

施氮量对间作马铃薯植株氮素累积及产量的影响

蔡 明¹,刘吉利²,杨亚亚¹,贺锦红¹,常雯雯²,何海锋¹,吴 娜¹

(1.宁夏大学农学院,宁夏 银川 750021; 2.宁夏大学资源环境学院,宁夏 银川 750021)

摘 要:针对宁夏南部山区马铃薯大面积连作,导致马铃薯氮素利用率低下以及晚疫病发病率高和用、养地矛盾突出等问题,于 2018 年 5—10 月在宁夏海原县开展田间试验,采用裂区试验设计,主处理为 0、75、150、225 kg·hm⁻² 4 个施氮水平(分别为 N0、N1、N2、N3 处理);副处理为 2 种植模式(马铃薯单作和马铃薯||燕麦),研究施氮量对间作马铃薯氮素累积及产量的影响。研究结果表明:单作马铃薯最大氮素累积速率出现在块茎形成期前后,间作马铃薯最大氮素累积速率出现在块茎膨大期前后,N2 处理的氮素累积效果相对优于其他处理。单作马铃薯施氮 150 kg·hm⁻² 处理的氮素收获指数(NHI)分别较 N0、N1、N2 处理提高 7.46%、8.54%、6.11%,间作马铃薯施氮 150 kg·hm⁻² 处理的 NHI 分别较 N0、N1、N2 处理高 2.08%、8.87%、2.40%,间作模式下氮肥农学利用率(AE)、氮肥生理利用率(PE)、氮肥利用率(NUE)均高于单作,并且施氮 150 kg·hm⁻² 处理的 AE、PE、NUE 分别较 N1 和 N3 处理高 33.98%、49.08%、41.83%、85.53%、55.15%、94.83%,各施氮处理间 PE、NUE 差异显著(P<0.05),种植模式间氮肥农学利用率差异极显著(P<0.01)。随施氮量的增加,单作模式下,各施氮处理马铃薯产量分别比不施氮对照增加 1.73%、10.29%、3.97%;间作模式下,各施氮处理马铃薯产量分别比不施氮对照增加 8.68%、31.23%、15.33%;在施氮水平与间作种植模式交互作用下,马铃薯产量差异显著(P<0.05),间作马铃薯的施肥增产效果明显优于单作。

关键词:施氮量;间作;马铃薯;燕麦;氮素利用;产量

中图分类号:S532;S365 **文献标志码:**A

Effects of nitrogen application rate on nitrogen accumulation and yield of intercropping potato plants

CAI Ming¹, LIU Jili², YANG Yaya¹, HE Jinhong¹, Chang Wenwen², He Haifeng¹, WU Na¹

(1. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;
2. College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: Aiming at the large scale continuous cropping of potato in the mountain area of southern Ningxia, the problem was obvious for low nitrogen utilization rate of potato, high incidence of late blight, and prominent contradiction of land use. A split experiment was used and the main treatment included four nitrogen application levels at 0, 75, 150, and 225 kg·hm⁻², and the secondary treatment was potato single and potato oat intercropping. The effects of nitrogen application rate on nitrogen accumulation and yield of potato were studied. The results showed that the maximum nitrogen accumulation rate of potato was observed near the tuber formation stage while the maximum nitrogen accumulation rate of intercropping potato appeared near the tuber expansion stage. The nitrogen accumulation effect of 150 kg·hm⁻² nitrogen application was better than that of other treatments. Under 150 kg·hm⁻² of potato single cropping treatment, NHI was higher than other treatments by 7.46%, 8.54%, and 6.11%, respectively. Under 150 kg·hm⁻² of inter cropping treatment, NHI was higher than other treatments by 2.08%, 8.87%, 2.40%, respectively. Compared with 75 kg·hm⁻² and 225 kg·hm⁻² nitrogen application, AE, PE and NUE of 150 kg·hm⁻² were higher than other treatments by 33.98%, 49.08%, and 41.83%, 85.53%, and 55.15%, 94.83%, respectively, under intercropping condition. The difference was significant between nitrogen treatments in PE and

NUE ($P<0.05$) and the *AE* was extremely significant difference under the intercropping mode ($P<0.01$). Compared with the control, the yield of nitrogen-treated potato increased by 1.73%, 10.29%, and 3.97%, respectively, under single cropping mode with the increase of nitrogen application rate, while, under the intercropping mode, the yield of nitrogen-treated potato increased by 8.68%, 31.23%, and 15.33%, respectively. Under the interaction of nitrogen application rate and intercropping planting pattern, yield of potato was significantly different ($P<0.05$). The effect of fertilization and yield increase of intercropped potato was greater than that of single cropping obviously.

