文章编号:1000-7601(2019)06-0138-07 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.06.20

间作模式对马铃薯叶片保护酶活性及产量的影响

杨娜娜[1],吴 娜[1],刘吉利[2],杨亚亚[1],贺锦红[1],
蔡 明[1],祁立中[1],张 佩[3]

(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;3 锦阳公学,陕西 铜川 727100)

摘 要:于 2016 年与 2017 年在宁夏南部山区开展马铃薯‖燕麦田间试验,以单作马铃薯为对照,研究了 4 种马铃薯(P)与燕麦(O)间作行数比[2∶2(P2O2),4∶2(P4O2),4∶8(P4O8)]对马铃薯叶片保护性酶活性与产量的影响。2 a 的试验结果表明,整个生育时期中 P4O8 处理的过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)显著高于其它间作处理($P<0.05$);马铃薯叶片超氧化物歧化酶(SOD)在块茎形成期最高;整个生育时期中,间作马铃薯叶片的丙二醛(MDA)高于单作($P<0.05$);与单作相比间作促进了马铃薯保护酶 POD、CAT 活性的增加。与单作相比,间作 P4O2 由于增加了商品薯数,减少了小薯数,从而显著增加了马铃薯产量($P<0.05$)。相关性分析表明,在马铃薯的整个生育时期中,POD、CAT 和 SOD 均与马铃薯产量呈正相关关系;MDA 与马铃薯产量呈负相关关系,马铃薯功能叶片膜脂过氧化程度越高,越不利于马铃薯的生长发育。马铃薯‖燕麦具有一定的优势,各间作处理土地当量比均大于 1,这说明间作比单作的资源利用效率高;其中间作群体 P4O2 土地当量比(LER)最大,为 1.21,其次是间作群体 P4O8。综合来看,在马铃薯‖燕麦生产实践中,适宜采用 4∶2(P4O2)的间作模式。

关键词:间作;马铃薯;燕麦;抗氧化酶系;产量

中图分类号:S344.2 **文献标志码**:A

Effects of different intercropping patterns on protective enzyme activities in leaves and yield of potato

YANG Nana[1], WU Na[1], LIU Jili[2], YANG Yaya[1], HE Jinhong[1],
CAI Ming[1], QI Lizhong[1], ZHANG Pei[3]

(1. *College of Agronomy*, *Ningxia University*, *Yinchuan*, *Ningxia* 750021, *China*;
2. *Research Institute of Environmental Engineering*, *Ningxia University*, *Yinchuan*, *Ningxia* 750021, *China*;
3. *Jinyang Gongxue*, *Tongchuan*, *Shaanxi* 727100, *China*)

Abstract: In the mountainous area of Southern Ningxia, a potato and oat field trial was carried out with the ratio of rows of potato (P) and oat (O) intercropping [2∶2 (P2O2), 4∶2 (P4O2), 4∶8 (P4O8)] and single potato as control to study the effect of various intercropping on protective enzyme activity of leaves and yield of potato in 2016 and 2017. The results of two years of experiments showed that P4O8 significantly increased catalase (CAT) and peroxidase (POD) over other intercropping treatments ($P<0.05$). Superoxide dismutase in potato leaves (SOD) was the highest at tuber formation stage and the malondialdehyde (MDA) in intercropped potato leaves was higher than that with monoculture during the whole growth period ($P<0.05$). Compared with monoculture, the intercropping promoted potato protective enzymes, POD and CAT, activities. Compared with the single crop, intercropping P4O2 increased the number of commercial potatoes and reduced the number of small potatoes, which significantly increased the yield ($P<0.05$). Correlation analysis showed that POD, CAT, and SOD were positively correlated with potato yield during the whole growth period of potato. The MDA was negatively correlated with potato yield. The higher the degree of membrane lipid peroxidation in potato functional leaves, the more unfavorable

收稿日期:2018-07-24 **修回日期**:2019-10-25

基金项目:国家自然科学基金(31660376);宁夏自然科学基金(2019AAC030363)

作者简介:杨娜娜(1992-),女,陕西铜川人,硕士研究生,研究方向为作物高产栽培。E-mail:ynn1115@qq.com

通信作者:刘吉利(1982-),男,山东聊城人,副研究员,博士,主要从事作物高产栽培等方面研究。E-mail:tim11082003@163.com

the growth and development of the potato. The potato glutinous oats had certain advantages, and the land equivalent ratio of each intercropping treatment was greater than 1, which indicated that the intercropping efficiency was higher than that of the single cropping. The intercropping group P4O2 had the largest land equivalent ratio (LER), which was 1.21, followed by the intercropping group P4O8. Comprehensively, in the potato-oat intercropping production practice, a 4∶2 (P4O2) intercropping mode was appropriate for the potato∶oat row ratio.

