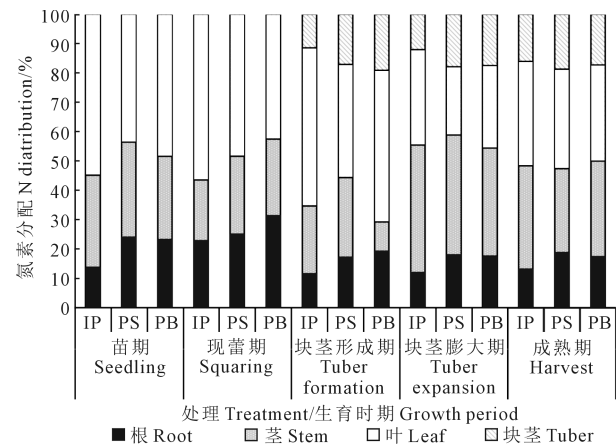


图 2 间作对马铃薯植株氮素分配的影响

Fig.2 Effects of intercropping on nitrogen distribution in potato plants

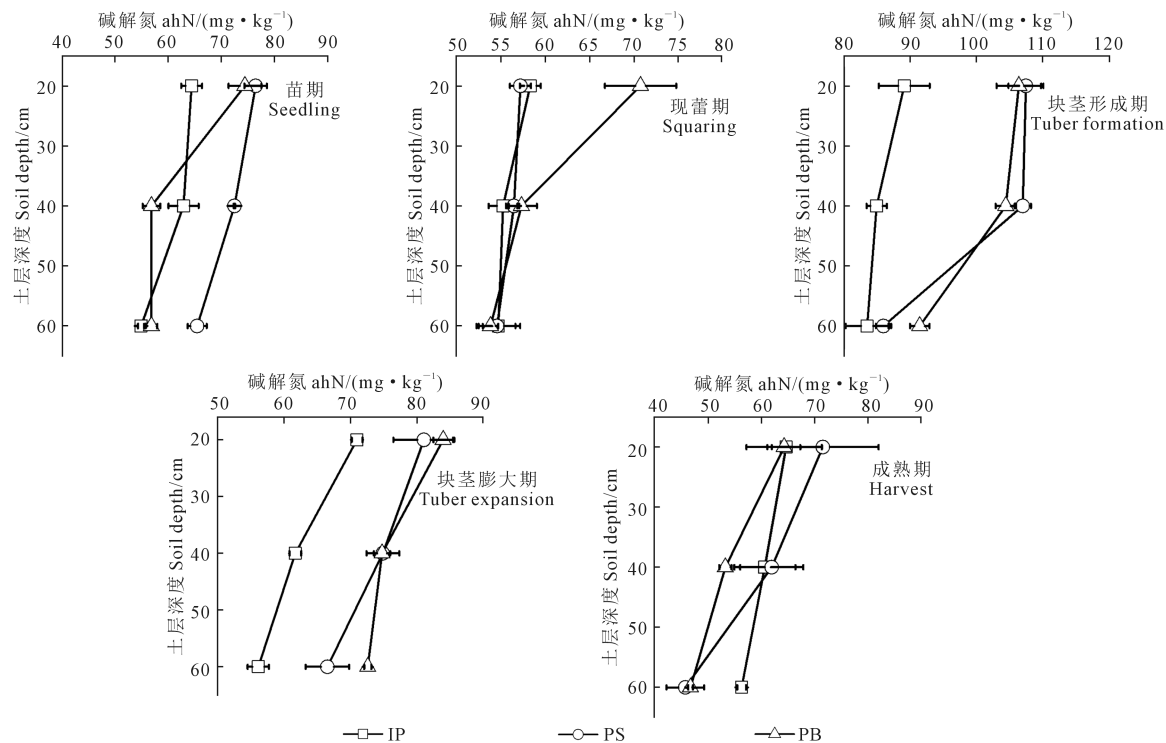


图 3 间作对马铃薯土壤碱解氮含量的影响

Fig.3 Effects of intercropping on alkaline nitrogen content in potato soil

IP。苗期 PS 在 0~20、20~40、40~60 cm 土层分别较 IP 和 PB 降低 14.21%、39.61%、49.03%和5.64%、34%、36.95%。现蕾期 PS 在 0~20、20~40、40~60 cm 土层分别较 IP 和 PB 降低 35.23%、31.69%、49.93%和 21.79%、4.91%、22.56%。块茎形成期 PS 在 0~20、20~40、40~60 cm 土层分别较 IP 和 PB 降低 39.76%、57.46%、44.09%和 37.25%、37.59%、33.76%。块茎膨大期 PS 在 0~20、20~40、40~60

cm 土层分别较 IP 和 PB 降低 21.03%、43.32%、52.98%和 7.78%、26.89%、1.39%。成熟期 PS 在 0~20、20~40、40~60 cm 土层分别较 IP 和 PB 降低 14.62%、50%、52.63%和 10.48%、24.63%、37.51%。

