

间作及施氮量对宁南旱区马铃薯 生理特性及品质的影响

王晓港¹,蔡 明¹,吴 娜¹,刘吉利²,麻仲花¹

(1.宁夏大学农学院,宁夏 银川 750021; 2.宁夏大学生态环境学院,宁夏 银川 750021)

摘 要:于 2019 年 5—10 月在大田条件下,以马铃薯青薯 9 号和燕麦燕科 1 号为试验材料,设置 2 种植模式(马铃薯单作、马铃薯燕麦间作,分别记为 IP、JP),4 种施氮水平(0、75、150、225 kg·hm⁻²,分别记为 N0、N1、N2、N3)的裂区试验,测定马铃薯叶片 CAT、POD 活性,MDA、脯氨酸、叶绿素含量及马铃薯品质。结果表明:施氮条件下,马铃薯 CAT、POD 活性均显著高于 N0 处理($P<0.05$),成熟期,JP 在 N3 水平下 CAT、POD 活性及叶绿素含量较 N0 处理分别增高 14.0%、22.5%、19.6%,N2 水平下 MDA 及脯氨酸含量较 N0 处理分别降低 2.1%、56.8%,现蕾期至块茎膨大期,JP 的生理特性优于 IP;间作和适宜的施氮量有益于马铃薯品质提高,N1、N2、N3 较 N0 处理,IP 直链淀粉含量分别增加 15.9%、23.8%、12.3%,JP 分别增加 11.4%、45.6%、17.1%,IP 支链淀粉含量分别增加 3.2%、16.7%、22.8%,JP 分别增加 27.8%、64.6%、1.1%;可溶性糖含量在各施氮处理间无显著差异($P>0.05$);粗蛋白含量随施氮量的增加呈先增后减的趋势,施氮量为 N2 时最高,IP、JP 较 N0 分别增加 3.0%、8.9%,且 JP 显著高于 IP($P<0.05$)。由通径分析中剩余因子 $e=(1-R^2)^{1/2}$ 可知,马铃薯生理指标对支链淀粉形成的影响最大,对粗蛋白含量的影响最小,剩余因子分别为 0.750、0.401。叶绿素对直链淀粉与支链淀粉形成的直接影响最大,直接通径系数分别为 0.328、0.767,可通过叶绿素含量反映出块茎直链淀粉、支链淀粉及可溶性糖的含量。综上,马铃薯燕麦间作复合系统优化了马铃薯生长发育过程中的生理特性,从而达到改善品质的目标,在生产中建议的施氮量为 150 kg·hm⁻²(N2)。

关键词:马铃薯;间作;施氮;生理特性;品质

中图分类号:S532 **文献标志码:**A

Effects of intercropping and nitrogen application on physiological characteristics and quality of potatoes in arid areas of Southern Ningxia

WANG Xiaogang¹, CAI Ming¹, WU Na¹, LIU Jili², MA Zhonghua¹

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

Abstract: This experiment used potato Qingshu 9 and oat Yanke 1 as study materials and took place from May to October 2019 under field conditions. The treatments included four nitrogen application levels of 0, 75, 150 and 225 kg·hm⁻² (N0, N1, N2 and N3) and two planting modes of potato monoculture and potato-oat intercropping (IP and JP). The activities of CAT and POD, MDA proline and chlorophyll content and quality of potato leaves were measured. The results showed that under the condition of nitrogen application, the activities of CAT and POD in potato were significantly higher than those in N0 treatment ($P<0.05$). At maturity, the activities of CAT, POD and chlorophyll content of JP at N3 level were 14.0%, 22.5% and 19.6% higher than those in N0 treatment respectively, and the contents of MDA and proline at N2 level were 2.1% and 56.8% lower than those in N0 treatment respectively. From budding stage to tuber expansion stage, the physiological characteristics of JP were better than that of IP. Intercropping and appropriate nitrogen application rate were beneficial to the formation of potato quality. Compared with N0 treatment, N1, N2 and N3 increased amylose content in IP by 15.9%, 23.8% and 12.3%, by

11.4%, 45.6% and 17.1% in JP, and amylopectin content by 3.2%, 16.7% and 22.8% in IP, by 27.8%, 64.6% and 1.1% in JP respectively. There was no significant difference in soluble sugar content among nitrogen application treatments ($P>0.05$). The content of crude protein increased first and then decreased with the increase of nitrogen application. When the amount of nitrogen application was N2, it was the highest with the increase of 3.0% in IP and 8.9% in JP respectively compared with N0. The crude protein in JP was significantly higher than that in IP ($P<0.05$). From the path analysis, the remaining factor $e=(1-R^2)^{1/2}$ showed that the physiological indicators of potato had the greatest impact on the formation of amylopectin and the least impact on the crude protein content. The remaining factors were 0.750 and 0.401, respectively. Chlorophyll had the greatest direct influence on the formation of amylose and amylopectin. The direct path coefficients were 0.328 and 0.767 respectively. The content of tuber amylose, amylopectin and soluble sugar was reflected by the level of chlorophyll. In summary, the potato-oat intercropping compound system optimized the physiological characteristics of potato growth and development, thereby improving potato quality. The recommended nitrogen application rate in production is $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N2).

