玉米/鹰嘴豆间作条件下不同施磷量对灌耕灰钙土无机磷组分的影响

柴博¹, 李隆², 杨思存^{1,3}, 陈英¹, 王成宝³, 姜万礼³

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃兰州 730070; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193;
3. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃兰州 730070)

摘要: 在甘肃引黄灌区的灌耕灰钙土区域, 通过玉米/鹰嘴豆间作种植, 采用蒋柏藩、顾益初石灰性土壤无机磷分级方法研究了施磷水平和间作种植方式对玉米、鹰嘴豆土壤无机磷素形态的影响。结果表明: 研究区各无机磷形态含量顺序为 $O-P > Ca_{10}-P > Ca_8-P > Al-P > Fe-P > Ca_2-P$, 施磷能够显著提高玉米和鹰嘴豆土壤中 Ca_2-P 、 Ca_8-P 、 $Al-P$ 和 $Fe-P$ 的含量, $O-P$ 和 $Ca_{10}-P$ 的含量不随施磷量增加发生显著性变化; 与单作相比, 间作种植对鹰嘴豆土壤带各无机磷组分含量没有显著影响, 但间作玉米种植带土壤各组分无机磷含量均低于单作土壤, 其中不施磷肥处理下 $Fe-P$ 、施纯磷 $40 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理下 $Al-P$ 及施纯磷 $80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理下 $Ca_{10}-P$ 的含量显著低于单作土壤。

关键词: 玉米/鹰嘴豆间作; 施磷水平; 无机磷组分; 灌耕灰钙土; 甘肃引黄灌区
中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A

Effects of different P applications on inorganic - P components in irrigated sierozems under maize/chickpea intercropping

CHAI Bo¹, LI Long², YANG Si-cun^{1,3}, CHEN Ying¹, WANG Cheng-bao³, JIANG Wan-li³

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
3. Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: The dosage effects of phosphorous applications on yield of maize and chick-pea under mono-cropping and intercropping systems were investigated using Jiang-Gu inorganic phosphorus fractionation method in irrigated sierozems in Gansu Yellow River Irrigation District. The results showed that the contents of inorganic phosphorus were in the following order: $O-P > Ca_{10}-P > Ca_8-P > Al-P > Fe-P > Ca_2-P$. With the increased uses of phosphate fertilizer, the contents of Ca_2-P , Ca_8-P , $Al-P$, and $Fe-P$ had increased significantly, whereas the contents of $O-P$ and $Ca_{10}-P$ did not show apparent changes. The inorganic P contents looked similar between mono-cropped and intercropped chick-peas, but lower in intercropped maize than mono-cropped one. Particularly, it was found that the $Al-P$ at P40 level (P application rate of $40 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), $Fe-P$ at P0 (Without P application) level, and $Ca_{10}-P$ at P80 level (P application rate of $80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) of intercropped maize were significantly lower than those of mono-cropped one.

Keywords: maize/chickpea intercropping; P application rate; inorganic - P component; irrigated sierozems; Gansu Yellow River Irrigation District

磷是植物必需的营养元素之一, 对植物的生长发育、产量品质都有重要影响^[1]。同时, 磷又是不可再生的矿质资源, 我国的磷肥消耗量占世界第一, 约

74%的耕地土壤缺磷, 且土壤中 95%以上的磷为难溶性磷, 磷肥的当季利用率大多数在 10% ~ 25%左右, 远低于氮、钾肥料, 难以满足作物生长的需

收稿日期: 2014-04-01

基金项目: 十二五国家科技支撑计划项目“循环农业科技工程”(2012BAD14B04); 农业部公益性行业(农业)科研专项(200903001); 甘肃省农业科学院科技创新专项(2011GAAS06-17)

作者简介: 柴博(1988—), 男, 甘肃酒泉人, 硕士研究生, 主要从事土壤磷素形态方面研究。E-mail: 475659650@qq.com。

通信作者: 杨思存(1971—), 男, 甘肃靖远人, 副研究员, 主要从事土壤养分管理研究。E-mail: yangsicun@sina.com。

要^[2-6]。因此,面对磷矿资源日趋紧张的局面,土壤缺磷已成了一个全球性的问题,而如何控制磷肥用量和提高磷肥有效性,减少磷素在土壤中的积累,防止磷素对地表水和地下水污染,并寻求生物学途径提高作物对土壤难溶性磷素的利用,成为国内外研究的热点。