Keywords: nitrogen application rate; intercropping; potato; oats; nitrogen utilization; yield

氮素是植物生长所必需的大量元素之一,被称为“生命的元素”^[1],在马铃薯的器官建成、物质代谢和块茎品质的形成中起着举足轻重的作用^[2],过量施氮会导致茎叶徒长,块茎干物质含量下降,延迟块茎成熟^[3]。植株吸收的氮素主要来自土壤和肥料,旱地土壤中最为缺乏的便是氮素,土壤中氮素含量直接影响到作物的生长发育和产量^[4-5]。作物对氮素的吸收、利用与转移与施氮量密切相关^[6]。马铃薯间作小麦研究表明^[7],合理的施氮量可实现作物的稳产,提高氮素利用率,也可有效降低氮肥污染环境的风险。大麦间作蚕豆试验表明^[8],随着施氮量的增加,单作和间作氮素吸收量和吸收速率均呈增加趋势,随生育期的推移,氮素吸收速率降低。一直以来,氮肥管理都是养分管理研究的重点^[9]。

马铃薯(*Solanum tuberosum*)作为宁夏南部山区的传统优势栽培作物和抗灾作物,在地区气候适应、光热等资源利用方面优势明显,在助力宁南山区脱贫致富和创收增收方面成效显著^[10-11]。近年来,马铃薯在宁南山区大面积连作,导致晚疫病发病率高和用、养地矛盾突出^[12]。间套作种植被看作传统农业的精髓^[13],研究表明^[14],马铃薯间作可有效缓解用地矛盾,发挥出马铃薯最大的产量优势。尽管前人在间作和施氮方面做了大量的研究,但关于马铃薯燕麦间作施氮对植株氮素累积及产量影响的研究较少。本文通过在宁夏南部山区开展施氮量对间作马铃薯植株氮素累积及产量方面的研究,充分挖掘马铃薯与其他作物的间作优势潜力,缓解马铃薯连作危害,揭示施氮对间作马铃薯氮素吸收累积影响规律,为当地马铃薯科学、高效施肥及进一步研究氮素的运移提供一定的理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2018 年 5—10 月在宁夏海原县树台乡大嘴村(105°09′~106°10′E,36°06′~37°04′N)进

行。研究区地处宁夏中部干旱带,试验地海拔 2 133 m,年总降水量 408 mm,无霜期为 149~171 d,年均气温 8℃,试验期间的气象资料如图 1 所示。试验地土壤类型为侵蚀黑垆土,土壤基本性质见表 1。

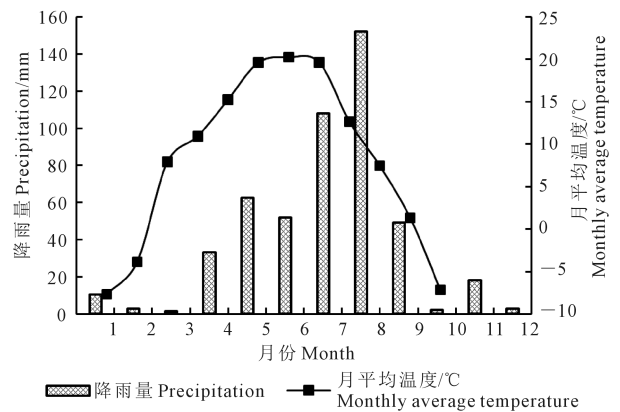


图 1 作物生育期内的月降雨量和平均气温
Fig.1 Monthly precipitation and average monthly temperatures during the growing season

表 1 试验地基础土壤理化性质						
Table 1 Physical and chemical properties of the study site						
土层 Soil layer /cm	有机质 SOM /(g·kg ⁻¹)	全氮 TN /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 AN /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 AP /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK /(mg·kg ⁻¹)	pH
0~20	8.59	0.76	68.05	8.16	353.59	8.10
20~40	7.99	0.75	61.77	4.39	299.12	8.34

1.2 试验方法

1.2.1 试验材料 马铃薯品种为青薯 9 号,燕麦品种为燕科 1 号。

1.2.2 试验设计 采用裂区试验设计,主处理为施氮量,设置 0、75、150、225 kg·hm⁻² 4 个施氮水平,分别标记为 N0、N1、N2、N3;副处理为种植方式,分别为马铃薯单作(IP)和马铃薯||燕麦(JP),各处理均设置 3 次重复,小区长 6 m,宽 6 m,面积为 36 m²。单作马铃薯每小区种植 12 行,垄宽 60 cm,垄距 40 cm,株距 40 cm,种植深度 20~25 cm,种植密度 50 025 株·hm⁻²,呈“S”形单垄双行半覆膜种植。马铃薯||燕麦小区的马铃薯、燕麦行数比为 4:2,马铃薯燕麦间距为 25 cm,其他栽培条件同单作保持一致,重复 3 次。

马铃薯于 5 月 12 日播种,起垄覆膜种植,同期播种燕麦,燕麦条播。结合整地各处理施底肥 70% 氮肥(尿素)、磷肥(过磷酸钙 90 kg·hm⁻²)、钾肥(硫酸钾 45 kg·hm⁻²),其余 30% 氮肥于马铃薯现蕾期追施。马铃薯于 10 月初收获,燕麦于 9 月底收获。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 产量的测定 收获时每小区选取 2 个垄测定实际产量(kg),换算为小区产量以及亩产、公顷产量。分别记录每穴薯重、每穴薯个数、大薯数、中薯数和小薯数(大、中、小薯标准为:大薯>150 g,150 g>中薯≥75 g,小薯<75 g),计算大、中、小薯率。