Keywords: potato; intercropping; nitrogen application; physiological characteristics; quality

马铃薯营养价值高、抗旱能力强,是宁夏南部山区的传统栽培作物^[1]。近年来,宁南旱区马铃薯连作率高达 40%^[2],导致土壤肥力下降、病虫害加重、产量减少、品质降低,给当地农民造成巨大的经济损失^[3]。

通过合理施用氮肥来延缓植物叶片衰老并提高作物产量与品质已成为发展现代农业的必然趋势^[4],氮肥使作物产量提高的贡献率可达 40%左右^[5]。氮肥对马铃薯产量的提高与品质的改善影响显著^[6],合理施用氮肥有利于马铃薯干物质的积累与分配,并可以增加马铃薯块茎的淀粉含量、提高叶片保护酶活性及商品薯的比例^[7]。合理的间作系统可以缓解马铃薯连作障碍,并可以作为减施氮肥的一种可持续手段^[8]。薯豆间作相较于马铃薯单作,其产量可提高 17.2%,并显著提高薯块粗蛋白与还原糖含量^[9];马铃薯燕麦间作系统中,整个生育时期马铃薯保护酶 POD、CAT 活性均高于单作马铃薯^[10]。因此,充分发挥间作优势缓解马铃薯连作障碍,并提高马铃薯品质对宁南旱区马铃薯种植业发展具有重大意义。

近年来,宁南山区已经普遍推广间作马铃薯的种植模式,但当地农民仍以增施化肥作为增产的主要措施,为明确适宜当地马铃薯种植的氮肥施用量并解决连作障碍,本文研究马铃薯燕麦间作,通过

设置不同梯度的氮肥施用量,了解施氮和间作的互作效应,分析施氮和间作对马铃薯品质的影响并探究其生理特性,为当地马铃薯的合理栽培与施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试品种

马铃薯:青薯 9 号由青海省农林科学院生物技术研究所选育,属中晚熟品种,适合在海拔 2 600 m 以下的区域种植。

燕麦:燕科 1 号由内蒙古农科院以 8115-1-2× 鉴 17 选育而成,适宜旱地种植。

1.2 试验地概况

试验于 2019 年在宁夏海原县树台乡大嘴村试验基地(105°9′~106°10′E,36°6′~37°4′N)进行,地处宁夏中部干旱带,海拔 2 166 m,年均气温 8℃,年均降雨量 290 mm,年无霜期 147~171 d。试验地土壤类型为侵蚀黑垆土,耕层土壤理化性状见表 1。

1.3 试验设计

采用裂区试验设计,主区为 2 种不同的种植模式(马铃薯单作、马铃薯燕麦间作,分别记为 IP、JP),副区为 4 种不同的施氮水平(0、75、150、225 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别记为 N0、N1、N2、N3)。以上处理均设

表 1 耕层土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of topsoil

土层 Soil layer/cm	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline nitrogen /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium /(mg·kg ⁻¹)	pH
0~20	8.72	0.79	69.54	15.26	294.61	8.26
20~40	8.06	0.77	62.21	9.86	259.43	8.28

3 次重复,共 24 个小区,小区面积 36 m²(6 m×6 m)。单作马铃薯每小区种植 12 行,种植方式为单垄双行半覆膜种植,垄宽 60 cm,垄距 40 cm,株距 40 cm,种植深度 20 cm;马铃薯燕麦间作小区中,行数比为(JP:JO=4:2),马铃薯燕麦间距 25 cm,燕麦条播,其余设计均同于单作。

马铃薯和燕麦均于 2019 年 5 月 12 日播种,将 70%氮肥(尿素)、全部磷钾肥(过磷酸钙 90 kg·hm⁻²、硫酸钾 15 kg·hm⁻²)结合整地施入,30%氮肥于马铃薯现蕾期追施。9 月 30 日收获燕麦,10 月 5 日收获马铃薯,其他管理(间苗、中耕除草、防治病虫害等)同当地大田生产。

1.4 测定项目与方法

于马铃薯苗期、现蕾期、块茎形成期、块茎膨大期、淀粉积累期和成熟期,每个小区选取有代表性的植株,取马铃薯植株基部第 3~4 片复叶放入低温取样箱中带回室内,置于-40℃冰箱保存,采用愈创木酚法^[11]测定过氧化物酶(POD)活性;采用硫代巴比妥酸法^[11]测定丙二醛(MDA)含量;采用紫外吸收法^[11]测定过氧化氢酶(CAT)活性;脯氨酸(Pro)含量采用茚三酮比色法^[12]测定;叶绿素含量采用丙酮乙醇混合液法^[19]测定。品质指标的测定参照李合生^[11]的方法。

