

# 大豆-柑桔间作系统中作物对磷的吸收利用特性

周卫军<sup>1</sup>, 王凯荣<sup>1</sup>, 李合松<sup>2</sup>

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125; 2. 湖南农业大学, 长沙 410125)

**摘要:**微区试验和<sup>32</sup>P 同位素示踪技术研究大豆-柑桔间作系统中大豆和柑桔对不同土层中磷的吸收特征表明,大豆-柑桔间作大豆与柑桔对浅层磷具有强烈竞争作用,大豆和柑桔对浅层磷的利用率分别降低 41.5% 和 14.7%,浅层磷肥对大豆和柑桔的供应量分别降低 346.8 mg/区和 148.1 mg/区。柑桔对土壤深层磷的吸收能力比大豆强,单作大豆对浅层磷的利用率比单作柑桔高 104.8%,而对 35cm 和 55cm 土层磷的利用率分别比单作柑桔低 25.6% 和 878.3%。大豆基本不能利用 55cm 及其以下的磷,利用率小于 0.1%。大豆-柑桔间作可以提高大豆对深层磷肥的利用率,间作大豆对 35cm 和 55cm 土层磷肥的利用率比单作大豆分别高 32.3% 和 175.0%。

**关键词:**大豆; 柑桔; 农林间作; <sup>32</sup>P; 磷吸收

## Characteristics of phosphorus uptake by plants in soybean (*Glycine MaxL. merr*) and citrus (*Citrus poonensis Hort ex Tanaka*) intercropping system

ZHOU Wei-Jun<sup>1</sup>, WANG Kai-Rong<sup>1</sup>, LI He-Song<sup>2</sup> (1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Hu'nan Agricultural University, Changsha 410125, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12): 2565~2572.

**Abstract:** The characteristics of <sup>32</sup>P uptake by soybean and citrus among monoculture and intercropping systems were studied with field micro-plot trials and <sup>32</sup>P isotope technique. A field experiment was conducted at Taoyuan Experimental Station of Agro-ecosystem Research of CAS from April to Jun in 2001. The experimental soil is acidic with pH of 4.45. The citrus tree were planted in plots of 3m×3m in row and line distance in Dec. 1995. The soybean was seeded 4 round around citrus tree within diameter of 3m on 15<sup>th</sup> April 2001. <sup>32</sup>P was applied at three distances (27.5, 62.5 and 97.5cm) from the cent of citrus tree and three depths (15, 35 and 55cm) below the surface. Sixty equi-spaced holes of each plot were dug to the required depth in certain distances according to the treatment protocol. Into each soil hole, a PVC access tube was inserted leaving about 10cm of the tube length above the soil surface. In each hole, 20mL

基金项目: 中国科学院知识创新资助项目(KZCX2-407)

收稿日期: 2002-05-25; 修订日期: 2003-09-20

作者简介: 周卫军(1966~), 男, 湖南临澧人, 副研究员, 博士, 主要从事农业生态系统物质循环与转化研究。E-mail: wjzh0108@163.com, 现在湖南农业大学资源与环境学院工作。

刘鑫和李志国参加了部分试验工作, 特此致谢

Foundation item: the Knowledge Innovation Project (No. KZCX2-407)

Received date: 2002-05-25; Accepted date: 2003-09-20

Biography: ZHOU Wei-Jun, Ph. D., Associate professor. Mainly engaged in the research of transformation and cycling of matter in agro-ecosystem. E-mail: wjzh0108@163.com, Present address is College of Resources and Environment, Hu'nan Agricultural University.

$^{32}\text{P}$  solution was dispensed into the access tube on 10<sup>th</sup> May 2001 with radioactivity of three depths (15, 35 and 55cm) being 13.5mCi, 20.0mCi and 28.4mCi, respectively. The samples of plant and soil were collected on 25<sup>th</sup> June 2001. The samples were dried at 80°C, wet digested ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  and  $\text{HClO}_4$ ) and the total P were determined with colorimetric method. The radioactivity of  $^{32}\text{P}$  was radioassayed with FH408 and FJ-367 counting technique in a scintillation system.