1.3.2 植株氮素累积及利用效率的测定 在马铃薯的苗期、现蕾期、块茎形成期、块茎膨大期、成熟期采集马铃薯植株样品,各部位器官分开烘干后称重,粉碎后过 60 目筛,采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法^[15]测定植株全氮含量,即植株含氮量。

氮素积累量、氮素利用效率相关计算公式如下:
植株氮素积累量(kg·hm⁻²)=植株全氮含量(%)×植株干物质重(kg·hm⁻²)

氮素积累速率(kg·hm⁻²·d⁻¹)=(后一生育时期单位面积氮素积累量-前一生育时期单位面积氮素积累量)/时间

氮肥农学利用率(AE,kg·kg⁻¹)=(施氮处理块茎产量-不施氮处理块茎产量)/施氮量

氮肥生理利用率(PE,kg·kg⁻¹)=(施氮区块茎产量-不施氮区块茎产量)/(施氮区地上部植株总吸氮量-不施氮区地上部植株总吸氮量)

氮肥利用率(NUE,%)=(施氮区地上部植株总吸氮量-不施氮区地上部植株总吸氮量)/施氮量×100

氮素收获指数(NHI)=块茎氮素积累量/植株总吸氮量

以上各公式中氮素积累量、产量、施氮量、吸氮量单位均为 kg·hm⁻²。

1.3.3 数据处理 采用 Excel 进行数据整理,用 SPSS 统计软件进行方差分析(LSD 法检验差异显著性),用 CurveExpert 进行氮素累积曲线模拟。

2 结果与分析

2.1 施氮量对间作马铃薯植株氮素累积的影响

2.1.1 施氮量对马铃薯植株氮素累积量 Logistic 曲线模拟 马铃薯的氮素累积过程符合快-慢-快的“S”型增长曲线规律,在不同施氮量下对马铃薯植株氮素累积进行 Logistic 方程模拟,得到图 2 所示模拟图。由图 2 可知,单作模式下,随着生育进程的推

进,马铃薯氮素累积先迅速升高而后缓慢上升至趋于稳定,由曲线斜率可以进一步看出,随着生育进程的推进,前期累积速率也随之增加;间作模式下,马铃薯植株氮素累积也表现出相同的变化趋势。

2.1.2 施氮量对马铃薯氮素累积速率的影响 图 3 可见,单作模式下,随着生育时期的推进,各施氮处理累积速率均表现为先迅速上升后缓慢下降,N3 处理下前期累积速率最快而后期下降也较快,N2 处理前期上升速率较快,后期下降速率较慢,最大氮素累积速率出现在块茎形成期前后;间作模式下,随着生育进程的推进,各处理氮素累积速率也表现为先迅速上升后缓慢下降,N1 与 N3 上升的幅度基本相同,下降比 N2 更慢,N1、N2 降幅均小于 N3 处理。马铃薯可以积累充分的氮素满足其生长,间作下增长速率明显低于单作,最大积累速率出现在块茎形成期(80 d)和块茎膨大期(100 d)之间。

2.1.3 施氮量对马铃薯氮素积累参数的影响 由表 2 可知,不同处理的氮素积累参数值不同。对方程参数进行分析发现,随着施氮量的增加,单作模式下,a(终极积累量),c(累积速率参数)均较对照降低,N1、N3 处理下 b(初始参数)低于对照;间作模式下,b(初始参数)、c(累积速率参数)表现为先降低后上升的趋势,a(终极积累量)表现为先上升后降低的趋势,各处理下方程的决定系数均在 0.990 以上,说明 logistic 方程可以较好地描述马铃薯氮素积累过程。单作模式下,随着施氮量的增加,T_{max}(达到最大氮素累积速率的天数)表现为先上升后下降的趋势,具体为 N2>N3>N1>N0;间作模式下,T_{max}的变化趋势与单作基本一致,均随着施氮量的增加先上升后下降,具体为 N2>N1>N0>N3。单作模式下,N_{max}(氮素累积速率最大时的含氮量)表现为先上升后降低的趋势,具体为 N2>N0>N3>N1;间作模式下,N_{max}表现与单作一致,随施氮量的增加先上升后下降,具体为 N2>N1>N0>N3。单作模式下,各施氮处理 G_{max}(氮素累积最大速率)均较 N0 处理降低,具体为 N0>N2>N1>N3;间作模式下,G_{max}表现与单作一致,随施氮量的增加先上升后下降,具体为 N2>N1>N3>N0。单作模式下,p(氮素活跃积累天数)表现为先下降后上升的趋势,具体表现为:N0>N3>N1>N2;间作模式下,p(氮素活跃积累天数)表现为逐渐下降的趋势,具体表现为:N0>N1>N2>N3。间作模式下 N_{max}、G_{max} 高于单作,可以充分发挥氮素的优势,表现出一定的间作优势。施氮量为 150 kg·hm⁻²处理的氮素积累效果相对优于其他处理。

