



薯-豆套作模式下作物对种间竞争与补偿作用的响应

陈光荣¹, 王立明¹, 杨如萍¹, 张国宏¹, 杨文钰², 杨桂芳³

(1. 甘肃省农业科学院 旱地农业研究所/农业部西北作物抗旱栽培与耕作重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 2. 四川农业大学 农学院/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 甘肃 成都 611130; 3. 甘肃环科雅农业科技有限公司, 甘肃 兰州 730070)

摘要:以马铃薯-大豆套作模式为研究对象,通过2年的大田试验,分析不同熟期大豆品种与马铃薯组合后系统内作物干物质和养分积累的特性与种间竞争补偿的相互关系,阐明间套作系统种间竞争力弱化和恢复补偿能力提高的作用机理,为实现间套作可持续发展提供科学依据。结果表明:套作马铃薯干物质及养分积累无显著变化,而套作大豆变化显著。出苗60 d内套作大豆干物质积累量是同期单作的43.74%,出苗后80~100 d,晚熟品种干物质积累量相对于中熟和早熟提高的幅度分别为35.54%~59.22%和65.56%~70.81%,大豆收获时,晚熟品种干物质积累接近单作,两者间差异不显著。共生期,套作大豆N、P、K积累量较同期单作降低的幅度分别为31.43%~41.44%、21.17%~25.36%和23.23%~35.6%,晚熟品种与中熟、早熟品种间差异达到显著水平。共生期结束后,套作大豆养分吸收量较单作显著增加,收获时,晚熟品种N、P、K养分积累量接近单作,两者间差异不显著。综上,在该群体中,马铃薯是核心作物,共生期处于竞争优势($A_{ps} > 0$, $CR_{ps} > 0$),而大豆处于竞争弱势($A_{ps} < 0$, $CR_{ps} < 0$),选择晚熟大豆品种与马铃薯组合可弱化种间竞争力和营养竞争比率,还有利于马铃薯收获后恢复补偿能力的发挥。

关键词:薯-豆套作;种间竞争;补偿效应;西北灌区

Interspecies Competition and Compensation Response in Potato-Soybean Relay-Cropping System Under Different Soybean Varieties

CHEN Guang-rong¹, WANG Li-ming¹, YANG Ru-ping¹, ZHANG Guo-hong¹, YANG Wen-yu², YANG Gui-fang³

(1. Institute of Dryland Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Northwest Drought Crop Cultivation of Chinese Ministry of Agriculture, Lanzhou 730070, China; 2. College of Agriculture, Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest China, Ministry of Agriculture, Chengdu 611130, China; 3. China Gansu Central Keya Green Agriculture Technology Ltd, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Taking the potato and soybean relay-cropping system as study object, two years experiment was carried out in Gansu irrigation districts. The study was aiming at investigating the characteristics of crop growth and nutrient absorption, determining dry matter accumulation, nutrient accumulation characteristics, interspecific competition dynamics and niche differentiation characteristics, clarifying the resources saving mechanism of intercropping. The results showed that there was no significant difference of dry matter and nutrient accumulation between intercropped potato and sole potato, but there was significant difference between intercropped soybean and sole soybean. Dry matter accumulation of inter-soybean relative to sole soybean was decreased by 43.74% at 60 d after soybean sowing, but there was no significant difference between different soybean varieties. Dry matter accumulation of late maturing variety was 35.54% - 59.22% and 65.56% - 70.81% higher than those under medium maturing and early maturing varieties at 80 - 100 d after soybean sowing, respectively. When the potato had been harvested, the dry matter accumulation of soybean in all intercropping systems increased, especially late maturing varieties, which became much closer to sole cropping, and there was significant difference between different soybean varieties. During the co-growth period, there was significant difference of Nutrient N, P and K accumulation between late maturing variety and medium and early maturing variety. Nutrient N, P and K accumulation of inter-soybean relative to sole soybean was decreased by 31.43% - 41.44%, 21.17% - 25.36% and 23.23% - 35.6%, respectively. After potato harvest, Nutrient N, P and K accumulation of soybean in all intercropping systems increased, especially late maturing varieties, which became much closer to sole cropping, and there was significant difference between different soybean varieties. Therefore, in potato-soybean relay-cropping system, the values of A and CR indicated that the potato was more competitive than soybean, late maturing variety was better than early maturing and medium maturing varieties to intercrop with potato, the interspecific competition in using resources was been weakened during the co-growth period, and it was beneficial to the compensation effect of soybean during the period after potato harvest.

Keywords: Potato-Soybean relay-cropping; Interspecies competition; Compensation effect; Northwest irrigation districts

在自然生态系统中,物种间的相互作用揭示了不同物种共存的主要机制,有利于自然生态的可持续发展,如果将这种生态学原理引入农田生态系统,对系统内作物高产和资源的高效利用发挥重要

收稿日期:2018-12-04

基金项目:甘肃省农业科学院科技支撑计划(2017GAAS47);国家自然科学基金(31660134);国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-04-CES17)。

第一作者简介:陈光荣(1980-),男,博士,副研究员,主要从事大豆新品种选育及作物高产高效栽培理论与技术研究。E-mail:chengr516@163.com。

作用^[1]。通过不同生育期、植物形态和资源利用特性的作物或品种组合配置,构建具有生态优化效应的间套作复合群体,能充分地利用时间生态位分离、空间生态位互补及种间促进作用来提高对光、热、水、肥等资源的高效利用,实现更优的生态效益和经济效益^[2]。

种间促进作用存在于某些特定的作物和特定的条件下,但种间竞争是普遍存在的^[3]。种间竞争主要表现在共生期对光、二氧化碳、水分、养分及生长空间的竞争^[4]。根据界面生态学原理,可分为地上和地下 2 个竞争界面,一个是以空气为介质,作物间竞争光、热、水的地上界面,另一个是以土壤为介质,作物根系间竞争养分和水分的地下界面^[5]。种间竞争中地上界面和地下界面的竞争同时发生,但不是两者的简单相加,实际存在着不同程度的交互作用^[6]。尽管共生期作物种间竞争相对比较激烈,但部分间套作模式可以通过时间生态位互补实现最终的系统生产力优势^[7-9]。李隆等^[10-11]研究玉米/小麦间套作模式时发现,小麦在共生期处于竞争优势,使间套作玉米氮、磷、钾吸收量及生物学产量显著低于单作。当小麦成熟后,玉米所受的抑制作用消失,并出现了快速生长现象,光、热、水及养分得到充分补偿,养分吸收量和生物产量在收获时接近单作,甚至超过单作。

以往有关马铃薯-大豆套作模式的研究主要集中在品种组合、行穴配置及平衡施肥等栽培因子

方面,或是该模式下弱势作物光合指标、干物质及产量构成因素的变化特征方面^[9,12]。关于马铃薯-大豆套作模式下作物对种间竞争与补偿作用的响应还未见报道。据此,本研究在甘肃沿黄灌区开展 2 年田间试验,通过分析间套作作物株高、叶面积、干物质及养分积累的动态变化特征与种间竞争与补偿作用的相关关系,研究分析不同熟期大豆品种与马铃薯间套作对种间竞争与补偿作用的响应,以期优化种间关系,为提高间套作资源利用率提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

马铃薯[*Solanum tubersum* L.]选用早熟品种克新 4 号,大豆[*Glycine max* (L.) Merrill]选用早、中、晚熟品种中黄 30(早熟)、冀豆 17(中熟)和齐黄 34(晚熟)。

1.2 试验地概况

试验于 2012-2013 年进行。试验设置在国家产业体系兰州大豆综合试验站基地,地处 N35°37'、E105°13',海拔 1 594 m,年平均气温 7.9℃,年均无霜期 156 d,年日照时数 2 741.5 h,年太阳辐射总量为 5 968 MJ·m⁻²,年均降雨量 332.6 mm,年均蒸发量 1 800 mm,≥10℃的有效积温 3 244℃。属于黄土高原丘陵沟壑区,温带季风性气候。土壤类型为灌淤土,0~20 cm 耕层土壤基础肥力见表 1。