1.5 数据统计分析

用 SPSS 软件进行数据统计分析,DPS 软件进行差异显著性检验,其他分析与作图用 Excel 完成。

2 结果与分析

2.1 间作及施氮量对马铃薯生理特性的影响

2.1.1 过氧化氢酶(CAT)活性 由表 2 可知,马铃薯的 CAT 活性随生育时期的推进呈现先升高后降低的趋势,在块茎形成期达到最高值,成熟期降到最低值。苗期,马铃薯单作模式(IP)下的 CAT 活性高于间作(JP),IP 的 CAT 活性表现为 N2>N3>N0>N1,JP 表现为 N3>N2>N1>N0,且 N2 和 N3 间差异不显著($P>0.05$)。现蕾期,IP 在 N2 水平下 CAT 活性最高,JP 在 N3 水平下 CAT 活性最高。块茎形成期,种植模式间差异不显著($P>0.05$),而种植模式和施氮水平交互作用间差异显著($P<0.05$),IP 在 N3 水平下 CAT 活性最高,JP 在 N0 水平下 CAT 活性最高。块茎膨大期,种植模式和施氮水平交互作用间差异显著($P<0.01$),IP 在 N3 水平下 CAT 活性最高,JP 在 N0 水平下 CAT 活性最高,且显著高于其他施氮水平($P<0.05$)。淀粉积累期,马铃薯在 N1 水平下 CAT 活性最高。成熟期,IP 在 N3 水平下 CAT 活性最高,且与其他施氮水平差异显著($P<0.05$),JP 条件下各施氮处理(N0~N3)较 IP 处理分别增加了 36.9%、3.6%、64.1%、19.3%。苗期至现蕾期,JP 比 IP 马铃薯 CAT 活性低,块茎形成期至成熟期,JP 比 IP 马铃薯 CAT 活性高。总体来看,施氮对马铃薯 CAT 活性提高的贡献显著大于种植模式。

表 2 间作及施氮量对马铃薯过氧化氢酶(CAT)活性的影响/(U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)							
Table 2 Effects of intercropping and nitrogen application on CAT activity in potato							
种植模式 Planting mode	施氮水平 Nitrogen application level	苗期 Seedling stage	现蕾期 Bud stage	块茎形成期 Tuber formation	块茎膨大期 Tuber expansion	淀粉积累期 Starch accumulation period	成熟期 Maturity
IP	N0	106.5±23.1b	137.1±29.6a	208.3±22.7b	91.4±20.3b	175.1±14.6a	59.08±5.7c
	N1	78.9±1.9c	139.1±11.1a	159.3±12.8c	113.9±9.7a	144.9±18.2b	70.1±1.0b
	N2	125.4±7.3a	142.7±1.3a	143.0±15.1c	125.8±7.0a	84.7±2.2c	68.0±0.3bc
	N3	108.4±8.5ab	106.5±4.7b	246.8±1.9a	130.1±11.2a	103.8±0.9c	78.9±5.2a
JP	N0	68.0±3.8b	110.2±1.3b	244.2±15.9a	132.8±2.6a	148.5±20.9a	80.9±7.6b
	N1	78.8±8.2ab	174.6±16.9a	206.3±34.9b	105.5±10.2b	142.9±5.4a	72.6±8.3ab
	N2	92.4±5.5a	120.9±1.9b	195.9±22.7b	102.8±6.6b	104.0±7.8b	111.6±2.9a
	N3	92.6±9.9a	181.5±3.6a	208.3±7.6b	110.2±9.7b	108.7±3.7b	94.1±15.6a
种植模式 Intercropping (I)		*	NS	NS	NS	NS	* *
施氮水平(N) Nitrogen application		* *	* *	* *	NS	* *	* *
种植模式×施氮水平 I×N		NS	* *	*	* *	NS	* *

注:不同字母表示在各施氮水平间差异显著($P<0.05$);NS 表示差异不显著,*、*、* 分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 的显著水平。下同。
Note: Different letters indicate that there is a significant difference between the levels of nitrogen application ($P<0.05$); NS, the difference is not significant, *, *, *: respectively indicate the significance level of $P<0.05$ and $P<0.01$. The same below.

2.1.2 过氧化物酶(POD)活性 如表 3 所示,马铃薯 POD 活性随生育时期的推进呈先升高后降低的趋势,在块茎膨大期或淀粉积累期达到最高值。苗期,种植模式间无显著性差异 ($P>0.05$),马铃薯在 N3 水平下 POD 活性最高。现蕾期至块茎形成期,马铃薯单作模式(IP)下的 POD 活性高于间作模式(JP),N3 水平下 POD 活性最高,且显著高于 N0 处理 ($P<0.05$)。块茎膨大期至成熟期,种植模式间无显著差异 ($P>0.05$),而种植模式和施氮水平交互作用间差异显著 ($P<0.05$)。其中在块茎膨大期,JP 在 N3 水平下较 N0、N1、N2 分别增高42.2%、38.5%、29.8%。淀粉积累期,JP 在 N3 水平下较 N0、N1、N2 分别增高 27.9%、66.0%、30.1%。总体来看,施氮对马铃薯 POD 活性提高的贡献显著大于间作。

2.1.3 丙二醛(MDA)含量 如表 4 所示,马铃薯 MDA 含量随施氮量增加呈先降低后升高的趋势。苗期,施氮水平和种植模式间差异不显著 ($P>$

0.05),JP 在 N2 水平下 MDA 含量最低。现蕾期,间作模式高于单作,IP 在 N2 处理下显著低于其他施氮水平($P<0.05$),JP 在 N1 处理下显著低于其他施氮水平($P<0.05$)。块茎形成期,N3 处理 MDA 含量最低,但与其他处理无显著差异 ($P>0.05$)。块茎膨大期,单作模式高于间作,JP 在 N2 处理下 MDA 含量最低。淀粉积累期至成熟期,MDA 含量均在 N2 水平下最低,其中在成熟期 N2 较 N0、N1、N3 水平下 MDA 含量分别降低40.2%、22.9%、38.9%。

2.1.4 脯氨酸含量 如表 5 所示,马铃薯脯氨酸含量随生育时期的推进呈先升高后降低的趋势,在块茎膨大期达到最高值。苗期,JP 脯氨酸含量高于 IP,种植模式、施氮水平及种植模式和施氮水平交互作用间均差异显著。现蕾期,IP 在 N3 水平下脯氨酸含量最高,且显著高于其他处理 ($P<0.05$),JP 表现为 N3<N2<N1<N0。块茎形成期,JP 在 N2 处理较 N0、N1、N3 脯氨酸含量分别降低了 66.4%、50.1%、