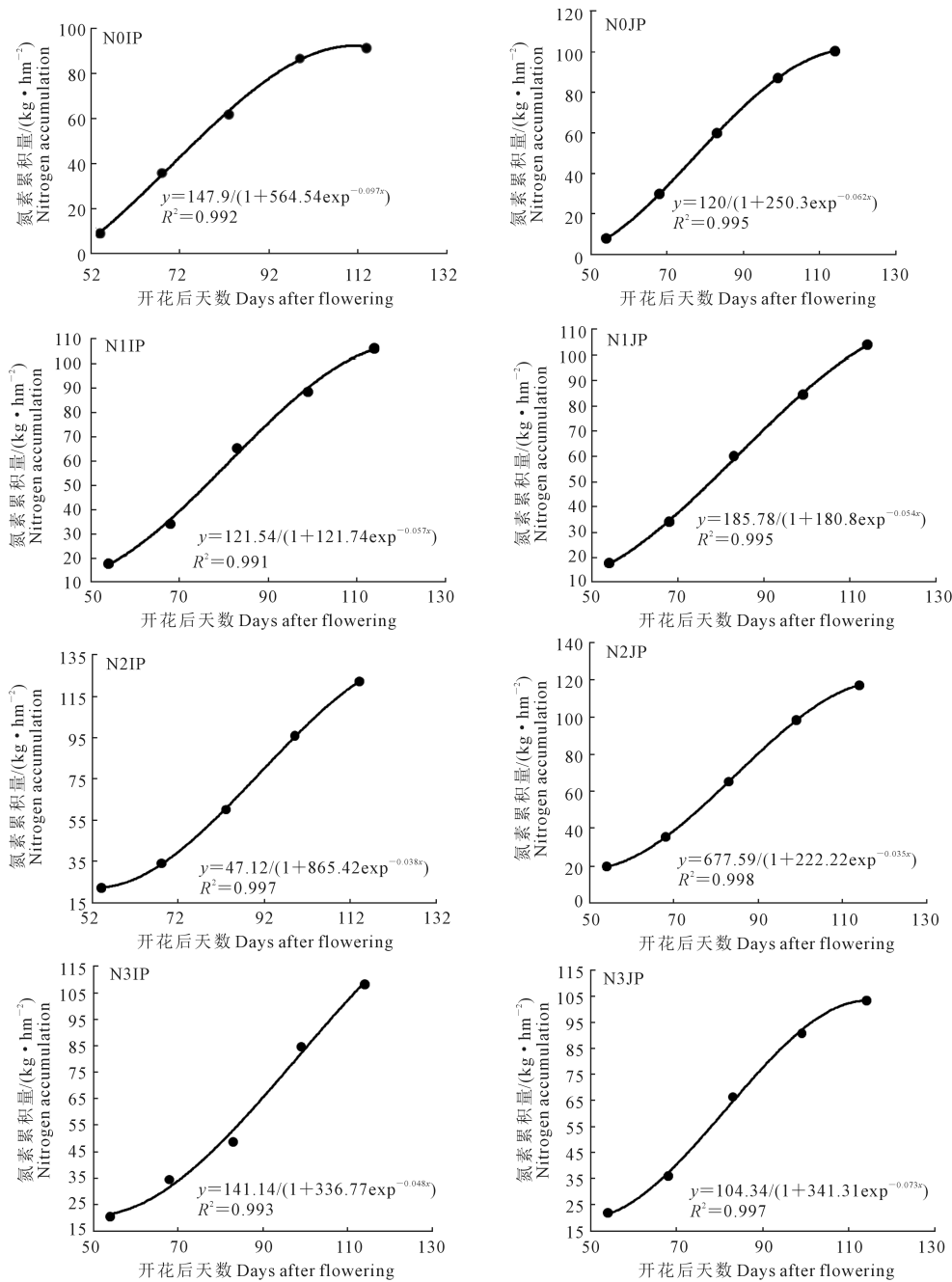


图 2 施氮量对马铃薯植株氮素累积 Logistic 曲线模拟

Fig.2 Logistic curve simulation of nitrogen accumulation of potato plants with nitrogen application rates

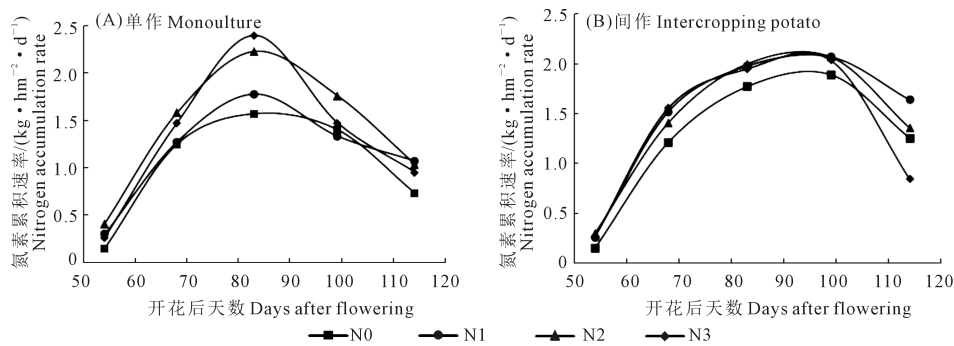


图 3 施氮量对马铃薯氮素累积速率的影响

Fig.3 Effect of nitrogen application rate on nitrogen accumulation rate of potato

表 2 施氮量对马铃薯氮素积累参数的影响

Table 2 Effects of nitrogen application rate on nitrogen accumulation parameters of potato