Keywords: intercropping; potato; oat; antioxidant enzyme system; yield

马铃薯营养价值很高,不仅含有大量淀粉、蛋白质,还含有丰富维生素 C[1]。马铃薯种植业是宁南山区当地农民增收和发展农村经济的特色优势产业[2];目前,该区大部分农田连作马铃薯年限超过 3 a 以上[3],连作使得用地和养地的矛盾日益突出。燕麦是长日照作物,喜凉爽湿润、忌高温干燥,在宁南山区表现出较好的生态适应性和耐旱性,是粮草兼用、轮作倒茬、培肥地力的特色作物[4]。将燕麦纳入当地耕作制度,可以缓解用地与养地的矛盾。

马铃薯间作燕麦,在一定程度上能够减少马铃薯连作的危害,减少马铃薯晚疫病的发病率,还能在一定程度上提高马铃薯及燕麦的产量。前人对于间作已经有大量的研究,例如刀静梅等[5]在甘蔗与马铃薯间作、李玉英等[6]在蚕豆与玉米间作、汤复跃等[7]在大豆与木薯间作、冯晓敏等[8]在豆科-燕麦间作、杜欣[9]在燕麦和苜蓿间作、叶优良等[10]在小麦和玉米间作等方面研究的多种种植模式已经在农业生产实践中得到广泛的推广与应用,并且达到了较优水平,但是针对马铃薯与燕麦间作行比对马铃薯生长等的影响方面少有研究,间套作体系中马铃薯与燕麦行比的不规范配置导致燕麦对马铃薯不同程度的荫蔽,直接影响到马铃薯植株对光照的吸收及其生长,并引起其生理特性的变化。而且这种不规范配置还造成马铃薯与燕麦竞争关系明显,减弱了复合群体的间套作优势。本试验针对马铃薯和燕麦的生产实际,在宁南山区开展马铃薯燕麦间作比例的研究,从而明确马铃薯与燕麦的间作行比对马铃薯叶片保护性酶活性及产量的影响,以期为宁南山区马铃薯和燕麦高产高效栽培技术提供理论依据与技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验在宁夏回族自治区海原县树台乡大嘴村(36°06′N~37°04′N,105°09′E~106°10′E)进行,位于海原县西南部。无霜期为 149~171 d,海拔高度为 2 166 m,年平均降水量 286 mm,年均气温 7℃,昼夜温差较大。该区属于宁夏中部干旱带,土壤类型为侵蚀黑垆土。土壤基本理化性质:全氮 0.319 g·kg^{-1},全磷 0.04 g·kg^{-1},碱解氮 39.946 mg·kg^{-1},速效磷 19.86 mg·kg^{-1},速效钾 24.8 mg·kg^{-1},土壤 pH 为 6.88。

1.2　试验设计

试验设置马铃薯∶燕麦行数比为 2∶2、4∶2 和宽幅带状间作 4∶8 共 3 个间作处理,以马铃薯单作(IP)为对照,分别标记为 P2O2、P4O2、P4O8、IP。采用单因素随机区组试验设计,每个小区宽 15 m、长 6 m。马铃薯采用青薯 9 号,分别于 2016 年 5 月 1 日和 2017 年 5 月 5 日起垄覆膜种植,于 2016 年 10 月 7 日和 2017 年 10 月 1 日收获,行距 50 cm,株距 30 cm。燕麦采用裸燕麦品种燕科 1 号,与马铃薯同期种植,条播,行距 25 cm,播种量 90 kg·hm^{-2}。间作处理中马铃薯与燕麦间距为 30 cm。施肥和田间管理同当地马铃薯大田生产。

施肥、喷药:全部磷肥、钾肥、氮肥于翻地前一天撒施后翻耕入土(深度 10~30 cm)。现蕾期前后进行病虫害防治,每 666.7m^2 施防病虫“克露”100 g、杀虫剂 50 mL。

供试肥料:

(1)土壤调理剂(N≥10%,SOM≥8.0%,游离脯氨酸≥3.0%)240 kg;

(2)马铃薯专用肥(N∶P∶K=21∶8∶6,N、P、K≥35%)160 kg;

(3)尿素(N≥46.4%)40 kg;二铵(N、P≥64%)10 kg。

1.3　测定指标与方法

可溶性糖含量的测定采用蒽酮法[10];丙二醛(MDA)含量的测定采用双组分光光度计法[11];超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用 NBT(氮蓝四唑)光还原法[11];过氧化氢酶(CAT)活性的测定采取紫外吸收法[11];过氧化物酶(POD)活性的测定采用愈创木酚法[12]。

1.4　收获测产

成熟采收前,每小区随机挖取 10 株马铃薯,测定每穴薯重、每穴个数、大薯数、中薯数和小薯数以

及商品薯数与重量(大、中、小薯标准为:大薯≥150 g,150 g>中薯>75 g,小薯≤75 g,商品薯>75 g),并分析其间作优势。间作优势用土地当量比(*LER*)来衡量。

$$LER = \frac{Y_{ip}}{Y_{sp}} + \frac{Y_{io}}{Y_{so}}$$

式中,Y_{ip} 和 Y_{io} 分别代表间作中马铃薯和燕麦的产量;Y_{sp} 和 Y_{so} 分别代表单作马铃薯和单作燕麦的产量。当 $LER > 1$,表明间作比单作的资源利用效率高;当 $LER < 1$,表明单作比间作能更有效利用资源。