The planting mode and  $^{32}\text{P}$  applying depth significantly affected the characteristics of phosphorus uptake by soybean and citrus. Under soybean-citrus intercropping, considerable competition could be observed when the  $^{32}\text{P}$  fertilizer was applied at topsoil (15cm) so the recovery rate of  $^{32}\text{P}$  fertilizer by soybean and citrus declined 41.5% and 14.7%, respectively, and the supplying amount of  $^{32}\text{P}$  fertilizer in topsoil to soybean and citrus decreased 346.8mg/plot and 148.1 mg/plot, respectively, comparing with monoculture. It was possible the recovery of  $^{32}\text{P}$  fertilizer by soybean was promoted when  $^{32}\text{P}$  fertilizer was applied at deeper soil layer (35cm or 55cm) under soybean-citrus intercropping, the  $^{32}\text{P}$  fertilizer was hardly used by soybean after  $^{32}\text{P}$  fertilizer was applied at 55cm or below 55cm layer so its recovery rate was less than 0.1% under soybean monoculture, while the recovery of  $^{32}\text{P}$  fertilizer by soybean was 0.253% under intercropping. The capacity of P uptake by citrus was larger than by soybean when P was applied at the deeper soil layer so the recovery rate of  $^{32}\text{P}$  fertilizer were less 25.6% and 878.3% while that of  $^{32}\text{P}$  fertilizer in 35cm and 55cm soil layer under soybean monoculture than under citrus monoculture, respectively. Considerable increase of  $^{32}\text{P}$  recovery was observed under soybean-citrus intercropping.

**Key words:** soybean; citrus; intercropping ecosystem;  $^{32}\text{P}$ ; absorption characteristic

文章编号:1000-0933(2003)12-2565-08 中图分类号:S565.106 文献标识码:A

合理间作不仅可以使光、热、水、土和养分资源得到充分利用,同时,还能防止水土流失与地力退化<sup>[1~3]</sup>。农林间作系统中物种间的相互作用主要有促进(Facilitation)和竞争(Competition)。两种作用相伴存在,当竞争作用>促进作用时,表现为间作劣势;当竞争作用<促进作用时,表现为间作优势<sup>[2]</sup>。20世纪80年代之前,关于复合经营系统中植物地上部对光热资源的竞争利用已有深入研究<sup>[2,4,5]</sup>。近年来,关于植物地下部对水分和养分资源的种间竞争和促进机理的探索已形成新的研究热点<sup>[4,6~11]</sup>。

农林复合经营在我国南方红壤丘陵地区旱地和坡土利用中非常普遍。南方红壤,不仅有效磷含量低,而且磷肥的利用率也较低,物种之间对于磷肥和土壤磷资源的竞争常是限制间作系统生产力的重要因素。柑桔(*Citrus poonensis Hort ex Tanaka*)是红壤丘陵地区的主要栽培果树,施磷对提高柑桔产量和品质有显著效应<sup>[12]</sup>。大豆(*Glycine max L. merr*)则是该地区的主要经济作物,施磷肥不仅可以提高大豆的固氮能力,而且具有显著的增产作用<sup>[13]</sup>。作为一种用地与养地相结合的复合农业经营模式,大豆-柑桔间作在我国红壤地区得到广泛应用。然而,人们对大豆-柑桔间作系统中磷的作物吸收分配特性的认识还非常有限。有研究表明,在农林复合生态系统中,深根性的木本植物与浅根性的草本作物之间对浅层土壤磷素的竞争激烈,同时,物种之间还存在着养分的相互转移现象<sup>[8~11]</sup>,但是,不同根性的植物对深层土壤磷的吸收分配特性尚不清楚。本实验利用 $^{32}\text{P}$ 同位素示踪的技术,研究了大豆-柑桔间作时两种根性作物对土壤不同层次磷肥的吸收利用特征。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验在中国科学院桃源农业生态试验站宝洞岭实验场(111°33'E,28°55'N)进行。农业地质地貌为第四纪红土低丘。年平均气温 16.5°C,降水量 1447.9 mm,日照 1531.4 h,太阳辐射 427.2 kJ/cm<sup>2</sup>。供试土壤为第四纪红色粘土发育的湿润富铁土(Plinthic ferralsol),耕层(0~20 cm)土壤肥力性状为:有机质 21.8 g/kg,全 N 1.29 g/kg,全 P 0.66 g/kg,全 K 13.9 g/kg,碱解 N 113.6 mg/kg,Olsen-P 6.8 mg/kg,醋酸铵浸提态 K 53.7 mg/kg,pH(水提)4.45。