处理 Treatment	方程参数 Equation parameter			相关系数 <i>r</i> Correlation coefficient <i>r</i>	氮素积累参数 Nitrogen accumulation parameter			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>		$T_{\max}/\text{d}$	$N_{\max}/(\text{g} \cdot \text{plant}^{-1})$	$G_{\max}/(\text{g} \cdot \text{plant}^{-1})$	p/d
N0IP	147.90	564.54	0.094	0.992	67.40	73.95	3.48	157.89
N1IP	121.54	121.74	0.057	0.996	84.24	60.77	1.73	105.26
N2IP	47.12	865.42	0.038	0.997	177.98	123.56	2.35	63.83
N3IP	141.14	336.77	0.048	0.993	121.24	70.57	1.69	125.21
N0JP	120.00	250.30	0.062	0.995	89.08	60.00	1.86	171.43
N1JP	185.78	180.80	0.054	0.995	96.25	92.89	2.51	111.11
N2JP	677.59	222.22	0.035	0.998	154.39	338.80	5.93	96.77
N3 JP	104.34	341.31	0.073	0.997	79.90	52.17	1.90	82.19

注: *a*: 终极积累量; *b*: 初始参数; *c*: 积累速率参数; $T_{\max}$: 达到最大氮素积累速率的天数; $N_{\max}$: 氮素积累速率最大时的含氮量; $G_{\max}$: 氮素积累最大速率; *p*: 氮素活跃积累天数(大约完成总积累量的 90%)

Note: *a*: Ultimate accumulation; *b*: Initial parameter; *c*: Accumulation rate parameter; $T_{\max}$: Number of days to reach nitrogen accumulation rate; $N_{\max}$: Nitrogen content when nitrogen accumulation rate is maximum; $G_{\max}$: Maximum rate of nitrogen accumulation; *p*: Nitrogen actively accumulates the number of days (about 90% of the total accumulated amount)

2.2 施氮量和种植模式对间作马铃薯氮素利用率的影响

表 3 为不同施氮量处理对间作马铃薯氮素利用率的影响。氮素收获指数(*NHI*)表明作物收获时氮素向马铃薯块茎转移的效率。单作模式下,随着施氮量的递增,氮素收获指数均表现为先上升后下降的趋势,具体表现为 $N2>N1>N3>N0$, $N2$ 处理下 *NHI* 分别较其余各处理高 7.46%、8.54%、6.11%; 间作条件下施氮处理表现与单作基本一致, $N2$ 处理下氮素收获指数达到最大, 分别较其余各处理高 2.08%、8.87%、2.40%, 各处理之间差异不显著。同一种植模式下, 马铃薯的 *AE*、*PE*、*NUE* 均随着施氮量的增加表现为先上升后降低的趋势, 间作模式下 *AE*、*PE*、*NUE* 均高于单作模式, 各种植模式下 $N2$ 处理氮素利用率均达到最大。单作种植模式下, $N2$ 处理 *AE*、*PE*、*NUE* 分别较 $N1$ 和 $N3$ 处理高 36.08%、22.89、80.24%、94.35%、34.02%、58.93%; 间作种植模式下, $N2$ 处理 *AE*、*PE*、*NUE* 分别比 $N1$ 和 $N3$ 处理高 33.98%、49.08%、41.83%、85.53%、55.15%、94.83%, 种植模式对氮肥农学利用率的影响显著, 施氮量对氮肥生理利用率、氮肥利用率的影响显著。从整体氮素利用来看, 间作模式优于单作模式且施氮 $150\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理下各种植模式氮肥利用率最高, 施氮 $225\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理下最低, 说明在一定范围内, 合理的施氮量有助于提高各种植模式的氮肥利用率, 促进氮素向块茎的转运, 进而提高马铃薯产量, 若超过这一范围, 则不利于氮肥的吸收转运, 间作模式下施氮对氮素利用率的贡献高于单作。

表 3 施氮量和种植模式对间作马铃薯氮素利用率的影响

Table 3 Effects of nitrogen application rate and planting pattern on nitrogen utilization rate of intercropping potato

处理 Treatment	氮素收获 指数 <i>NHI</i> /%	氮肥农学 利用率 <i>AE</i> /($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮肥生理 利用率 <i>PE</i> /($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮肥利用率 <i>NUE</i> /%
N0IP	67.15±5.12a			
N1IP	72.16±10.53a	25.45±4.36a	24.05±5.41a	19.52±4.12a
N2IP	72.89±13.24a	20.94±2.76b	43.35±9.57a	26.16±2.10a
N3IP	71.25±7.32a	11.22±2.25b	21.79±4.68a	16.46±3.45b
N0JP	70.97±12.10a			
N1JP	72.45±13.47a	32.28±12.94a	37.53±7.45a	22.0±3.896a
N2JP	77.27±6.85a	59.37±15.67a	53.23±4.73a	37.33±3.10a
N3JP	71.97±11.65a	24.93±8.14a	28.69±3.89a	19.16±2.14a

注: 同一列不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$), 下同。
Note: Different letters in the same colum indicate significant differences ($P<0.05$), the same below.