甘肃引黄灌区的灌耕灰钙土是典型的石灰性土壤,土壤有效磷含量本身就很低,施入的磷肥又很容易被转化为溶解度较低的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_3\text{-P}$,并逐渐向更稳定的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 及 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 转化而成为土壤磷的固定态,固定态的磷则很难被一般作物吸收利用^[7]。不同作物对磷胁迫的反应机制不同,磷素不足时,磷高效型作物通过根系分泌较多的有机酸、改变根系形态、增加根际磷酸酶活性等方式提高根际土壤磷的有效性^[8-10]。Dinkelaker 等的研究表明,缺磷条件下,白羽扇豆 (*Lupinus spp.*) 的簇生根分泌大量的柠檬酸,并释放到根际,明显地提高了土壤中磷的有效性^[11]。李隆等的研究表明,玉米/蚕豆间作条件下,蚕豆相对于玉米具有更强的质子释放能力,能够显著地酸化根际,从而有利于难溶性土壤磷的活化和蚕豆及玉米对磷的吸收利用;此外,蚕豆根系释放更多的有机酸,也能促进难溶性磷的活化,从而有利于两种作物的磷营养^[12]。左元梅等研究发现,玉米与花生间作,花生的根干重、主根长明显高于单作,而且间作增加了花生侧根长度和根毛数量,同时花生的比根长明显高于单作花生,根半径低于单作花生,通过改变根系形态增加磷的吸收量^[13]。李隆等通过盆栽试验研究表明,鹰嘴豆/小麦间作在提供有机磷时,鹰嘴豆根系所分泌的酸性磷酸酶能促进小麦对有机磷的利用^[14]。这些研究结果充分表明,通过磷高效基因型与磷低效基因型作物的合理间作套种是提高作物对土壤难溶性磷素利用的一条新途径。但由于受地球化学过程、生物作用和人类活动的影响,磷素在土壤存在着多种形态,各形态间存在复杂的转换关系,因此通过建立土壤磷素分级体系来了解不同形态无机磷在土壤中的分布状况,以及间作中不同作物对磷素的吸收利用情况就显得非常有必要。目前,我国已有不同施肥方式及不同耕作方式对无机磷组分影响的研究报道^[15-17]。但对间作种植引起无机磷组分变化的研究尚属少见,鹰嘴豆/玉米间作系统是否可促进各自对磷素的吸收也少见报道。为此,我们采用蒋柏藩、顾益初的方法^[18],研究了玉米/鹰嘴豆间作条件下连续不同施磷量对灌耕灰钙土无机磷形态的影响,旨在为该土壤磷肥的合理利用提供科学理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况及试验材料

试验设在甘肃省靖远县北滩乡景滩村 (37°05' N, 104°40' E), 位于兴电灌区中游, 海拔 1 645 m, 是黄河水经提升 480 m 形成的新灌区, 成土母质为洪积黄土, 土壤类型为灌耕灰钙土。该区处在旱地农业向荒地牧地过渡线的北部, 属黄土丘陵沟壑干旱区, 由于受青藏高原和腾格里沙漠的影响, 形成了大陆性干旱荒漠气候, 年平均降水量 259 mm, 蒸发量 2 369 mm; 年平均气温 6.6℃, 大于 0℃ 和 10℃ 的积温分别为 3 208℃ 和 2 622℃, 无霜期 160 ~ 170 d; 年日照时数 2 919 h, 辐射量 616.2 KJ·cm⁻²。试验地耕层 (0 ~ 20 cm) 土壤含有机质 15.9 g·kg⁻¹、全氮 0.83 g·kg⁻¹、速效磷 9.3 mg·kg⁻¹、速效钾 204.7 mg·kg⁻¹。基础土样无机磷各组分平均含量 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 4.28 mg·kg⁻¹、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 90.38 mg·kg⁻¹、 Al-P 50.0 mg·kg⁻¹、 Fe-P 25.11 mg·kg⁻¹、 O-P 273.35 mg·kg⁻¹、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 227.56 mg·kg⁻¹。供试玉米品种为郑单 958, 鹰嘴豆为陇鹰 1 号。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计, 主处理为施磷水平, 设 P_0 、 P_{40} 、 P_{80} 三个水平, 即不施磷、施纯磷 40 kg·hm⁻² 和 80 kg·hm⁻²; 副处理为种植方式, 设单种玉米、单种鹰嘴豆、鹰嘴豆/玉米间作三种方式, 重复 3 次, 随机区组排列。试验小区面积均为 4.2 m × 6.0 m = 25.2 m², 每个间作小区种植 3 个作物组合带, 每个作物组合带包括 2 行玉米和 3 行鹰嘴豆, 每个作物组合带宽 1.40 m, 其中两行玉米宽为 0.80 m, 行距 0.40 m, 株距 0.30 m, 每行 21 株; 3 行鹰嘴豆宽为 0.60 m, 行距 0.20 m, 株距 0.20 m, 每行种 31 株; 玉米和鹰嘴豆之间的距离 0.30 m。每个种植单作玉米的小区种 10 行, 行距 0.4 m, 株距 0.3 m; 每个种植单作鹰嘴豆的小区种 21 行, 行距 0.2 m, 株距 0.2 m。