种间相对竞争力(A)是衡量一种作物相对另一种作物的资源竞争能力大小的指标[13],本文表示马铃薯相对燕麦的竞争能力 A_{po},计算公式:

$$A_{po} = \frac{Y_{ip}}{Y_{sp} \times P_p} - \frac{Y_{io}}{Y_{so} \times P_o}$$

式中,A_{po} 为马铃薯相对于燕麦的资源竞争力,Y_{ip} 和 Y_{io} 为分别代表间作马铃薯和燕麦的产量,Y_{sp} 和 Y_{so} 分别代表单作马铃薯和燕麦的产量,P_p 和 P_o 分别为间作中马铃薯和燕麦所占的土地面积比例。当 $A_{po} > 0$ 表示马铃薯对资源的竞争力大于燕麦;$A_{po} < 0$,表示马铃薯对资源的竞争力小于燕麦。

1.5 数据分析

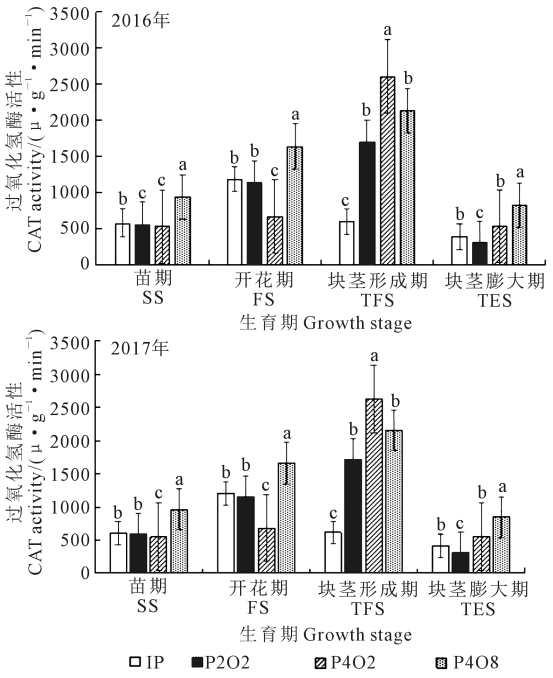
采用 SPSS 17.0(SPSS.Inc.,USA)软件统计分析试验数据,其它分析在 Microsoft Excel 中完成。

2 结果与分析

2.1 马铃薯‖燕麦对马铃薯功能叶片保护酶活性的影响

2.1.1 *马铃薯‖燕麦对马铃薯功能叶片过氧化氢酶(CAT)活性的影响* 由图 1 可知,2016 年与 2017 年的叶片过氧化氢酶随生育期变化趋势是一致的。从苗期至块茎形成期,马铃薯功能叶片过氧化氢酶活性均呈上升趋势,在块茎膨大期显著下降。在块茎形成期各间作处理马铃薯功能叶片过氧化氢酶的活性最大,其中 P4O2 处理分别比 IP、P2O2、P4O8 增加 76.4%、20.6%、17.7%,差异显著($P<0.05$)。块茎膨大期马铃薯功能叶片过氧化氢酶的活性最小,其中间作处理 P4O8 最大,分别比 IP、P2O2、P4O2 增加 72.9%、90.0%、69.2%,马铃薯P2O2的过氧化氢酶(CAT)活性最小,并与其它处理之间差异显著($P<0.05$)。

2.1.2 *马铃薯燕麦间作对马铃薯功能叶片过氧化物酶(POD)活性的影响* 由图 2 可知,2016 年与 2017 年的叶片过氧化物酶活性随生育期变化趋势基



注:不同字母表示同一生育期不同处理间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different letters indicate significant different ($P<0.05$) among treatments of the same growth stage, the same below.

图 1 间作对不同生育时期马铃薯叶片过氧化氢酶(CAT)活性的影响

Fig.1 Effects of intercropping on catalase activity in potato leaves at different growth stages