表 1 前茬耕层土壤(0~20 cm)基本理化性质

Table 1 Soil physic-chemical (0-20 cm depth) properties before the experiment

年份 Year	有机质 OM/ g·kg ⁻¹	全氮 Total N/ g·kg ⁻¹	全磷 Total P/ g·kg ⁻¹	全钾 Total K/ g·kg ⁻¹	碱解氮 Available N/ mg·kg ⁻¹	有效磷 Olsen P / mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/ mg·kg ⁻¹	pH
2012	11.17	1.43	1.24	12.47	59.54	13.79	149.24	7.96
2013	14.04	1.13	1.42	14.21	62.47	19.82	164.27	7.84

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计,3 次重复,3 个大豆品种单作及分别与马铃薯套作,分别为中黄 30 单作(SPZ),冀豆 17 单作(SPJ),齐黄 34 单作(SPQ),中黄 30 套作(IPZ),冀豆 17 套作(IPJ)和齐黄 34 套作(IPQ),另设马铃薯单作(SP)。套作种植带幅 150 cm,100 cm 起垄覆膜种植 2 行马铃薯,50 cm 平种 2 行大豆;马铃薯单作带幅与套作一致,大豆带不种植作物;大豆单作为平地种植^[9]。2012 和 2013 年马铃薯播种期均为 3 月 20 日,大豆播种期分别为 4 月 18 日和 4 月 15 日。套作模式氮、磷、钾肥施用量分别为 225,150 和 180 mg·hm⁻²;单作马铃薯氮、磷、钾肥施用量分别为 180,90 和 120 mg·hm⁻²;单作大

豆氮、磷、钾肥施用量分别为 45,60 和 60 mg·hm⁻²。肥料选用尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)和硫酸钾(K₂O 50%)。其中,N 50%,K₂O 70%,P₂O₅ 100%,作为基肥;N 50%,K₂O 30%作为花期追肥。整个生长季节共灌水 4 次且每次灌水量为 1 200~1 300 m³·hm⁻²,其它栽培管理同当地大田生产。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 株高、叶面积指数及干物质 自大豆出苗后 20 d 开始取样,参照陈光荣^[9]方法测定。

1.4.2 籽粒和秸秆养分测定 采用 H₂O₄-H₂O₂ 湿灰化法煮沸,凯氏定氮仪测定氮;钼钼黄显色,岛津 UV-120 分光光度计比色测定磷;火焰光度计测定钾^[13]。

1.4.3 土地当量比(Land equivalent ratio, LER)
土地当量比 LER 参照 Saddam Aref Al-Dalain 的方法^[14-15]计算。

1.4.4 种间竞争相关指标

(1)种间相对竞争力(A)

$$A_{PS} = Y_{IP}/(Y_{MP} \times F_{IP}) - Y_{IS}/(Y_{MS} \times F_{IS})$$

式中, A_{PS} 为马铃薯相对于大豆的资源竞争力, F_{IP} 和 F_{IS} 分别为套作中马铃薯和大豆所占的面积比例(%); Y_{IP} 和 Y_{IS} 分别表示套作马铃薯和套作大豆产量或生物量($mg \cdot hm^{-2}$); Y_{MP} 和 Y_{MS} 分别表示单作马铃薯和单作大豆产量或生物量($mg \cdot hm^{-2}$)^[16-17]。

(2)间套作中养分竞争比率(CR)

$$CR_{PS-P} = (PU_{IP}/PU_{MP}) \times F_{IP}/(PU_{IS}/PU_{MS}) \times F_{IS}$$

以 P 元素为例, CR_{PS-P} 为马铃薯相对于大豆的磷素竞争力, PU_{IP} 和 PU_{IS} 分别为马铃薯和大豆在套作中磷的吸收量($g \cdot 株^{-1}$), F_{IP} 和 F_{IS} 分别为套作中马铃薯和大豆所占的面积比例(%); PU_{IP} 和 PU_{IS} 分别表示马

铃薯和大豆在单作中磷的吸收量($g \cdot 株^{-1}$)。

1.5 数据处理

试验数据均用 Excel 2007 和 DPS 7.05 统计软件进行试验数据汇总与统计分析。

2 结果与分析

2.1 作物生长对种间竞争补偿的响应

2.1.1 作物生育期结构 由表 2 可知,2 年套作马铃薯生育期结构较单作无显著变化,套作大豆开花期较单作延迟 5.7 d,但对全生育期影响不大,说明套作使大豆营养生长期延长而生殖生长期相对缩短。从马铃薯与大豆的共生期分析(套作大豆苗期至套作马铃薯成熟期),3 个不同熟期大豆品种间无显著差异,但从马铃薯与大豆的生殖生长共生期分析(套作大豆始花期至套作马铃薯成熟期),各品种间差异显著($P<0.05$),齐黄 34 最短,为 12 d,其次是冀豆 17,为 35.5 d,中黄 30 最长,为 41.5 d。

表 2 薯-豆套作系统中作物生育期结构

年份 Year	处理 Treatment	播期(月-日) Sowing date (Month-day)	苗期(月-日) Emergence date (Month-day)	始花期(月-日) Beginning bloom date (Month-day)	成熟期(月-日) Maturity date (Month-day)
2012	SP	03-20	04-24	05-19	08-04
	IP(Z)	03-20	04-25	05-20	08-02
	IP(J)	03-20	04-24	05-18	08-03
	IP(Q)	03-20	04-25	05-19	08-02
	IPZ	04-18	05-05	06-21	09-15
	IPJ	04-18	05-03	06-27	09-27
	IPQ	04-18	05-07	07-21	10-16
	SPZ	04-18	05-02	06-17	09-14
	SPJ	04-18	05-01	06-22	09-25
	SPQ	04-18	05-04	07-11	10-15
2013	SP	03-20	04-21	05-14	07-28
	IP(Z)	03-20	04-22	05-12	07-27
	IP(J)	03-20	04-21	05-13	07-28
	IP(Q)	03-20	04-23	05-14	07-27
	IPZ	04-15	05-04	06-17	09-13
	IPJ	04-15	05-05	06-23	09-25
	IPQ	04-15	05-08	07-16	10-21
	SPZ	04-15	05-03	06-13	09-12
	SPJ	04-15	05-04	06-17	09-21
	SPQ	04-15	05-06	07-11	10-16

SP:单作马铃薯;IP(Z):与中黄 30 套作的马铃薯;IP(J):与冀豆 17 套作的马铃薯;IP(Q):与齐黄 36 套作的马铃薯;SPZ:中黄 30 单作;SPJ:冀豆 17 单作;SPQ:齐黄 34 单作;IPZ:中黄 30 套作;IPJ:冀豆 17 套作;IPQ 齐黄 34 套作。下同。

SP:Sole potato cropping;IP(Z):Potato of intercropping Zhonghuang 30;IP(J):Potato of intercropping Jidou 17;IP(Q):Potato of intercropping Qihuang 34;SPZ:Sole cropping Zhonghuang 30;SPJ:Sole cropping Jidou 17;SPQ:Sole cropping Qihuang 34;IPZ:Intercropping Zhonghuang 30;IPJ:Inter-cropping Jidou 17;IPQ:Intercropping Qihuang 34. The same below.