本试验自 2009 年开始至 2013 年已连续进行 5 年, 每年在间作小区采取小倒茬种植。2009 年施用磷肥为重过磷酸钙, 磷肥全部为基肥; 施用氮肥为尿素, 分为基肥和追肥, 基肥施肥量 (N) 为 112.5 kg·hm⁻², 播种前连同磷肥一起撒施并翻耕到土壤中, 追肥时期为大喇叭口期和吐丝期, 施肥量均为 (N) 56.25 kg·hm⁻², 用追肥枪穴施。2010 年至 2013 年施用磷肥为磷二铵, 全部基施; 氮肥为尿素, 基肥施肥量 (N) 为 112.3 kg·hm⁻², 追肥施肥量 (N) 为 224.6 kg·hm⁻²。鹰嘴豆每年 3 月中旬播种, 8 月上旬收

获,玉米 4 月下旬播种,10 月上旬收获,期间共灌水 4 次,每次灌水 $1\ 200\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.3 土样采集与测定方法

在作物收获期取玉米及鹰嘴豆种植带的鲜土样品,深度为 0~20 cm,每带选取中间行按递进式随机取 5 个点,取回后将样品充分混合,并去除可见根。土样在自然通风处阴干后过 100 目筛。

土壤无机磷素分级按照顾益初和蒋柏藩提出^[18]的连续浸提方法将土壤无机磷区分为 6 个形态:Ca₂-P(磷酸二钙型)、Ca₈-P(磷酸八钙型)、Al-P(磷酸铝型)、Fe-P(磷酸铁型)、O-P(闭蓄态磷)和 Ca₁₀-P(磷石灰型)。一般而言,使用的提取剂酸碱性越强,浸提条件越复杂,说明该组分无机磷越难以被作物吸收,有效性越差。

1.4 数据处理

将数据用 Microsoft Excel 2007 整理后,用 SAS 8.1 统计软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 单作鹰嘴豆条件下施磷对无机磷组分和分配率的影响

由表 1 可以看出,与 P0 处理相比,P40 和 P80 处理中 Ca₂-P 含量大幅增加,分别提高了 81% 和 200%;Ca₈-P 含量分别提高了 38% 和 72%;Al-P 含量分别提高 41% 和 133%;Fe-P 由 P0 到 P40 处理含量不发生显著增加,由 P40 到 P80 处理显著增加;O-P 含量在不施磷肥时显著低于施磷肥,但在 P40 和 P80 处理中 O-P 含量无显著差异。Ca₁₀-P 含量在三种施磷水平下均不发生显著变化。基础土壤同单作鹰嘴豆土壤比较,Ca₂-P 含量高于 P0、低于 P40 处理,Ca₈-P 高于 P40、低于 P80 处理,Al-P 含量与 P40 处理相同,Fe-P 含量低于 P0 处理,O-P 和 Ca₁₀-P 含量均无明显变化。

表 1 单作鹰嘴豆条件下施磷对土壤无机磷组分和分配率的影响

Table 1 Contents and proportions of inorganic P forms in chickpea monoculture soil under different P application rates

土壤 Soil	施磷 水平 P rates	Ca ₂ -P		Ca ₈ -P		Al-P		Fe-P		O-P		Ca ₁₀ -P		无机磷 iP
		含量	比例	含量	比例	含量	比例	含量	比例	含量	比例	含量	比例	含量
		/(mg·kg ⁻¹)	/%	/(mg·kg ⁻¹)	/%	/(mg·kg ⁻¹)	/%	/(mg·kg ⁻¹)	/%	/(mg·kg ⁻¹)	/%	/(mg·kg ⁻¹)	/%	/(mg·kg ⁻¹)
单作	P0	3.73b	0.65	63.99c	11.09	35.42c	6.14	27.95b	4.85	220.47b	38.22	225.27a	39.05	576.83
鹰嘴豆	P40	6.76ab	1.00	88.34b	13.06	50.00b	7.39	30.52b	4.51	260.15a	38.45	240.77a	35.59	676.54
M - chickpea	P80	11.19a	1.51	110.26a	14.92	82.57a	11.17	37.93a	5.13	266.52a	36.07	230.51a	31.19	738.98

