

间套作和施磷对玉米籽粒磷质量分数和体内磷素分配及利用效率的影响

夏海勇^{1,2} 赵建华³ 王志刚¹ 刘红亮¹ 师永沿⁴ 孙建好³ 包兴国³ 李隆^{1*}

(1. 中国农业大学 资源与环境学院,北京 100193;

2. 山东省农业科学院 作物研究所/山东省作物遗传改良与生态生理重点实验室,济南 250100;

3. 甘肃省农业科学院 土壤肥料与节水研究所,兰州 730070;

4. 甘肃省白银市委农村工作办公室,甘肃 白银 730900)

摘要 为明确间套作和施磷对玉米籽粒磷质量分数、收获指数、磷素收获指数和体内磷素利用效率的影响,进行为期3年(2009—2011年)的田间定位试验。试验为裂区设计,主区为不同施磷水平,分别为0、40和80 kg/hm²施磷量,副区为油菜、蚕豆、鹰嘴豆和大豆与玉米间套作及单作玉米。结果表明:1)间套作显著提高玉米籽粒磷质量分数,与油菜、蚕豆、鹰嘴豆和大豆间套作的玉米平均籽粒磷质量分数比单作玉米分别高出19.8%、13.0%、17.2%和12.0%;而间套作玉米相对于单作玉米收获指数和磷素收获指数均无显著变化;间套作明显降低玉米体内磷素利用效率,与油菜、蚕豆、鹰嘴豆和大豆间套作玉米的平均体内磷素利用效率比单作玉米分别降低15.9%、9.6%、14.9%和8.5%。2)施磷对玉米收获指数无显著影响;2009年施磷量对玉米籽粒磷质量分数没有显著影响,后2年40和80 kg/hm²施磷量时玉米籽粒磷质量分数显著高于不施磷,2年平均提高12.5%和15.9%;40 kg/hm²施磷量时(2010年)和80 kg/hm²施磷量时(2010和2011年)平均体内磷素利用效率显著低于不施磷,2年平均分别降低8.8%和10.4%;施磷只对2011年磷素收获指数有增加趋势,这可能与土壤基础磷肥力较好,施磷在第2年和第3年才产生梯度效应有关。综上,间套作和施磷均能提高玉米籽粒磷质量分数,对收获指数均无影响,但却降低体内磷素利用效率,磷素存在奢侈吸收现象;间套作对磷素收获指数无影响;施磷有提高磷素收获指数的趋势。

关键词 玉米;间套作;施磷;籽粒磷质量分数;收获指数;磷素收获指数;体内磷素利用效率

中图分类号 S 344

文章编号 1007-4333(2015)02-0067-10

文献标志码 A

Grain P concentrations, P allocation and internal use efficiency of maize affected by P application and intercropping

XIA Hai-yong^{1,2}, ZHAO Jian-hua³, WANG Zhi-gang¹,

LIU Hong-liang¹, SHI Yong-yan⁴, SUN Jian-hao³, BAO Xing-guo³, LI Long^{1*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Crop Research Institute/Shandong Provincial Key Laboratory of Crop Genetic Improvement, Ecology and Physiology, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China;

3. Institute of Soils, Fertilizers and Water-Saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China;

4. Baiyin Municipal Rural Affairs Office, Baiyin 730900, China)

Abstract The aim of this study was to investigate the influences of phosphorus (P) fertilizer application and intercropping on maize grain P concentrations, harvest indexes, P harvest indexes and internal P use efficiency of maize plants. Field experiments were carried out in 2009, 2010 and 2011. The main plots received pure P applications of 0, 40 and 80 kg/hm², and the sub-plots comprised maize monoculture and maize (*Zea mays* L. cv. Zhengdan no. 958) intercropping with oilseed rape (*Brassica napus* L. cv. Longyou no. 1) in 2009 or turnip (*Brassica campestris* L. cv.

收稿日期: 2014-06-03

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(30890133)

第一作者: 夏海勇, 助理研究员, 主要从事生物多样性、资源利用、耕作和农业生态研究, E-mail: drhaiyongxia@gmail.com

通讯作者: 李隆, 教授, 博士生导师, 主要从事植物根际营养、生物多样性和资源利用研究, E-mail: lilong@cau.edu.cn

Gannan no. 4) in 2010 and 2011, faba bean (*Vicia faba* L. cv. Lincan no. 5), chickpea (*Cicer arietinum* L. cv. Longying no. 1) and soybean (*Glycine max* L. cv. Huaxia no. 1 in 2009 and cv. Wuke no. 2 in 2010 and 2011), respectively. 1) Intercropping significantly enhanced maize grain P concentrations compared to monocropped maize, the average grain P concentrations of maize intercropped with *Brassica*, faba bean, chickpea and soybean were increased by 19.8%, 13.0%, 17.2% and 12.0%, respectively. However, neither the harvest indexes nor the P harvest indexes of maize were influenced by intercropping. This indicates that the allocation of dry matter and P in vegetative tissues and grains at maize harvest were not influenced by intercropping. Further studies showed that internal P use efficiency of maize plants intercropped with *Brassica*, faba bean, chickpea and soybean were significantly reduced by 15.9%, 9.6%, 14.9% and 8.5%, respectively. 2) No responses of harvest index of maize to P were found in all the three years. In 2009, there were no significant effects of fertilizer P application rates on the average maize grain P concentrations. Afterwards, the average grain P concentrations in 2010 and 2011 were all significantly increased by average of 12.5% at P 40 kg/hm² and 15.9% at P 80 kg/hm² compared to no P application; meanwhile, the internal P use efficiency of maize plants at P 40 kg/hm² in 2010 and at P 80 kg/hm² in both 2010 and 2011 were significantly decreased by 8.8% and 10.4%, respectively; the P harvest indexes were enhanced by P only in 2011. In general, both intercropping and P application increased maize grain P concentrations while decreased internal P use efficiency with luxury absorption of P and P application enhanced the P harvest index of maize.

