

大豆和蚕豆苗期根系生长特征的比较*

陈 杨 李 隆** 张福锁

(中国农业大学资源与环境学院 农业部植物营养与养分循环重点开放实验室, 植物-土壤相互作用教育部重点实验室, 北京 100094)

【摘要】 大豆和蚕豆是西北地区间套作生产中广泛种植的豆科作物, 但二者在与禾本科作物间作时差异十分明显, 蚕豆相对于大豆具有更强的竞争能力. 从大豆和蚕豆的根系入手, 研究了大豆和蚕豆在苗期根系生长发育和形态的差异. 采用 PVC 管砂培装置, 通过扫描仪扫描根系, 用图像分析软件 WinRHIZO 进行了研究. 结果表明, 出苗 42 d 时, 蚕豆根表面积是大豆根表面积的 2.61 倍; 出苗 14 d 时, 大豆根系在整个砂层中均有分布, 而蚕豆根系只分布在表层; 大豆根较细, 大部分根的直径为 0.25~1.0 mm, 相对于大豆而言, 蚕豆根较粗, 大部分根直径为 0.5~1.5 mm. 蚕豆根较粗, 所以有更大的表面积, 而且它的根系分布在上层的比例大于大豆, 这些因素决定了它的吸收能力强于大豆, 能更好地利用上层土壤养分. 这是蚕豆竞争能力强于大豆的原因之一.

关键词 大豆 蚕豆 根系 形态参数 空间分布

文章编号 1001-9332(2005)11-2112-05 中图分类号 S181 文献标识码 A

Root growth characteristics of soybean and faba bean at their seedling stage. CHEN Yang, LI Long, ZHANG Fusuo (Key Laboratory of Plant Nutrition and Nutrient Cycling of Agriculture Ministry, Key Laboratory of Plant Soil Interaction of Education Ministry, College of Resources and Environment, China Agriculture University, Beijing 100094, China). - Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(11): 2112~ 2116.

Soybean and faba bean are the two main legumes widely intercropped with cereals (e. g., wheat or maize) in western China, but have significantly different performance in intercropping system. Compared to soybean, faba bean has a stronger competitive ability. Considering that underground interspecific interaction makes a significant contribution to the advantage of intercropping system, a pot experiment was conducted to compare the differences in root growth and morphological parameters between soybean and faba bean at their seedling stage. A PVC tube, with 10 cm in diameter and 50 cm in depth, was filled with quartz and used to grow the crops. Root systems were scanned by a scanner, and analyzed by WinRHIZO on days 14, 21, 28, 35 and 42 after seedling emergence. The results indicated that on the 42nd day after seedling emergence, the root surface area of faba bean was 2.61 times larger than that of soybean. Soybean roots distributed in the whole layer of quartz on the 14th day, but most faba bean roots only distributed in its top layer. Soybean roots were thinner, and most of them were 0.25~1.0 mm in diameter, while faba bean roots were thicker, and their diameter was mostly between 0.5~1.5 mm. All of these facts resulted in a higher absorption capacity and nutrient use efficiency of faba bean, which could be one of the reasons that faba bean had a stronger competitive capacity than soybean.

Key words Soybean, Faba bean, Root system, Configuration parameter, Spatial distribution.

1 引言

间套作是我国精耕细作传统农业的精髓, 在我国已经具有 2000 多年的历史. 当 2 种植物生长在一起时, 基本的生物学原理表明, 它们将要发生种间相互作用和种间相互竞争^[20]. 种间相互作用包括地上部相互作用和地下部相互作用. 大量研究表明, 地下部种间相互作用对于间作优势具有重要贡献^[1]. 自从 Darwin^[4] 时代以来, 学术界一直认为竞争是植物形态、生活历史、植物群落结构与动态形成的主要原动力. 大量的研究结果表明, 在自然生态系统中, 根系生长较快的植物竞争能力更强^[2]. 前人对大豆和蚕豆根系形态和空间分布的研究较少^[16, 19, 23], 而且

在受人为干扰或较高生产力的农田生态系统中有关根系生长发育与植物竞争能力关系的研究就更少.