## 1.2 试验设计

试验共设 9 个处理,包括 3 种植模式,即大豆单作(S)、柑桔单作(C)和大豆-柑桔间作(SC),3 个磷肥的施用深度,即 15 cm 土层(大豆和柑桔根系聚集层)、35cm 土层(大豆根系聚集层之下)和 55cm 土层(柑桔根系聚集层之下)。试验处理组合分别为:(1)大豆单作+15 cm 施 P 肥(S15);(2)大豆单作+35 cm 施 P 肥(S35);(3)大豆单作+55 cm 施 P 肥(S55);(4)柑桔单作+15 cm 施 P 肥(C15);(5)柑桔单作+35 cm 施 P 肥(C35);(6)柑桔单作+55 cm 施 P 肥(C55);(7)大豆-柑桔间作+15 cm 施 P 肥(SC15);(8)大豆-柑桔间作+35 cm 施 P 肥(SC35);(9)大豆-柑桔间作+55 cm 施 P 肥(SC55)。每个处理重复 2 次。

试验柑桔于 1995 年 12 月移栽,株行距均为 3 m。大豆于 2001 年 4 月 15 日播种,品种为“铁丰 29 号”。在大豆-柑桔间作系统中,以柑桔树为中心,在以树基干为圆心、半径 45、80、115 和 150 cm 的四个同心圆上播种大豆,构成一个圆形的实验微区。大豆按 30 cm 株(穴)距播种,第 1 圈播种 8 穴,第 2 圈 16 穴,第 3 圈 24 穴,第 4 圈 32 穴。具体种植与施肥点分布见图 1。柑桔单作处理区,树周不种植大豆,施肥方式和施肥点分布同间作处理。大豆单作处理设在试验桔园附近的旱地上,土壤类型和肥力性状与桔园土壤相似,大豆播种和施肥方式均与间作处理区相同,只是圆形实验微区的中心没有桔树。

在大豆播种前一天(4 月 14 日),于每个微区(面积 7.065 m<sup>2</sup>)施 N 100 g(尿素 225 g)和 K 28.2 g(氯化钾 60 g)作基肥,肥料均匀混入表层土壤(0~20 cm)中。在大豆 4 叶期(5 月 10 日),将<sup>32</sup>P 标记磷酸二氢钾 192 g(P 43.6 g,K 54.8 g)作追肥,通过预置的 PVC 管施到特定深度的土层中。具体施肥方法是:以柑桔基干(大豆-柑桔间作及柑桔单作处理区)或微区中心(大豆单作处理区)为圆心,以 27.5 cm、62.5 cm 和 97.5 cm 为半径划 3 个同心圆,在圆周线上用土钻钻孔至确定深度后,插入一 PVC 塑料管。钻孔间距为 20cm,第 1 圈 8 个孔,第 2 圈 20 个孔,第 3 圈 32 个孔,每微区共 60 个孔(见图 1)。按每孔 20 ml 溶液量(约为 0.73 g P),用移液管将<sup>32</sup>P 标记磷酸二氢钾溶液注入 PVC 管中。每个微区施用的标记磷肥<sup>32</sup>P 活度为:15 cm 施 P 处理为 13.5 mci;35 cm 施 P 处理为 20.0 mci;55 cm 施 P 处理为 28.4 mci。

## 1.3 样品采集

于施<sup>32</sup>P 肥料后的第 45 天(6 月 25 日,大豆结荚期)结束田间实验。将微区分为东西两半,这样大豆处理获得了 4 次重复数。大豆按叶、茎、荚和根分别收获,洗净、烘干(105℃杀青 15min,80℃烘至恒重,下同)后测定生物量,取小样供实验室分析。柑桔平地砍伐,按新叶(当年生叶)、老叶、1 次枝条、2 次枝条、3 次枝条和新梢(当年梢)分割,再将 1、2 次分枝的木质部与韧皮部分开,洗净、烘干后测定生物量,取小样供实验室分析。

以桔树为圆心,按 0~25 cm、25~100 cm、125~150 cm 的圆面将微区分为 3 圈,再分东西两半,共 6 个区域,采集土样和植物根系样。按区分别将 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 和 60~80 cm 土层的土壤全部取出,在塑料板上捣碎,捞出植物根系后混匀,取小样分析。在挖取土壤前用环刀法测定土壤容重和水分含量。

大豆和柑桔根系先用自来水冲洗干净,再用蒸馏水淋洗。将晾干的柑桔根系放在方格坐标图纸上,按直径再分为≥2 mm 的粗根和<2 mm 的细根两部分。烘干至恒重后测定生物量。