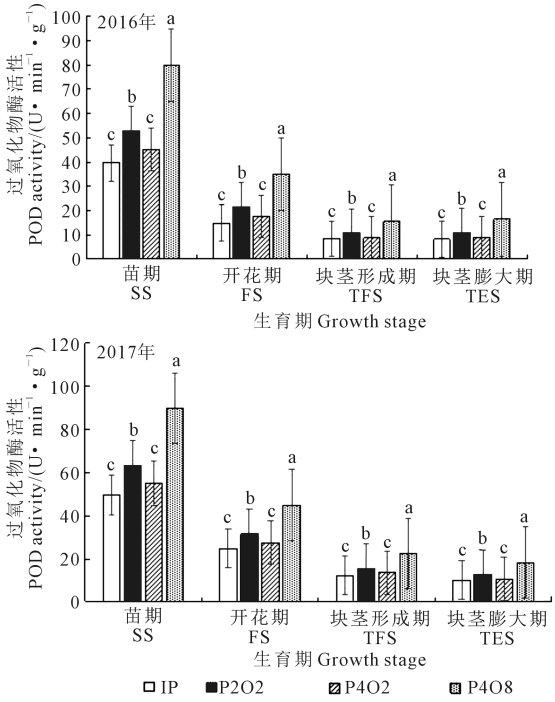


图 2 间作对不同生育时期马铃薯叶片过氧化物酶(POD)活性的影响

Fig.2 Effect of intercropping on peroxidase (POD) activity of potato leaves at different growth stages

本保持一致。从苗期至块茎膨大期,马铃薯功能叶片过氧化物酶活性呈显著下降趋势。苗期马铃薯功能叶片过氧化物酶(POD)活性最高,其中 P4O8 处理最大,并与同时期其它 3 个处理差异显著($P<0.05$),分别比单作马铃薯、P2O2、P4O2 增加 44.69%、29.88%、38.76%;块茎膨大期马铃薯功能叶片过氧化物酶活性最小,其中 P4O8 最高,并与其它 3 个处理呈显著性差异($P<0.05$),分别比单作马铃薯、P2O2、P4O2 增加 44.61%、30.14%、40.98%。

2.1.3　马铃薯‖燕麦对马铃薯功能叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响　由图 3 可以看出,2016 年与 2017 年叶片超氧化物歧化酶随生育期变化的趋势一致。随着马铃薯生育时期的推进,超氧化物歧化酶活性呈现先上升后下降的趋势,块茎形成期马铃薯功能叶片超氧化物歧化酶活性最高,其中单作马铃薯最大,并与其它 3 个处理呈显著性差异($P<0.05$),分别比 P2O2、P4O2、P4O8 增加54.74%、21.59%、51.33%;块茎膨大期马铃薯功能叶片超氧化物歧化酶活性(SOD)最小,其中单作马铃薯最高,并与其它 3 个处理呈显著性差异($P<0.05$),分别比 P2O2、P4O2、P4O8 增加 0.35%、37.98%、13.25%。

2.2　马铃薯‖燕麦对马铃薯功能叶片丙二醛(MDA)含量的影响

由图 4 可知,2016 年与 2017 年的叶片丙二醛含量随生育期变化趋势是一致的。随着马铃薯生育时期的推进,丙二醛含量呈现先上升后下降的趋势,开花期马铃薯功能叶片中丙二醛(MDA)的含量最高,其中 P4O2 处理含量最大,并与其它两个处理呈显著性差异($P<0.05$),分别比单作马铃薯、P2O2、P4O8 增加 13.80%、17.37%、7.53%;苗期马铃薯功能叶片中丙二醛(MDA)含量最小,其中单作马铃薯含量最高,并与其它 3 个处理呈显著性差异($P<0.05$),分别比 P2O2、P4O2、P4O8 增加 28.71%、38.66%、7.23%。

2.3　马铃薯‖燕麦对马铃薯产量及土地当量比影响

2.3.1　马铃薯‖燕麦对马铃薯土地当量比的影响　由表 1 可以看出,2017 年马铃薯与燕麦间作群体中,马铃薯 P4O2 的产量最高,达到 2 772.12 kg·666.7m^{-2},单作马铃薯的产量最低,是 2 524.12 kg·666.7m^{-2};燕麦P2O2的产量最低,为 38.81 kg·666.7 m^{-2}。马铃薯和燕麦间作具有一定的优势,各间作处理土地当量比均大于 1,这说明间作比单作的资源利用效率高;其中间作群体 P4O2 土地当量比(LER)最大,为 1.21;其次是间作群体 P4O8,为 1.12;间作群体 P2O2 的最小,为 1.09。间作群体 P2O2、P4O2、P4O8 间相对竞争力(A_{po})分别为 -0.16、-0.05、-0.23,3 种间作方式种间相对竞争力(A_{po})<1,说明马铃薯对资源的竞争力小于燕麦。由此可见,适当减少燕麦行数或增加马铃薯行数有利于增加间作优势,提高种间竞争力。