2.4 间作对土壤硝态氮含量的影响

由图 5 可知,随土层的深入土壤硝态氮在各生育时期均呈现下降的趋势,且均表现为 PS<PB<IP。苗期 PS 在 0~20、20~40、40~60 cm 土层分别较 IP

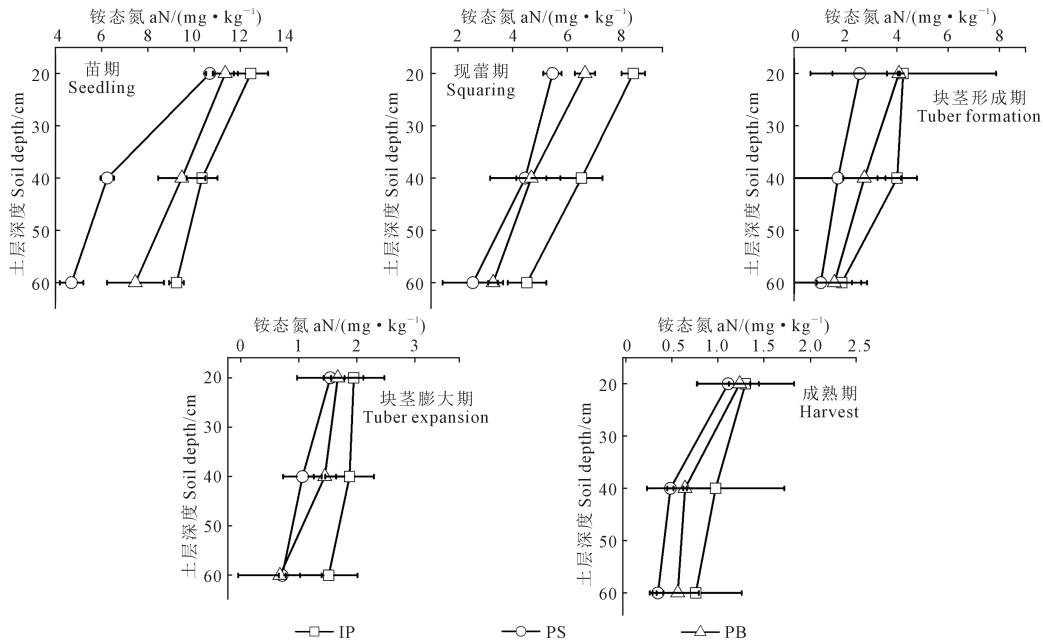


图 4 间作对马铃薯土壤铵态氮含量的影响

Fig.4 Effects of intercropping on soil ammonium nitrogen content of potato

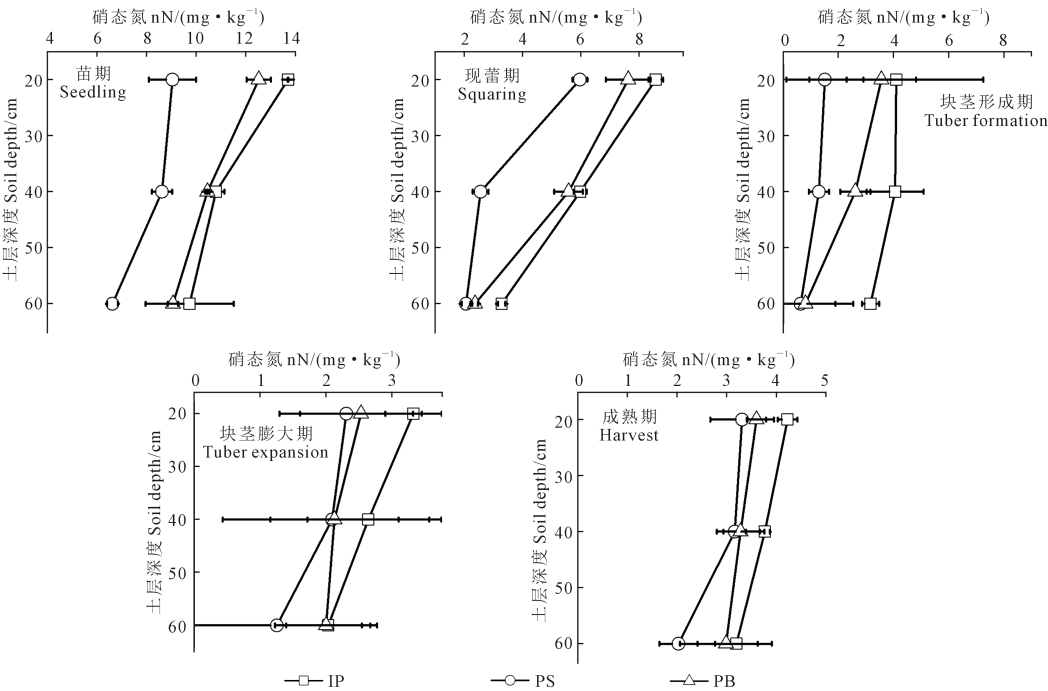


图 5 间作对马铃薯土壤硝态氮含量的影响

Fig.5 Effect of intercropping on nitrate nitrogen content in potato soil

和 PB 降低 33.99%、20.09%、31.93% 和 27.77%、17.49%、26.9%。现蕾期 PS 在 0~20、20~40、40~60 cm 土层分别较 IP 和 PB 降低 30.37%、57.12%、37.19%和 21.78%、54.04%、13.08%。块茎形成期 PS 在 0~20、20~40、40~60 cm 土层分别较 IP 和 PB 降低 63.11%、67.81%、79.56%和 57.42%、50.19%、20.73%。块茎膨大期 PS 在 0~20、20~40、40~60 cm 土层分别较 IP 和 PB 降低 30.42%、20.83%、37.93%和 8.69%、22.54%、35.18%。成熟期 PS 在 0~20、20~40、40~60 cm 土层分别较 IP 和 PB 降低 21.75%、15.92%、36.36%和 8.06%、3.35%、32.21%。