## 1.4 样品分析方法

植株、土壤全磷的测定 硫酸-高氯酸消化,钼锑抗比色。

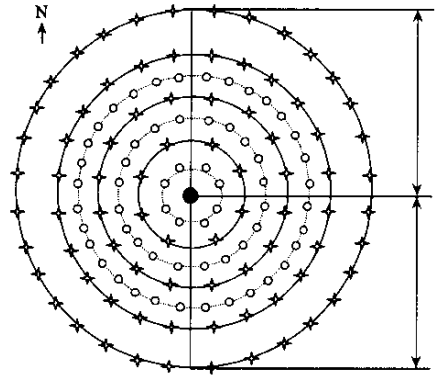


图 1 大豆-柑桔间作及施肥点分布示意图

Fig.1 Schematic diagram of soybean-citrus intercropping and application <sup>32</sup>P fertilizer location

● 柑桔 Citrus, ☆ 大豆 Soybean, ○ PVC 管 PVC tube.

肥料、土壤和植物<sup>32</sup>P 活度测定 干粉制样,采用 FH408 定标器和 FJ-367 塑料闪烁探头测定。并用标准样品按仪器的计数效率和衰变时间,将测定结果校正到同一时间。

## 1.5 数据处理

依照下列公式计算磷肥利用率、植株吸磷总量、植株吸收肥料磷量和植株吸收肥料磷比率:

$$\text{磷肥利用率}(\%) = \text{植株体内}^{32}\text{P 比活度} \times 100 / \text{标记磷肥}^{32}\text{P 比活度}$$

$$\text{植株吸磷总量}(\text{g}/\text{区}) = \text{植株干重} \times \text{植株含磷量}$$

$$\text{植株吸收肥料磷量}(\text{g}/\text{区}) = \text{施用磷肥量} \times \text{磷肥利用率}$$

$$\text{植株吸收肥料磷比率}(\%) = \text{植株吸收肥料磷量} \times 100 / \text{植株吸磷总量}$$

试验数据用 Excel 2000 进行计算,用 Duncan's 新复极差法 ( $LSR_{0.05}$ ) 进行数据的统计分析<sup>[14]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 吸磷总量

种植模式与施肥深度明显地影响大豆和柑桔地吸磷总量。大豆的吸磷总量,单作显著高于间作,且在单作时,浅施磷肥(15 cm)处理又显著高于中层(35 cm)和深(55 cm)施磷处理,但在间作条件下,施磷深度对大豆的吸磷总量无显著影响(表 1)。

单作时,浅层和中层施磷处理对柑桔的吸磷总量没有明显影响,而在深层施磷情况下,柑桔的吸磷总量显著降低。在间作条件下,柑桔的吸磷总量随施磷深度增加而显著降低(表 1)。

表 1 大豆和柑桔的吸磷总量(g/区)

Table 1 Total amount of phosphorus absorption by soybean and citrus plants (g/plot)

处理 Treatments	单作 Monoculture			间作 Intercropping			单作 Monoculture		
	S15	S35	S55	SC15	SC35	SC55	C15	C35	C55
大豆 Soybean	6.84a	6.39b	6.18b	4.61c	4.55c	4.75c			
柑桔 Citrus				5.125a	4.520b	4.288c	5.033a	5.035a	4.639b

同一行中标有不同字母的数据之间具有 5% 的显著性差异 ( $LSR_{0.05}$ ) Data in a row with various letters are statistically different at 5% of significant level ( $LSR_{0.05}$ )

### 2.2 磷肥利用率

2.2.1 浅层(15 cm)施磷的利用率 大豆和柑桔对浅层磷肥的利用率因种植模式不同存在显著差别(表 2)。间作条件下,大豆对浅层磷肥的利用率比单作时降低 41.5%,柑桔对磷肥的利用率比单作时低 14.7%。无论在单作还是间作条件下,大豆对浅施磷肥的利用率均高于柑桔,其中单作时高 104.8%,间作时高 66.0%。

就生态系统而言,间作系统对浅施磷肥的总利用率要显著的高于单作系统,其中间作系统(大豆+柑桔)磷的总利用率比大豆单作系统高 13.3%,比柑桔单作系统高 1.3 倍(表 2)。