豆科/禾本科间作是我国西北地区广泛采取的一种种植形式. 大豆和蚕豆是这个间作系统中普遍采用的豆科作物, 但是二者在与禾本科作物间作时的表现具有非常显著的差异^[22]. 当与禾本科间作时, 间作大豆的生长明显差于单作大豆^[7~9], 而间作蚕豆生长明显好于单作蚕豆^[10, 24, 25]. 本文在研究大豆和蚕豆在苗期根系生长发育和形态差异的基础上, 阐明了产生种间竞争能力差异的根系生长和形

* 农业部“948”计划资助项目(Z53).

** 通讯联系人.

2004-12-01 收稿, 2005-03-22 接受.

态学依据, 为研究种间竞争的生物学机制提供科学依据.

2 材料与方法

2.1 供试材料

试验用大豆为中黄 17, 蚕豆为临夏大白蚕.

2.2 试验方法

试验在中国农业大学植物营养系培养室进行. 试验采用 PVC 管和 PVC 板制成的特殊土柱, 高 50 cm, 内径 10 cm. 每个土柱中装 40~ 70 目的石英砂 6 kg, 种 2 株作物, 重复 4 次. 出苗后浇 450 ml 蒸馏水, 3 d 后浇 1/2 浓度的营养液 450 ml, 之后每 3 d 浇 1 次营养液, 体积为 450 ml. 完全营养液组成为 ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$): K_2SO_4 0.75×10^{-3} ; MgSO_4 0.65×10^{-3} ; KCl 0.1×10^{-3} ; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 2.0×10^{-3} ; KH_2PO_4 0.25×10^{-3} ; H_3BO_3 1×10^{-5} ; MnSO_4 1×10^{-6} ; CuSO_4 1×10^{-7} ; ZnSO_4 1×10^{-6} ; (NH_4) $_6\text{Mo}_2\text{O}_4$ 5×10^{-9} ; Fe EDTA 1×10^{-4} , pH 值 6.0. 从出苗后第 2 周开始取样, 每周取 1 次样, 共取 5 次样. 作物从出苗后共生长 42 d. 每次取样时, 每 15 cm 为 1 层, 把整个砂层分为 3 层, 从砂中取出植物根系后, 用水冲洗干净, 在扫描仪上扫描, 用 WinRHIZO 软件处理图像, 计算出根表面积、体积、直径、根长. 将根样放入 65 °C 烘箱中烘干至恒重, 用万分之一天平称其干重.

3 结果与讨论

3.1 大豆和蚕豆的根系形态参数

3.1.1 根系表面积 在大豆和蚕豆生长的 42 d 中, 蚕豆的根表面积始终大于大豆的根表面积 (表 1), 说明蚕豆对养分的吸收能力强于大豆. 在出苗 21 d 前二者的根表面积没有差异, 在出苗 21 d 后二者根表面积差异达到显著水平, 出苗 42 d 时, 大豆的根表面积为 $6.43 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, 蚕豆的根表面积为 $16.53 \times 10^{-2} \text{ m}^2$. 蚕豆的根表面积是大豆根表面积的 2.61 倍. 在整个生长过程中, 大豆根表面积最快增长时期是出苗后 14~ 21 d, 出苗后 21 d 的根表面积比出苗后 14 d 的根表面积增加了 74.5%; 蚕豆根表面积最快增长时期是出苗后 21~ 28 d, 出苗后 28 d 的根表面积比出苗后 21 d 的根表面积增加了 158.5%; 蚕豆生长较快, 出苗后 42 d 的根表面积比出苗后 14 d 的根表面积增加了 578.2%; 大豆的生长较慢, 出苗后 42 d 的根表面积比出苗后 14 d 的根表面积增加了 160.3%. 两者根表面积发育速度的差异, 很大程度上可以解释为什么在与禾本科作物间作时蚕豆比大豆的竞争能力更强的现象.

3.1.2 根系体积 在整个生长过程中, 蚕豆根系体积始终高于大豆, 二者的差异都达到了显著水平(表

1). 出苗 42 d 时, 大豆根体积为 $12.89 \times 10^{-6} \text{ m}^3$, 蚕豆根体积为 $56.82 \times 10^{-6} \text{ m}^3$, 蚕豆根体积是大豆根体积的 4.41 倍. 大豆和蚕豆根体积最快增长时期同根表面积最快增长时期也相同. 大豆出苗后 21 d 根体积比出苗后 14 d 根体积增加了 86.4%; 蚕豆出苗后 28 d 的根体积比出苗后 21 d 根体积增加了 167.5%. 蚕豆根体积的增长比大豆快, 大豆出苗后 42 d 根体积比出苗后 14 d 根体积增加了 182.7%; 蚕豆出苗后 42 d 根体积比出苗后 14 d 根体积增加了 532.7%.