表 3 间作及施氮量对马铃薯过氧化物酶(POD)活性的影响/($\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)

Table 3 Effects of intercropping and nitrogen application on POD activity in potato

种植模式 Planting mode	施氮水平 Nitrogen application level	苗期 Seedling stage	现蕾期 Bud stage	块茎形成期 Tuber formation	块茎膨大期 Tuber expansion	淀粉积累期 Starch accumulation	成熟期 Maturity
IP	N0	23.8±2.5b	30.8±5.2c	49.8±5.3c	52.0±2.4c	137.7±16.0a	87.0±1.7a
	N1	27.0±1.2ab	51.3±3.6b	64.4±3.1b	134.2±11.8b	136.3±4.9a	65.1±1.2b
	N2	27.3±3.9ab	45.0±2.7a	71.4±5.0ab	169.4±13.4a	83.0±7.6b	82.6±2.1a
	N3	32.6±3.9a	66.5±3.1a	79.1±4.4a	120.3±13.5b	110.9±8.2b	41.0±2.7c
JP	N0	32.6±4.5a	27.7±2.8b	51.4±3.0b	104.2±12.1c	112.9±17.6b	54.4±3.9c
	N1	25.0±3.0b	31.1±2.7b	26.1±6.5c	110.9±10.9bc	87.0±16.9c	65.4±2.8ab
	N2	38.0±2.3a	42.9±3.0a	65.1±8.4a	126.6±13.5b	111.0±8.4b	64.66±3.8b
	N3	38.0±5.9a	47.3±2.5a	68.7±6.6a	180.2±14.8a	144.4±19.0a	70.2±1.3a
种植模式 Intercropping (I)		NS	* *	*	NS	NS	NS
施氮水平 (N)							
Nitroge application level		* *	* *	* *	* *	NS	* *
种植模式×施氮水平 I×N		NS	*	* *	* *	*	* *

表 4 间作及施氮量对马铃薯丙二醛(MDA)含量的影响/($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)

Table 4 Effects of intercropping and nitrogen application on MDA content in potato

种植模式 Planting mode	施氮水平 Nitrogen application level	苗期 Seedling stage	现蕾期 Bud stage	块茎形成期 Tuber formation	块茎膨大期 Tuber expansion	淀粉积累期 Starch accumulation	成熟期 Maturity
IP	N0	8.2±0.2b	11.2±1.5a	10.9±1.3a	10.3±1.0b	11.6±0.5a	13.2±0.6a
	N1	9.6±1.2a	10.1±1.8ab	10.1±0.6a	11.7±1.3ab	10.1±1.0a	11.1±0.7b
	N2	8.8±2.5ab	8.5±0.6b	10.2±1.3a	13.3±0.3a	10.5±0.6a	8.1±1.8c
	N3	9.8±0.1a	9.6±0.9ab	9.9±0.7a	12.2±0.5ab	9.9±0.9a	8.7±0.6c
JP	N0	11.1±0.3a	11.4±0.2a	10.3±0.2a	9.6±1.4a	10.7±0.6a	14.2±1.0a
	N1	8.7±0.8b	8.1±0.8b	11.3±1.1a	12.2±1.5a	10.5±1.4a	11.0±1.3b
	N2	8.1±0.6b	9.4±1.6ab	10.2±1.5a	9.6±1.2a	8.4±1.4b	8.5±1.0c
	N3	9.3±1.8b	10.8±0.8a	9.8±1.0a	10.9±0.7a	10.9±0.6a	13.9±0.4a
种植模式 Intercropping (I)		NS	*	NS	NS	NS	* *
施氮水平 (N)							
Nitrogen application level		NS	NS	NS	*	NS	NS
种植模式×施氮水平 I×N		* *	NS	NS	NS	NS	*

31.0%,且各处理间差异显著($P<0.05$);块茎膨大期各处理间差异性与苗期一致,种植模式和施氮水平交互作用间差异不显著($P>0.05$);淀粉积累期至成熟期,IP 在 N1 处理下均高于其他处理,JP 在 N2 处理下均高于其他处理且差异性显著($P<0.05$),种植模式及施氮水平间无显著差异($P>0.05$),成熟期,种植模式和施氮水平交互作用间差异显著($P<0.05$)。

2.1.5 叶绿素含量 如表 6 所示,马铃薯叶片叶绿素含量随生育时期的推进呈逐渐下降趋势,成熟期降至最低。苗期,IP、JP 均在 N2 水平下叶绿素含量最低。现蕾期,JP 的叶绿素含量高于 IP,N3 叶绿素含量均显著低于其他处理($P<0.05$)。块茎形成期,IP 叶绿素含量高于 JP,各处理间差异不显著($P>0.05$)。块茎膨大期,IP 叶绿素含量低于 JP,各处理间差异不显著($P>0.05$)。淀粉积累期,JP 叶绿素含

量 N3 较 N0、N1、N2 分别增加 39.2%、48.0%、37.0%。成熟期,叶绿素含量降至最低,IP 表现为 $N2>N3>N1>N0$,JP 表现为 $N3>N2>N0>N1$,各处理间差异不显著($P>0.05$),种植模式、施氮水平及种植模式和施氮水平交互作用间均差异显著。