Key words maize; intercropping; phosphorus (P) application; grain P concentrations; harvest index; P harvest indexes; internal P use efficiency

作物体内的磷素大部分集中在籽粒部分,影响籽粒蛋白质、脂肪含量等品质性状,此外,籽粒磷含量还关系到磷素在整体生态系统中的物质和能量流动循环过程。玉米是一种非常重要的粮食兼饲料作物。玉米籽粒中总磷含量约为 0.25%^[1],其中 60%~80%以植酸磷形式存在^[2],人体和动物只能吸收利用 10%~12%的磷^[3],其他的磷都以粪磷形式排出体外,造成严重的磷污染^[4-5]。何萍等^[6]研究表明,单作条件下,适宜施用磷肥可以增加高油玉米和普通玉米籽粒蛋白质和脂肪酸及其组分含量,但施磷对 2 品种的淀粉及其组分含量的增加不明显。侯彦楠等^[7]研究表明,低磷胁迫下,耐低磷基因型玉米籽粒粗淀粉、粗油分含量的平均值总体上升,磷和粗蛋白含量的平均值总体略有下降;磷敏感型基因型玉米籽粒粗油分含量平均值总体略有上升,磷含量、粗淀粉和粗蛋白含量的平均值总体下降;施磷量与磷和粗蛋白含量之间存在一定的相关性。

间套作是中国传统精耕细作农业的重要种植体系。禾本科与豆科等作物间套作是比较常见的种植模式。在过去的十多年里,磷素吸收优势在小麦/玉米、小麦/大豆和蚕豆/玉米等间套作体系的研究得到特别的关注和重视^[8-11]。特别是对蚕豆/玉米和鹰嘴豆/玉米间套作体系种间促进作用的研究,从根际过程方面为间套作体系磷素吸收优势提供了理论依据^[8,12-15]。Mei 等^[16]研究表明,在中国西北新灌溉开垦的荒漠土壤上进行玉米/蚕豆间套作,中等适

宜的磷肥用量(纯磷 60 kg/hm²),能够促进增产和结瘤固氮,提高磷肥利用效率,间作系统磷素回收率比单作系统增加幅度最高达 297%。本实验室前期通过连续 3 年的田间试验研究也得到类似的结果,白菜型油菜、蚕豆、鹰嘴豆和大豆分别与玉米间套作能显著增加体系(与单作体系加权平均相比)和玉米(仅就玉米所占净面积而言)籽粒产量、磷素吸收量和磷肥表现回收率,而且合理的磷肥用量(纯磷 40 kg/hm²)可以实现间套作作物体系和间套作玉米最佳生产力、最大磷素吸收量和最高磷肥表现回收率,此时,玉米与油菜和豆科作物间套作体系的平均磷肥表现回收率从单作玉米时的 6.1% 提高到 30.6%,具有明显的磷肥回收率优势,而且这种体系回收率优势主要来源于间套作玉米的贡献^[17-18]。然而,目前关于在田间连续几年间套作种植条件下,作物籽粒磷质量分数、磷素收获指数和体内磷素利用效率的变化及其受到施磷量影响作用的研究报道还比较少。因此,本研究拟在前期研究^[18]油菜和豆科作物与玉米间套作和施磷对玉米籽粒产量、地上部生物量、磷素吸收量和磷肥回收率影响的工作基础上,报道不同施磷量条件下,与豆科作物或油菜间套作玉米的籽粒磷质量分数、磷素收获指数和体内磷素利用效率等指标相对于单作玉米的变化,以期为间套作玉米体内磷素累积利用和籽粒营养品质变化提供理论依据,并为间套作生产体系的健康发展的研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验地气候及土壤条件

试验于2009—2011年在甘肃武威绿洲农业生态试验站进行(隶属甘肃省农业科学院土壤肥料与节水研究所)。该试验站位于甘肃省武威市北15 km处的永昌镇白云村(北纬38°37'N,东经102°40'E)。该村海拔1 504 m,年平均气温为7.7℃,≥0℃和≥10℃的有效积温分别为3 646和3 149℃,无霜期170~180 d,日照时数3 023 h,太阳辐射总量5 988 MJ/(m²·年),年平均降雨量150 mm,年平均蒸发量2 021 mm。供试土壤为石灰性灌漠土,表土质地为轻壤。2009年试验开始前耕层土壤(0~20 cm)含有机质19.1 g/kg、全氮1.1 g/kg、速效磷(Olsen-P)20.3 mg/kg和速效钾(1 mol/L醋酸铵浸提)233 mg/kg,土壤pH 8.0(水:土=5:1)。