表 1 大豆和蚕豆苗期根系表面积、体积和根干重
Table 1 Root surface area, root volume and root dry matter of soybean and faba bean at seedling stage

项目 Item	作物 Crop	出苗后天数 Days after emergence (d)				
		14	21	28	35	42
根表面积 Root surface area ($10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{plant}^{-1}$)	大豆 Soybean	2.43 ^a	4.25 ^a	4.42 ^b	5.27 ^b	6.34 ^b
	蚕豆 Faba bean	2.43 ^a	4.47 ^a	11.56 ^a	15.78 ^a	16.53 ^a
根体积 Root volume ($10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{plant}^{-1}$)	大豆 Soybean	4.13 ^b	8.50 ^b	8.64 ^b	11.93 ^b	12.89 ^b
	蚕豆 Faba bean	7.75 ^a	15.65 ^a	41.87 ^a	55.90 ^a	56.82 ^a
根干重 Root dry matter ($\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$)	大豆 Soybean	0.10 ^b	0.18 ^a	0.23 ^b	0.37 ^b	0.41 ^b
	蚕豆 Faba bean	0.27 ^a	0.30 ^a	0.56 ^a	0.77 ^a	1.03 ^a

* 列内字母相同的值间差异不显著 ($P > 0.05$), 具有不同字母的值表示差异显著 ($P < 0.05$) Values within column followed by the same letter are not significant different ($P > 0.05$), and those followed by the different letters are significant ($P < 0.05$).

3.1.3 根系干重 从表 1 可以看出, 除出苗 21 d 时, 大豆和蚕豆根干重没有差异, 其它时期二者根干重差异显著 ($P < 0.05$). 出苗 42 d 时, 大豆根干重为 0.41 g, 蚕豆根干重为 1.03 g, 蚕豆根干重是大豆根干重的 2.50 倍. 大豆和蚕豆根干重最快增长时期同根表面积最快增长时期相同. 大豆出苗后 21 d 根干重比出苗后 14 d 根干重增加了 82.1%; 蚕豆出苗后 28 d 根干重比出苗后 21 d 的根干重增加了 87.1%. 前人对蚕豆根系的研究很少, 对大豆根系的研究则较多. 王法宏等^[2,17] 研究指出, 根系干重增长过程呈 S 形曲线变化, 最快时期是播种后 20~ 50 d. 本研究与前人的研究结果相似, 大豆根系增长最快时期是播种后 21~ 28 d. 张恩和等^[27] 对间作蚕豆研究发现, 蚕豆根系干重变化呈上升趋势, 与本研究结果相似.

3.1.4 根长 图 1 表明, 在生长的 42 d 中, 大豆和蚕豆根长的差异均达到显著水平, 但在出苗 21 d 前, 大豆根长大于蚕豆根长, 出苗 14 d 时, 大豆的根长为 10.68 m, 蚕豆的根长为 5.21 m, 大豆根长是蚕豆根长的 2.05 倍, 说明出苗 21 d 前蚕豆根是粗而短的, 大豆根是细而长的, 出苗 21 d 后由于蚕豆生长较快, 使蚕豆根长明显大于大豆根长. 出苗 42 d 时, 大豆根长为 25.80 m, 蚕豆根长为 36.64 m, 蚕豆根长比大豆根长增加了 42.0%, 大豆和蚕豆根长的最快增长时期同根表面积最快增长时期也是同步的.

龚振平等^[3]研究发现,大豆根长的变化呈单峰曲线,最高峰出现在结荚期,而本实验只做了大豆苗期根长变化,苗期大豆的根长一直呈上升趋势,与前人的研究结果一致.