2.2 间作及施氮量对马铃薯品质的影响

由表 7 可以看出,种植模式对直链淀粉形成的影响显著($P<0.05$),N0、N1、N3 水平下 IP 优于 JP。IP 直链淀粉含量在 N1、N2、N3 水平下较不施氮处理分别增加 15.9%、23.8%、12.3%,支链淀粉含量分别增加 3.2%、16.7%、22.8%。JP 直链淀粉含量在 N1、N2、N3 水平下较不施氮处理分别增加 11.4%、45.6%、17.1%,支链淀粉含量分别增加 27.8%、64.6%、1.1%。淀粉含量总体上随施氮量呈先上升后下降的趋势,各施氮水平间差异显著($P<0.05$),

表 5 间作及施氮量对马铃薯脯氨酸含量的影响/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

Table 5 Effects of intercropping and nitrogen application on proline content of potato							
种植模式 Planting mode	施氮水平 Nitrogen application level	苗期 Seedling stage	现蕾期 Bud stage	块茎形成期 Tuber formation	块茎膨大期 Tuber expansion	淀粉积累期 Starch accumulation	成熟期 Maturity
IP	N0	129.7±2.5a	106.5±20b	86.6±8.3ab	335.1±15.7a	66.4±0.3ab	36.6±4.7b
	N1	67.0±5.7c	96.3±30.4b	59.2±4.3b	443.1±20.6a	74.2±17.7a	56.2±2.6a
	N2	74.3±11.0bc	99.2±12.2b	93.9±17.0a	374.7±18.7a	55.4±7.4b	34.3±4.4b
	N3	86.5±2.1b	139±24.4a	64.8±4.6b	366.2±20.7a	66.5±1.4ab	45.5±2.0ab
JP	N0	67.3±8.0c	111.8±31.3a	346.3±38.6a	264.7±11.9b	46.9±3.3b	44.2±4.1ab
	N1	115.8±11.7a	81.2±8.4b	233.2±64.4b	347.9±36.1a	64.1±10.0ab	40.5±4.1ab
	N2	89.9±3.7b	59.3±5.4b	116.4±45.6d	245.7±9.8b	67.9±10.6a	57.3±26.8a
	N3	111.0±7.9a	56.6±10.0b	168.6±75.7c	353.9±31.5a	64±6.8ab	28.2±2.9b
种植模式 Intercropping (I)		* *	*	NS	* *	NS	NS
施氮水平 (N)		*	NS	* *	*	NS	NS
Nitrogen application level							
种植模式×施氮水平 I×N		* *	* *	* *	NS	NS	*

表 6 间作及施氮量对马铃薯叶片叶绿素含量的影响/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)

Table 6 Effects of intercropping and nitrogen application on chlorophyll content of potato							
种植模式 Planting mode	施氮水平 Nitrogen application level	苗期 Seedling stage	现蕾期 Bud stage	块茎形成期 Tuber formation	块茎膨大期 Tuber expansion	淀粉积累期 Starch accumulation	成熟期 Maturity
IP	N0	0.98±0.1bc	1.01±0.18c	0.66±0.04a	0.75±0.1a	0.56±0.19ab	0.37±0.08a
	N1	1.36±0.04a	1.49±0.05a	0.75±0.16a	0.77±0.19a	0.63±0.21a	0.37±0.04a
	N2	0.78±0.18c	1.23±0.18b	0.76±0.24a	0.92±0.29a	0.57±0.08ab	0.44±0.05a
	N3	1.19±0.19ab	0.69±0.06d	0.84±0.08a	0.97±0.1a	0.3±0.05b	0.44±0.15a
JP	N0	1.6±0.35a	1.27±0.21b	0.57±0.17a	1.35±0.24a	0.45±0.13a	0.37±0.15a
	N1	0.99±0.05b	1.64±0.09a	0.6±0.16a	1.39±0.1a	0.5±0.22a	0.33±0.02a
	N2	0.97±0.05b	1.54±0.06a	0.7±0.18a	1.49±0.11a	0.54±0.19a	0.42±0.02a
	N3	1.43±0.49a	0.6±0.13b	0.71±0.29a	1.37±0.28a	0.74±0.16a	0.46±0.03a
种植模式 Intercropping (I)		*	* *	NS	* *	* *	* *
施氮水平 (N)							
Nitrogen application level		*	*	*	NS	*	*
种植模式×施氮水平 I×N		* *	NS	*	* *	NS	* *

不同模式下 N2 水平含量最高,且与对照差异显著 ($P<0.05$)。JP 模式下,各施氮处理总淀粉含量较对照分别增加 3.2%、16.7%、22.8%。同一种植模式下可溶性糖含量随施氮量呈先降低后升高的趋势,各施氮处理间差异不显著 ($P>0.05$)。粗蛋白含量随施氮量的增加呈现先增后减的趋势,各处理间差异显著,IP 模式下 N1、N2、N3 处理较 N0 分别增加 4.3%、3.8%、8.9%,JP 模式下 N2 较 N0、N1、N3 分别增加 3.2%、1.7%、5.4%,种植模式和施氮水平间差异不显著 ($P>0.05$),而间作和施氮水平交互作用间差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 马铃薯生理及品质指标的通径分析

由于马铃薯淀粉积累期块茎大小已基本定型,块茎淀粉、粗蛋白开始快速积累,同时糖分相应减少,因此将马铃薯淀粉积累期的 CAT、POD、MDA、脯氨酸、叶绿素含量分别设为自变量 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 ,直链淀粉、支链淀粉、可溶性糖、粗蛋白设为因变