2.1.2 株高 由表3可知,2年单作与套作马铃薯在不同时期株高差异不显著,说明套作对马铃薯株高影响不显著。单作与套作大豆在不同生育时期株高差异显著。大豆出苗60 d内,套作大豆生长速率显著慢于单作,套作大豆株高较单作降低的幅度为29.44%~40.27%,不同品种间差异不显著;大

豆出苗60 d后,套作大豆生长加快,其生长速率显著高于单作,不同品种间表现略有不同;2012年,大豆出苗140 d后,中、晚熟套作大豆最终株高接近与单作,差异不显著,但早熟品种套作与单作株高差异显著($P>0.05$)。

表3 单作及套作下作物株高的变化
Table 3 Characteristics of crops height under sole cropping and intercropping (cm)

作物 Crop	年份 Year	处理 Treatment	出苗后天数 Days after emergency						
			20 d	40 d	60 d	80 d	100 d	120 d	140 d
马铃薯 Potato	2012	SP	34.9 a	54.7 b	62.5 a	65.6 a	54.8 a		
		IP(Z)	33.7 a	55.9 a	63.6 a	67.8 a	56.2 a		
		IP(J)	35.2 a	56.2 a	64.8 a	64.2 a	53.1 a		
		IP(Q)	34.1 a	53.8 b	62.1 a	65.9 a	54.9 a		
	2013	SP	31.7 a	57.9 a	64.2 b	68.3 a	58.2 a		
		IP(Z)	33.5 a	60.1 a	67.8 a	69.2 a	60.3 a		
		IP(J)	32.1 a	56.8 a	63.2 b	70.2 a	61.8 a		
		IP(Q)	33.7 a	59.3 a	63.1 b	67.3 a	63.5 a		
大豆 Soybean	2012	IPZ	14.2 b	23.5 c	33.5 b	45.2 b	58.4 b	63.1 c	68.5 c
		IPJ	12.9 c	25.3 b	35.1 b	47.3 b	57.3 b	67.4 b	77.4 a
		IPQ	12.6 c	26.1 b	36.4 b	52.3 b	59.4 b	69.7 b	78.2 a
		SPZ	21.4 a	36.4 a	51.3 a	64.1 a	67.4 a	70.2 b	72.9 b
		SPJ	19.8 a	34.7 a	56.7 a	64.3 a	73.5 a	81.5 a	82.6 a
		SPQ	19.2 a	35.2 a	59.4 a	67.2 a	75.2 a	78.4 a	80.2 a
	2013	IPZ	14.5 b	21.6 b	30.6 c	43.7 c	54.7 c	61.3 c	65.8 d
		IPJ	13.7 c	19.6 b	29.7 c	47.9 bc	56.7 c	64.2 bc	72.5 b
		IPQ	12.4 c	20.8 b	32.4 b	50.2 b	57.9 bc	65.9 bc	72.7 b
		SPZ	18.4 a	34.6 a	54.9 a	63.1 ab	64.8 b	67.3 b	68.5 c
		SPJ	17.1 a	33.8 a	53.1 a	62.9 ab	70.2 a	73.6 a	75.1 ab
		SPQ	17.9 a	32.7 a	55.6 a	64.8 a	73.2 a	75.6 a	77.4 a

同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Different lowercase in the same column are significantly different at $P<0.05$ level. The same below.

2.1.3 叶面积指数 由表4可知,2年不同品种大豆出苗60~80 d,套作马铃薯叶面积指数较单作平均升高了3.27%~9.16%,套作马铃薯表现出较强的竞争优势。大豆出苗80 d(马铃薯块茎增长期),单作和套作马铃薯叶面积指数达到峰值,随后呈降低趋势。不同熟期大豆品种的LAI表现不同。大豆出苗80 d内(薯-豆共生期间),IPZ较SPZ降低的幅度为1.15%~14.54%,IPJ较SPJ降低的幅度为3.07%~12.33%,IPQ较SPQ降低的幅度为2.67%~17.19%,说明套作降低了大豆LAI。大豆出苗100 d后(此时套作马铃薯已收获),套作及单作大豆LAI均呈下降趋势,但套作大豆LAI下降幅度低于单作,晚熟大豆LAI高于早熟和中熟大豆品种,说明晚熟大豆品种在马铃薯收获后可保持较高的叶面积指数,并持续较长的时间。

2.1.4 干物质积累 由表5可知,大豆出苗60 d后,马铃薯与大豆进入生殖生长共生期,套作马铃薯处于竞争优势,干物质积累较单作马铃薯趋于平缓,但两者间差异不显著。单作与套作大豆干物质积累特征明显不同。大豆出苗60 d内,套作大豆干物质积累量是同期单作的43.75%,2012年不同品种间干物质积累差异不显著,2013年晚熟品种干物质积累较中、早熟积累较快;大豆出苗80~100 d,单作及套作大豆干物质积累特征基本一致,晚熟较中、早熟品种提高的幅度分别为35.54%~59.22%和65.56%~70.81%,且差异达到显著水平,而中、早熟品种间差异不显著;大豆出苗100 d后,晚熟及中熟套作大豆干物质进程加快,尤其是晚熟品种,成熟时干物质最终接近于单作大豆,差异不显著,但早熟品种套作及单作干物质差异显著。

表 4 单作及套作下作物叶面积指数的变化

Table 4 Characteristics of LAI of crops under sole cropping and intercropping

作物 Crop	年份 Year	处理 Treatment	出苗后天数 Days after emergency						
			20 d	40 d	60 d	80 d	100 d	120 d	140 d
马铃薯 Potato	2012	SP	1. 16 a	2. 75 a	3. 86 a	4. 14 a	1. 05 b		
		IP(Z)	1. 37 a	3. 01 a	4. 04 a	4. 26 a	1. 19 a		
		IP(J)	1. 28 a	2. 94 a	4. 11 a	4. 23 a	1. 07 b		
		IP(Q)	1. 21 a	2. 83 a	3. 99 a	4. 24 a	1. 15 a		
	2013	SP	0. 85 a	2. 17 b	3. 49 a	4. 02 a	1. 21 a		
		IP(Z)	0. 93 a	2. 25 ab	3. 62 a	4. 16 a	1. 11 ab		
		IP(J)	0. 81 a	2. 35 a	3. 38 a	4. 2 a	1. 07 b		
		IP(Q)	0. 87 a	2. 41 a	3. 62 a	4. 19 a	1. 17 a		
大豆 Soybean	2012	IPZ	0. 86 a	2. 10 bc	3. 76 c	5. 16 b	5. 06 bc	3. 64 e	1. 16 c
		IPJ	0. 89 a	2. 20 b	4. 10 b	5. 53 a	5. 37 b	4. 52 c	2. 61 b
		IPQ	0. 72 b	1. 95 c	3. 72 c	5. 03 b	5. 55 ab	5. 22 b	4. 67 a
		SPZ	0. 87 a	2. 27 b	4. 40 a	5. 24 ab	4. 89 c	3. 25 f	0. 87 d
		SPJ	0. 87 a	2. 45 a	4. 23 ab	5. 54 a	5. 28 b	4. 06 d	2. 28 b
		SPQ	0. 73 b	2. 13 bc	4. 05 b	5. 31 ab	5. 64 a	5. 52 a	4. 44 a
	2013	IPZ	0. 76 a	2. 04 c	3. 55 cd	4. 96 c	4. 75 c	3. 49 d	1. 39 c
		IPJ	0. 75 a	2. 13 bc	3. 77 c	5. 37 ab	5. 12 b	4. 32 b	2. 71 b
		IPQ	0. 66 b	1. 90 d	3. 42 d	5. 11 b	5. 12 b	5. 18 a	4. 27 a
		SPZ	0. 71 ab	2. 26 b	4. 14 b	4. 93 c	4. 64 c	3. 17 e	1. 12 c
		SPJ	0. 78 a	2. 34 a	4. 30 a	5. 43 a	5. 13 b	3. 95 c	2. 50 b
		SPQ	0. 67 b	2. 10 bc	4. 13 b	5. 25 ab	5. 30 a	5. 23 a	4. 23 a