表 2 <sup>32</sup>P 肥料的利用率 %

Table 2 <sup>32</sup>P recovery rate by soybean and citrus %

处理 Treatments	单作 Monoculture			间作 Intercropping			单作 Monoculture		
	S15	S35	S55	SC15	SC35	SC55	C15	C35	C55
大豆 Soybean	5.421a	1.473d	0.092f	3.832b	1.948c	0.253e			
柑桔 Citrus				2.308b	1.612d	0.696f	2.647a	1.849c	0.900e
合计 Total	5.421b	1.473f	0.092h	6.140a	3.559c	0.949g	2.647d	1.849e	0.900g

同一行中标有不同字母的数据之间具有 5% 的显著性差异 ( $LSR_{0.05}$ ) Data in a row with various letters are statistically different at 5% of significant level ( $LSR_{0.05}$ )

2.2.2 中层(35 cm)施磷的利用率 在间作条件下,大豆对施于 35cm 土层磷肥的利用率比单作时提高 32.2%,而柑桔对磷肥的利用率比单作时降低了 12.8%。在单作条件下,大豆对 35 cm 土层磷肥的利用率比柑桔低 25.6%,而在间作条件下,大豆对磷肥的利用率反而比柑桔提高了 20.8%。就整个系统而言,

间作同样显著提高了磷肥的总利用率,与大豆和柑桔单作系统相比,间作系统对中层施磷的总利用率分别提高了 141.6 % 和 92.5 % (表 2)。

**2.2.3 深层(55 cm)施磷的利用率** 从表 2 结果看出,在单作条件下,大豆基本上不能有效吸收施于 55cm 土层的磷肥,其利用率仅为 0.092 %,而与柑桔间作时,其利用率显著提高,达到了 0.253 %。柑桔对深层施磷的利用率则是单作显著高于间作。大豆-柑桔间作系统对磷肥的总利用率与柑桔单作系统没有显著差异。

### 2.3 肥料贡献率

植物体吸收的磷,有来自肥料和土壤两个方面。来自肥料的磷占植物吸收总磷量的百分率称为肥料磷的贡献率。

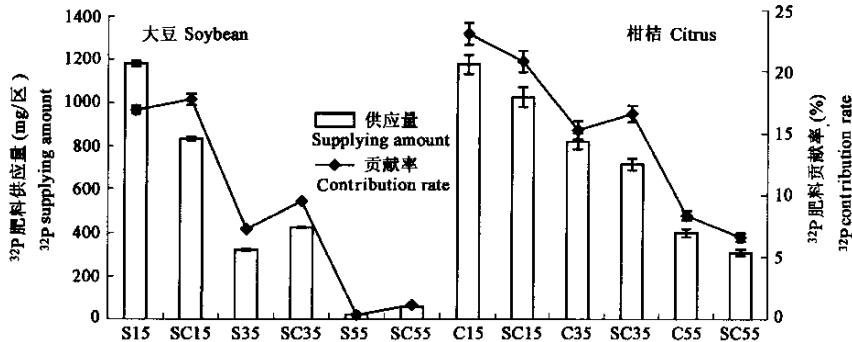


图 2  $^{32}\text{P}$  肥料的供应量和贡献率

Fig. 2 Supplying amount and contribution rate of  $^{32}\text{P}$  fertilizer

从图 2 可以看出,无论是单作还是间作,大豆对肥料磷的绝对吸收量以及肥料磷的贡献率都随磷肥施用深度增加而降低。但是,在间作条件下,施于各土层的磷肥对大豆植株磷的贡献率均比单作时明显提高。间作大豆对表层肥料磷的吸收量小于单作大豆,而对施于 35 cm 和 55 cm 土层的肥料磷的吸收量则明显大于单作大豆。

柑桔对肥料磷的吸收量随施肥深度的增加而显著降低,间作柑桔对肥料磷的吸收量又明显地小于单作柑桔。磷肥的贡献率总体上也是随施肥深度增加而减低。在两种种植模式中,浅施和深施磷肥对单作柑桔植株磷的贡献率大于间作柑桔,而 35 cm 土层磷肥对单作柑桔磷的贡献率小于间作柑桔(图 2)。