量(4 个因变量均符合正态性检验)进行线性回归方程的建立,将上述自变量逐步引入,直至建立最优的线性回归方程为止。由表 8 可知,随着自变量被逐步引入回归方程,各品质指标的相关系数(R)和决定系数(R^2)都会增大,表明生理指标对以上 3 种品质的作用在增加,各因变量的剩余因子 $e = (1 - R^2)^{1/2}$ 大小为支链淀粉>可溶性糖>直链淀粉>粗蛋白,表明 5 个自变量对支链淀粉的形成影响最大,对粗蛋白含量影响最小。

由表 9 可得, x_1 (CAT)、 x_2 (POD)、 x_3 (MDA)、 x_4 (脯氨酸)、 x_5 (叶绿素)5 个自变量对马铃薯直链淀粉形成的直接影响表现为 $x_5>x_3>x_1>x_2>x_4$,对马铃薯支链淀粉形成的直接影响表现为 $x_5>x_3>x_4>x_1>x_2$ 。间接通径系数可表明,MDA 通过脯氨酸对直链淀粉形成的间接影响较大,间接通径系数为 0.177,MDA 通过 POD 间接通径系数为负值,但是 MDA 与直链淀粉的相关系数及通径系数较大,其相关系数

表 7 间作及施氮量对马铃薯品质的影响/%
Table 7 Effects of intercropping and nitrogen application on potato quality

种植模式 Planting mode	施氮水平 Nitrogen application level	直链淀粉 Amylose	支链淀粉 Amylopectin	可溶性糖 Soluble sugar	粗蛋白 Crude protein
IP	N0	12.61±0.24abc	59.13±2.34b	0.024±0.003a	123.93±0.79bcd
	N1	14.62±2.22ab	61.04±14.3b	0.029±0.005a	125.76±0.87bcd
	N2	15.61±0.25ab	69.00±5.06ab	0.022±0.009a	127.85±1.08b
	N3	14.16±1.36abc	72.64±11.07ab	0.025±0.001a	120.90±2.19d
JP	N0	11.01±1.19c	53.17±7.64b	0.027±0.003a	121.89±3.97cd
	N1	12.26±0.21bc	67.97±5.35ab	0.024±0.003a	127.14±2.75b
	N2	16.03±2.52a	87.53±8.31a	0.023±0.001a	132.73±0.71a
	N3	12.89±0.66abc	53.77±5.21b	0.030±0.007a	126.57±1.30bc
种植模式 Intercropping (I)		*	NS	NS	NS
施氮水平 Nitrogen application level (N)		NS	NS	NS	NS
种植模式×施氮水平 I×N		NS	NS	NS	*

表 8 品质指标的线性回归方程输出结果
Table 8 Linear regression equation output results of quality index

品质指标 Quality index	模型 model	R	R^2	e
直链淀粉 Amylose	1	0.819 ^a	0.671	0.475
	2	0.927 ^b	0.860	
支链淀粉 Amylopectin	1	0.750 ^a	0.604	0.750
	2	0.814 ^b	0.662	
可溶性糖 Soluble sugar	1	0.779 ^a	0.607	0.728
	2	0.828 ^b	0.686	
粗蛋白 Crude protein	1	0.719 ^a	0.517	0.401
	2	0.957 ^b	0.916	

注:a 为单独引入各个自变量所得线性回归方程中最优的相关系数,b 为引入全部自变量所得线性回归方程的相关系数。
Note:“a” represents the optimal correlation coefficient in the linear regression equation obtained by gradually introducing a single independent variable, and “b” represents the correlation coefficient of the linear regression equation obtained by introducing all independent variables.

达到 0.460,所以 MDA 对直链淀粉形成的影响较大;脯氨酸的直接通径系数为-0.640,通过其他自变量的间接通径系数也较低,分别为 0.009、-0.181、-0.075、0.067,因此对直链淀粉改变的影响较小。5 个自变量对可溶性糖形成的直接影响表现为 $x_2>x_5>x_1>x_3>x_4$,POD 与可溶性糖的简单相关系数最大为 0.684,所以 POD 对可溶性糖形成的影响最大。而 5 个自变量与粗蛋白的直接通径系数均为负值,与粗蛋白的简单相关系数也均是负值,表明生理特性对马铃薯粗蛋白形成的影响较小。