2.3 施氮量与种植模式对马铃薯产量构成因素的影响

由表 4 可知, 随着施氮量的增加, 马铃薯间作和单作产量均呈先增加后减少的趋势, 单作模式下, 大薯率、商品薯率表现上升趋势; 间作模式表现先上升后降低的趋势, 而小薯率均较对照降低。不同施氮量处理下, 产量构成因素表现不同。与对照不施氮处理相比, 除 $N3$ 处理外, 其他施氮处理下马铃薯的每穴薯块数、每穴薯重、大薯数、中薯数均有所增加, 说明施氮可以通过增加马铃薯的每穴薯块数、大薯数、中薯数来增加马铃薯的产量, 主要是增加马铃薯的每穴薯块数。 $N1$ 、 $N2$ 间作处理下每穴薯块数与对照相比, 分别高 20.56%、12.27%, $N3$ 处理下每穴薯块数略低于对照, 说明过高的氮素不利于马铃薯薯块数的增加, 施氮量和种植模式下每穴

表 4 种植模式和施氮水平对马铃薯产量构成因素的影响

Table 4 Effects of planting patterns and nitrogen application levels on potato yield components										
处理 Treatment	每穴薯块数 Number of potato clips per hole	每穴薯重/kg Potato weight per hole	每穴大薯数 Big potato numbe per hole	每穴中薯数 Medium potato number per hole	每穴小薯数 Small potato number per hole	商品薯率/% Commercial potato rate	大薯率/% Big potato rate	中薯率/% Medium potato rate	小薯率/% Small potato rate	产量/(kg·hm ⁻²) Yield
NOIP	5.67±0.29a	0.90±0.08a	2.30±0.32a	1.53±0.17a	2.33±0.55a	66.18±5.55a	37.96±1.97a	28.94±4.61a	30.63±1.34a	30494.40±1292.67a
N1IP	5.70±0.32b	0.96±0.01a	2.93±0.39a	1.67±0.35a	1.23±0.12b	65.54±3.52a	43.11±3.79a	27.33±4.16a	27.61±4.33a	31022.40±1448.13a
N2IP	6.97±0.33a	0.95±0.11a	2.70±0.17a	2.03±0.17a	1.40±0.38a	71.53±1.58a	44.12±6.50a	29.17±2.26a	27.47±1.59a	33635.10±879.54a
N3IP	4.87±0.27a	0.73±0.07a	2.17±0.48a	1.33±0.12a	1.33±0.19a	71.68±5.03a	49.81±4.39a	27.83±3.87a	22.03±1.34a	31705.35±1192.32a
NOJP	6.03±0.50a	0.79±0.04a	2.67±0.24a	1.64±0.43a	1.73±0.23a	67.94±1.36a	37.89±1.67a	26.37±5.77a	33.77±5.67a	27887.55±326.76b
N1JP	7.27±0.66a	0.85±0.06a	2.94±0.29a	2.27±0.18a	2.50±0.46a	71.15±4.87a	39.53±0.27a	31.33±1.28a	33.63±1.34a	30308.10±2170.87a
N2JP	6.77±0.43a	0.87±0.04a	2.60±0.32a	1.83±0.23a	2.33±0.55a	78.43±1.34a	45.77±2.44a	26.90±1.72a	24.17±5.59a	36796.05±918.18a
N3JP	5.90±0.26a	0.90±0.04a	2.47±0.10a	1.90±0.25a	1.79±0.01a	71.32±5.18a	42.22±4.22a	32.32±4.59a	26.90±4.33a	32163.15±1432.16a
变异来源 Source										
相关性 Correlation										
施氮水平 Nitrogen application level	*	NS	NS	NS	NS	NS	**	NS	NS	**
种植模式 Cropping pattern	*	NS	NS	NS	*	*	NS	NS	NS	NS
施氮水平×种植模式 Nitrogen application level×Cropping pattern	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	*

注: NS 表示相关不显著, * 和 ** 分别表示显著相关($P<0.05$)和极显著相关($P<0.01$)。
Note: NS indicates no significant correlation, and * and ** refer to significant correlation ($P<0.05$) and extremely significant correlation ($P<0.01$), respectively.

薯块数均呈显著性差异。施氮量和种植模式下每穴薯重、大薯数、中薯数均未达到显著水平,间作模式下每穴薯重、大薯数、中薯数略高于单作。不同种植模式下商品薯率差异显著,施氮水平间大薯数差异显著。单作模式下,小薯数随施氮量的增加而降低,与对照相比,N1、N2、N3 处理分别降低了 89.43%、66.42%、75.18%,间作模式下小薯数随施氮量先上升后下降,N1、N2、N3 分别较对照提高 44.51%、34.68%、3.46%,种植模式及施氮量和种植模式间的交互作用下小薯数差异显著。单作模式下,各施氮处理马铃薯产量分别较对照增加 1.73%、10.29%、3.97%,间作模式下,各施氮处理产量分别较对照增加 8.68%、31.23%、15.33%,施氮水平及两者间的交互作用下产量差异显著,方差分析表明,施氮量对马铃薯产量的增加效应要高于种植模式,施氮对马铃薯的产量影响显著。