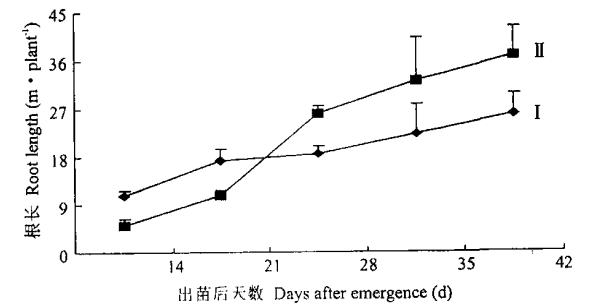


图1 大豆和蚕豆在整个生长过程中根长的差异
Fig. 1 Difference in root length between soybean and faba bean at different growth stages.
I. 大豆 Soybean, II. 蚕豆 Faba bean.

3.2 根系的垂直分布

大豆和蚕豆根系无论是以根重还是以根长计算,主要分布在0~15 cm砂层,随着深度的增加,各部分根量相应减少,呈T形分布状态(表2).最后1次取样时,0~15、15~30和30~45 cm砂层中,大豆根重占全部根重的比例分别为83.1%、12.2%、4.7%,蚕豆根重占全部根重的比例分别为86.8%、7.7%、5.5%,蚕豆根在上层中所占的比例大于大豆,说明蚕豆相对于大豆能更好地利用上层土壤中的养分,满足其生长.第1次取样时,大豆根系在整个砂层中均有分布,蚕豆根系只分布在0~15 cm的砂层中.前人研究发现,大豆根主要集中在0~20 cm耕层^[9,14],50%以上集中在0~10 cm土层中^[5,6,18],与本研究结果一致.研究发现,根系长度在耕层中也占到一半,随着生育期的推进,10~20 cm土层的根长接近于0~10 cm土层的根长^[3,15],与本研究结果不相同,主要原因是:大田中,10~20 cm的土层中肥效发挥的最好,是植物生长和吸收养分的主要区域,而且在结荚期,10~20 cm的土层中,分枝根较多.张恩和等^[26]研究发现,间作蚕豆的根系49.6%~77.4%分布在0~30 cm土层.

表2 大豆、蚕豆苗期根长垂直分布
Table 2 Difference in root length distribution at different depth between soybean and faba bean at the seedling stage(%)

深度 Depth (cm)	作物 Crop	出 苗 后 天 数 Days after emergence (d)				
		14	21	28	35	42
0~ 15	大豆 Soybean	90.2	82.1	81.4	81.0	79.4
	蚕豆 Faba bean	100.0	95.7	81.6	79.2	82.3
15~ 30	大豆 Soybean	7.7	15.7	16.6	15.7	16.1
	蚕豆 Faba bean	0	4.2	11.7	16.3	11.8
30~ 45	大豆 Soybean	2.2	2.1	2.1	3.3	4.4
	蚕豆 Faba bean	0	0	6.7	4.5	5.9