注:不同小写字母表示差异达显著水平(P < 0.05),下同。

Note: Different small letters in the column means significant difference at 5% level. The same symbol is used for other tables.

2.2 单作玉米条件下施磷对无机磷组分和分配率的影响

由表 2 可知,与 P0 处理相比,P40 和 P80 处理中 Ca₂-P 含量分别提高了 96% 和 387%;Ca₈-P 含量分别提高了 39% 和 74%;Al-P 含量分别提高 73% 和 118%;Fe-P 含量分别提高了 26% 和 49%;O-P

和 Ca₁₀-P 含量在三种磷水平下均无显著变化。基础土壤同单作玉米土壤比较,Ca₂-P 含量高于 P0、低于 P40 处理,Ca₈-P 含量高于 P40、低于 P80 处理,Al-P 含量高于 P0、低于 P40 处理,Fe-P 含量高于 P0、低于 P40 处理,O-P 和 Ca₁₀-P 含量均无显著变化。

表 2 单作玉米条件下施磷对土壤无机磷组分和分配率的影响

Table 2 Contents and proportions of inorganic P forms in maize monoculture soil under different P application rates

土壤 Soil	施磷 水平 P rates	Ca ₂ -P		Ca ₈ -P		Al-P		Fe-P		O-P		Ca ₁₀ -P		无机磷 iP
		含量	比例	含量	比例	含量	比例	含量	比例	含量	比例	含量	比例	含量
		/(mg·kg ⁻¹)	/%	/(mg·kg ⁻¹)	/%	/(mg·kg ⁻¹)	/%	/(mg·kg ⁻¹)	/%	/(mg·kg ⁻¹)	/%	/(mg·kg ⁻¹)	/%	/(mg·kg ⁻¹)
单作	P0	3.73b	0.59	62.00c	9.77	34.21c	5.39	26.14b	4.12	269.72a	42.51	238.68a	37.62	634.48
玉米	P40	7.34b	1.04	86.36b	12.19	59.32b	8.38	32.94ab	4.65	285.33a	40.28	237.00a	33.46	708.29
M - maize	P80	18.18a	2.48	108.04a	14.76	74.67a	10.2	38.98a	5.32	257.61a	35.18	234.70a	32.05	732.18

2.3 玉米/鹰嘴豆间作条件下施磷对鹰嘴豆土壤带无机磷组分和分配率的影响

由表 3 可以看出,间作条件下鹰嘴豆土壤带中,与 P0 处理相比,P40 和 P80 处理中 $Ca_2 - P$ 含量显著增加,分别提高了 124% 和 285%; $Ca_8 - P$ 含量由 P0 到 P40 处理提高了 43%,由 P40 到 P80 处理增加不显著;与 P0 处理相比,P40 和 P80 处理中 $Al - P$ 含量

分别提高 44% 和 108%; $Fe - P$ 由 P0 到 P40 处理含量增加了 24%,由 P40 到 P80 处理无显著变化; $O - P$ 和 $Ca_{10} - P$ 含量在三种施磷水平下均无显著变化。基础土壤同间作鹰嘴豆土壤比较, $Ca_2 - P$ 含量高于 P0、低于 P40 处理, $Ca_8 - P$ 高于 P40、低于 P80 处理, $Al - P$ 高于 P0、低于 P40 处理, $Fe - P$ 含量低于 P0 处理, $O - P$ 和 $Ca_{10} - P$ 含量无明显变化。

表 3 间作条件下施磷对鹰嘴豆土壤带无机磷组分和分配率的影响

Table 3 Contents and proportions of inorganic P forms in chickpea intercropping soil under different P application rates