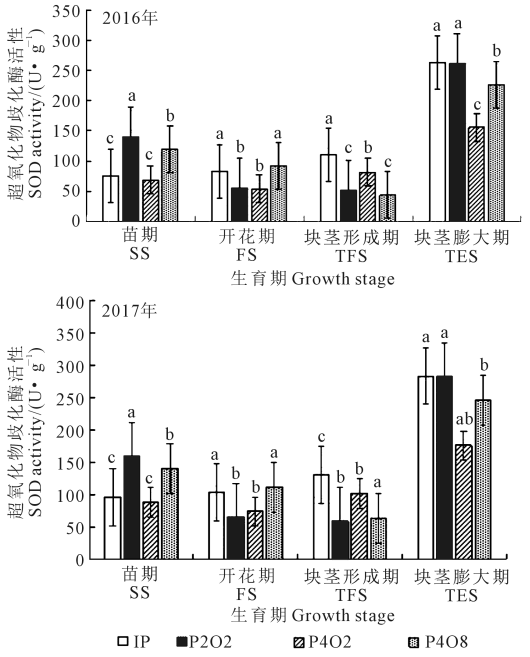


图 3　间作对不同生育时期马铃薯叶片超氧化物歧化酶(SOD)的影响

Fig.3　Effects of intercropping on superoxide dismutase (SOD) in potato leaves at different growth stages

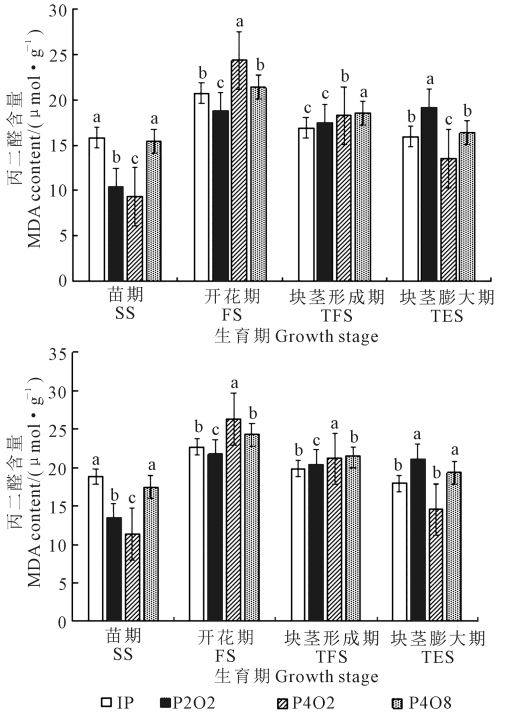


图 4　间作对不同生育时期马铃薯叶片丙二醛(MDA)含量的影响

Fig.4　Effect on malondialdehyde (MDA) cotent in potato leaves at different growth stages

2.3.2 马铃薯燕麦间作对马铃薯产量构成因素的影响 由表 2 可以看出,2016 年与 2017 年各处理马铃薯产量构成指标表现基本保持一致。2017 年,单作马铃薯每穴薯块数最多达到 9.76 个,比 P2O2、P4O8 处理下马铃薯分别高 18.02%, 25.61%,各处理间差异显著;大薯数在 P4O2 处理下最多,为每穴 4.87 个,比 P4O8 处理下马铃薯高 9.93%,两处理间差异显著,而单作马铃薯的大薯数最少,为每穴 4.34 个;中薯数在 P4O2 处理下达到最大,为每穴 2.53 个,比单作马铃薯、P2O2、P4O8 处理下马铃薯分别高 68.67%、68.67%、15.00%,各处理间差异显著;单作马铃薯的小薯数最多,每穴为 2.4 个,P4O2 处理下小薯数最少,每穴为 1.4 个;商品薯在 P4O2 下达到最多,每穴为 7.2 个,比单作马铃薯、P2O2、P4O8 处理下马铃薯分别高 26.32%、16.13%、33.33%,各处理间差异显著;所以大薯率、中薯率、小薯率、商品薯率分别在单作马铃薯、P4O2、单作马铃薯、P4O2 达到最大;单产在间作 P4O2 达到最大,为 2 772.12 kg · 666.7m^{-2},在单作马铃薯处理下最少,为 2 524.12 kg · 666.7m^{-2}。综上可知,与间作相比,单作马铃薯由于降低了商品薯数,增加了小薯个数,从而显著降低了产量。

2.3.3 马铃薯功能叶片抗氧化酶活性与产量的相关性分析 由表 3 可以看出,2016 年与 2017 年表现基本是一致的。随着生育期的推进,马铃薯的产量与抗氧化酶活性具有相关性。在马铃薯整个生育期内,POD、CAT 和 SOD 均与马铃薯产量呈正相关关系,说明马铃薯功能叶片的 POD、CAT 和 SOD 抗氧化酶活性越高,越有利于马铃薯植株的生长,能更有效缓解植株的衰老,提高马铃薯产量。

表 1 间作模式下马铃薯与燕麦产量及其产量优势

Table 1 The potato and oat yields and its yield dominance under intercropping pattern

年份 Year	处理 Treatment	马铃薯产量 Potato yield /(kg · 666.7m^{-2})	燕麦产量 Oat yield /(kg · 666.7m^{-2})	LER	A_{po}
2016	IP	2478.35±32.46c	–	1.00	–
	P2O2	2528.4±21.41bc	35.69±18.12c	1.03	−0.12
	P4O2	2687.31±29.11a	41.45±22.61b	1.11	−0.04
	P4O8	2597.88±52.34ab	38.21±29.99ab	1.05	−0.19
2017	IP	2524.12±54.75c	–	1.00	–
	P2O2	2559.4±17.39bc	38.81±20.41c	1.09	−0.16
	P4O2	2772.12±26.07a	42.16±24.58b	1.21	−0.05
	P4O8	2693.51±46.98ab	43.04±38.97ab	1.12	−0.23

注:同列不同字母表示同一年份处理间差异显著(P<0.05)。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference among treatments of the same year (P<0.05).