1.2 试验设计及作物管理

试验处理为裂区试验设计,3次重复。主区为3个施磷水平:纯磷(P)0、40和80 kg/hm²,以重过磷酸钙施入,分别标记为P₀、P₄₀和P₈₀。副区包括蚕豆“临蚕5号”(Vicia faba L. cv. Lincan no. 5)、鹰嘴豆“陇鹰1号”(Cicer arietinum L. cv. Longying no. 1)、油菜和大豆分别与玉米“郑单958”(Zea mays L. cv. Zhengdan no. 958)间套作及单作玉米。大豆第1年为南方品种“华夏1号”(Glycine max L. cv. Huaxia no. 1),由于不能结荚,第2年更改为当地品种“武科2号”(Glycine max L. cv. Wuke no. 2);油菜第1年为甘蓝型油菜“陇油5号”(Brassica napus L. cv. Longyou no. 5),由于其严重抑制了玉米的生长和产量,第2年更改为白菜型油菜“甘南4号”(Brassica campestris L. cv. Gannan no. 4)。

所有小区为东西走向,随机区组排列。间套作小区面积5.6 m×5.5 m=30.8 m²,单作玉米小区面积5.0 m×5.5 m=27.5 m²。间套作小区种植4个作物组合带,1个作物组合带包含2行玉米(行距0.40 m,株距0.20 m)和3行蚕豆、鹰嘴豆、大豆或油菜(蚕豆、鹰嘴豆和大豆的行距0.20 m,株距0.20 m;油菜的行距0.20 m,每行人工均匀撒播),玉米与豆科或油菜的间距为0.30 m。行距和株距的设置代表当地的种植实际情况,其中玉米种植面积占整个间套作区域的57%,豆科或油菜种植面积占整个间套作区域的43%;为便于将间套作和单作玉米进行比较,间套作小区玉米在各自所占净面积

内种植密度、行距和株距与单作玉米小区相同。

豆科或油菜均给予相同的施氮量(N)112.5 kg/hm²,以尿素的形式一次性作为基肥,均匀撒施于地表后,翻入表层20 cm土壤中;玉米施氮为225 kg/hm²,分为基肥和追肥,基肥时期施肥量为112.5 kg/hm²,追肥时期为大喇叭口期和吐丝期,追肥位置为玉米行间,每个时期随灌溉施入量为56.3 kg/hm²。磷肥(重过磷酸钙)全部为基肥,未施用钾肥和有机肥。在作物整个生长期,所有小区给予充足灌水和人工除草,并在作物生长的适当时期进行中耕。不施用任何杀菌剂,只在蚕豆盛花期叶面喷施氧化乐果(O,O-二甲基-S-(N-甲基氨基甲酸酯)硫代磷酸酯,中国达州兴隆化学试剂有限公司)以防治蚕豆蚜虫。

2009—2011年,蚕豆、鹰嘴豆和油菜同时播种,播种期为3月下旬;大豆和玉米同时播种,播种期为4月下旬。2009年8月初收获甘蓝型油菜;2010和2011年6月底收获白菜型油菜;2009—2011年,7月底同时收获蚕豆和鹰嘴豆,8月底—9月初收获大豆,10月中上旬收获玉米。

1.3 作物成熟收获时地上部植株样品采集与分析

作物成熟期,单作或间套作小区收获非小区边行且离小区边0.5 m以上的2行紧邻的玉米或3行紧邻的豆科或油菜用以测定各作物籽粒产量和地上部生物量,并取玉米10株进行考种。取出3株地上部考种的玉米,样品分为籽粒和秸秆2部分,烘干后用不锈钢研磨机(型号HY-04B,北京)进行粉碎,充分混合均匀,用以测定籽粒和秸秆磷浓度。植株磷浓度采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,钒钼黄比色法测定。

1.4 数据分析

利用SAS 8.0 (SAS Institute, Cary, NC)进行方差分析(ANOVA),用最小显著性差异法(LSD_{0.05})多重比较。每年的数据用主区3个磷水平,裂区5个种植体系(单作和4种间套作玉米)的裂区设计分析;3年的数据采用3(年际)×3×5三因素分析。

2 结果与分析

2.1 玉米籽粒磷质量分数

表1中,2009—2011年3个施磷水平下,除2009年不施磷时与大豆间套作玉米籽粒磷质量分数略低于单作玉米外,其余与油菜、蚕豆、鹰嘴豆和大豆间套作的玉米籽粒磷质量分数均高于单作玉

米,其中,与油菜间套作的玉米(2009年纯磷40和80 kg/hm²时,2010年纯磷80 kg/hm²时和2011年纯磷40 kg/hm²时)和与蚕豆间套作玉米(2009年纯磷80 kg/hm²时和2011年纯磷40 kg/hm²时)籽粒磷质量分数与单作玉米处理的差异达到显著水平。3个施磷水平平均,与油菜(2009—2011年)、蚕豆(2010年除外)、鹰嘴豆(2009—2011年)和大豆(2009年除外)间套作玉米籽粒磷质量分数均显著高于单作玉米;3年平均,与油菜、蚕豆、鹰嘴豆和大豆间套作玉米平均籽粒磷质量分数比相应单作玉米分别高19.8%、13.0%、17.2%和12.0%(表1)。