2.5 间作对土壤全氮含量的影响

由图 6 可知,随土层的深入土壤全氮在各生育时期均表现为下降的趋势,且除苗期外均表现为 PS >PB>IP。现蕾期 PS 在 0~20、20~40、40~60 cm 土层分别较 IP 和 PB 高出 15.62%、37.67%、54.41%和 14.48%、23.08%、36.23%。块茎形成期 PS 在 0~20、

20~40、40~60 cm 土层分别较 IP 和 PB 高出8.00%、20.99%、19.44%和 6.05%、14.81%、17.02%。块茎膨大期 PS 在 0~20、20~40、40~60 cm 土层分别较 IP 和 PB 高出 16.24%、15.46%、32.29%和 13.68%、12.24%、23.81%。成熟期 PS 在 0~20、20~40、40~60 cm 土层分别较 IP 和 PB 高出 21.93%、59.2%、48.53%和 8.77%、28.08%、4.41%。苗期表现为 IP>PS>PB,IP 在 0~20、20~40、40~60 cm 土层分别较 PS 和 PB 高出 36.69%、44.73%、52.46%和 37.61%、60.38%、62.58%。

2.6 间作对产量、土地当量比和种间相对竞争力的影响

由表 2 可知,PB 和 PS 两间作处理土地当量比 (*LER*)均大于 1,其中 PS 的土地当量比最大为2.41。两间作处理马铃薯的资源竞争力均小于豆类 (*A_{ps}*<0),表现为 PS<PB。PS 和 PB 产量显著高于 IP,且表现为 PS>PB>IP,PS 和 PB 产量较 IP 分别增加了