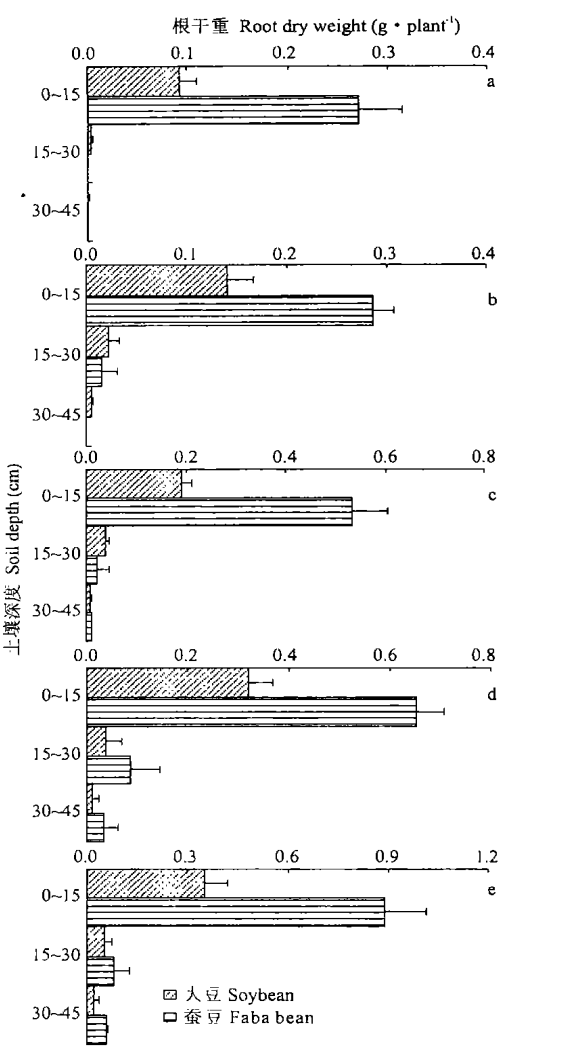


图2 大豆和蚕豆苗期根干重的垂直分布特征
Fig. 2 Difference in rooting depth distribution of root dry matter between soybean and faba bean on days 14 (a), 21 (b), 28 (c), 35 (d), 42 (e) after seedling emergence.
a) 出苗后 14 d 大豆和蚕豆不同深度根干重 Difference in rooting depth distribution of root dry matter between soybean and faba bean on 14th day after seedling emergence; b) 出苗后 21 d 大豆和蚕豆不同深度根干重 Difference in rooting depth distribution of root dry matter between soybean and faba bean on 21st day after seedling emergence; c) 出苗后 28 d 大豆和蚕豆不同深度根干重 Difference in rooting depth distribution of root dry matter between soybean and faba bean on 28th day after seedling emergence; d) 出苗后 35 d 大豆和蚕豆不同深度根干重 Difference in rooting depth distribution of root dry matter between soybean and faba bean on 35th day after seedling emergence; e) 出苗后 42 d 大豆和蚕豆不同深度根干重 Difference in rooting depth distribution of root dry matter between soybean and faba bean on 42nd day after seedling emergence.

3.3 根系直径

从表3、图3可以看出,大豆根系直径主要集中在0.25~1.0 mm,蚕豆根系主要集中在0.5~1.5 mm.最后1次取样时,大豆0.25~0.5 mm直径的根长为12.45 m,占总根的45.4%,0.5~1.0 mm直径的根长为6.80 m,占总根的24.8%;蚕豆0.5~1.0 mm直径的根长为14.92 m,占总根的45.5%,

表 3 收获时大豆和蚕豆不同直径根长及其所占的比例
Table 3 Root length and its proportion distribution of different root diameter for soybean and faba bean at day 42 after emergence

作物 Crop	直 径 分 级 Diameter class(mm)						
	0~ 0.1	0.1~ 0.25	0.25~ 0.5	0.5~ 1.0	1.0~ 1.5	1.5~ 2.5	> 2.5
大豆 Soybean(m ² plant ⁻¹)	1.70	2.91	12.45	6.80	2.33	0.99	0.22
百分比 Percentage(%)	6.2	10.6	45.4	24.8	8.5	3.6	0.8
蚕豆 Faba bean(m ² plant ⁻¹)	1.77	0.49	1.67	14.92	9.96	3.57	0.37
百分比 Percentage(%)	5.4	1.5	5.1	45.5	30.4	10.9	1.1

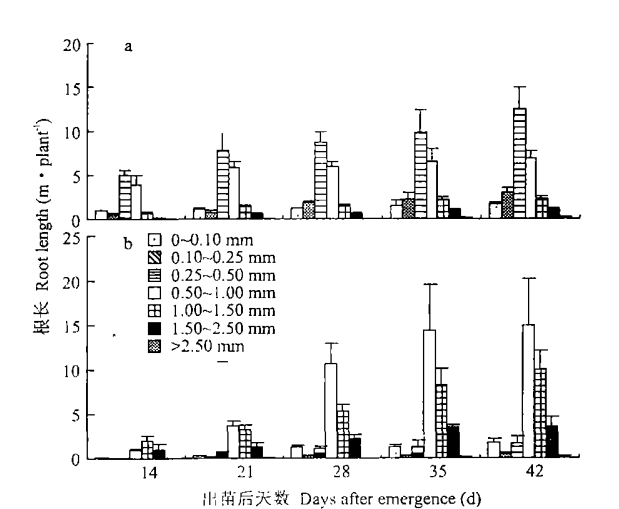


图 3 大豆(a)和蚕豆(b)整个生长过程中根的不同直径
Fig.3 Difference for different diameter between soybean(a) and faba bean(b) at the growth stage.

1.0~ 1.5 mm 直径的根长为 9.96 m, 占总根的 30.4%, 说明蚕豆根比大豆根粗, 在相同的根长条件下, 蚕豆有较大的表面积, 其吸收养分的能力强于大豆.