除2009年单作玉米纯磷40 kg/hm²时和与鹰嘴豆间套作玉米纯磷80 kg/hm²时籽粒磷质量分数低于不施磷时外,2009—2011年纯磷40和80 kg/hm²时玉米籽粒磷质量分数均高于不施磷时(表1)。单、间套作体系平均:2009年施磷量对玉米籽粒磷质量分数没有显著影响;2010和2011年,纯磷40和80 kg/hm²时玉米籽粒磷质量分数显著高于不施磷时,2年平均提高12.5%和15.9%(表1)。

3年的试验数据表明,施磷和间套作2种处理对玉米籽粒磷质量分数的影响不存在交互作用(表1)。不考虑种植体系和施磷量2种因素,同一年数据总体平均,玉米籽粒磷质量分数间存在一定的年际效应,2009—2011年间逐渐降低,分别为2.24、2.14和2.10 g/kg(表1)。

2.2 玉米收获指数

表2中,2009—2011年3个施磷水平下,除2009年纯磷80 kg/hm²时与大豆间套作玉米收获指数显著高于单作玉米、2010年不施磷时与蚕豆间套作玉米和2011年纯磷80 kg/hm²时与大豆间套作玉米显著低于与油菜间套作玉米外,其余单、间套作玉米间均无显著性差异。3个施磷水平平均,2011年与大豆间套作玉米收获指数显著低于与油菜间套作玉米,而间套作并不能导致与单作玉米间在收获指数上存在显著性差异(表2)。

2009—2011年,3个施磷水平下,单作或间套作玉米随施磷量的增加,收获指数并没有表现出明显升高或降低的变化规律(表2)。统计分析表明,单、间套作体系平均,2009—2011年玉米收获指数在施磷量间没有显著性差异。

3年的试验数据表明,施磷和间套作2种处理对玉米收获指数的影响并无交互作用(表2)。不考虑种植体系和施磷量2种因素,同一年数据总体平

均,2009—2011年收获指数分别为53.6%、57.4%和51.3%,存在一定的年际效应(表2)。

2.3 玉米磷素收获指数

表3中,2009—2011年3个施磷水平下,除2010年不施磷时与鹰嘴豆间套作玉米和2011年纯磷80 kg/hm²时与大豆间套作玉米的磷素收获指数显著低于与油菜间套作玉米外,其余单、间套作玉米间均无显著性差异。3个施磷水平平均,除2011年与大豆间套作玉米磷素收获指数显著低于与油菜间套作玉米外,其余单、间套作玉米间在磷素收获指数上无显著性差异(表3)。

2011年,3个施磷水平下,间套作玉米施磷时的磷素收获指数存在高于不施磷的趋势(表3)。统计分析表明,单、间套作体系平均,2011年玉米磷素收获指数在纯磷80 kg/hm²时为75.0%,显著高于不施磷时的70.4%(表3)。

3年的试验数据表明,施磷和间套作2种处理对玉米磷素收获指数的影响中不存在交互作用(表3)。不考虑种植体系和施磷量2种因素,同一年数据总体平均,2009—2011年磷素收获指数分别为87.9%、88.9%和72.8%,存在年际效应,2011年有降低的趋势(表3)。

2.4 玉米体内磷素利用效率

体内磷素利用效率,又称之为体内磷代谢效率,用植株地上部干物质重量与相应地上部磷素吸收量的比值表示,即单位地上部磷素养分吸收量所能生产的地上部植株干物质重量,单位kg/kg,此数值愈大则表明体内磷素利用或代谢效率愈高。表4中,2009—2011年3个施磷水平下,单作玉米体内磷素利用效率均高于间套作玉米(2009年不施磷时与大豆间套作玉米高于单作玉米除外),其中,与油菜间套作玉米(2009年纯磷40和80 kg/hm²和2011年不施磷时)、与蚕豆间套作玉米(2009年纯磷80 kg/hm²时)和与鹰嘴豆间套作玉米(2009年纯磷80 kg/hm²时和2011年不施磷时)显著低于单作玉米。3个施磷水平平均,间套作玉米体内磷素利用效率显著低于单作玉米(除2009年和2011年与大豆间套作玉米和2010年与蚕豆间套作玉米外);与油菜、蚕豆、鹰嘴豆和大豆间套作玉米平均体内磷素利用效率比单作玉米分别降低15.9%、9.6%、14.9%和8.5%(表4)。

2009—2011年,3个施磷水平下,单、间套作玉米施磷时体内磷素利用效率低于不施磷(2009年单

表 1 2009—2011 年施磷水平和作物种植方式对玉米籽粒磷质量分数的影响

Table 1 Grain P concentrations of maize affected by P application rates and cropping systems from 2009 to 2011