表 2 间作模式下马铃薯产量及其构成

Table 2 The potato yield and its composition under intercropping pattern

年份 Year	产量及构成 Yield and its composition	IP	P2O2	P4O2	P4O8
2016	每穴薯块数 Number of tubers per hole/(No. · hole^{-1})	8.34±2.12a	7.99±2.19b	8.49±4.09b	7.31±2.07c
	大薯数 Number of large potatoes/(No. · hole^{-1})	3.25±2.61ab	3.76±1.36ab	4.32±2.14a	3.13±0.99b
	中薯数 Number of medium potatoes/(No. · hole^{-1})	1.7±0.92c	1.67±1.53c	2.33±1.08a	1.98±0.97b
	小薯数 Number of small potatoes/(No. · hole^{-1})	2.9±2.01a	1.6±1.97b	1.32±1.58c	2.46±1.89a
	商品薯 Commercial potato/(No. · hole^{-1})	5.9±3.31c	6.6±1.45b	7.5±3.42a	5.1±2.57c
	大薯率 Large potato rate	0.56±0.09b	0.59±0.13a	0.58±0.06a	0.59±0.16a
	中薯率 Medium potato rate	0.21±0.02b	0.19±0.03b	0.25±0.09a	0.16±0.04c
	小薯率 Small potato rate	0.25±0.02b	0.24±0.05b	0.17±0.06c	0.29±0.06a
	商品薯率 Commercial potato rate	0.76±0.21bc	0.78±0.16b	0.82±0.18a	0.69±0.34c
	单产/(kg · 666.7m^{-2})	2497.23±34.23c	2534.4±15.64b	2769.12±23.48a	2657.51±56.05ab
2017	每穴薯块数 Number of tubers per hole/(No. · hole^{-1})	9.76±3.35a	8.27±2.91b	8.63±4.04ab	7.77±2.25c
	大薯数 Number of large potatoes/(No. · hole^{-1})	4.34±2.46ab	4.67±1.62ab	4.87±2.36a	4.43±1.11b
	中薯数 Number of medium potatoes/(No. · hole^{-1})	1.5±1.17c	1.5±1.25c	2.53±1.99a	2.2±1.11b
	小薯数 Number of small potatoes/(No. · hole^{-1})	2.4±1.75a	1.7±2.01b	1.4±1.65c	2.37±2.16a
	商品薯 Commercial potato/(No. · hole^{-1})	5.7±2.58c	6.2±1.83b	7.2±3.63a	5.4±2.16c
	大薯率 Large potato rate	0.54±0.11b	0.57±0.14a	0.57±0.05a	0.57±0.21a
	中薯率 Medium potato rate	0.18±0.03b	0.18±0.05b	0.26±0.13a	0.13±0.09c
	小薯率 Large potato rate	0.23±0.06b	0.21±0.03b	0.16±0.09c	0.31±0.01a
	商品薯率 Commercial potato rate	0.74±0.18bc	0.79±0.17b	0.84±0.20a	0.71±0.22c
	单产/(kg · 666.7m^{-2})	2524.12±54.75c	2559.4±17.39b	2772.12±26.07a	2693.51±46.98ab

注:同行不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

Note: Different letters in the same line indicate significant difference among treatments (P<0.05).

表 3　马铃薯叶片保护酶活性与产量的相关系数

Table 3　Correlation coefficient between potato yield and protective enzyme activities of leaves at different growth stages

生育时期 Growth stage	各因子 Faetor	2016					2017				
		马铃薯产量 Potato yield	MDA	SOD	CAT	POD	马铃薯产量 Potato yield	MDA	SOD	CAT	POD
苗期 Seedling stage	马铃薯产量 Potato yield	1					1				
	MDA	−0.643	1				−0.549	1			
	SOD	0.121	0.019	1			0.282	0.022	1		
	CAT	0.195	0.36	0.383	1		0.206	0.52	0.406	1	
	POD	0.197	0.121	0.538*	0.936**	1	0.313	0.23	0.609*	0.936**	1
开花期 Flower stage	马铃薯产量 Potato yield	1					1				
	MDA	0.869**	1				0.941**	1			
	SOD	0.047	0.06	1			0.058	0.06	1		
	CAT	0.238	0.389	0.688*	1		0.294	0.402	0.721**	1	
	POD	0.297	0.065	0.324	0.603	1	0.313	0.087	0.458*	0.774**	1
块茎形成期 Tuber formation stage	马铃薯产量 Potato yield	1					1				
	MDA	0.736**	1				0.894**	1			
	SOD	0.15	−0.834	1			0.17	−0.527	1		
	CAT	0.831**	0.825**	0.601*	1		0.911**	0.906**	−0.512	1	
	POD	0.297	0.654*	−0.86	0.355	1	0.313	0.699*	−0.74	0.412*	1
块茎膨大期 Tuber enlargement stage	马铃薯产量 Potato yield	1					1				
	MDA	−0.703	1				−0.651	1			
	SOD	0.821**	0.765	1			0.943**	0.838**	1		
	CAT	0.523*	−0.251	−0.407	1		0.633*	−0.168	−0.395	1	
	POD	0.215	0.409*	0.057	0.697*	1	0.266	0.455*	0.069	0.783**	1