### 2.4 根系分布特征

**2.4.1 大豆** 从表 3 可以看出,大豆 70 % 左右的根系都分布在 0~20 cm 土层,约 30 % 的根系分布在 20~40 cm 土层。在 40 cm 以下土层中虽有一些细根分布,但数量很少。种植模式和磷肥施用深度对大豆根系分布有一定地影响。单作大豆根系的生物量显著地高于间作大豆。而无论是单作还是间作,随着磷肥施用深度的增加,0~20 cm 土层的根系分布量显著降低,20~40 cm 土层的根系分布量则呈增加趋势。单作大豆在 0~20cm 土层的根系占总根量的比例高于间作,其中深施磷肥处理两者的差异达到了统计学显著水平。相反,20~40 cm 土层根系占大豆总根量的比例则是间作高于单作,其中只有浅层施磷处理的差异没有达到统计学显著水平。很显然,在本实验中,磷肥是诱导大豆根系生长下扎的一个重要因素。

**2.4.2 柑桔** 本试验利用的柑桔树已经种植 6a,根系生长基本定形,试验种植模式与磷肥施用深度对柑桔根系的生长没有明显影响(结果未列出)。所有供试柑桔树的根系平均值见表 4,从中可以看出,供试柑桔的根系在 0~20 cm 土层中的分布量最大,占总根量的 58 % 以上,显著地高于其它土层。直径  $\geq 2\text{mm}$  的粗根在 20~40 cm 土层中的分布量没有显著差异,各占 11 % 左右,而直径  $< 2\text{mm}$  的细根在 20~40 cm 土层的分布量则显著高于 40~60 cm 土层。在 60~80 cm 土层中,柑桔根系的分布量很少,只有总

根量的 4 % (表 4)。

表 3 大豆根系在土体中的分布

Table 3 The distribution of soybean root in the soil profile

深度 Depth (cm)	项目 Items	单作 Monoculture			间作 Intercropping			LSD <sub>0.05</sub>
		S15	S35	S55	SC15	SC35	SC55	
0~20	根分布量 (g) Root biomass	155.4	145.1	140.9	130.0	121.0	117.6	3.44
	占总根量 (%) Percentage of the total root biomass	73.4	71.2	70.5	72.9	69.9	68.5	1.74
20~40	根分布量 (g) Root biomass	56.2	58.6	58.9	48.3	52.2	54.1	1.68
	占总根量 (%) Percentage of the total root biomass	26.6	28.8	29.5	27.1	30.1	31.5	0.85

### 3 讨论

陈铨荣<sup>[15]</sup>的试验结果显示,大豆对肥料磷的总利用率小于 6%,对于 30 cm 以下土壤深处的<sup>32</sup>P 标记肥料的利用率 0.7%。Suman 等<sup>[11]</sup>报道,灌木对磷肥的利用率随磷肥施用深度及离树距离的增加而降低。在本试验中,无论单作还是间作,磷肥的利用率随着磷肥施用深度的增加而降低,55 cm 土层磷肥的利用率小于 1%,且大豆在单作时基本不能吸收 55cm 土层的磷肥,其利用率小于 0.1% (表 2)。可能是由于磷在土壤中的扩散系数很小<sup>[16]</sup>,作物对磷的吸收主要靠根系的接触,而大豆的根系主要聚集在 0~20 cm 土层,柑桔的根系主要聚集在 0~40 cm 土层的缘故。

农林间作系统中,作物和树对磷肥的总利用率往往高于各自单作时对磷肥的利用率<sup>[1,11]</sup>。本试验中,间作时大豆和柑桔对表施磷肥(15 cm 土层)的总利用率比单作大豆和柑桔分别提高 13.3% 和 132.0%;施于 35cm 土层时分别高 141.6% 和 92.5%;施于 55 cm 土层时分别高 931.5% 和 5.4%;除磷肥施于 55 cm 土层时,间作总利用率与单作柑桔没有显著差异外,其它均有显著差异。可见,大豆-柑桔间作可以显著提高磷肥的利用率。

间作系统表施磷肥,大豆的吸磷总量和磷肥的利用率均显著的低于单作,大豆吸磷总量中,肥料的贡献率却比单作时提高了 5.1%,柑桔虽然吸磷总量与单作没有显著差异,但磷肥利用率下降了 14.7%,且达显著差异水平,而柑桔吸磷总量中,肥料的贡献率降低了 10.9%。这充分说明间作系统中,大豆和柑桔对表施磷肥有强烈的竞争作用,这与前人在研究林-草、农-果系统中养分的竞争吸收特性时的结果相似<sup>[9,11]</sup>。