3 讨论与结论

3.1 间作及施氮量对马铃薯生理特性的影响

间作可以充分利用光照、降水与土地面积,提高作物产量与经济效益。王晓红等^[13]研究表明,桑

表 9 马铃薯生理特性与品质的通径分析

Table 9 Path analysis of potato physiological characteristics and quality

品质指标 Quality index	自变量 Independent variable	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient					合计 Total
				x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	
直链淀粉 Amylose	x_1	0.032	0.112		-0.176	0.142	-0.052	0.007	-0.079
	x_2	-0.429	-0.436	0.045		0.075	-0.265	0.150	0.006
	x_3	0.460	0.270	0.058	-0.123		0.177	0.075	0.190
	x_4	-0.819	-0.640	0.009	-0.181	-0.075		0.067	-0.179
	x_5	0.062	0.328	0.002	-0.199	0.062	-0.131		-0.265
支链淀粉 Amylopectin	x_1	-0.384	-0.305		-0.176	0.142	-0.052	0.007	-0.079
	x_2	-0.063	-0.386	-0.123		0.077	0.017	0.351	0.322
	x_3	0.171	0.275	-0.160	-0.108		-0.011	0.177	-0.103
	x_4	-0.061	0.043	-0.025	-0.159	-0.076		0.157	-0.104
	x_5	0.655	0.767	-0.007	-0.176	0.063	0.008		-0.111
可溶性糖 Soluble sugar	x_1	0.148	-0.133		0.377	-0.072	-0.021	-0.002	-0.079
	x_2	0.684	0.933	-0.053		-0.038	-0.108	-0.047	-0.248
	x_3	0.103	-0.138	-0.069	0.262		0.072	-0.023	0.241
	x_4	0.130	-0.262	-0.010	0.386	0.038		-0.021	0.392
	x_5	0.235	-0.103	-0.003	0.427	-0.031	-0.053		0.338
粗蛋白 Crude protein	x_1	-0.516	-0.349		-0.043	-0.071	-0.035	-0.017	-0.167
	x_2	-0.796	-0.107	-0.141		-0.037	-0.180	-0.329	-0.689
	x_3	-0.393	-0.135	-0.183	-0.030		0.121	-0.166	-0.258
	x_4	-0.610	-0.436	-0.028	-0.044	0.037		-0.147	-0.183
	x_5	-0.890	-0.720	-0.008	-0.049	-0.031	-0.089		-0.1780

树与马铃薯间作条件下,马铃薯叶片的 MDA 含量较单作降低 20.4% ($P<0.05$),CAT 活性较单作显著升高 28.89% ($P<0.05$),POD 活性较单作升高 28.35% ($P<0.05$)。金建新等^[14]研究表明,马铃薯玉米间作模式下各指标比单作模式均有所提高,马铃薯和玉米的叶绿素含量分别提高 10.3% 和 24.2%。本研究发现,间作马铃薯叶片 CAT、POD 活性在块茎形成期至成熟期高于单作,而在苗期低于单作,说明间作马铃薯较单作有明显的通风透光优势,保障了马铃薯的生长发育条件,因此在生育后期间作马铃薯叶片的抗逆性高于单作处理。

CAT、POD 在逆境胁迫下可以提高植物细胞的抗氧化性^[15],MDA 含量可反映植物对逆境条件反应的强弱^[16-17],脯氨酸对植物渗透势有显著调节作用^[18],叶绿素含量直接影响作物的生长状况。氮素通过参与氮化合物的形成影响植物体内活性氧的产生与清除,有利于提高叶片的抗氧化酶活性,同时氮素既可以提高 GSH-PX 活性,清除大量自由基来防止脂质过氧化,也有利于蛋白质的合成从而降低脯氨酸含量。研究表明,增施氮肥有助于植物在逆境条件下消除细胞内产生的活性氧代谢物质,提高植物抗逆性。杨洁等^[19]研究表明,增施氮肥可以减缓干旱胁迫对 POD、SOD 的抑制作用,有一定的氮补偿效应。张松超等^[20]研究发现,适量施氮可显著降低小麦 MDA 及脯氨酸含量,过量施氮或不施氮都会增高 MDA 含量。董道峰等^[21]研究发现,高

施氮量会提高马铃薯叶片叶绿素含量,延缓植株衰老。本研究结果表明随着施氮量的增加,马铃薯叶片 CAT、POD 活性及叶绿素含量增高,MDA 与脯氨酸含量呈现降低的趋势,这与前人研究结果一致,说明增施氮肥有助于植物在逆境条件下消除细胞内产生的活性氧代谢物质,提高植物抗逆性。

间作模式和适宜的施氮量可以有效改善宁南旱区马铃薯生理特性,综合比较而言,施氮量在 N2 (150 kg · hm⁻²) 和 N3 (225 kg · hm⁻²) 水平下,马铃薯各生理指标表现最佳。

3.2 间作及施氮量对马铃薯品质的影响

本研究表明,间作模式下马铃薯淀粉、粗蛋白、可溶性糖含量高于单作。张海星等^[22]研究表明,禾豆间作与施氮能增加玉米产量与品质。马铃薯和燕麦间作研究表明,可以通过改善间作作物的微环境循环,进而影响作物淀粉、粗蛋白、可溶性糖的变化^[23]。施氮对品质的影响要高于种植模式,这与曹哲等^[23]的研究一致,可能是由于间作模式下马铃薯对氮素的吸收能力强于燕麦,两者改善了间作土壤微环境,从而利于品质提高。

合理增施氮肥有利于作物品质的提高,而淀粉、可溶性糖及粗蛋白含量等是评价马铃薯品质的重要指标^[24]。本试验结果表明,随施氮量的增加淀粉含量呈现先升后降的趋势,可溶性糖含量变化趋势与之相反,粗蛋白含量呈现递增趋势,这是因为氮素有利于 D-葡萄糖基的合成,从而通过糖苷键合

成大量直链淀粉与支链淀粉。董茜等^[25]研究表明,施氮可以提高马铃薯的淀粉含量,过量施氮会降低淀粉含量,这与本研究结果一致。总之,间作和适宜的施氮量有益于宁南旱区马铃薯品质的提高,而过量施氮会导致品质下降,本试验以 150 kg · hm⁻² 的施氮量为宜。