随着马铃薯块茎的膨大和淀粉的积累,马铃薯功能叶片中 MDA 含量与产量呈负相关关系,说明 MDA 含量越高,马铃薯功能叶片膜脂过氧化程度越高,不利于马铃薯的生长发育。

3　讨　论

合理的间套作能够在一定程度上将不同的作物集中在一起,在时间和空间上达到一种集约化的种植效果。本研究表明,在马铃薯 ‖ 燕麦体系中,由于作物高低不等,受热受光不均,导致两种作物在生长过程中存在光热资源的竞争。

过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)是活性氧清除系统的重要保护酶,它们活性的高低反映了细胞清除活性氧的能力[14]。本研究结果表明,在整个生育时期中P4O8处理的 CAT、POD 活性显著高于其它间作处理;从苗期至块茎形成期,马铃薯功能叶片 CAT 活性均呈上升趋势,在块茎膨大期显著下降。焦志丽[15]在干旱胁迫下对马铃薯的研究中发现,过氧化物酶始终高于单作,与本研究间作系统中马铃薯的功能叶片 POD 活性始终大于单作研究结果基本一致。本研究还发现,随着马铃薯生育时期的推进,SOD 活性呈现先上升后下降的趋势,块茎形成期马铃薯功能叶片 SOD 活性最高,在块茎膨大期马铃薯功能叶片 SOD 活性最低。姚远[16]、邓仁菊[17]在马铃薯持续干旱方面研究发现,青薯 9 号叶片的 SOD 和 POD 活性呈逐渐增加趋势,且始终高于对照,随干旱胁迫加剧,这两种酶的活性随持续时间延长呈先增加后降低趋势,这与本研究结果基本一致。本研究结果表明,随着马铃薯生育时期的推进,丙二醛(MDA)含量呈现先上升后下降的趋势,这与黄坚雄[18]在胶园和豆薯上的研究结果基本一致。本试验中间作 P4O2 处理比 P2O2 处理增加了 2 行马铃薯,使燕麦对马铃薯的荫蔽程度减弱,马铃薯叶片的 POD、SOD、MDA 显著低于 P2O2。P4O8 处理比间作处理 P4O2、P2O2 增加了 6 行燕麦,使燕麦对马铃薯的荫蔽程度加强,马铃薯体内的活性氧积累,从而使其叶片 CAT、POD 活性在整个生育时期显著高于其它间作处理,而相应的 MDA 含量也相应增加,这两种保护酶活性协同可以减少燕麦对马铃薯的荫蔽,以维持马铃薯的正常生长。

马铃薯和燕麦的不同行比不仅改变了马铃薯叶片的保护酶活性,还显著增加了马铃薯的产量。蚕豆间作玉米,分别较单作增加了籽粒产量[19],陈光荣[20]在西北灌区对马铃薯套作大豆的研究表明,间作单位面积产量高于单作。在本试验中,马铃薯与燕麦间作提高了马铃薯单作产量,说明间作具有产量优势,间套作系统能够提高系统生产力。P4O2

处理由于增加了 2 行马铃薯,使马铃薯产量显著高于其它间作处理,土地当量比也比较高,显示了较强的间作优势;这与黄承建等[21]在马铃薯/玉米不同行比套作对马铃薯生理特性和群体产量的影响的研究结论基本一致。由于 P4O8 处理也增加了燕麦行数,抑制马铃薯的生长和产量,因此在马铃薯‖燕麦模式中应适当增加马铃薯行数或减少燕麦行数,有利于增加间作优势。本试验中各间作处理土地当量比均大于 1,表明马铃薯与燕麦适合间作,两者之间的互利作用大于竞争作用,其间作比单作的资源利用效率高,表现出产量优势。