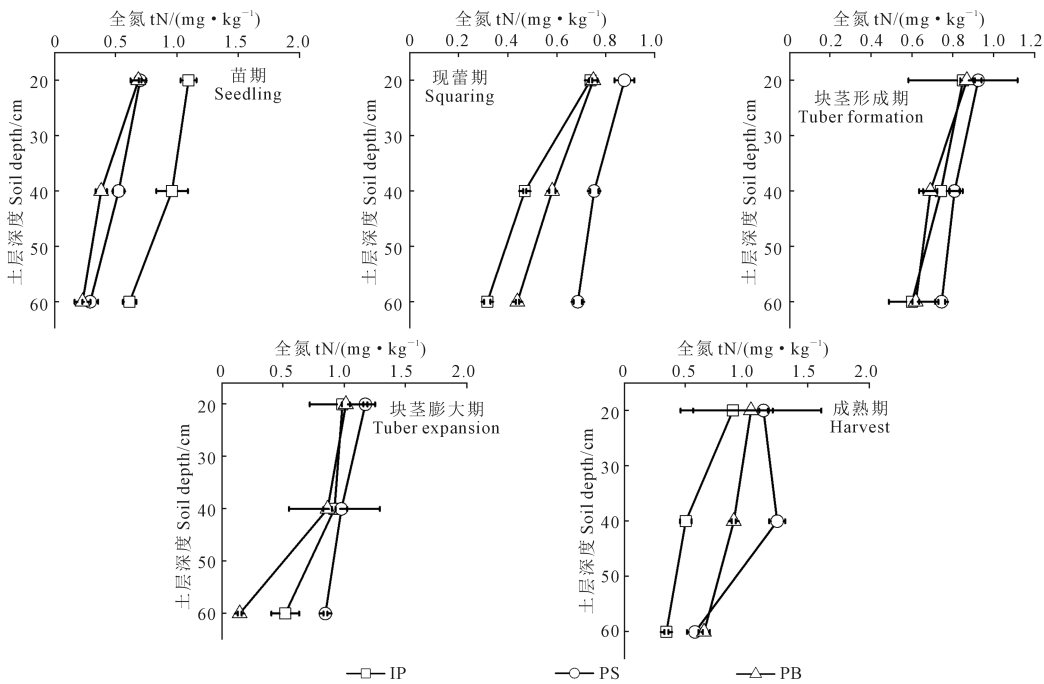


图 6 间作对马铃薯土壤全氮的影响

Fig.6 Effects of intercropping on soil total nitrogen content of potato

表 2 间作对马铃薯、大豆和蚕豆的产量、土地当量比的影响

Table 2 Effects of intercropping on yield and land equivalent ratio of potato, soybean and broad bean					
处理 Treatment	大豆产量 Soybean yield /(kg·hm ⁻²)	蚕豆产量 Broad bean yield /(kg·hm ⁻²)	马铃薯产量 Potato yield /(kg·hm ⁻²)	土地当量比 Land equivalent ratio	种间相对竞争力 Aggressivity
IP	6078.38±211.59	4022.70±256.68	29082.24±422.09c	2.41	-0.18
PS			33141.56±211.61a		
PB			30632.50±836.36b		
IS	4792.50±540.94	3333.00±247.35		1.00	-0.15
IB				1.00	

注: 同列不同字母表示差异性显著 ($P<0.05$), “±”后为标准误差。
Note: Different letters in the same column represent significant differences ($P<0.05$), ± is the standard error ($P<0.05$).

11.29%和 5.06%。由此可知间作可以提高土地当量比,在利用资源方面更优,其次合理的间作系统有利于降低种间相对竞争力,提高对资源的利用率及作物产量。

2.7 不同间作模式对马铃薯土壤各氮素指标隶属函数值的影响

由表 3 可得,不同间作模式中 0~60 cm 土层各

氮素指标隶属函数平均值呈先升后降的趋势。其中,马铃薯间作大豆在 20~40 cm 土层隶属函数平均值最大为 0.61,马铃薯单作在 0~20 cm 土层隶属函数平均值最小为 0.38。PS 和 PB 土壤各氮素指标隶属函数平均值均高于 IP,隶属函数平均值大小依次为 PS>PB>IP。说明各指标氮素在间作模式下吸收更多,处理 PS 对氮素吸收利用最佳。

表 3 间作对马铃薯土壤各氮素指标隶属函数值的影响

Table 3 Effects of intercropping on membership function values of nitrogen indexes in potato soil										
指标 Index	时期 Period	0~20 cm			20~40 cm			40~60 cm		
		IP	PS	PB	IP	PS	PB	IP	PS	PB
碱解氮 ahN	苗期 Seedling	1.00	0.00	0.83	0.00	0.39	1.00	1.00	0.00	0.19
	现蕾期 Squaring	0.00	0.08	1.00	1.00	0.00	0.59	0.83	1.00	0.00
	块茎形成期 Tuber formation	1.00	0.00	0.94	0.88	0.00	1.00	0.31	0.00	1.00
	块茎膨大期 Tuber expansion	0.77	0.00	1.00	0.99	0.00	1.00	0.63	0.00	1.00
	成熟期 Harvest	1.00	0.05	0.00	0.00	0.85	1.00	0.00	1.00	0.09
铵态氮 aN	苗期 Seedling	0.00	1.00	0.38	0.79	1.00	0.00	0.00	1.00	0.61
	现蕾期 Squaring	0.00	1.00	0.40	0.11	1.00	0.00	0.00	1.00	0.37
	块茎形成期 Tuber formation	0.00	1.00	0.90	0.45	1.00	0.00	0.00	1.00	0.65
	块茎膨大期 Tuber expansion	1.00	0.32	0.00	0.00	0.70	1.00	0.11	1.00	0.00
	成熟期 Harvest	0.00	1.00	0.66	0.33	1.00	0.00	0.00	1.00	0.52
硝态氮 nN	苗期 Seedling	0.00	1.00	0.75	1.00	0.80	0.00	0.00	1.00	0.79
	现蕾期 Squaring	0.00	1.00	0.64	0.88	1.00	0.00	0.00	1.00	0.25
	块茎形成期 Tuber formation	0.00	1.00	0.79	0.48	1.00	0.00	0.00	1.00	0.07
	块茎膨大期 Tuber expansion	0.00	1.00	0.22	0.07	1.00	0.00	0.00	0.11	1.00
	成熟期 Harvest	1.00	0.57	0.00	1.00	0.51	1.00	1.00	0.00	0.82
全氮 tN	苗期 Seedling	0.00	1.00	0.15	0.00	1.00	0.25	0.17	1.00	0.00
	现蕾期 Squaring	1.00	0.00	0.08	0.39	0.00	1.00	1.00	0.00	0.33
	块茎形成期 Tuber formation	0.00	0.00	0.25	0.00	0.44	1.00	1.00	0.00	0.13
	块茎膨大期 Tuber expansion	0.00	0.00	0.15	0.00	0.50	1.00	1.00	0.00	0.00
	成熟期 Harvest	1.00	0.00	0.59	0.52	0.00	1.00	0.76	0.00	1.00
均值 Average		0.38	0.50	0.49	0.44	0.61	0.54	0.39	0.56	0.44