3.3 马铃薯生理特性与品质的关系

本试验研究表明,马铃薯生理特性对支链淀粉的影响最大,其中通过直接通径系数可以看出,对直链淀粉与支链淀粉形成直接影响最大的是叶绿素与 MDA 含量,对可溶性糖形成直接影响最大的是 POD 活性与叶绿素含量。叶绿素含量的高低直接影响着作物光合作用,而且在一定范围内也可反映施氮量与种植模式是否合理^[26-27]。研究还发现,马铃薯生理特性对粗蛋白的影响不显著,这可能是因为马铃薯块茎中粗蛋白含量受施氮量和干旱胁迫影响较小所造成的,这与文国宏等^[28]的研究结果一致。总之,马铃薯生理特性在一定程度上可作为品质高低的参考指标,本试验中马铃薯叶绿素高低可反映出块茎直链淀粉、支链淀粉及可溶性糖的含量,且叶绿素含量与其均呈正比。

参 考 文 献:

[1] 付梦雪,吴名字,韩碧波,等.秸秆还田与生物炭配施对麦-玉轮作体系产量和氮素利用率的影响[J].中国农学通报,2021,37(8):89-96.
FU M X, WU M Y, HAN B B, et al. Effects of straw returning and biochar application on yield and nitrogen use efficiency of wheat-maize rotation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(8): 89-96.

[2] 佚名.宁夏马铃薯产业发展现状分析[J].农业工程技术(农产品加工业),2009,(11):48-49.
Anon. Agricultural product processing industry[J]. Applied Engineering Technology, 2009, (11): 48-49.

[3] 夏皖豫,陈彦云,柴忠良,等.宁南山区膜下滴灌对马铃薯土壤酶活性、土壤养分及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(1):57-64.
XIA W Y, CHEN Y Y, CHAI Z L, et al. Effects of drip irrigation under mulch on soil enzyme activities, soil nutrients and yield of potatoes in Ningnan mountainous area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(1): 57-64.

[4] 巨晓棠,谷保静.我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):783-795.
JU X T, GU B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, 20(4): 783-795.

[5] JU X T, XING G X, CHEN X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(9): 3041-3046.

[6] 马文奇,张福锁,张卫锋.关乎我国资源、环境、粮食安全和可持续发展的化肥产业[J].资源科学,2005,27(3):33-40.
MA W Q, ZHANG F S, ZHANG W F. Fertilizer production and consumption and the resources, environment, food security and sustainable development in China[J]. Resources Science, 2005, 27(3): 33-40.

[7] 同延安,赵营,赵护兵,等.施氮量对冬小麦氮素吸收、转运及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(1):64-69.
TONG Y A, ZHAO Y, ZHAO H B, et al. Effect of N rates on N uptake, transformation and the yield of winter wheat [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2007, 13(1): 64-69.

[8] 蔡明,刘吉利,杨亚亚,等.施氮量对间作马铃薯植株氮素累积及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(2):142-149.
CAI M, LIU J L, YANG Y Y, et al. Effects of nitrogen application rate on nitrogen accumulation and yield of intercropping potato plants[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(2): 142-149.

[9] 久兰,孙锐锋,何佳芳,等.种植模式和氮肥形态对威芋 3 号马铃薯产量及品质的影响[J].中国马铃薯,2011,25(1):36-41.
JIU L, SUN R F, HE J F, et al. Effect of different cropping patterns and nitrogenous fertilizer forms on potato yield and quality[J]. Chinese Potato Journal, 2011, 25(1): 36-41.

[10] 杨娜娜,吴娜,刘吉利,等.间作模式对马铃薯叶片保护酶活性及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(6):138-144.
YANG N N, WU N, LIU J L, et al. Effects of different intercropping patterns on protective enzyme activities in leaves and yield of potato[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(6): 138-144.

[11] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000:164-165.
LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 164-165.

[12] 郝建军,康宗利,于洋.植物生理学实验技术[M].北京:化学工业出版社,2007:17-18.
HAO J J, KANG Z L, YU Y. Physiological experimental technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 17-18.

[13] 王晓红,韩世玉,罗泽虎,等.铜胁迫对桑树与马铃薯间作植株生理生化的影响[J].贵州农业科学,2021,49(9):14-20.
WANG X H, HAN S Y, LUO Z H, et al. Effects of mulberry intercropping with potato on plant physiology and biochemistry under Cd stress [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2021, 49(9): 14-20.

[14] 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.

[15] 陈明媛,张淑英,王梦柯,等.外源硫化氢对 NaCl 胁迫下棉花幼苗抗逆生理特性的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(2):55-61.
CHEN M Y, ZHANG S Y, WANG M K, et al. Effects of exogenous hydrogen sulfide on stress resistance physiological characteristics of cotton seedlings under NaCl stress [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(2): 55-61.

[16] 丁玉梅,马龙海,周晓罡,等.干旱胁迫下马铃薯叶片脯氨酸、丙二醛含量变化及与耐旱性的相关性分析[J].西南农业学报,2013,26(1):106-110.
DING Y M, MA L H, ZHOU X G, et al. Effects of drought stress on free proline and malonaldehyde contents in potato leaves and correlation analysis of drought-tolerant level among different varieties[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2013, 26(1): 106-110.

[17] 闫士朋,焦润安,张俊莲,等.灌溉量对马铃薯生理特性及块茎产量品质的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(3):41-51.
YAN S P, JIAO R A, ZHANG J L, et al. Influence of irrigation amount on potato physiological characteristics and tuber yield and quality[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(3): 41-51.