土壤 Soil	施磷 水平 P rates	$Ca_2 - P$		$Ca_8 - P$		$Al - P$		$Fe - P$		$O - P$		$Ca_{10} - P$		无机磷 iP
		含量	比例	含量										
		Content /(mg·kg ⁻¹)	Proportion /%	Content /(mg·kg ⁻¹)										
间作	P0	2.91c	0.49	63.29b	10.67	35.42b	5.97	25.99b	4.38	235.24a	39.65	230.51a	38.85	593.36
鹰嘴豆	P40	6.53b	0.95	90.33a	13.09	51.10b	7.41	32.33a	4.69	273.58a	39.65	236.16a	34.22	690.03
In - chickpea	P80	11.19a	1.55	101.75a	14.11	73.57a	10.20	34.60a	4.80	263.78a	36.58	236.16a	32.75	721.05

2.4 玉米/鹰嘴豆间作条件下施磷对玉米土壤带无机磷组分和分配率的影响

由表 4 可得,在间作条件下,玉米土壤带中,与 P0 处理相比,P40 和 P80 处理中 $Ca_2 - P$ 含量显著增加,分别提高了 122% 和 509%; $Ca_8 - P$ 含量分别提高 43% 和 64%; $Al - P$ 含量分别提高 46% 和 154%; $Fe - P$ 含量分别增加了 49% 和 99%; $O - P$ 和 $Ca_{10} -$

P 含量在三种施磷水平下均不发生显著变化。基础土壤同间作玉米土壤比较, $Ca_2 - P$ 含量高于 P0 低于 P40 处理, $Ca_8 - P$ 高于 P40、低于 P80 处理, $Al - P$ 高于 P40、低于 P80 处理, $Fe - P$ 含量高于 P0、低于 P40 处理, $O - P$ 含量与 P40 处理相近, $Ca_{10} - P$ 含量无明显变化。

表 4 间作条件下施磷对玉米土壤带无机磷组分和分配率的影响

Table 4 Contents and proportions of inorganic P forms in maize intercropping soil under different P application rates

土壤 Soil	施磷 水平 P rates	$Ca_2 - P$		$Ca_8 - P$		$Al - P$		$Fe - P$		$O - P$		$Ca_{10} - P$		无机磷 iP
		含量	比例	含量										
		Content /(mg·kg ⁻¹)	Proportion /%	Content /(mg·kg ⁻¹)										
间作	P0	2.68b	0.46	59.91b	10.25	32.57c	5.57	20.85c	3.57	237.71a	40.69	230.51a	39.46	584.23
玉米	P40	5.94b	0.88	85.43a	12.58	47.59b	7.01	30.97b	4.56	273.58a	40.30	235.33a	34.67	678.84
In - maize	P80	16.32a	2.29	98.02a	13.74	82.57a	11.58	41.40a	5.81	249.38a	34.97	225.48a	31.62	713.17

2.5 玉米/鹰嘴豆间作对鹰嘴豆土壤带无机磷组分的影响

由表 5 可以看出,随着施磷量的增加,鹰嘴豆间作与单作土壤中的 $Ca_2 - P$ 含量逐渐接近; $Ca_8 - P$ 和 $Al - P$ 情况相似,在 P0 和 P40 处理中单作与间作含量十分接近,仅在 P80 处理中,间作含量分别比单作低 7.7% 和 10.9%,但差异不显著,可能在较高磷水平下间作对鹰嘴豆 $Ca_8 - P$ 和 $Al - P$ 的吸收有一定促进作用; $Fe - P$ 、 $O - P$ 和 $Ca_{10} - P$ 在三种磷水平下单作与间作的含量都无显著差异。

2.6 玉米/鹰嘴豆间对玉米土壤带无机磷组分的影响

由表 6 可以看出,与鹰嘴豆间作的玉米土壤带

中, $Ca_2 - P$ 在 P0、P40 及 P80 处理中含量分别比单作低 28.15%、19.07%、10.23%; $Ca_8 - P$ 分别低 3.37%、1.08%、9.27%; $Al - P$ 在 P0 和 P40 处理中含量分别比单作低 4.79% 和 19.77%; $Fe - P$ 在 P0 和 P40 处理中含量分别比单作低 20.24% 和 5.98%; $O - P$ 在 P0、P40 及 P80 处理中含量分别比单作低 11.87%、4.12% 和 3.19%; $Ca_{10} - P$ 分别低 3.42%、0.70%、3.93%。除 P80 处理的 $Al - P$ 和 $Fe - P$ 含量略高于单作玉米,其余数值均为间作土壤中含量低于单作,也包括较难被植物吸收利用 $O - P$ 和 $Ca_{10} - P$ 。并在 P40 处理 $Al - P$ 、P0 处理 $Fe - P$ 和 P80 处理的 $Ca_{10} - P$ 处达到显著水平。