表 5 单作及套作下作物干物质积累动态的变化

Table 5 Characteristics of dry matter accumulation of crops under sole cropping and intercropping (g)

作物 Crop	年份 Year	处理 Treatment	出苗后天数 Days after emergency						
			20 d	40 d	60 d	80 d	100 d	120 d	140 d
马铃薯 Potato	2012	SP	23. 18 a	68. 02 a	229. 73 a	259. 48 a	274. 26 a		
		IP(Z)	19. 32 a	65. 49 a	218. 17 a	251. 22 a	269. 15 a		
		IP(J)	21. 18 a	73. 07 a	224. 85 a	269. 28 a	284. 04 a		
		IP(Q)	20. 09 a	69. 26 a	217. 45 a	248. 46 a	271. 92 a		
	2013	SP	22. 74 a	69. 44 a	231. 79 a	263. 74 a	275. 58 a		
		IP(Z)	19. 94 a	69. 38 a	219. 54 a	257. 94 a	280. 72 a		
		IP(J)	20. 22 a	70. 21 a	220. 09 a	270. 33 a	279. 93 a		
		IP(Q)	17. 49 a	63. 66 a	208. 31 a	239. 99 b	264. 26 a		
大豆 Soybean	2012	IPZ	1. 39 c	6. 47 c	10. 65 b	15. 12 d	25. 60 c	30. 66 e	25. 92 c
		IPJ	1. 59 bc	5. 43 d	9. 48 b	17. 46 d	28. 65 c	38. 32 d	39. 99 b

续表 5

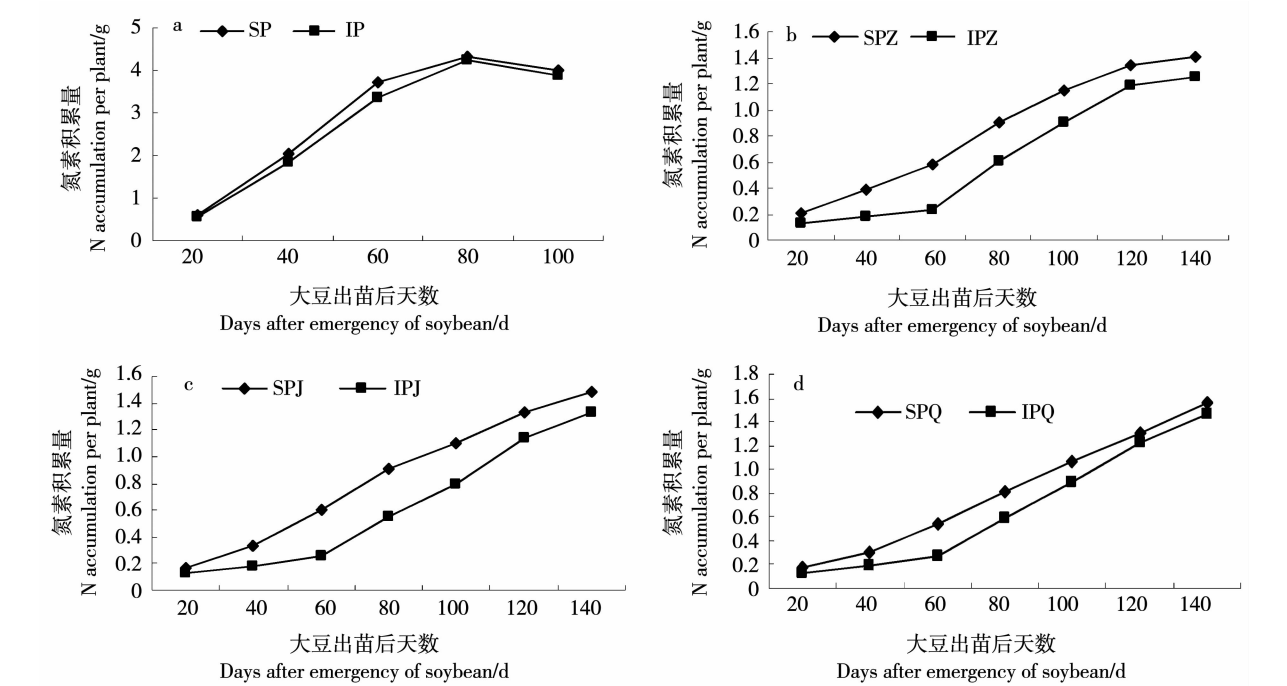
作物 Crop	年份 Year	处理 Treatment	出苗后天数 Days after emergency						
			20 d	40 d	60 d	80 d	100 d	120 d	140 d
	2013	IPQ	2.06 b	7.04 bc	11.70 b	24.77 c	43.73 b	69.77 b	88.18 a
		SPZ	2.93 a	10.38 a	26.08 a	31.36 b	40.38 b	45.24 cd	40.23 b
		SPJ	2.84 a	8.64 b	24.31 a	28.55 bc	37.56 b	50.01 c	44.38 b
		SPQ	3.07 a	9.91 ab	26.65 a	39.60 a	60.20 a	81.99 a	89.93 a
		IPZ	1.29 c	5.95 b	9.88 e	14.08 e	23.36 d	28.66 f	26.89 d
		IPJ	1.58 c	5.73 b	11.89 d	18.21 d	24.20 d	35.52 e	39.41 c
		IPQ	1.44 c	6.59 b	10.75 de	23.57 c	39.89 c	65.54 b	78.17 a
		SPZ	2.26 b	10.60 a	23.66 c	31.05 b	37.98 c	41.65 d	38.54 c
		SPJ	2.71 a	9.41 a	26.03 b	33.25 b	43.49 b	46.48 c	43.58 b
		SPQ	2.93 a	10.31 a	28.21 a	42.04 a	55.04 a	75.65 a	80.31 a

2.2 作物养分积累对竞争补偿作用的响应

2.2.1 氮素积累动态变化 由图 1 可知,大豆出苗 60 d 内,套作与单作马铃薯氮素吸收迅速增加,大豆出苗 60~80 d 内增长速度缓慢,大豆出苗 80 d 达到峰值,随后呈降低趋势。大豆出苗 100 d(马铃薯成熟时)套作马铃薯氮素吸收量与单作差异不显著。套作与单作大豆氮素积累特点明显不同,大豆出苗 60 d 内,套作大豆氮素积累较单作降低了 23.53%~60.34%。大豆出苗 60 d 后,套作大豆氮素积累迅速增快,且晚熟品种氮素积累量较快。大豆出苗 140 d(大豆成熟期),晚熟品种氮素积累量与单作差异不显著,但中、早熟品种套作与单作氮

素积累差异显著。

2.2.2 磷素积累动态变化 由图 2 可知,套作与单作马铃薯磷素吸收量呈“慢-快-慢”增加趋势,表现为大豆出苗 20~40 d 内磷素吸收量缓慢增长,大豆出苗 40~80 d 内迅速增长,大豆出苗 80 d 后又缓慢增长。大豆出苗 100 d(马铃薯成熟时)套作马铃薯磷素吸收量与单作差异不显著。大豆出苗 60 d 内,套作与单作大豆磷素积累差异显著,套作大豆磷素积累较单作降低了 22.89%~32.39%。大豆出苗 140 d(大豆成熟期),早、中、晚熟大豆品种套作磷素积累量与单作差异不显著。



a:马铃薯; b:中黄 30; c:冀豆 17; d:齐黄 34。
a:Potato; b:Zhonghuang 30; c:Jidou 17; d:Qihuang 34.