4 结 语

同为豆科作物的大豆和蚕豆根系形态参数有很大的差异, 在整个生长过程中, 除出苗 21 d 前蚕豆根系短于大豆外, 蚕豆根表面积、根体积、根干重的参数指标均大于大豆. 大豆各项指标最快增长时期是出苗后 14~ 21 d, 蚕豆各项指标最快增长时期是出苗后 21~ 28 d, 蚕豆相对于大豆的最快增长时期稍微推后一些, 这与竞争能力的差异也是相关的. 70.2% 的大豆根系直径为 0.25~ 1.0 mm, 75.9% 的蚕豆根系直径为 0.5~ 1.5 mm. 因此, 在相同的根长条件下, 蚕豆有更大的表面积, 其吸收养分的能力要强于大豆.

大豆和蚕豆根系呈 T 形分布状态, 主要分布在 0~ 15 cm 砂层, 出苗 42 d 时, 蚕豆 0~ 15 cm 的根长占全部根长的 82.3%, 根重占全部根重的 86.8%; 大豆 0~ 15 cm 的根长占全部根长的 79.4%, 根重占全部根重的 83.1%. 第 1 次取样时, 大豆根系在

整个砂层中均有分布, 蚕豆根系就只分布在 0~ 15 cm 砂层中. 蚕豆根在上层中所占的比例大于大豆, 说明蚕豆相对于大豆能更好地利用上层土壤中的养分, 满足其生长.

在与禾本科作物间作时, 蚕豆的竞争能力强于大豆, 这可以用两种作物根系各种参数的大小来进行解释. 蚕豆相对于大豆而言, 它的根较粗, 因此具有更大的表面积, 其吸收能力强于大豆, 而且它的根分布在上层土壤的比例要大于大豆, 所以能更好地利用上层土壤养分, 在上层土壤养分充足的条件下, 其生长要好于大豆. 二者竞争能力的差异与另一个作物的根系形态也有很大的相关性^[12, 13], 而且作物在养分吸收时间上的差异也是它们在间作系统中产生差异的原因^[11, 14].

参考文献

1 Cahill JF. 1999. Fertilization effects on interactions between above and below ground competition in an old field. *Ecology*, **80**: 466~ 480

2 de Kroon H, Mommer L, Nishiaki A. 2003. Root competition: Towards a mechanistic understanding. *Ecol Studies*, **168**: 215~ 233

3 Gong Z-P (龚振平), Shen G-P (沈昌蒲), Zhao F-H (赵福华). 2000. Study on mechanism of fertility increase soil by growing soybean II. The dynamic changes of soybean root in soil wider conventional cultural practice. *Soybean Sci(大豆科学)*, **19**(4): 351~ 355 (in Chinese)

4 Grace J, Tilman D. 1990. Perspectives on plant competition: Some introductory remarks. *Perspectives on Plant Competition*. London: Academic Press Limited. 3~ 7

5 He Y(何 庸), Sun G-Y(孙广玉), Cheng X-G(程学刚). 1997. The dynamic distribution of soybean roots and roots activation in meadow black soil. *Oil Crop China(中国油料)*, **19**(2): 28~ 31(in Chinese)

6 He Y(何 庸), Sun G-Y(孙广玉), Zhu L(朱 廉), et al. 1997. Root characteristics and fertilization placements of soybean cultivated with wide ridge. *Mod Agric(现代化农业)*, **9**: 7~ 9(in Chinese)

7 Li L(李 隆), Li X-L(李晓林), Zhang F-S(张福锁), et al. 2000. Uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium as related to yield advantage in wheat/soybean intercropping. *Plant Nutr Fert Sci(植物营养与肥科学报)*, **6**(2): 140~ 146(in Chinese)

8 Li L(李 隆), Yang S-C(杨思存), Sun J-H(孙建好), et al. 1999. Dynamic of nitrogen, phosphorus and potassium uptake by intercropped species in the spring wheat/soybean intercropping. *Plant Nutr Fert Sci(植物营养与肥科学报)*, **9**(2): 163~ 171(in Chinese)

9 Li L(李 隆), Yang S-C(杨思存), Sun J-H(孙建好), et al. 1999. Interspecific competition and facilitation in wheat/soybean intercropping system. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, **10**(2): 197~ 200(in Chinese)