本试验结果(表 2)显示,无论单作还是间作,柑桔对表施磷肥的利用率均比大豆低,而对深施磷肥的利用率均比大豆高。这一方面是由于本试验的磷肥是施在大豆行间的,而大豆的根系又主要聚集在 0~20 cm 土层(见表 3,4),有利于大豆对表层磷肥的吸收。而柑桔虽然在 0~20 cm 土层也聚集了 58% 以上的根系,但由于每小区只有一株柑桔,根系的分布密度比大豆小,因而对表层土壤中磷肥的利用率较低。此外,固氮植物对磷的依赖性高,可能是大豆对根圈磷肥竞争性较强的另一原因。另一方面,磷在土壤中的扩散系数较小,土壤磷的作物有效性在很大程度上取决于作物根系的生理特性,如根长、根半径、根系比表面积、根构型以及根旁分泌物<sup>[18]</sup>,柑桔的根系分布较深,在 20~40 cm 土层,根系分布量占 20% 左右,40~60 cm 土层还有 15% 以上,有利于其对土壤深层磷肥的吸收利用。

表 4 柑桔根系在土体中的分布

Table 4 The distribution of citrus root in soil profile

深度 Depth (cm)	粗根 Coarse root		细根 Fine root	
	分布量(g) Root biomass	占总量(%) Percentage of total root biomass	分布量(g) Root biomass	占总量(%) Percentage of total root biomass
0~20	190.2	33.7	138.8	24.6
20~40	65.2	11.6	50.8	9.0
40~60	61.9	11.0	34.4	6.1
60~80	15.4	2.7	7.2	1.3

粗根直径 ≥ 2mm, 细根直径 < 2mm Coarse root diameter ≥ 2mm; fine root diameter < 2mm

本试验得到一个有趣结果,间作时,大豆对深施(35 cm 和 55 cm)磷肥的利用率显著高于单作,大豆对 35 cm 土层磷肥的利用率较单作时高 32.2%,对 55cm 土层的磷肥利用率虽然只有 0.2%左右,但单作大豆基本上不能利用该土层深度的磷肥(利用率小于 0.1%),且均有显著差异。表明浅根性的农作物(大豆)与深根性的木本植物(柑桔)间作可以改善浅根作物对深层土壤磷的利用。这其中的原因可能比较复杂,但可以假设,在农林间作条件下,深根性的木本植物吸收了土壤深处的养分之后,在向各组织器官输送的过程中,部分养分随着根系分泌作用或根毛断裂、根细胞死亡脱落等生理代谢过程释放到浅层土壤之中,从而被农作物根系所吸收利用。木本植物地上部分凋落物分解之后释放的养分也能为浅根作物所利用。复合系统中植物之间养分通过根系相互转移的现象早已引起关注<sup>[8,19]</sup>。当然,浅根作物对深层养分的利用率既取决于木本植物对养分的供给能力,也与其自身对根圈养分的竞争吸收能力有关。复合系统中木本植物对养分的释放及草本作物对养分的竞争吸收机理还有待于进一步深入研究。

#### 4 结论

农林间作是我国红壤丘陵坡地和旱土的主要经营模式之一。豆科作物与经济果树间作是一种用地与养地相结合地复合模式,对于深入了解和探讨此种模式下,作物对土壤养分地吸收机制一直是人们关注的焦点,本研究采用<sup>32</sup>P 同位素示踪技术进行了初步地研究。

农林间作可以提高磷肥的利用率。大豆-柑桔间作虽然大豆和柑桔各自对磷肥的利用率比大豆和柑桔单作磷肥的利用率低,但大豆和柑桔对磷肥利用率之和显著地高于大豆和柑桔单作。

浅根性的农作物与深根性的木本植物间作可以提高农作物对深层土壤养分的利用率。大豆-柑桔间作大豆对表层磷肥的利用率显著低于大豆单作,而对深层磷肥的利用率却显著高于大豆单作。