图 1 单作及套作下马铃薯和大豆氮素积累的变化

Fig. 1 N accumulation of potato and different soybean cultivaters under sole cropping and intercropping

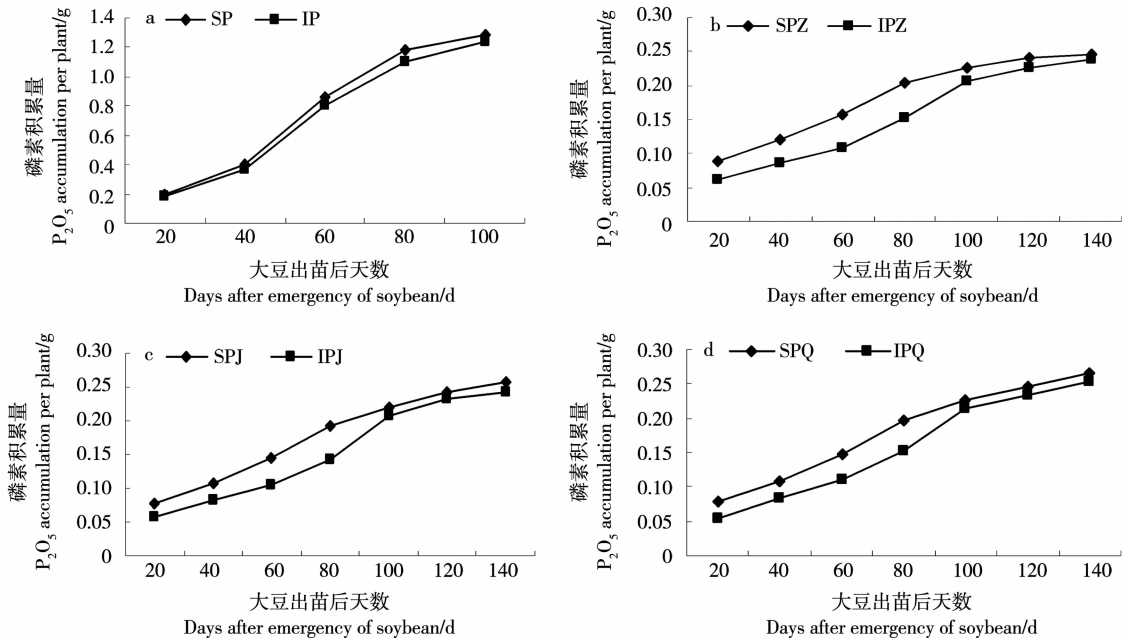


图 2 单作及套作下马铃薯和大豆磷素积累的变化

Fig. 2 P_2O_5 accumulation of potato and different soybean cultivars under sole cropping and intercropping

2.2.3 钾素积累动态变化 由图3可知,大豆出苗60 d内,套作与单作马铃薯钾素吸收迅速增加,大豆出苗60~80 d内增长速度缓慢,大豆出苗80 d达到峰值,随后呈降低趋势。大豆出苗100 d(马铃薯收获时)套作马铃薯单株钾素吸收量与单作差异不显著。套作与单作大豆钾素积累特点与磷素相似,

单作与套作大豆在出苗80 d内钾素积累较慢,大豆出苗80 d后,钾素积累迅速增加,单作与套作大豆钾素积累间存在显著差异。大豆出苗80 d内,套作大豆钾素积累较单作降低了14.02%~49.47%。大豆出苗140 d(大豆成熟期),早、中、晚熟大豆品种套作钾素积累量与单作差异不显著。

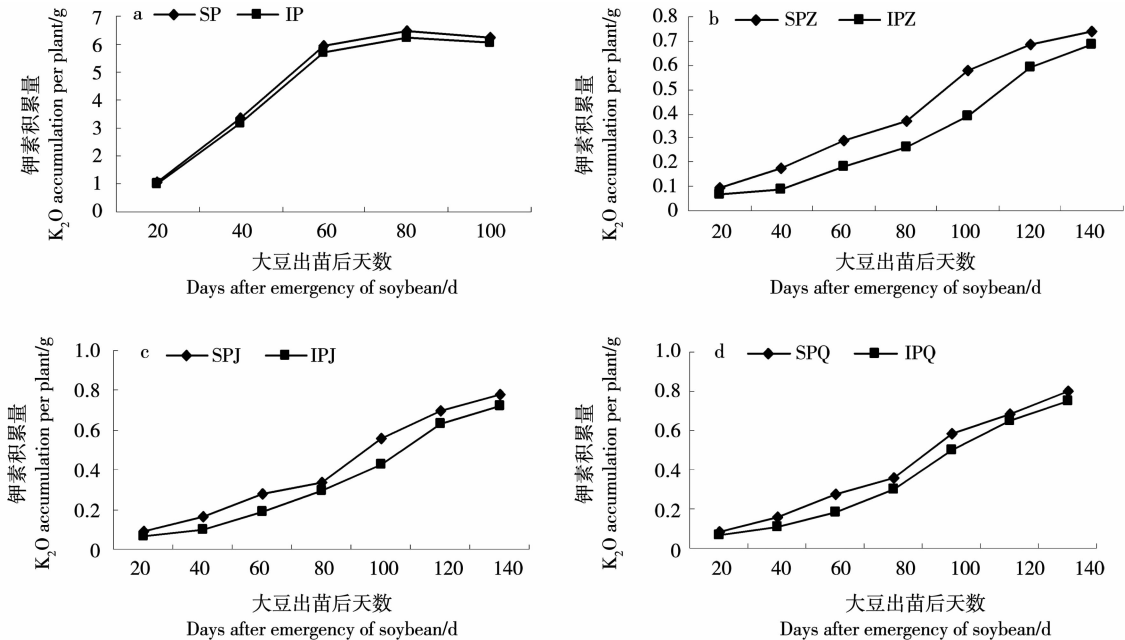


图 3 单作及套作下马铃薯和大豆钾素积累的变化

Fig. 3 K_2O accumulation of potato and different soybean cultivars under sole cropping and intercropping

2.3 薯-豆共生期种间竞争作用分析

2.3.1 马铃薯相对于大豆的竞争力 如表6所示,不同熟期大豆品种与马铃薯组合,共生期内马铃薯相对于大豆的竞争力 A_{PS} 在2年试验中均大于0,说明在薯-豆套作模式下,马铃薯是优势作物,具备较强的资源竞争能力。而选择生育期较长的大豆品种,能够显著降低马铃薯相对于大豆的资源竞争

能力,2012年和2013年试验中,晚熟品种的 A_{PS} 比早熟品种分别降低27.65%和34.54%。同时马铃薯相对于大豆的竞争力随作物生育期进程呈现先增后减的趋势,大豆出苗60~80 d内(大豆花期)竞争力最强,随后开始降低,大豆出苗100 d(马铃薯成熟期)马铃薯相对于大豆的 A_{PS} 比大豆出苗60~80 d降低了31.13%~46.18%。

表6 薯-豆共生期马铃薯相对于不同熟期大豆品种的资源竞争能力

Table 6 Aggressivity of potato relative to different soybean varieties during co-growth period

年份 Year	处理 Treatment	大豆出苗后天数 Days after emergency of soybean					平均值 Mean
		20 d	40 d	60 d	80 d	100 d	
2012	IPZ	0.62 a	0.55 a	0.98 a	0.86 a	0.57 a	0.71 a
	IPJ	0.59 a	0.76 a	1.07 a	0.72 a	0.40 b	0.71 a
	IPQ	0.27 b	0.48 a	0.91 a	0.54 b	0.39 b	0.52 b
2013	IPZ	0.50 a	0.75 a	0.95 a	0.94 a	0.68 a	0.76 a
	IPJ	0.50 a	0.68 a	0.87 a	0.83 a	0.79 a	0.73 a
	IPQ	0.23 b	0.50 a	0.94 a	0.58 b	0.24 b	0.50 b
平均值 Mean		0.45 c	0.62 bc	0.95 a	0.74 b	0.51 c	