表 5 单作与间作下鹰嘴豆土壤无机磷各组分的含量/(mg·kg⁻¹)

Table 5 Differences of inorganic P forms between intercropped and mono-cropped chickpeas

施磷水平 P rates	种植方式 Planting methods	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P
P0	单作 Monoculture	3.73 a	63.99 a	35.42 a	27.95 a	220.47 a	225.27 a
	间作 Intercropping	2.91 a	63.29 a	35.42 a	25.99 a	235.24 a	230.51 a
P40	单作 Monoculture	6.76 a	88.34 a	50.00 a	30.52 a	260.15 a	240.77 a
	间作 Intercropping	6.53 a	90.33 a	51.10 a	32.33 a	273.58 a	236.16 a
P80	单作 Monoculture	11.19 a	110.26 a	82.57 a	37.93 a	266.52 a	230.51 a
	间作 Intercropping	11.19 a	101.75 a	73.57 a	34.60 a	263.78 a	236.16 a

表 6 单作与间作下玉米土壤无机磷各组分的含量/(mg·kg⁻¹)

Table 6 Differences of inorganic P forms between intercropped and mono-cropped maize

施磷水平 P rates	种植方式 Planting methods	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P
P0	单作 Monoculture	3.73 a	62.00 a	34.21 a	26.14 a	269.72 a	238.68 a
	间作 Intercropping	2.68 a	59.91 a	32.57 a	20.85 b	237.71 a	230.51 a
P40	单作 Monoculture	7.34 a	86.36 a	59.32 a	32.94 a	285.33 a	237.00 a
	间作 Intercropping	5.94 a	85.43 a	47.59 b	30.97 a	273.58 a	235.33 a
P80	单作 Monoculture	18.18 a	108.04 a	74.67 a	38.98 a	257.61 a	234.70 a
	间作 Intercropping	16.32 a	98.02 a	82.57 a	41.40 a	249.38 a	225.48 b

3 讨 论

3.1 施磷对无机磷组分的影响

甄清香等^[19]对甘肃省内主要农业土壤的研究表明,施磷可使灌漠土、黑垆土和褐土的 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P 和 Fe-P 含量均明显增加。其中 3 土类的 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P 以及黑垆土和褐土的 Fe-P 增加达极显著水平;施磷对各土类的 O-P 和 Ca₁₀-P 在试验期间内影响不显著。以上结果表明,施入土壤的磷肥,除作物吸收利用外,主要以 Ca₂-P、Ca₈-P、和 Al-P 的形态积累。随着培育时间的延长,各土类的 Ca₂-P、和 Ca₈-P 极显著递减,而 Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca₁₀-P 有递增趋势,但多数形态未达到显著水平。吕家珑等^[20]进行的室内模拟试验表明,施入水溶性 KH₂PO₄ 能够明显地提高 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P 和 Fe-P 的含量,施磷量与以上 4 种磷组分的相关系数均达极显著水平。不论是无机磷肥或有机肥,基本对 O-P 和 Ca₁₀-P 没有影响。长期施用化学磷肥、有机肥以及有机肥配合化肥的处理,均可较大幅度提高 O-P 含量(25.8%~64.9%),并在 6 组无机磷总增量中占有可观的比例(9.4%~15.0%)。施用有机肥或无机磷肥,均能生成一定数量的 Ca₁₀-P 型磷酸盐。从其在总增量中所占的比例看,以化肥处理最高(17.7%)。说明长期施用化学磷肥,确有一部分转化为 Ca₁₀-P 磷酸盐,其数量仍相当可观;而在旱地上长期大量施用有

机肥, Ca₁₀-P 的增长幅度却很小。从本试验可得,施化学磷肥会使土壤中 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P 和 Fe-P 含量迅速增加,但 O-P 和 Ca₁₀-P 含量没有表现出明显的增加趋势,这与前人研究结果一致^[20]。