#### References:

- [1] Yan Y H, Pei B H, Wang J L, *et al.* Study on interaction between tree and crop in agroforestry systems oversea. *World Forestry Research*, 1999, **12**(6): 13~16.
- [2] Vandermer J. *The ecology of intercropping*. Cambridge University Press, 1989.
- [3] Ruan F S and Zhou F J. New model of water and soil conservation on orchard slopes. *Rural Ecological Environment*, 1995, **11**(2): 7~11, 14.
- [4] Ong C K, Black C R, Wallace J S, *et al.* Productivity, Microclimate and water use in Grevillea robusta-based agroforestry systems on hillslopes in semi-arid Kenya. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, **80**: 121~141.
- [5] Zhang J X, Liu K Z, Reng Z X, *et al.* The sunshine propagating laws within the wheat colony in the system of the wheat-jujube interplanting. *Journal of Shandong Agricultural University*, 1998, **29**(3): 317~322.
- [6] Akinnifesi F K, Kang B T, Sanginga N *et al.* Nitrogen use efficiency and N~competition between leucaena hedgerows and maize in an alley cropping system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, **47**: 71~80.
- [7] Li L, Li X L and Zhang F S. Facilitation of wheat to phosphorus uptake by soybean in wheat-soybean intercropping system. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(1): 129~133.
- [8] Martyn M Caldwell, David M Eissenstat and James H Richards. Competition for phosphorus: differential uptake from dual-isotope-labeled soil interspaces between shrub and grass. *Science*, 1985, **229**: 384~386.
- [9] Ashokan P K, Wahid P A and Sreedharan C. Relative uptake of <sup>32</sup>P by cassava, banana, elephant foot yam and groundnut in intercroppingsystem. *Plant and Soil*, 1988, **109**: 23~30.
- [10] De Rajat, Sinha M N and Rai K K. Studies on phosphorus utilization in intercropping maize with green gram using <sup>32</sup>P as tracer. *J. Nuclear Agric. Biol.*, 1984, **13**:138~140.
- [11] Suman Jacob George, Mohan Kumar B, Wahid P A, *et al.* Root competition for phosphorus between the tree and herbaceous components of silvopastoral system in Kerala, India. *Plant and Soil*, 1996, **179**:189~196.
- [12] Shen T H, Hu Z Y, Wan S L, *et al.* Effects of mycorrhiza on phosphorus efficiency to citrus in red soil. *Jiangxi Science* **19**: 13~19.
- [13] Ding H and Li S X. Relationship between phosphorus and growth and N fixation of soybean. *Journal of North-*

west Agricultural University, 1998, **26**(5): 67~70.

- [14] Ma Y H. *Statistic method and field experiment*. Beijin. Agricultural publication House, 1979. 175~182.
- [15] Chen C R. Study on depth of nutrients uptake by soybean root system using  $^{32}\text{P}$  trace technique. *Acta Pedologica Sinica*, 1962, **10**(2): 216~219.
- [16] Dong Y Y. Diffuse and translocation coefficient of phosphorus and potassium in red soil. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 1995, **14**(2): 247~251.
- [17] Gardner W K and Barber D A. The acquisition of phosphorus by *Linus albus* L. III. The probable mechanism by which phosphorus movement in the soil/root interface is enhanced. *Plant and Soil*, 1983, **70**:107~124.
- [18] Ae N J, Arihara K, Okada T, Yoshihara, *et al.* Phosphorus uptake by pigeon pea and its role in cropping system Indian subcontinent. *Science* (Washington, DC), 1990, **248**:477~480.
- [19] Nona Chiariello, James C Hichman, Harold A Mooney. Endomycorrhizal role for interspecific transfer of phosphorus in a community of annual plants. *Science*, 1982, **217**: 941~943.

#### 参考文献:

- [1] 袁玉欣,裴保华,王九龄,等. 国外混农林业系统中林木与农作物的相互关系研究进展. *世界林业研究*,1999, **12**(6): 13~16.
- [3] 阮伏水,周伏建. 坡地果园开发水土保持新模式. *农村生态环境*,1995, **11**(2): 7~11, 14.
- [5] 张继祥,刘克长,任中兴,等. 枣麦间作系统中光能在小麦群体内传播规律的研究. *山东农业大学学报*,1998, **29**(3): 317~322.
- [7] 李隆,李晓林,张福锁. 小麦-大豆间作中小麦对大豆磷吸收的促进作用. *生态学报*,2000, **20**(1):129~133.
- [12] 沈廷厚,胡正月,万水林,等. 红壤中菌根对柑桔磷肥效应的研究. *江西科学*,1990, **8**(3): 13~19.
- [13] 丁洪,李生秀. 磷素营养与大豆生长和共生固氮的关系. *西北农业大学学报*,1998, **26**(5): 67~70.
- [14] 马育华. *田间试验和统计方法*. 北京,农业出版社,1979. 175~182.
- [15] 陈铨荣. 应用 $^{32}\text{P}$ 探讨大豆根系的吸肥深度. *土壤学报*,1962,**10**(2): 216~219.
- [16] 董元彦. 磷钾在红壤中的迁移及扩散系数. *华中农业大学学报*,1995, **14**(2): 247~251.