2.3.2 马铃薯相对于大豆的营养竞争比率 不同熟期大豆品种对马铃薯相对于大豆的氮营养竞争比率 CR_{PS-N} 的影响与竞争力 A_{PS} 类似,所有处理条件下的马铃薯相对于大豆的 CR_{PS-N} 均大于1,说明在薯/豆共生期马铃薯具备氮养分竞争优势(表7)。同样选择生育期较长的大豆品种与马铃薯套作 CR_{PS-N} 能显著降低,2012、2013年晚熟品种的 CR_{PS-N} 比早熟品种分别降低6.33%和19.14%。随作物生育期进程,马铃薯相对于大豆的竞争力呈先增后减的趋势,大豆出苗60 d后,竞争力最强,随后开始降低,大豆出苗100 d(马铃薯成熟期)马铃薯相对于大豆的 A_{PS} 比大豆出苗60 d降低了44.07%。

选择晚熟大豆品种与马铃薯套作时,马铃薯相对于大豆的磷营养竞争比率 CR_{PS-P} 较早熟大豆品种有下降的趋势,但两者间差异不显著。随作物生

育期进程,马铃薯相对于大豆的 CR_{PS-P} 呈下降的趋势,在大豆出苗100 d后(马铃薯成熟), CR_{PS-P} 值小于1,说明在马铃薯成熟时,大豆已具备磷养分竞争优势。不同熟期大豆品种对马铃薯相对于大豆的钾营养竞争比率 CR_{PS-K} 的影响与 CR_{PS-N} 类似,所有处理条件下的马铃薯相对于大豆的 CR_{PS-K} 均大于1,说明在薯/豆共生期马铃薯具备钾养分竞争优势。同样选择生育期较长的大豆品种与马铃薯套作 CR_{PS-K} 能显著降低,2012、2013年晚熟品种的 CR_{PS-K} 比早熟品种分别降低10.88%和13.50%。大豆出苗40 d后,马铃薯相对于大豆的 CR_{PS-K} 最强,随后开始降低,大豆出苗100 d(马铃薯成熟期)马铃薯相对于大豆的 A_{PS} 比大豆出苗40 d降低了16.98%。

表7 薯-豆共生期马铃薯相对于不同熟期大豆品种的营养竞争比率

Table 7 Competitive ratio for N, P and K of potato relative to different soybean varieties during co-growth period

养分 Nutrition	年份 Year	处理 Treatment	出苗后天数 Days after emergency of soybean					平均 Mean
			20 d	40 d	60 d	80 d	100 d	
N	2012	IPZ	1.39 a	1.81 a	1.97 a	1.38 b	1.20 a	1.55 a
		IPJ	1.10 b	1.38 b	1.65 b	1.41 a	1.19 a	1.35 a
		IPQ	1.35 a	1.76 a	1.79 b	1.24 b	1.13 a	1.45 a
	2013	IPZ	1.45 a	1.82 a	2.49 a	1.31 b	1.11 ab	1.64 a
		IPJ	1.33 a	1.73 a	2.65 a	1.58 a	1.29 a	1.72 a
		IPQ	1.09 b	1.32 b	1.93 b	1.22 c	1.05 b	1.32 b
		平均值 Mean		1.28 c	1.64 b	2.08 a	1.36 bc	1.16 c
P ₂ O ₅	2012	IPZ	1.39 a	1.05 a	1.20 a	1.12 b	0.95 b	1.14 a
		IPJ	1.16 b	1.11 a	1.19 a	1.24 a	0.92 b	1.12 a
		IPQ	1.25 a	0.98 a	1.13 a	1.14 b	0.92 b	1.08 a

续表 7

养分 Nutrition	年份 Year	处理 Treatment	出苗后天数 Days after emergency of soybean					平均 Mean
			20 d	40 d	60 d	80 d	100 d	
K ₂ O	2013	IPZ	1.26 a	1.21 a	1.27 a	1.14 a	1.00 a	1.18 a
		IPJ	1.38 a	1.02 a	1.11 b	1.19 a	0.91 b	1.12 a
		IPQ	1.39 a	1.22 a	1.11 b	1.09 a	0.95 b	1.15 a
		平均值 Mean		1.30 a	1.10 c	1.17 b	1.15 b	0.94 c
	2012	IPZ	1.28 a	1.55 a	1.37 a	1.19 b	1.33 a	1.34 a
		IPJ	1.31 a	1.38 a	1.23 b	1.05 c	1.27 a	1.25 a
		IPQ	1.05 b	1.29 b	1.35 a	1.08 c	1.22 b	1.20 b
		平均值 Mean						
	2013	IPZ	1.14 a	1.82 a	1.44 a	1.31 a	1.30 a	1.40 a
		IPJ	1.20 a	1.62 a	1.34 a	1.03 b	1.18 b	1.28 b
		IPQ	1.03 a	1.40 b	1.37 a	1.05 b	1.21 b	1.21 b
		平均值 Mean		1.17 c	1.51 a	1.35 ab	1.12 c	1.25 b

2.4 马铃薯收获后大豆补偿作用分析

2.4.1 马铃薯收获后大豆补偿生长效应 如图 4 所示,共生前期由于马铃薯的竞争作用,套作大豆干物质积累较单作显著降低,降幅为 27.45% ~ 59.08%。共生后期及马铃薯收获后套作大豆得到了一定程度的恢复生长,干物质积累速率较单作大豆显著提高。不同熟期大豆恢复补偿生长能力表现不同,马铃薯收获时,早熟大豆品种和晚熟品种生长速率略高于相应的单作水平,而中熟大豆品种生长速率仍然较单作低;马铃薯收获 15 d 后,不同熟期大豆品种的生长速率均较单作分别提高 19.58% ~ 21.45%、35.95% ~ 58.97% 和 21.91% ~ 146.35%,均与相应的单作水平间差异达到显著水

平。对不同熟期大豆品种而言,马铃薯收获后中、晚熟大豆表现出较强的恢复补偿生长能力,晚熟品种及中熟品种收获时干物质接近于单作大豆,差异不显著。

2.4.2 马铃薯收获后大豆养分补偿效应 如图 4 所示,马铃薯收获后,早熟品种中黄 30 (IPZ) 和中熟品种冀豆 17 (IPJ) 氮素吸收量得到一定的恢复,成熟时较单作分别降低了 10.68% 和 10.40%,2 个品种套作与单作间差异均达到显著水平;晚熟品种齐黄 34 (IPQ) 在套作马铃薯收获后,氮素吸收量呈直线型的急剧增长态势,成熟时接近于单作大豆的氮素吸收量,表现出较强的氮吸收恢复能力。