3 讨 论

大量研究表明^[16-19],不同作物在与豆科作物间作系统中大多存在氮营养间作优势,有利于作物对养分的吸收和利用。焦念元等^[20]研究结果表明,玉米花生间作提高了玉米和花生茎、叶、籽粒氮含量,本研究表明间作马铃薯与单作马铃薯相比马铃薯植株根、茎、块茎的氮素含量有了不同程度的提高,这与前人研究结果类似。其原因可能是马铃薯间作大豆和蚕豆改变了系统内作物根系布局,有利用马铃薯根系吸收不同土层的氮素营养。同时豆科植物具有固氮功能,能将固定的氮素贡献给与它相邻的马铃薯。肖靖秀^[21]和贾曼曼^[22]等研究表明间作可以通过促进氮素从营养器官向生殖器官的转运来提高作物的产量。本研究结果表明间作马铃薯叶部氮素分配比例较单作马铃薯有所降低,而块茎部位氮素分配比例有所提高,说明间作可以促进叶部氮素向块茎的转移,这与前人研究结果一致。

土壤中的碱解氮、铵态氮和硝态氮作为速效氮,其含量在马铃薯生长发育各时期变化不同,其含量的多少可以为马铃薯种植过程中肥料的施用及种植方式的选择提供参考。碱解氮能反映土壤的氮素供应能力,合理间作不仅可以增强土壤氮素的互补利用,也可减轻作物间的竞争,提高氮素利用效率^[23]。杨亚亚^[24]等研究表明在同一生育时期,马铃薯田不同土层间作处理的土壤碱解氮较单作处理均有不同程度的提高。本研究表明在马铃薯块茎形成期和块茎膨大期这两个高消耗养分时期,马铃薯间作大豆和蚕豆土壤碱解氮含量在不同土层均高于单作马铃薯,现蕾期马铃薯间作蚕豆和成熟期马铃薯间作大豆在 0~20 cm 土层土壤碱解氮含量均高于单作马铃薯,这与前人研究结果基本一致。在成熟期 20~60 cm 土层土壤碱解氮表现为 PB<IP<PS,推测原因蚕豆生育期较短,在马铃薯成熟期蚕豆植株根系固氮机制基本已丧失,失去了间作优势。铵态氮易溶于水,能够被植物快速吸收,

是植物吸收的主要氮形态^[25]。研究表明间作土壤中铵态氮含量在整个生育期是呈明显下降趋势的^[26]。黄坚雄等^[27]研究发现,间作处理下的各土层铵态氮含量基本低于玉米单作处理,因为马铃薯间作相吸收土壤有效氮铵态氮使其维持在相对较低的水平。本试验中不同间作模式下,从苗期到成熟期土壤铵态氮含量逐渐降低,且马铃薯不同土层土壤铵态氮含量基本低于单作马铃薯,这与前人研究结果类似。硝态氮是土壤中的有效氮,同时也是植物能够直接吸收利用的速效氮,其易随水流失^[28]。赵薇等^[29]研究发现,同一氮水平下,马铃薯间作玉米土壤硝态氮供应低于马铃薯单作。吕玉等^[30]研究表明,由于间作引起硝化微生物的变化,从而显著降低了土壤的硝化势。本试验结果表明间作马铃薯在各生育时期土壤硝态氮含量均小于单作,这说明间作系统形成了作物对资源竞争的微环境,使得作物能更好地吸收氮素而不会被硝化。土壤全氮是土壤中各种形态氮素含量的总和,能够反映土壤给植株供氮的综合水平^[31]。相关研究表明间作能提高土壤全氮含量^[32]。樊志龙^[33]的研究结果也表明,玉米和豆科间作与玉米单作相比增加了土壤中全氮的含量。本研究表明随土层的深入,土壤全氮含量逐渐下降。不同生育时期间作马铃薯土壤全氮含量在各土层基本高于单作马铃薯,这与杨亚亚等^[24]研究结果基本一致。表明间作可以提高土壤全氮含量,其作用机理可能是大豆和蚕豆所固定的氮素恰好被马铃薯吸收,而土壤中的氮被保留下来,这与但春风等^[34]的推测一致。还有可能是前期大豆和蚕豆从大气中固定的一部分氮素保留到了土壤中没有被马铃薯直接吸收,使土壤中的氮素含量增加,具体作用机理还有待进一步研究。