年份 Year	施磷水平/ (kg/hm ²) P rate	间套作玉米籽粒磷质量分数/(g/kg)					平均值 Mean	方差分析, 变异来源 ANOVA, variable	概率值 P
		单作玉米籽粒磷质量 分数/(g/kg)	油菜 Rape or turnip	蚕豆 Faba bean	鹰嘴豆 Chickpea	大豆 Soybean			
2009	0	1.96 ab	2.44 a	2.22 ab	2.37 ab	1.92 b	2.18 A	磷水平 P	0.639 2
	40	1.92 b	2.63 a	2.25 ab	2.37 ab	2.28 ab	2.29 A	种植方式 C	<0.000 1
	80	2.01 c	2.65 a	2.34 ab	2.27 bc	2.02 bc	2.26 A	P * C	0.631 5
	平均值 Mean	1.97 D	2.57 A	2.27 BC	2.33 B	2.07 CD	2.24		
2010	0	1.67 a	1.87 a	1.82 a	2.05 a	2.05 a	1.89 B	磷水平 P	0.039 9
	40	1.91 a	2.07 a	2.10 a	2.50 a	2.53 a	2.22 A	种植方式 C	0.072 6
	80	2.03 b	2.62 a	2.30 ab	2.22 ab	2.33 ab	2.30 A	P * C	0.664 9
	平均值 Mean	1.87 B	2.19 A	2.08 AB	2.26 A	2.30 A	2.14		
2011	0	1.82 a	2.02 a	2.10 a	2.09 a	1.90 a	1.98 B	磷水平 P	0.029 0
	40	1.91 b	2.27 a	2.18 a	2.14 ab	2.14 ab	2.13 A	种植方式 C	0.038 7
	80	2.07 a	2.16 a	2.24 a	2.21 a	2.21 a	2.18 A	P * C	0.864 6
	平均值 Mean	1.93 B	2.15 A	2.17 A	2.15 A	2.08 A	2.10		

方差分析 ANOVA

年份 Y	0.025 1
磷水平 P	0.000 2
种植方式 C	<0.000 1
Y * P	0.186 5
Y * C	0.021 5
P * C	0.562 7
Y * P * C	0.892 2

注：Y 代表年份，P 代表施磷水平，C 代表作物种植方式。表中所列数据为 3 个观测值的平均值。同一年同一施磷水平下相同小写字母表示不同作物种植体系间在 LSD $P < 0.05$ 水平差异不显著(水平方向比较)；同一年相同大写字母表示不同种植体系间(水平方向比较)或不同施磷量间(垂直方向比较)在 LSD $P < 0.05$ 水平差异不显著。方差分析(ANOVA)的数据为各变异来源的概率 P 值。下表同。

Note: Y, P and C represent year, P application rates and cropping systems, respectively. Values followed by the same lowercase letters are not significantly different among different cropping systems within the same P rate in one year at the 5% level by LSD (horizontal comparison); values followed by the same capital letters are not significantly different among different P rates (vertical comparison) or among different cropping systems (horizontal comparison) in one year at the 5% level by LSD. Values under ANOVA are the probabilities (P values) of the source of variation. The same as below.

表2 2009—2011年施磷水平和作物种植方式对玉米收获指数的影响

Table 2 Harvest indexes of maize affected by P application rates and cropping systems from 2009 to 2011

年份 Year	施磷水平/ (kg/hm ²) P rate	间套作玉米收获指数/% Harvest indexes of maize intercropped with				平均值 Mean	方差分析, 变异来源 ANOVA, variable	概率值 P
		油菜 Rape or turnip	蚕豆 Faba bean	鹰嘴豆 Chickpea	大豆 Soybean			
2009	0	51.1 a	54.9 a	54.2 a	54.4 a	53.5 A	磷水平 P	0.876 9
	40	51.1 a	50.7 a	53.7 a	52.0 a	53.0 A	种植方式 C	0.749 2
	80	54.4 ab	53.6 ab	54.6 ab	58.0 a	54.3 A	P * C	0.405 3
	平均值 Mean	52.2 A	53.1 A	54.2 A	54.8 A	53.6		
2010	0	62.4 a	56.0 b	58.3 ab	57.7 ab	58.4 A	磷水平 P	0.415 5
	40	58.4 a	58.5 a	56.5 a	56.3 a	57.6 A	种植方式 C	0.464 7
	80	56.0 a	52.7 a	58.2 a	57.3 a	56.1 A	P * C	0.572 0
	平均值 Mean	59.0 A	55.7 A	57.7 A	57.1 A	57.4		
2011	0	50.3 a	51.0 a	52.7 a	45.6 a	50.4 A	磷水平 P	0.544 1
	40	51.3 a	51.9 a	53.5 a	49.2 a	51.1 A	种植方式 C	0.042 2
	80	61.4 a	50.3 ab	52.1 ab	45.8 b	52.4 A	P * C	0.306 1
	平均值 Mean	54.4 A	51.1 AB	52.8 A	46.9 B	51.3		
方差分析 ANOVA								
年际 Y		<0.000 1						
磷水平 P		0.940 8						
种植方式 C		0.287 6						
Y * P		0.405 5						
Y * C		0.125 6						
P * C		0.727 8						
Y * P * C		0.275 0						

注:①表示收获指数的计算方法为:收获指数=籽粒产量/地上部总生物量×100。

Note:① indicates harvest index which is calculated according to the following formula: Harvest index = Grain yield / Above-ground shoot biomass × 100.