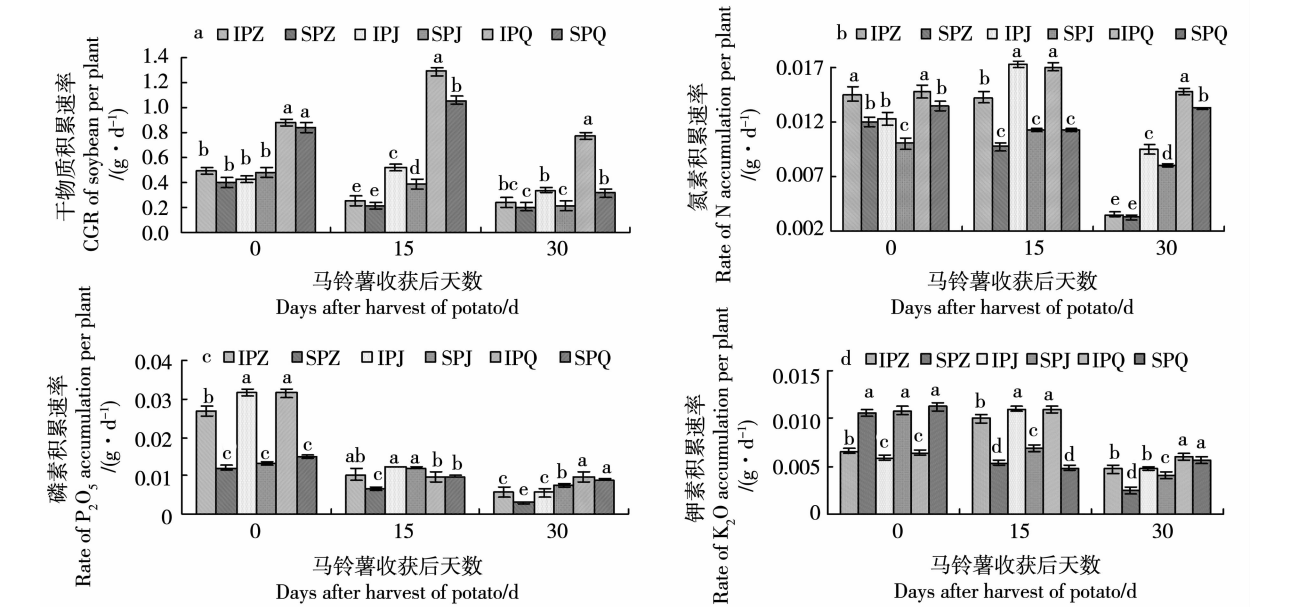


图 4 马铃薯收获后大豆干物质及养分积累速率

Fig. 4 Rate of dry matter and nutrient accumulation of different soybeans after potato harvest

马铃薯收获后,3 个大豆品种磷素吸收速率均趋于平缓,IPZ、IPJ 和 IPQ 较相应的单作分别降低了 9.30%、5.53% 和 5.51%,早熟品种中黄 30 套作与单作磷素积累量差异显著,中熟品种冀豆 17 和晚熟

品种齐黄 34 与相应的单作磷素积累量差异不显著,说明套作大豆磷素恢复吸收的时期较氮素恢复吸收时期早,在马铃薯与大豆共同生长后期已经出现。

马铃薯收获后,套作大豆钾素吸收量呈直线型的急剧增长态势,成熟时接近于单作大豆的钾素吸收量,表现出较强的钾吸收恢复能力,不同熟期大豆品种套作与单作单株钾素积累差异不显著,这可能与土壤钾素养分含量较高,具有钾素养分竞争优势的套作马铃薯对套作大豆钾素吸收并未造成影响有关。

2.5 系统产量与土地当量比的变化特征

由表 8 可知,不同熟期大豆品种与马铃薯套作,系统内马铃薯产量较单作略有下降,降幅为 5.24%~7.86%;系统内大豆产量较单作显著下降,2012

年早、中、晚熟大豆籽粒产量分别降低了 39.69%、13.98% 和 11.18%,2013 年分别降低了 43.27%、20.38% 和 8.61%,中、晚熟品种降幅低于早熟品种,套作对早熟大豆品种产量的影响大于中、晚熟品种。另外,中、晚熟大豆品种的套作产量较早熟品种套作产量分别提高了 79.85% 和 145.08%,LER 分别达到了 1.77 和 1.83,说明中、晚熟品种套作优势更强,其优势主要来源于大豆(LER 为 0.83 和 0.91),原因是中、晚熟大豆品种生育期较长,能够减缓对大豆前期生长的荫蔽伤害,使大豆叶面积指数、光合速率均保持在较高水平,从而为马铃薯收获后进行光合补偿生长提供物质和能量基础,保证了套作大豆较高产量。

表 8 马铃薯-大豆套作对产量与土地当量比的影响

Table 8 Effect of potato-soybean intercropping on yield and equivalent rations (LER)						
年份 Year	处理 Treatment	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)		土地当量比 LER		
		马铃薯	大豆	马铃薯	大豆	马铃薯 + 大豆
		Potato	Soybean	Potato	Soybean	Potato + Soybean
2012	SP	8761.37 ± 461 a	—	1.00	—	1.00
	IPZ	8072.31 ± 255 b	1355.56 ± 136 d	0.92	0.60	1.52
	SPZ	—	2247.65 ± 247 c	—	1.00	1.00
	IPJ	8282.17 ± 364 ab	2607.47 ± 174 bc	0.95	0.86	1.81
	SPJ	—	3031.26 ± 249 b	—	1.00	1.00
	IPQ	8302.25 ± 473 ab	3570.79 ± 297 a	0.95	0.89	1.84
	SPQ	—	4020.39 ± 317 a	—	1.00	1.00
2013	SP	8439.87 ± 519 a	—	1.00	—	1.00
	IPZ	7697.35 ± 492 b	1416.60 ± 364 e	0.91	0.57	1.48
	SPZ	—	2497.25 ± 377 d	—	1.00	1.00
	IPJ	7862.12 ± 547 b	2378.20 ± 302 d	0.93	0.80	1.73
	SPJ	—	2987.00 ± 329 c	—	1.00	1.00
	IPQ	7628.64 ± 459 b	3223.20 ± 301 b	0.90	0.91	1.82
	SPQ	—	3526.45 ± 321 a	—	1.00	1.00

马铃薯产量按 5 kg 鲜重产量折合 1 kg 粮食产量计算,表中马铃薯产量均为折合后产量。同列不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。
The potato yield was calculated as one fifth fresh tuber yield, which is equivalent to grain yield. Values within a column followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$.

3 讨论

Mushagalusa 等^[18]、Ruiz 等^[19]和宋艳霞等^[20]研究表明,高秆作物在共生期对光热水肥的竞争能力较强,引起低秆作物的光合作用减弱,干物质和养分积累速度相对较慢。王树起等^[21]研究水稻/花生间作套系统根系分隔试验的结果表明,间作花生在共生期较单作氮素降低了 18.6%。金绍龄等^[22]、叶优良^[23]和李文学^[24]研究小麦/玉米间套作模式时发现,间作玉米在共生期吸磷量较单作显著下降。

李隆等^[10-11]研究玉米/小麦间套作模式时同样发现,间套作玉米在共生期氮、磷、钾吸收量及生物学产量显著低于单作。由此可见,间套作模式下弱势作物光合指标、养分积累、生物产量及产量构成因素的变化归根结底是优势作物竞争力强所致。本研究与前人研究结果基本一致,马铃薯-大豆套作共生期,由于马铃薯的强竞争作用,弱势大豆干物质积累量及植株体内氮、磷、钾积累量较同期单作显著下降。另外,受生育期结构的影响,晚熟大豆品种与马铃薯生殖生长共生期较短,种间竞争作用

相对减弱,干物质和养分积累较中、早熟品种下降幅度较小。

间套作作物在共生期受到一定的水分^[25-26]、光温^[27]以及养分的竞争胁迫^[28-29],通常会在形态和生理上发生相应的改变;前茬作物收获后,后茬作物还有一段独立生长期,可进行补偿生长,以缓解前期竞争造成的损失。张福锁等^[30]对西北灌区小麦间作大豆和玉米间作大豆种间营养竞争的研究表明,作物共生期,间套作大豆和玉米养分含量和吸收量低于单作,小麦收获后,间套作大豆和玉米地上部养分吸收速率加快,植株干物质积累量直线上升,至成熟时已接近或超过相应的单作。雍太文等^[31]研究认为,玉米-大豆套作体系中,水肥充分满足条件下选择生育期较长的大豆品种,在玉米收获后,大豆进行一段时间的恢复生长,光合特性明显提高,干物质积累量呈上升趋势,套作大豆生殖生长不受影响,表现出超补偿效应。Aggarwal 等^[7]和 Madhavan 等^[32]研水稻/绿豆和高粱/木豆间套作时同样发现了弱势作物在优势作物收获后的养分快速恢复的现象。本研究与前人研究结果一致,在马铃薯收获后,套作大豆干物质积和养分积累速率加快,套作与单作差异逐渐缩小,收获时晚熟套作大豆干物质及 N、P、K 养分积累量接近单作,晚熟大豆品种恢复补偿效应显著高于中、早熟品种,这与刘广才^[33]研究不同玉米品种与小麦间套作后的补偿效应结果基本一致。