相关研究表明,间作可以促进氮素从营养器官向生殖器官转运从而提高作物产量^[35-36],金建新等^[37]研究表明马铃薯和玉米间作种植改变了作物生长的农田小气候环境,间接影响了作物生长过程和同化物的积累,从而获得产量优势。陈光荣^[38]研究结果表明马铃薯间作大豆单位面积产量高于单作。本试验研究结果表明马铃薯间作较单作产量有所增加,同时间作大豆和蚕豆产量较单作也有大幅增加,研究结果与前人一致。土地当量比是评判两种作物是否适合间作的重要参数,当土地当量比大于 1 时说明对土地资源利用率高,两种作物适合间作,反之利用率低不适合间作。侯慧芝等^[39]研究结果表明马铃薯与蚕豆间作提高了土地当量比,本试验研究结果显示马铃薯间作大豆和蚕豆土地当

量比分别为 2.41 和 2.46,说明马铃薯与大豆和蚕豆适合间作,且间作效益良好,这与前人研究结果类似。种间相对竞争力表示两种作物对资源的竞争能力大小。本试验中马铃薯间作大豆和蚕豆的种间竞争力都小于 0,说明马铃薯和豆类间作降低了对资源的竞争力。

采用隶属函数法分析多指标测定对材料的影响进行综合评价,结果应用于对处理材料的选择,更具科学性和可靠性^[40]。唐明明等^[41]研究结果表明,马铃薯间作具有氮素营养吸收优势。本试验研究结果表明间作马铃薯对土壤氮素吸收效率高于单作马铃薯,这与前人研究结果一致。间作氮素营养吸收优势的主要原因是不同株型的作物占据不同的生态位,就根系而言马铃薯和大豆以及蚕豆的根系占据不同的生态位,间作模式充分利用了空间生态位的差异,从而提高了整个系统的养分吸收率。

4 结 论

合理的马铃薯和豆类间作模式可有效提高氮素吸收和马铃薯产量。各处理中,马铃薯间作大豆土地当量比最大,种间竞争最小,作物产量相对较高。因此在生产中宜推广的种植模式为马铃薯间作大豆(PS 处理)。

参 考 文 献:

[1] BEDOUSSAC L, JOURNET E P, HAUGGAARD-NIELSEN H, et al. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercroops in organic farming. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(3): 911-935.

[2] BROOKER R W, BENNETT A E, CONG W F, et al. Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology[J]. *The New Phytologist*, 2015, 206(1): 107-117.

[3] 曹云,马艳.间套作防治作物土传枯萎病的研究进展[J].*土壤*, 2015,47(3):466-473.

CAO Y, MA Y. Advances in *Fusarium* wilt disease suppression by intercropping[J]. *Soils*, 2015, 47(3): 466-473.

[4] 徐宁,张洪亮,张荣华,等.中国马铃薯种植业现状与展望[J].*中国马铃薯*, 2021,35(1):81-96.

XU N, ZHANG H L, ZHANG R H, et al. Current situation and prospect of potato planting in China[J]. *Chinese Potato Journal*, 2021, 35(1): 81-96.

[5] 王娜,陆姗姗,马琨,等.宁夏南部山区马铃薯不同间作模式对根际土壤细菌多样性的影响[J].*干旱区资源与环境*, 2016,30(12): 193-198.

WANG N, LU S S, MA K, et al. The genetic diversity of rhizosphere soil bacteria under different intercropping patterns for potato in southern mountainous area of Ningxia[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(12): 193-198.