- 10 Li L, Yang SC, Li XL, *et al.* 1999. Interspecific complementary and competitive interactions between intercropped maize and faba bean. *Plant Soil*, **212**: 105~ 114
- 11 Li L, Zhang FS, Li XL, *et al.* 2003. Interspecific facilitation of nutrient uptake by intercropped maize and faba bean. *Nutr Cycl Agroecosyst*, **65**: 61~ 71
- 12 Li L, Sun JH, Zhang FS, *et al.* 2001. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping II. Recovery or compensation of maize and soybean after wheat harvesting. *Field Crops Res*, **71**(3): 173~ 181
- 13 Li L, Sun JH, Zhang FS, *et al.* 2001. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients. *Field Crops Res*, **71**(2): 12~ 31
- 14 Li WX, Li L, Sun JH, *et al.* 2003. Effects of nitrogen and phosphorus fertilizers and intercropping on uptake of nitrogen and phosphorus by wheat, maize and faba bean. *J Plant Nutr*, **26**(36): 29~ 64
- 15 Song R(宋 日), Mou Y(牟 瑛), Wang Y-L(王玉兰), *et al.* 2002. Effects of intercropping of maize and soybean on the morphological character of roots. *J Northeast Nor Univ(Nat Sci)* (东北师大学报·自然科学版), **34**(3): 83~ 86(in Chinese)
- 16 Song R(宋 日), Wu C-S(吴春胜), Mou J-M(牟金明). 2003. Effects of maize stubble remaining in field on dynamics of soil microbial biomass C and soil enzyme activities. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, **13**(3): 303~ 307(in Chinese)
- 17 Sun G-Y(孙广玉), He Y(何 庸), Zhang R-H(张荣华), *et al.* 1996. Studies on growth and activities of soybean root. *Soybean Sci(大豆科学)*, **15**(4): 317~ 321(in Chinese)
- 18 Sun G-Y(孙广玉), Zhang R-H(张荣华), Huang Z-Y(黄忠义). 2002. Soybean root distributions in meadow-blackland and albic soil. *Chin J Oil Crop Sci(中国油料作物学报)*, **24**(1): 45~ 47(in Chinese)
- 19 Sun H-G(孙海国), Zhang F-S(张福锁). 2002. Morphology of wheat roots under low phosphorus stress. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, **13**(3): 295~ 299(in Chinese)
- 20 Vandermeer J. 1989. The Ecology of Intercropping. New York: Cambridge University Press.
- 21 Wang F-H(王法宏), Zheng P-R(郑丕尧), Wang S-A(王树安), *et al.* 1989. A comparative study on characteristics of root system among soybean varieties which have different drought resistance I. Morphological and anatomical structures. *Oil Crop China(中国油料)*, **1**(1): 32~ 37(in Chinese)
- 22 Wang J-L(王金陵). 1982. Soybean. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press. 24~ 25(in Chinese)
- 23 Wang Q-C(王庆成), Cheng Y-H(程云环). 2004. Response of fine roots to soil nutrient spatial heterogeneity. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, **15**(6): 1063~ 1068(in Chinese)
- 24 Xiao Y-B(肖焱波), Li L(李 隆), Zhang F-S(张福锁). 2003. Enhancement of growth by inoculating different rhizobium strain in intercropped wheat and faba bean. *Res Agric Mod(农业现代化研究)*, **24**(4): 275~ 277(in Chinese)
- 25 Xiao Y-B(肖焱波), Li L(李 隆), Zhang F-S(张福锁). 2003. Nitrogen complementary use in intercropped wheat and faba bean. *Plant Nutr Fert Sci(植物营养与肥料学报)*, **9**(4): 396~ 400(in Chinese)
- 26 Zhang E-H(张恩和), Huang G-B(黄高宝). 2003. Temporal and spatial distribution characteristics of the crop root in intercropping system. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, **14**(8): 1301~ 1304(in Chinese)
- 27 Zhang E-H(张恩和), Li L-L(李玲玲), Huang G-B(黄高宝), *et al.* 2002. Regulation of fertilizer application on yield and root growth of spring wheat faba bean intercropping system. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, **13**(8): 939~ 942(in Chinese)

作者简介 陈 杨,女,1980年生,硕士.主要从事植物营养研究. E-mail: chen y80@126.com