3 讨 论

在不同的生长发育阶段,氮素积累量在马铃薯植株各个器官的分布不同^[16-17]。本研究表明,不同施氮量下,随着马铃薯生育时期的推进,马铃薯氮素积累过程符合快-慢-快的“S”型增长曲线变化规律,这主要是由于马铃薯叶、茎氮素积累量随着生育进程的推进呈现先上升后降低的趋势,而块茎氮素积累量呈现上升趋势,植株整个氮素积累量综合表现为“慢-快-慢”的“S”型增长曲线变化规律,这与其他研究结果一致^[18-20]。进一步分析氮素积累速率变化,随着施氮量的增加,两种种植模式下积累速率均表现为先迅速上升后缓慢下降,单作模式下最大氮素累积速率出现在块茎形成期前后,间作模式下则出现在块茎膨大期前后,这可能是由于单作马铃薯前期氮素营养供应充足,营养生长旺盛,提前转为生殖生长,氮素累积速率开始缓慢降低;间作模式下马铃薯和燕麦前期由于对氮素营养的竞争,马铃薯由营养生长转为生殖生长的时间推迟,也可能由于随着生育时期的不同,间作系统中两者处于不同的生态位,对光及养分的吸收有所不同,造成氮素累积速率差异^[21-22]。本研究发现,无论是间作还是单作,施氮 150 kg · hm⁻²处理下,马铃薯氮素前期积累速率较快,后期下降缓慢,施氮 225 kg · hm⁻²处理下前期氮素累积速率较快,后期下降速率也较快,说明在一定范围内,施氮有利于提高马铃薯氮素累积速率,超过此范围,氮素累积速率

降低。对氮素累积模拟参数进行分析发现,施氮量与马铃薯氮素累积有极强的相关性,间作模式下各氮素累积模拟参数高于单作模式,两种种植模式下施氮 150 kg · hm⁻²处理氮素累积最大含氮量、氮素积累最大速率表现为最大,达到最大速率时的天数表现为最短,因此施氮 150 kg · hm⁻²处理下,单作和间作氮素累积速率最快。从氮素利用率来看,氮素收获指数随施氮量的增加先上升后降低,表明合理施氮有利于马铃薯植株氮素向块茎的转移效率,氮素农学利用率、氮肥吸收速率、生理利用率均随施氮量的增加先上升后下降,这主要是由于生长前期随着生育进程的推进,马铃薯地上部氮素累积量增加,向块茎转移量增加,施氮对块茎产量的贡献度增加,而后地上部氮素累积量降低,向块茎的转移减弱,氮肥对块茎产量的贡献减弱;间作模式下各氮素利用率总体高于单作,主要是由于间作中燕麦也为喜氮作物,生育前期马铃薯地上部种植处于高位,对氮素的吸收、利用、转化均处于优势,燕麦处于低位,各方面均处于劣势,两者之间的竞争加速了对氮素的吸收利用,后期则相反;氮肥偏生产力则表现为降低趋势且间作降低幅度小于单作,可能由于间作燕麦提前收获,使得间作马铃薯光环境和生长空间得到补充和发展,降低幅度减弱,也可能是由于整个生育后期降雨较多,造成氮素淋溶、损失较大,氮素对作物生产的贡献降低,这与施氮量对马铃薯氮素利用的相关研究结果有差异^[23-24]。综合来看,无论是单作还是间作,随着整个生育进程的推进,合理施氮对马铃薯氮素累积、氮肥利用率都有显著影响,有助于提高氮肥利用率,促进氮素向块茎的运转,进而提高马铃薯产量,间作模式下施氮优势明显。

研究表明^[25-26],合理施氮对间作马铃薯实现增产、降低施肥对环境污染的风险起着至关重要的作用。也有研究表明,施氮可以有效减缓间作所导致的作物减产,将间作劣势转为间作优势,来维持间作系统较理想的产量^[26-27]。间作也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^[28-29]。本研究表明,合理的施氮对间作马铃薯产量具有促进作用,主要是提高了马铃薯对氮素的吸收累积量及氮素利用率。相同的种植密度下,施氮和间作对马铃薯产量均有贡献,施氮对间作马铃薯产量的贡献要大于单作,施氮和种植模式间的交互作用达到极显著水平,这与 Bedoussac 等^[30]研究

一致。对产量构成因素进行分析,表明施氮可以通过增加间作马铃薯的每穴薯块数、大薯数、中薯数来增加马铃薯的产量;种植模式下,每穴薯块数、商品薯率差异显著,施氮处理下每穴薯块数、大薯率差异显著,可以看出,种植模式对产量构成因素的贡献大于施氮量。

4 结 论

马铃薯植株氮素积累过程符合快-慢-快的“S”型增长曲线。马铃薯氮素最大积累速率出现在块茎膨大期前后,施氮能够显著提高马铃薯各氮素利用率指标。间作马铃薯氮素利用率高于单作,施氮 150 kg · hm⁻²下单作和间作氮素积累速率最大时的含氮量、氮素积累最大速率均比其他处理高,马铃薯产量也最高。施氮对马铃薯产量及氮素累积的贡献大于间作,间作马铃薯最佳施肥量为 150 kg · hm⁻²。

参 考 文 献:

[1] 李合生.《现代植物生理学》(第 3 版)[M].北京:高等教育出版社, 2012:25-30.