3.2 间作对无机磷组分的影响

Nelemans 和 Findehegg 发现,根系分泌的柠檬酸和苹果酸是芸薹(*Brassica napus*)能有效利用磷矿石的主要原因,因为根系所分泌的有机酸(包括柠檬酸、苹果酸、琥珀酸,α-酮戊二酸等),不仅可降低根际土壤的 pH 值,增加难溶态磷的活性,而且还可与 Fe、Al、Ca 等形成螯合物,从而通过离子交换和还原化作用,抑制吸附或有机磷沉淀出来,增加对土壤难溶态磷的释放^[11,21]。张福锁认为,在石灰性土壤上磷利用率较高的作物(油菜等),主要通过根分泌柠檬酸和苹果酸等有机酸,使土壤中的 Ca-P 溶解,来满足土壤磷胁迫下的磷素需要^[22]。蚕豆/玉米间作研究表明,蚕豆相对于玉米具有更强的质子释放能力,能够显著地酸化根际,从而有利于难溶性土壤磷的活化和吸收。此外,蚕豆根系释放更多的有机酸,也能促进难溶性磷的活化,利于两种作物的磷营养供给,鹰嘴豆与小麦间作也有类似的现象^[23]。已经证实当两种作物间作时,分泌酸能力强的作物活化的磷能被另一种作物吸收,如小麦/白羽扇豆间作,白羽扇豆分泌的柠檬酸使土壤中难溶性 Ca-P 活化出来,使小麦的吸磷量比单作小麦增加了两倍^[24]。Lindsay 指出,根际 pH 值对作物利用土壤磷库起重

要作用, pH 值决定土壤溶液中的磷酸根种类, 在一定范围的土壤 pH 值内, H_2PO_4^- 和 HPO_4^{2-} 是土壤磷的主要形式, 在土壤 pH 7.2 以上时, 后者是土壤磷的主要形式; 当土壤 pH 值较低时, 根系吸收 H_2PO_4^- 较多, 反之吸收 HPO_4^{2-} 较多^[25]。而磷在土壤中极易发生化学变化, 容易与土壤中的金属离子 (Ca、Mg、Al、Fe) 形成难溶性磷酸盐^[26]。根际 pH 值的降低, 可以促进难溶性磷化合物的溶解, 提高磷的生物有效性。由本试验可知, 间作时土壤中最易被吸收的 $\text{Ca}_2 - \text{P}$ 在鹰嘴豆根系分泌的有机酸活化作用下活性进一步增强, 更利于玉米的吸收, 含量均低于单作土壤。与芸薹、油菜、白羽扇豆等利用磷素的机理相同, 鹰嘴豆根系分泌的有机酸在降低根际土壤 pH 值的同时, 增加了难溶磷的活性, 并与 Fe、Al、Ca 等形成螯合物, 使 $\text{Ca}_8 - \text{P}$ 、 $\text{Al} - \text{P}$ 、 $\text{Fe} - \text{P}$ 等难溶性磷酸盐通过离子交换反应增加土壤磷的释放, 促进了玉米根系的吸收。O - P 由于被氧化铁胶膜包被, 抗蚀性很强, 且它的形成需要一段较长的时间过程, 因此它的释放也需要一定时间, 三种磷水平下间作玉米土壤 O - P 含量都低于单作, 平均低 6%, 在 P0 处理中低 12%, 说明间作可以将少量 O - P 转化为能被玉米吸收利用的磷, 并在低磷胁迫时效果较明显。 $\text{Ca}_{10} - \text{P}$ 是磷灰石类磷酸盐, 其化学活性很低, 在理论上几乎无供磷能力, 因此无论间作单作其含量都很稳定。土壤中磷素形态还与气候、土壤微生物、植物品种、土壤类型等因素有关, 是一个复杂的过程, 本试验只从施磷水平和种植方式两方面进行分析研究, 关于其他因素的作用还有待进一步研究。

4 结 论

甘肃灌耕灰钙土区域各无机磷形态含量顺序为 $\text{O} - \text{P} > \text{Ca}_{10} - \text{P} > \text{Ca}_8 - \text{P} > \text{Al} - \text{P} > \text{Fe} - \text{P} > \text{Ca}_2 - \text{P}$ 。施入土壤中的无机磷肥, 除被作物吸收外, 主要以 $\text{Ca}_2 - \text{P}$ 、 $\text{Ca}_8 - \text{P}$ 、 $\text{Al} - \text{P}$ 、 $\text{Fe} - \text{P}$ 的形态积累, 其中 $\text{Ca}_2 - \text{P}$ 、 $\text{Ca}_8 - \text{P}$ 、 $\text{Al} - \text{P}$ 的含量和占总无机磷的比例都随施磷量的增加而显著提高, O - P 和 $\text{Ca}_{10} - \text{P}$ 的含量和比例不随施磷量增加发生显著性变化。