- [6] MARTIN-GUAY M O, PAQUETTE A, DUPRAS J, et al. The new green revolution: sustainable intensification of agriculture by intercropping[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 767-772.
- [7] DAI J, QIU W, WANG N Q, et al. From leguminosae/gramineae intercropping systems to see benefits of intercropping on iron nutrition[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 605.
- [8] 肖焱波,段宗颜,金航,等.小麦/蚕豆间作体系中的氮节约效应及产量优势[J].*植物营养与肥料学报*,2007,13(2):267-271.
- XIAO Y B, DUAN Z Y, JIN H, et al. Spared N response and yields advantage of intercropped wheat and fababean[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2007,13(2): 267-271.
- [9] ASHWORTH A J, TAYLOR A M, REED D L, et al. Environmental impact assessment of regional switchgrass feedstock production comparing nitrogen input scenarios and legume-intercropping systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87: 227-234.
- [10] 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. Effect of N supply and wheat/faba bean intercropping on N uptake and accumulation of wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4): 742-747.
- [11] KLÆR L P, SKOVGAARD I M, ØSTERGÅRD H. Grain yield increase in cereal variety mixtures: a meta-analysis of field trials[J]. *Field Crops Research*, 2009, 114(3): 361-373.
- [12] HAUGGAARD-NIELSEN H, JØRNSGAARD B, KINANE J, et al. Grain legume-cereal intercropping: the practical application of diversity, competition and facilitation in arable and organic cropping systems[J]. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2008, 23(1): 3-12.
- [13] 李越,曹瑾,汪春明,等.蚕豆间作栽培对连作马铃薯根际土壤微生物的影响[J].*农业科学研究*,2017,38(2):8-13.
- LI Y, CAO J, WANG C M, et al. Effects of potato/faba bean intercropping on the potato rhizosphere soil microbial community[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 38(2): 8-13.
- [14] 汪春明,马琨,代晓华,等.间作栽培对连作马铃薯根际土壤微生物区系的影响[J].*生态与农村环境学报*,2013,29(6):711-716.
- WANG C M, MA K, DAI X H, et al. Effect of intercropping on soil microflora in rhizosphere soil of potato under continuous cropping[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(6): 711-716.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].第3版.北京:中国农业出版社,2000: 87-110.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000:87-110.
- [16] FUJITA K, OFOSU-BUDU K G, OGATA S. Biological nitrogen fixation in mixed legume-cereal cropping systems[J]. *Plant and Soil*, 1992, 141(1/2): 155-175.
- [17] 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,(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]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2000,(2): 140-146.
- [18] 焦念元.玉米花生间作复合群体中氮磷吸收利用特征与种间效应研究[D].泰安:山东农业大学,2006.
- JIAO N Y. Studies on the characters of N & P utilization and inter-specific interaction in the maize || peanut intercropping[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2006.
- [19] 王小春,杨文钰,任万军,等.小麦/玉米/大豆和小麦/玉米/甘薯套作体系中玉米产量及养分吸收的差异[J].*植物营养与肥料学报*, 2012,18(4):803-812.
- WANG X C, YANG W Y, REN W J, et al. Study on yield and differences of nutrient absorptions of maize in wheat/maize/soybean and wheat/maize/sweet potato relay intercropping systems[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(4): 803-812.
- [20] 焦念元,汪江涛,尹飞,等.施用乙烯利和磷肥对玉米||花生间作氮吸收分配及间作优势的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2016,22(6):1477-1484.
- JIAO N Y, WANG J T, YIN F, et al. Effects of ethephon and phosphate fertilizer on N absorption and intercropped advantages of maize and peanut intercropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(6): 1477-1484.
- [21] 肖靖秀,汤利,郑毅.氮肥用量对油菜||蚕豆间作系统作物产量及养分吸收的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2011,17(6):1468-1473.
- XIAO J X, TANG L, ZHENG Y. Effects of N fertilization on yield and nutrient absorption in rape and faba bean intercropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(6): 1468-1473.
- [22] 贾曼曼,肖靖秀,汤利,等.不同施氮量对小麦蚕豆间作作物产量及其光合特征的影响[J].*云南农业大学学报(自然科学)*,2017,32(2):350-357.
- JIA M M, XIAO J X, TANG L, et al. Effects of nitrogen supply on yields and photosynthesis characteristics of crops in wheat and broad bean intercropping[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2017, 32(2): 350-357.
- [23] 杨萍.胡麻/大豆间作体系氮素吸收利用特性及种间关系的研究[D].兰州:甘肃农业大学,2016.
- YANG P. Analysis of nitrogen uptake and utilization and the interspecific relationship in oil flax/soybean intercropping system[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016.
- [24] 杨亚亚,吴娜,刘吉利,等.马铃薯-燕麦间作对马铃薯氮含量和土壤氮素的影响[J].*浙江农业学报*,2019,31(12):1955-1962.
- YANG Y Y, WU N, LIU J L, et al. Effects of potato-oats on nitrogen content and soil nitrogen in potato[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, 31(12): 1955-1962.
- [25] 王梦柳,樊卫国,官纪元,等.营养液 pH 变化对刺梨苗吸收硝态氮和铵态氮的影响[J].*中国农学通报*,2021,37(9):28-34.
- WANG M L, FAN W G, GUAN J Y, et al. Effect of nutrient solution PH on nitrate-N and ammonium-N uptake of *Rosa roxburghii* seedlings[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(9): 28-34.
- [26] 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*,2020,28(12):1890-1900.
- REN J B, ZHANG M Y, XIAO J X, et al. Wheat and faba bean intercropping to improve yield and response to nitrogen[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(12): 1890-1900.
- [27] 黄坚雄,陈源泉,隋鹏,等.玉米与豆科植物间作对土壤铵态氮及氨挥发的影响[C]//中国农学会耕作制度分会.中国农作制度研究

进展, 济南: 山东科学技术出版社, 2010: 375-378.