[2] 焦峰, 彭东君, 翟瑞常.不同氮肥水平对马铃薯蛋白质和淀粉合成的影响[J]. 东北农业科学, 2013, 38(4):38-41.

[3] Vos J, van der Putten P E L, Birch C J. Effect of nitrogen supply on leaf appearance, leaf growth, leaf nitrogen economy and photosynthetic capacity in maize (*Zea mays* L.)[J]. Field Crops Research, 2005, 93 (1):64-73.

[4] 许堃, 党秀丽, 董旭, 等.¹⁵N 示踪法研究生物炭施用对油菜氮素吸收和转运的影响[J].水土保持学报, 2018, 32(5):197-201,207.

[5] 段有强. 铵态氮、硝态氮及其配施对冬小麦氮素利用及籽粒蛋白质品质的影响[D].洛阳:河南科技大学, 2013.

[6] 韦剑锋, 宋书会, 韦巧云, 等.施氮量对冬马铃薯氮素利用和土壤氮含量的影响[J].作物杂志, 2015, (3):93-97.

[7] 石晓华, 杨海鹰, 康文钦, 等.不同施氮量对马铃薯-小麦轮作体系产量及土壤氮素平衡的影响[J]. 作物杂志, 2018, (2):108-113.

[8] 肖靖秀, 汤利, 郑毅, 等.大麦/蚕豆间作条件下供氮水平对作物产量和大麦氮吸收累积的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 31(3): 499-503.

[9] Weier K L, Doran J W, Power J F, et al. Denitrification and the di-nitrogen/nitrous oxide ratio as affected by soil water, available carbon, and nitrate[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57 (1):66.

[10] 李洋, 张俊莲, 白江平, 等. 马铃薯软腐病菌 *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora* 714 种胞外酶基因的克隆和原核表达分析[J]. 草业科学, 2014, 31(4):561-574.

[11] 吴娜,赵宝平,曾昭海,等. 两种灌溉方式下保水剂用量对裸燕麦产量和品质的影响[J].作物学报,2009,35(8):1552-1557.

[12] 贺锦红, 吴娜, 蔡明, 等. 马铃薯-燕麦间作条件下施氮水平对马铃薯农艺性状及产量品质的影响[J]. 南方农业, 2018, 12(27): 39-43.

[13] Exner D N, Davidson D G, Ghaffarzadeh M, et al. Yields and returns from strip intercropping on six Iowa farms [J]. American Journal of Alternative Agriculture, 1999, 14(2):69-77.

[14] Zhu Y, Chen H, Fan J, et al.Genetic diversity and disease control in rice[J].Nature, 2000,406(6797):718-722.

[15] 南京农业大学. 土壤农化分析(第 2 版)[M]. 北京:农业出版社, 1981:78-79.

[16] 郭恒, 贾豪, 王舰.马铃薯氮营养高效基因型筛选指标的研究进展[J].现代农业科技, 2017, (24):62-64.

[17] 祁驰恒, 魏峭嵘, 田洵, 等.施氮量对马铃薯氮素积累分配及利用率的影响[J].中国马铃薯, 2016,30(3):158-163.

[18] 王凯. 冬作马铃薯氮磷钾营养特性与合理施肥的研究[D].广州:华南农业大学, 2016.

[19] 杨丽辉. 肥料配施对马铃薯产质量、养分吸收及土壤养分的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2013.

[20] 刘向梅. 氮磷钾施用量及施用时期对马铃薯干物质和养分积累分配的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2013.

[21] 吴娜, 杨娜娜, 刘吉利, 等. 马铃薯//燕麦对马铃薯氮、磷、钾含量及营养品质的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(3):592-597.

[22] 李利. 不同施氮量对马铃薯氮素吸收、积累及利用的影响[J]. 山西农业科学, 2012, 40(12):1292-1295.

[23] 范香全, 张胜, 蒙美莲, 等. 施氮量及密度对膜下滴灌马铃薯氮素吸收与利用的影响[J]. 安徽农业科学, 2014,42(14):4272-4274,4421.

[24] 陈瑞英. 水氮互作对马铃薯产量和氮素吸收利用特性的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2011.

[25] 马心灵, 朱启林, 耿川雄, 等.不同氮水平下作物养分吸收与利用对玉米马铃薯间作产量优势的贡献[J].应用生态学报, 2017,28(4):1265-1273.

[26] 杨文亭, 王晓维, 王建武. 豆科-禾本科间作系统中作物和土壤氮素相关研究进展[J]. 生态学杂志, 2013, 32(9):2480-2484.

[27] 朱启林, 向蕊, 汤利, 等.间作条件下施氮量对马铃薯光合特性的调控作用[J].生态学杂志, 2018, 37(5):1391-1397.

[28] 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.

[29] 贾曼曼, 肖靖秀, 汤利, 等.不同施氮量对小麦蚕豆间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.

[30] Bedoussac L, Justes E. Dynamic analysis of competition and complementarity for light and N use to understand the yield and the protein content of a durum wheat - winter pea intercrop [J]. Plant and Soil, 2010, 330(1-2):37-54.