表 3 2009—2011 年施磷水平和作物种植方式对玉米磷素收获指数影响

Table 3 P harvest indexes of maize affected by P application rates and cropping systems from 2009 to 2011

年份 Year	施磷水平/ (kg/hm ²) P rate	间套作玉米磷素收获指数/% P harvest indexes of maize intercropped with				平均值 Mean	方差分析, 变异来源 ANOVA, variable	概率值 P
		单作玉米磷素收获 指数 ^① / % P harvest indexes of monocropped maize	油菜 Rape or turnip	蚕豆 Faba bean	鹰嘴豆 Chickpea			
2009	0	84.8 a	89.8 a	89.5 a	87.4 a	88.1 a	磷水平 P	0.639 2
	40	89.0 a	84.8 a	85.2 a	89.3 a	86.8 a	种植方式 C	0.937 2
	80	88.3 a	86.8 a	88.5 a	89.4 a	88.7 a	P * C	0.699 1
	平均值 Mean	87.4 A	87.1 A	87.8 A	88.7 A	87.9		
2010	0	87.9 ab	91.7 a	88.2 ab	87.7 b	88.8 ab	磷水平 P	0.862 5
	40	90.5 a	89.5 a	88.0 a	88.5 a	89.3 a	种植方式 C	0.332 4
	80	88.9 a	88.2 a	86.8 a	88.1 a	88.6 a	P * C	0.691 6
	平均值 Mean	89.1 A	89.8 A	87.6 A	88.1 A	88.9		
2011	0	71.7 a	67.6 a	73.0 a	70.4 a	70.4 B	磷水平 P	0.137 6
	40	68.3 a	77.4 a	73.9 a	74.2 a	73.0 AB	种植方式 C	0.326 8
	80	75.9 ab	81.1 a	73.6 ab	75.1 ab	75.0 A	P * C	0.367 8
	平均值 Mean	72.0 AB	75.3 A	73.5 AB	73.2 AB	72.8		
方差分析 ANOVA								
年际 Y							<0.000 1	
磷水平 P							0.541 1	
种植方式 C							0.945 7	
Y * P							0.650 8	
Y * C							0.992 3	
P * C							0.738 2	
Y * P * C							0.838 0	

注：①表示磷素收获指数的计算方法为：磷素收获指数 = 籽粒磷吸收量/地上部总磷吸收量 × 100。

Note: ① indicates P harvest index which is calculated according to the following formula: P harvest index = Grain P acquisition/Above-ground shoot P acquisition × 100.

表4 2009—2011年施磷水平和作物种植方式对玉米体内磷素利用效率的影响

Table 4 Internal P use efficiency of maize affected by P application rates and cropping systems from 2009 to 2011

年份 Year	施磷水平/ (kg/hm ²) P rate	间套作玉米体内磷素利用效率/(kg/kg)						平均值 Mean	方差分析, 变异来源 ANOVA,variable	概率值 P
		单作玉米体内磷素 利用效率 ^① /(kg/kg)		Internal P use efficiency of maize intercropped with						
		Internal P use efficiency of monocropped maize	油菜 Rape or turnip	蚕豆 Rape or turnip	鹰嘴豆 Chickpea	大豆 Soybean				
2009	0	833.2 a	721.2 a	752.6 a	682.2 a	866.6 a	771.1 A	磷水平 P	0.311 8	
	40	814.8 a	645.7 b	748.5 ab	709.9 ab	736.2 ab	730.8 A	种植方式 C	0.000 5	
	80	868.9 a	603.7 b	715.8 bc	727.1 b	771.5 ab	737.4 A	P * C	0.523 1	
	平均值 Mean	839.0 A	656.8 D	738.9 BC	706.1 CD	791.4 AB	746.5			
2010	0	920.8 a	792.5 a	883.0 a	753.4 a	744.6 a	818.8 A	磷水平 P	0.004 9	
	40	826.2 a	741.5 a	718.5 a	646.3 a	652.6 a	717.0 B	种植方式 C	0.020 6	
	80	791.1 a	620.2 a	729.3 a	685.2 a	682.7 a	701.7 B	P * C	0.914 4	
	平均值 Mean	846.0 A	718.1 B	776.9 AB	694.9 B	693.3 B	745.8			
2011	0	761.3 ab	670.1 c	683.5 bc	644.5 c	800.2 a	711.9 A	磷水平 P	0.033 2	
	40	724.8 a	664.3 a	655.9 a	655.6 a	672.9 a	674.7 AB	种植方式 C	0.026 9	
	80	696.3 a	630.1 a	655.9 a	654.5 a	695.1 a	666.4 B	P * C	0.700 2	
	平均值 Mean	727.5 A	654.8 B	665.1 B	651.6 B	722.7 A	684.3			
方差分析 ANOVA										
年际 Y									0.000 4	
磷水平 P									0.000 3	
种植方式 C									<0.000 1	
Y * P									0.272 4	
Y * C									0.054 3	
P * C									0.485 1	
Y * P * C									0.958 7	

注:①表示体内磷素利用效率的计算方法:体内磷素利用效率 = 地上部总生物量/地上部总磷吸收量 × 100。

Note: ① indicates internal P use efficiency which is calculated according to the following formula: Internal P use efficiency = Above-ground shoot biomass/Above-ground shoot P acquisition × 100.