鹰嘴豆与玉米间作对鹰嘴豆土壤带各组分无机磷含量无显著性影响, 但玉米种植带土壤各组分无机磷含量均低于单作土壤, 其中 P0 处理下 $\text{Fe} - \text{P}$ 、P40 处理下 $\text{Al} - \text{P}$ 及 P80 处理下 $\text{Ca}_{10} - \text{P}$ 的含量显著低于单作。

参 考 文 献:

[1] 杨 慧. 岩溶区不同土地利用类型土壤无机磷形态分布特征[J]. 水土保持学报, 2010, 4(24): 135-140.
[2] 鲁如坤. 我国的磷矿资源与磷肥生产状况 I. 磷矿资源与磷肥生产[J]. 土壤, 2004, 36(1): 1-4.

[3] 鲁如坤. 我国的磷矿资源与磷肥生产情况 II. 磷肥消费与需求[J]. 土壤, 2004, 36(2): 113-116.
[4] 吴 平, 印莉萍, 张立平. 植物营养分子生理学[M]. 北京: 科学技术出版社, 2001: 103-104.
[5] 邵宗臣, 赵美芝. 土壤中积累态磷活化动力学的研究 I. 有机质的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 318-325.
[6] 沈 汉. 从农田土壤养分的 10 年演变看北京市今后施肥方向与策略[J]. 北京农业科学, 1996, 14(3): 1-4.
[7] 王庆仁, 李继云, 李振声. 高效利用土壤磷素的植物营养学研究[J]. 生态学报, 1999, 19(3): 417-421.
[8] Jorg Gerke. Phosphate, aluminium and iron in the soil solution of three different soils in relation to varying concentrations of citric acid[J]. Z. Pflanzenemahr Bodenk, 1992, 155: 339-343.
[9] Gerke J, Meyer U, Romer W. Phosphate, Fe and Mn uptake of N2-fixing red clover and ryegrass from an Oxisol as affected by P and model humic substances application[J]. Z. Pflanzenemahr Bodenk, 1995, 158: 261-2681.
[10] Braum S D, Helmke P A. White lupin utilizes soil phosphorus that is unavailable to soybean[J]. Plant and Soil, 1995, 176: 95-1001.
[11] Dinkelaker B, Romheld V, Marschner H. Citic acid excretion and precipitation of calcium citrate in the rhizosphere of white lupin[J]. Plant, Cell and Environment, 1989, 12: 285-292.
[12] Li L, Li S M, Sun J H, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104: 11192-11196.
[13] 左元梅. 石灰性土壤上玉米/花生间作改善花生铁营养的效应与机制[D]. 北京: 中国农业大学, 1997.
[14] Li L, Tang C, Rengel Z, et al. Chickpea facilitates phosphorus uptake by intercropped wheat from an organic phosphorus source[J]. Plant and Soil, 2003, 248: 297-303.
[15] 孙 华, 熊德祥. 施用有机肥和溶磷细菌肥料对砂姜黑土磷素形态转化的影响[J]. 土壤通报, 2002, 33(3): 194-196.
[16] 戚瑞生. 长期施肥与轮作对农田土壤磷素吸持特性和磷素形态的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
[17] 海 龙. 耕作方式及轮作对土壤磷素形态影响的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2006.
[18] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究[J]. 中国农业科学, 1989, 22: 58-66.
[19] 甄清香, 邵煜庭. 施磷肥对土壤磷素形态转化和有效性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 1994, 12(4): 392-395.
[20] 吕家珑, 刘文革, 王旭东, 等. 长期施肥对土壤无机磷形态组成的影响[J]. 西北农业大学学报, 1995, 23(3): 51-54.
[21] Johnson J F, Allan D L, Vance C P. Phosphorus stress-induced proteoid roots show Altered Metabolism in Lupinus albus[J]. Plant Physiol, 1994, 104(2): 657-665.
[22] 张福锁. 环境胁迫与植物根际营养[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 1-15.
[23] 余常兵, 孙建好, 李 隆. 种间相互作用对作物生长及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 1-8.
[24] 李淑敏. 间作物吸收磷的种间促进作用机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
[25] 周丽莉. 蚕豆、大豆、玉米根系质子和有机酸分泌差异及其在间作磷营养中的意义[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
[26] Holford I C R. Soil Phosphorus, its measurements and its uptake by plants[J]. Australian Journal of soil Research, 1997, 35: 227-239.