4 结 论

在马铃薯-大豆群体中,马铃薯是核心作物,共生期处于竞争优势($A_{ps} > 0$ 、 $CR_{ps} > 0$),而大豆处于竞争弱势($A_{ps} < 0$ 、 $CR_{ps} < 0$)。选择晚熟大豆品种与马铃薯组合可弱化种间竞争力和营养竞争比率,还有利于马铃薯收获后恢复补偿能力的发挥。2012 和 2013 年的试验中,共生期间晚熟品种平均竞争力(A_{ps})较早熟品种分别降低了 27.65% 和 34.54%,N 营养竞争比率(CR_{ps-N})降低了 6.33% 和 19.14%,K 营养竞争比率(CR_{ps-K})降低了 10.88% 和 13.5%。共生期结束(马铃薯收获)后,晚熟大豆品种生长速率及养分积累较早熟品种显著增加,收获时接近与单作水平。因此,在该区域中晚熟大豆品种适宜与马铃薯套作。

参考文献

[1] Brooker R W, Bennett A E, Conf W F, et al. Improving intercropping: A synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology[J]. New Phytologist, 2015(206): 107-117.

[2] 王志刚. 灌漠土上连续间作对作物生产力和土壤肥力的影响[D]. 北京:中国农业大学, 2014. (Wang Z G. Crop productivity and soil fertility as affected by continuous intercropping in an orthic anthrosol[D]. Beijing: Chinese Agricultural University, 2014.)

[3] Schoener T W. Field experiments on interspecific competition[J]. American Naturalist, 1983: 240-285.

[4] Tilman D. The importance of the mechanisms of interspecific competition[J]. American Naturalist, 1987: 769-774.

[5] 吴刚, 李静. 农林生态系统界面生态学初探[J]. 应生态学报, 2000(3): 459-460. (Wu G, Li J. Primary research on interface ecology in agroforestral ecosystems [J]. Journal of Applied Ecology, 2000(3): 459-460.)

[6] Casper B B, Jackson R B. Plant competition underground [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1997: 545-570.

[7] Aggarwal P, Garrity D P, Liboon S, et al. Resource use and plant interactions in a rice-mungbean intercrop [J]. Agronomy Journal 1992, 84: 71-78.

[8] Chen X, Cui Z, Fan M, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486.

[9] 陈光荣, 杨文钰, 张国宏, 等. 薯豆套作模式下不同熟期大豆品种的生长补偿效应[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3): 455-467. (Chen G R, Yang W Y, Zhang G H, et al. Compensation effect of different soybean varieties in potato/soybean intercropping systems [J]. Scientia Agricultural Sinica, 2016, 49 (3): 455-467.)

[10] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: II. Recovery or compensation of maize and soybean after wheat harvesting[J]. Field Crops Research, 2001, 71(3):173-181.

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

[12] 陈光荣, 杨文钰, 张国宏, 等. 马铃薯/大豆套作对 3 个大豆品种光合指标与产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3345-3352. (Chen G R, Yang W Y, Zhang G H, et al. Effects of potato/soybean intercropping on photosynthetic characteristics and yield of three soybean varieties [J]. Chinese Journal of Applied Ecololy, 2015, 26(11): 3345-3352.)

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005. (Bao S D. Analysis of soil agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.)

[14] Al-Dalain S A. Effect of intercropping of zea maize with potato Solanum tuberosum L. on potato growth and on the productivity and land equivalent ratio of potato and zea maize[J]. Agriculture Journal, 2009, 4: 164-170.

[15] Connolly J, Goma H C, Rahim K. The information content of indicators in intercropping research[J]. Agriculture Ecosystem and Environment, 2001, 87: 191-207.

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

[17] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping: Non-nitrogen nutrients [J]. Field Crops Research, 1993, 34: 319-334.

[18] Mushagalush G N, Ledent J F, Draye X. Shoot and root competition in potato/maize intercropping: Effects on growth and yield [J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, 64: 180-188.

[19] Ruiz R A, Bertero H D. Light interception and radiation use efficiency in temperate quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars[J]. European Journal of Agronomy, 2008, 29: 144-152.

[20] 宋艳霞, 杨文钰, 李卓玺, 等. 不同大豆品种幼苗叶片光合及叶绿素荧光特性对套作遮荫的响应[J]. 中国油料作物学报, 2009, 31(4): 474-479. (Song Y X, Yang W Y, Li Z X, et al. The effects of shading on photosynthetic and fluorescent characteristics of soybean seedlings under maize-soybean relay cropping [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2009, 31(4): 474-479.)

[21] 王树起, 沈其荣, 褚贵新, 等. 种间竞争对旱作水稻与花生间作系统根系分布和氮素吸收积累的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 860-863. (Wang S Q, Shen Q R, Chu G X, et al. Effect of interspecies competition on root distribution and nitrogen uptake of peanut and rice in intercropping in aerobic soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(5): 860-863.)

[22] 金绍龄, 张丽慧, 李隆. 小麦玉米带田一种作物施用氮肥对配对作物氮营养的影响[J]. 西北农业学报, 1993, 2(3): 1-6. (Jin S L, Zhang L H, Li L. Effect of N application in maize-wheat intercropping system[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 1993, 2(3): 1-6.)

[23] 叶优良. 间作对氮素和水分利用的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2003. (Ye Y L. Effect of intercropping on nitrogen and water use [D]. Beijing: Chinese Agricultural University, 2003.)

[24] 李文学. 小麦玉米蚕豆间作系统中氮、磷吸收利用特点及其环境效应[D]. 北京: 中国农业大学, 2001. (Li W X. Nitrate accumulation in soil and nutrient acquisition by intercropped wheat, maize and faba bean[D]. Beijing: Chinese Agricultural University, 2001.)

[25] Mao L L, Zhang L Z, Li W Q, et al. Yield advantage and water saving in maize/pea intercrop[J]. Field Crops Research, 2012, 138: 11-20.

[26] Li R, Hou X Q, Ji Z K, et al. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and full mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 116: 101-109.

[27] Nichols I J D, Rosemeyer M E, Carpenter F L, et al. Intercropping legume trees with native timber trees rapidly restores cover to eroded tropical pasture without fertilization[J]. Forest Ecology and Management, 2001, 152: 195-209.

[28] Li Q Z, Sun J H, Wei X J, et al. Overyielding and interspecific interactions mediated by nitrogen fertilization in strip intercropping of maize with faba bean, wheat and barley[J]. Plant and Soil, 2011, 339(1/2): 147-161.

[29] Zuo Y M, Zhang F S. Effect of peanut mixed cropping with gramineous species on micronutrient concentrations and iron chlorosis of peanut plants grown in a calcareous soil[J]. Plant and Soil, 2008, 306(1/2): 23-36.

[30] Zhang F S, Li L. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency[J]. Plant and Soil, 2003, 248(1): 305-312.

[31] 雍太文, 杨文钰, 向达兵, 等. 小麦/玉米/大豆套作的产量、氮营养表现及其种间竞争力的评定[J]. 草业学报, 2012, 21(1): 50-58. (Yong T W, Yang W Y, Xiang D B, et al. Production and N nutrient performance of wheat-maize-soybean relay strip intercropping system and evaluation of interspecies competition [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(1): 50-58.)

[32] Madhavan M, Shanmugasundaram V S. Effect of population on nutrient uptake of pigeonpea genotypes in sole and intercropped situation with sorghum CO₂ [J]. Acta Agronomica Hungarica, 1990, 39: 389-392.

[33] 刘广才. 不同间套作体系种间营养竞争的差异性及机理研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2005. (Liu G C. Difference and its mechanism of interspecific nutrition competition in different intercropping system [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2005.)