作玉米和与鹰嘴豆间套作玉米及2011年与鹰嘴豆间套作玉米除外)(表4)。统计分析表明,单、间套作体系平均,纯磷40 kg/hm²时(2010年)和纯磷80 kg/hm²时(2010和2011年)显著低于不施磷时,2年平均降低8.8%和10.4%(表4)。

3年的试验数据表明,施磷和间套作2种处理对玉米体内磷素利用效率不存在交互作用影响(表4)。不考虑种植体系和施磷量2种因素,同一年数据总体平均,2009—2011年体内磷素利用效率分别为746.5、745.8和684.3 kg/kg,存在年际效应,2011年有降低的趋势(表4)。

3 讨论与结论

本研究中的一个显著特点是,连续3年的田间试验充分证明,间套作能显著提高玉米籽粒磷含量,与油菜、蚕豆、鹰嘴豆和大豆间套作的玉米平均籽粒磷质量分数比单作玉米分别高出19.8%、13.0%、17.2%和12.0%(表1)。相关研究表明,与单作相比,玉米花生间套作使得玉米全株氮质量分数降低5.5%~8.9%,达到极显著水平;而间套作则提高玉米全株磷含量^[19]。

收获指数或经济系数是反映作物库源比和影响作物经济产量和籽粒产量提高的重要的栽培生理指标,适宜的养分供应才能获得适宜的源、库关系,养分供应不足或过量均不利于上述指标的提高。养分供应不足,使得源的生产和供应能力下降,从而影响库的建成和发育;养分供应过量,是一种浪费,既增加了农业生产的成本,又会使过量的肥料进入环境造成污染,而且过量的养分供应,还使得光合产物的源端装载及向籽粒的运输受到影响^[20]。而有关间套作对玉米或豆科收获指数影响的研究较少。有研究表明,玉米花生间套作降低玉米干物质向茎秆和叶片的分配比例,提高其向籽粒的分配量,进而增加收获指数,说明间套作有利于光合产物向库-籽粒中的运输^[21]。本研究中,3年连续田间试验证明,间套作对单作玉米收获指数并无显著影响(表2)。与此同时,磷素收获指数在单、间套作玉米间也无显著性差异(表3)。上述现象说明,玉米籽粒磷含量的提高并非磷素或干物质分配中库源比,即植株体内磷素或干物质向籽粒中转移比例升高所导致,间套作并没有影响干物质或磷素在营养体和籽粒中的分配比例,而是同时增加了籽粒和秸秆中的磷含量。因此,可以说,正是这种磷素在间套作玉米籽粒和秸

秆中的奢侈累积,降低了玉米体内磷素利用或代谢效率。

本研究中,2009年施磷量对玉米籽粒磷含量没有显著影响,后2年纯磷40和80 kg/hm²时,玉米籽粒磷质量分数显著高于不施磷时,平均提高11.9%和16.5%(表1)。2009年玉米籽粒磷含量对磷肥施用没有响应,其原因可能是,由于受到之前农民传统施肥量的影响,试验开始的第1年土壤基础磷素质量分数较高(Olsen-P达20.3 mg/kg),从而不能体现磷肥施用的效果。沈阳棕壤田间试验研究^[22]表明,一定的氮(240 kg/hm²)、磷(225 kg/hm²)和钾(240 kg/hm²)组合用量下,营养体、籽粒干物质和总生物产量的累积速率最大,出现日期较早,且籽粒产量最高,收获指数最大。目前的研究表明,3年连续田间试验施磷对玉米收获指数无显著影响(表2)。施磷只对2011年磷素收获指数有增加的趋势(表3)。夏威夷大学学者^[23]对10个土壤磷素水平和3种土壤环境下的研究表明,随着磷素有效性的提高,玉米体内磷素养分利用效率降低。另有研究^[24]表明,小米和豇豆间套作时,磷肥施用量和施肥位点不同(撒施、小米带和豇豆带),豇豆和小米生物量、籽粒产量、叶片磷含量和体内磷素利用效率等的响应不同,存在最佳合理的配合。本试验研究表明,施磷降低玉米体内磷素利用效率,磷素存在奢侈吸收现象;纯磷40 kg/hm²(2010年)和80 kg/hm²时(2010和2011年)玉米体内磷素利用效率显著低于不施磷时,2年平均分别降低8.8%和10.4%(表4)。

另外,玉米籽粒磷质量分数、收获指数、磷素收获指数和体内磷素利用效率在年际间存在一定的变异(表1~4),这可能与第1年与玉米搭配的作物甘蓝型油菜和大豆(华夏1号)在第2年和第3年更换为白菜型油菜和武科2号大豆有关。这点在玉米籽粒磷含量变化(表1)方面的表现尤为明显,如2009年与甘蓝型油菜间套作玉米平均籽粒磷质量分数显著高于与其他豆科作物间套作的玉米,而后2年与白菜型油菜间套作玉米与其他豆科作物间套作玉米相比无明显差异;2009年与“华夏1号”大豆间套作玉米平均籽粒磷含量与单作玉米无显著差异,而后2年与“武科2号”大豆间套作玉米平均籽粒磷含量显著高于单作玉米。并且,由于持续磷肥施用的原因,3年间土壤速效磷含量会存在差异,第1年磷肥效应没有体现,第2年和第3年磷肥效应才表现出