通过马铃薯产量与生理指标的相关分析结果可知,CAT、SOD 和 POD 与马铃薯产量呈正相关关系,这与白健慧[22]在燕麦对盐碱胁迫的生理响应机制研究基本一致。本研究结果表明马铃薯过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)活性越高,越有利于马铃薯功能叶片的生长,POD、CAT 和 SOD 协同发挥抗氧化作用降低膜脂过氧化伤害,从而更加有效地延缓马铃薯的衰老,进一步提高了马铃薯的产量,这与刘天学等[23]研究结果相一致。通过马铃薯产量与生理指标的相关分析结果可知,MDA 与马铃薯产量呈负相关关系,这与白健慧[22]在燕麦对盐碱胁迫的生理响应机制研究基本一致,本研究结果表明 MDA 含量越高,马铃薯功能叶片膜脂过氧化程度越高,越不利于马铃薯的生长发育以及产量的生成。

4 结 论

通过 2 a 的数据分析发现,马铃薯与燕麦间作在生理特性方面表现出较强的竞争优势,马铃薯与燕麦间作具有产量优势,马铃薯的种间资源竞争力弱于燕麦;3 个间作模式下,土地当量比(LER)均大于 1,表明间作比单作的资源利用率高,马铃薯‖燕麦模式在 P4O2 处理土地当量比最大,其次为 P4O8 处理,再次为 P2O2 处理,说明马铃薯行数比越大,当量比就越大,对于产量而言,间作模式下增加马铃薯的间作行比能提高马铃薯的产量。在马铃薯‖燕麦生产实践中,在宁南山区适宜采用 4∶2(P4O2)的间作模式。

参 考 文 献:

[1] 景博,张成军,陆萍,等.宁夏南部山区近 10 年气候变化分析[J].江西农业学报,2011,23(4):139-143.

[2] 何文寿,马琨,代晓华,等.宁夏马铃薯氮、磷、钾养分的吸收累积特征[J].植物营养与肥料学报,2014,20(6):1477-1487.

[3] 汪春明.马铃薯连作栽培与间作调控对根际土壤的影响[D].银川:宁夏大学,2014.

[4] 杜燕萍,马均伊,常克勤,等.宁夏南部山区裸燕麦丰产栽培技术[J].内蒙古农业科技,2008,(1):103-104.

[5] 刀静梅,刘少春,樊仙,等.甘蔗间种马铃薯对产量和综合效益的影响[J].中国糖料,2013,(3):18-20.

[6] 李玉英,余常兵,孙建好,等.蚕豆-玉米间作系统经济生态施氮量及对氮素环境承受力[J].农业工程学报,2008,24(3):223-227.

[7] 汤复跃,陈渊,梁江,等.大豆、木薯播期对间作大豆产量和主要农艺性状的影响[J].大豆科学,2012,31(3):395-398.

[8] 冯晓敏,杨永,任长忠,等.豆科–燕麦间作对作物光合特性及籽粒产量的影响[J].作物学报,2015,41(9):1426-1434.

[9] 杜欣,张越利,杨云贵.燕麦与苜蓿混间条播模式对产量和品质的影响[J].河南农业科学,2011,40(9):146-149.

[10] 叶优良,孙建好,李隆,等.小麦-玉米间作根系相互作用对氮素吸收和土壤硝态氮含量的影响[J].农业工程报,2005,21(11):33-37.

[11] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2007:159-165.

[12] 李玲.植物生理学模块试验指导[M].北京:科学出版社,2009.

[13] Willey R W, Rao M R. A competitive ratio for quantifying competition between intercrops [J]. Experimental Agriculture, 1980, 16(2):117-125.

[14] Stepien P, Klobus G. Antioxidant defense in the leaves of C_3 and C_4 plants under salinity stress [J]. Plant Physiology, 2005, 12(5): 31-40.

[15] 焦志丽,李勇,吕典秋,等.不同程度干旱胁迫对马铃薯幼苗生长和生理特性的影响[J].中国马铃薯,2011,25(6):329-333.

[16] 姚远.花生玉米不同间作方式对连作花生生理特性及产量品质的影响[D].泰安:山东农业大学,2017:221-223.

[17] 邓仁菊,鲁扬,曾宪浩,等.持续干旱胁迫对青薯 9 号幼苗生长及生理特性的影响[J].西南农业学报,2017,2(30):291-295.

[18] 黄坚雄,潘建,周立军.全周期间作模式胶园内间作豆薯的产量及其抗逆生理的特征[J].热带作物学报,2015,4(36):639-644.

[19] Li L, Sun J H, Zhang F S. Wheat/maize or wheat/soybean styip intercropping: I. Yeild advantage and interspecific interactions on nutrients[J]. Field Crops Research, 2001, 71(2):123-137.

[20] 陈光荣,张国宏,王立明,等.西北沿黄灌区不同作物间套作大豆产出效果分析[J].大豆科学,2013,32(5):614-619.

[21] 黄承建,赵思毅,王季春,等.马铃薯/玉米不同行比套作对马铃薯生理特性和群体产量的影响[J].作物学报,2013,22(6):117-128.

[22] 白健慧.燕麦对盐碱胁迫的生理响应机制研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.

[23] 刘天学,李潮海,马新明,等.不同基因型玉米间作对叶片衰老、籽粒产量和品质的影响[J].植物生态学报,2008,32(4):914-921.