HUANG J X, CHEN Y Q, SUI P, et al. Effects of maize and legume intercropping on ammonium nitrogen and ammonia volatilization in soil[C]//Tillage System Branch of Chinese Society of Agronomy. Progress in Agricultural System research in China, Jinan: Shandong Science & Technology Press, 2010: 375-378.

[28] 王晓巍. 混作对大豆、玉米生长发育及土壤无机氮的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.

WANG X W. Effect of mixed cropping on soybeans, corn growth and development and soil inorganic nitrogen[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012.

[29] 赵薇, 伊文博, 王顶, 等. 间作对马铃薯种植土壤硝化作用和硝态氮供应的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4171-4179.

ZHAO W, YI W B, WANG D, et al. Effects of intercropping on soil nitrification and nitrogen supply in potato field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(12): 4171-4179.

[30] 吕玉, 周龙, 龙光强, 等. 不同氮水平间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(8): 3229-3236.

LV Y, ZHOU L, LONG G Q, et al. Effect of different nitrogen rates on the nitrification potential and abundance of ammonia-oxidizer in intercropping maize soils[J]. Environmental Science, 2016, 37(8): 3229-3236.

[31] 张水清, 林杉, 郭斗斗, 等. 长期施肥下潮土全氮、碱解氮含量与氮素投入水平关系[J]. 中国土壤与肥料, 2017, (6): 23-29.

ZHANG S Q, LIN S, GUO D D, et al. Relationship between total nitrogen, alkali hydrolyzed nitrogen content and nitrogen input levels in fluvo-aquic soil under long term fertilization[J]. Soil and Fertilizer Science in China, 2017, (6): 23-29.

[32] 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.

WANG Y. Research of intercropping benefit and nitrogen absorption mechanism of alfalfa || oat intercropping systems[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2019.

[33] 樊志龙. 密植提高玉米间作豌豆氮肥利用率的碳氮协同机理[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2015.

FAN Z L. Mechanism of C、N coupling for improving n-fertilizer use rate in high density planted maize/pea intercropping system[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2015.

[34] 但春风, 王家豪, 黄娟娟, 等. 玉米/紫花苜蓿间作对土壤化学性质的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2020, (14): 97-102, 107.

DAN C F, WANG J H, HUANG L J, et al. Effects of corn/alfalfa intercropping on soil chemical properties[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2020, (14): 97-102, 107.

[35] 厉浩, 余慧, 李倩, 等. 不同间作模式对马铃薯光合特性的影响[J]. 农业科学研究, 2019, 40(2): 6-12.

LI H, YU H, LI Q, et al. Effects of different intercropping patterns on photosynthetic characteristics of potato[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2019, 40(2): 6-12.

[36] 杨萌珂. 玉米花生间作功能叶的光合荧光特性及叶绿体超微结构[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2014.

YANG M K. Photosynthetic characteristics, fluorescence characteristics and chloroplast ultrastructure of function leaves under maize-peanut intercropping[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2014.

[37] 金建新, 何进勤, 冯付军, 等. 马铃薯/玉米间作对作物生理生态特性的影响[J]. 贵州农业科学, 2019, 47(5): 14-19.

JIN J X, HE J Q, FENG F J, et al. Effects of potato/maize intercropping patterns on physiological and ecological characteristics of crops[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2019, 47(5): 14-19.

[38] 陈光荣. 西北灌区早熟马铃薯套作大豆的竞争补偿效应研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2018.

CHEN G R. Competition and compensation of potato-soybean relay-cropping in northwest irrigation districts[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2018.

[39] 侯慧芝, 张绪成, 汤瑛芳, 等. 半干旱区全膜覆盖垄沟种植马铃薯/蚕豆间作的产量和水分效应[J]. 草业学报, 2016, 25(6): 71-80.

HOU H Z, ZHANG X C, TANG Y F, et al. Effects of potato-fababean intercropping on crop productivity and soil water under a plastic mulch and ridge-furrow planting system in a semiarid area[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(6): 71-80.

[40] 席万鹏, 王有科, 孙飞达. 利用隶属函数值法综合评价花椒的抗旱性[J]. 甘肃林业科技, 2004, (1): 5-6.

XI W P, WANG Y K, SUN F D. Comprehensive evaluation on *Zanthoxylum bungeanum* drought-resistance traits by subordinate function values analysis[J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2004, (1): 5-6.

[41] 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.