来,这也可能导致年际间的差异。

玉米籽粒磷与籽粒粗蛋白、粗淀粉和脂肪酸等籽粒营养品质间存在一定的相关性^[6-7]。粉质粘土试验的研究表明,不同的磷肥用量和间套作配比对玉米和大豆粗蛋白含量的影响不同,1:2配比纯磷20 kg/hm²大豆粗蛋白的含量最高,1:1配比纯磷0 kg/hm²玉米粗蛋白含量最高^[25]。本研究中,间套作能提高玉米籽粒磷含量,后续有待于分析研究间套作对玉米籽粒粗蛋白、粗淀粉、脂肪酸和植酸磷等有关动物和人体健康的籽粒营养品质的影响。如何协调间套作对玉米增产和磷素高效利用(仅对玉米所占净面积而言)^[17-18]及其对籽粒营养品质影响之间的关系也是今后要考虑的重要问题,以期在保证粮食高产和资源高效的同时,尽量确保粮食品质的维持和提升。

参 考 文 献

- [1] 翟少伟. 低植酸盐饲料原料:降低家禽磷新途径[J]. 广东饲料, 2001, 10(1): 27-28
- [2] 袁磊, 朱立贤, 宋志刚, 等. 应用植酸酶降低粪磷排放量的研究[J]. 国外畜牧科技, 2001, 28(3): 10-11
- [3] 傅启高. 植酸对单胃动物的抗营养作用[J]. 动物营养学报, 1998, 10(4): 1-10
- [4] 苏继影, 李瑛莹, 梁冬梅. 酶制剂在减少畜禽粪便对环境污染中的作用[J]. 饲料广角, 2000(16): 35-37
- [5] 许俊香, 刘晓利, 王方浩, 等. 我国畜禽生产体系中磷素平衡及其环境效应[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 119-126
- [6] 何萍, 金继运, 李文娟, 等. 施磷对高油玉米和普通玉米吸磷特性及品质的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(3): 538-543
- [7] 侯彦楠, 杨俊诚, 姜慧敏, 等. 低磷胁迫下不同基因型玉米籽粒磷含量及品质性状分析[J]. 核农学报, 2009, 23(2): 327-333
- [8] Li L, Li S M, Sun J H, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2007, 104(27): 11192-11196
- [9] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping I Yield advantage and interspecific interactions on nutrients[J]. Field Crop Res, 2001, 71(2): 123-137
- [10] Li L, Zhang F S, Li X L, et al. Interspecific facilitation of nutrient uptake by intercropped maize and faba bean[J]. Nutr Cycl Agroecosys, 2003, 65(1): 61-71
- [11] Li W X, Li L, Sun J H, et al. Effects of nitrogen and phosphorus fertilizers and intercropping on uptake of nitrogen and phosphorus by wheat, maize, and faba bean[J]. J Plant Nutr, 2003, 26(3): 629-642
- [12] Li L, Tang C X, Rengel Z, et al. Chickpea facilitates phosphorus uptake by intercropped wheat from an organic phosphorus source[J]. Plant Soil, 2003, 248(1/2): 297-303
- [13] Li S M, Li L, Zhang F S, et al. Acid phosphatase role in chickpea/maize intercropping[J]. Ann Bot, 2004, 94(2): 297-303
- [14] Zhou L L, Cao J, Zhang F S, et al. Rhizosphere acidification of faba bean, soybean and maize[J]. Sci Total Environ, 2009, 407(14): 4356-4362
- [15] Hinsinger P, Betencourt E, Bernard L, et al. P for two, sharing a scarce resource: Soil phosphorus acquisition in the rhizosphere of intercropped species[J]. Plant Physiol, 2011, 156(3): 1078-1086
- [16] Mei P P, Gui L G, Wang P, et al. Maize/faba bean intercropping with rhizobia inoculation enhances productivity and recovery of fertilizer P in a reclaimed desert soil[J]. Field Crop Res, 2012, 130: 19-27
- [17] 夏海勇. 种间相互作用和供磷强度对玉米间作系统生产力、根系分布和养分吸收利用的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2013
- [18] Xia H Y, Wang Z G, Zhao J H, et al. Contribution of interspecific interactions and phosphorus application to sustainable and productive intercropping systems [J]. Field Crop Res, 2013, 154: 53-64
- [19] 焦念元, 侯连涛, 宁堂原, 等. 玉米花生间作氮磷营养间套作优势分析[J]. 作物杂志, 2007(4): 50-53
- [20] 金继运, 何萍. 氮钾营养对春玉米后期碳氮代谢与粒重形成的影响[J]. 中国农业科学, 1999, 32(4): 55-62
- [21] 焦念元, 陈明灿, 宁堂原, 等. 玉米花生间作对玉米干物质积累与分配的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(36): 11782-11783
- [22] 战秀梅, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 不同氮、磷、钾肥用量对玉米源、库干物质积累动态变化的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(3): 495-499
- [23] Rajbbandari N P. Analysis of competition and phosphorus response in maize/soybean and maize/rice intercrops in relation to soil phosphorus availability in different environments[J]. Dissertation Abstracts International B Sciences and Engineering, 1992, 52(12): 6143B
- [24] Davis J G, Manu A, Hossner L R, et al. Phosphorus management of a millet/cowpea intercrop system on sandy dunal soils of western Niger[J]. J Plant Nutr, 1994, 17(6): 899-910
- [25] Dey A K. Effect of phosphorus fertilization on quality parameters of soybean+maize intercropping system in the tarai soils of Uttaranchal[J]. Crop Res Hisar, 2003, 26(2): 374-377

责任编辑: 袁文业