

不同磷效率玉米自交系根系形态与根际特征的差异

于兆国, 张淑香*

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:通过三室根袋栽培试验,对3种磷高效型和3种磷低效型的玉米自交系在2种不同磷水平下的植株生物量、吸磷量、根系形态、根际pH值以及根际磷酸酶进行研究,比较不同磷利用率基因型玉米自交系的根系形态及根际特征的差异。结果表明,在低磷情况下,磷利用率高的玉米自交系其植株生物量中的根干重、植株的吸磷量、根系形态中的根尖数与根长以及根际磷酸酶的活性方面均高于磷利用率低的玉米自交系。植株的根部干重:磷高效的1号品种(hp1)显著高于磷低效的2号品种(lp2),hp2显著高于lp1、lp2、lp3;hp1、hp2的地上部与根系的吸磷量均显著高于lp2、lp3。hp1、hp2根尖数、根长显著高于磷低效型的lp2、lp3。hp1、hp2、hp3根际土壤的酸性磷酸酶活性显著高于lp2、lp3。其他指标如植株地上部分干重、pH值,磷高效型玉米自交系也存在一定优势。所有品种中hp2与lp3的差异最为显著。

关键词:玉米;自交系;根际磷酸酶;根系特征;生物量

中图分类号:S513.01 文献标识码:A 文章编号:1008-505X(2008)06-1227-05

Root configuration and rhizosphere characteristics of different maize inbred lines with contrasting P efficiency

YU Zhao-guo, ZHANG Shu-xiang*

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Root configuration and rhizosphere characteristics of the different efficiency-phosphorus maize inbred line types were studied by using a three-chamber-root-bag culture experiment. Three high-efficient-phosphorus maize inbred lines and three low efficiency-phosphorus maize inbred lines were selected for the study. Crop biomass, phosphorus absorption amount, root configuration, rhizosphere pH and phosphatase activity under two P levels were investigated as well. Results showed that under the low P level, root weight, phosphorus absorption amount, number of root tips, root length and rhizosphere phosphatase activity were high for the high-efficient-phosphorus maize inbred lines, and low for the low-efficient-phosphorus maize inbred lines. Root weight of the high-efficient-phosphorus maize inbred line 1 (hp1) was significantly higher than that of the low-efficient-phosphorus maize inbred line 2 (lp2), while root weight of hp2 was higher than that of lp1, lp2 and lp3, respectively. Phosphorus absorption amounts of shoots and roots of hp1 and hp2 were higher than those of lp2 and lp3. Number of root tips and lengths of hp1 and hp2 were both higher than those of lp2 and lp3. Rhizosphere acid phosphatase activities of hp1, hp2 and hp3 were higher than those of lp2 and lp3. There was certain superiority in high-efficient-phosphorus maize inbred lines too, such as dry weight of shoot and pH. Among all cultivars, the differences between hp2 and lp3 were the most significant ones.

Key words: maize; inbred line; rhizosphere phosphatase; characteristics of root system; biomass

收稿日期:2008-01-14 接受日期:2008-06-30

基金项目:国家重点基础研究发展规划973项目(2005CB121102)和(2007CB109302)。

作者简介:于兆国(1981—)男,黑龙江省佳木斯市人,硕士,主要从事土壤生态学方面的研究。Tel:010-62122473, E-mail:yuzhaoguo@sohu.com

* 通讯作者 Tel:010-62197077, E-mail:sxzhang@caas.ac.cn

土壤中的全磷含量很高,但大部分不能被根吸收^[1]。世界上 40% 耕地上的农作物产量受磷有效性水平的影响^[2]。植株通过对根的形态学以及生理学的变化以缓解低磷胁迫,这些变化可使植株根际磷酸酶增加、根际土壤 pH 值下降、根长以及根毛数量增加的^[3-6]。

低磷胁迫条件下,同种作物不同基因型的根际的研究早有报道。水稻根际的研究表明,在低磷胁迫下,磷利用率高的品种根际有机酸含量、磷酸酶活性、以及土壤中的质子数量均高于磷利用率低的品种^[7]。Asmar 等人^[8]研究发现,不同基因型的大麦根系附近可溶性磷与非可溶性磷的消耗程度存在差异;Lynch 等^[9]认为,磷利用率高的大豆品种都有着发达的根系,其根毛数量、根长、侧根数量都较磷效率低的品种高。在玉米的方面,Hajabbasi 等^[10]研究指出,在磷胁迫的情况下,磷高效型玉米根密度的增加超过磷低效型品种;Gaume 等^[11]研究表明,耐低磷的玉米品种拥有更加强大的根系,而且会释放出大量的有机酸和酸性磷酸酶;Liu 等^[12]认为,磷高效型玉米自交系根际 pH 值显著低于磷低效型玉米自交系,根际有机酸的总量也显著高于磷低效型玉米自交系;但是有关玉米自交系苗期根际方面的研究较少。据报道,在酸性土壤上磷素的有效性是玉米营养限制的首要因素^[13],尤其在红壤上。为此,开展了不同磷效率玉米自交系根系形态与根际特征的差异研究,旨在了解玉米基因型间磷素吸收利用效率的差异,为筛选和培育磷高效基因型玉米提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

为比较不同玉米自交系间的差异,于 2006 年 11 月 30 日至 1 月 27 日利用三室根袋培养方法进行。根袋用 25 μm 尼龙网缝制,将土壤分成 3 个区域,在最内层尼龙网的内侧形成了根密集区域,根系分泌物通过尼龙网分布到中层土壤中,将此部分土壤近似的看作根际土壤,混匀后,统一选择对这一部分土壤进行比较研究,以减小取样过程中根系等物质的混入所带来的误差。每袋装土 2.5 kg。试验在中国农业科学院作物所网室内进行。供试土壤为红壤,采自湖南。土壤的基础理化性状为:有机质 15.41 g/kg;全氮 0.972 g/kg;全磷 0.581 g/kg;全钾 9.05 g/kg;速效磷 30.76 mg/kg;速效钾 126.72 mg/kg; pH 4.94。

供试玉米自交系是经前期大田试验后选定的。磷高效型玉米自交系为:dsy-10、dsy-89、dsy-93(分别用 hp1、hp2、hp3 表示);磷低效型玉米自交系为:dsy-97、dsy-79、dsy-15(分别用 lp1、lp2、lp3 表示)。

试验设:不施磷(P0)、足量施磷(施 P 0.1g/kg, P1) 2 个磷水平,所有处理另施 N、K 各 0.1g/kg。

肥料以溶液的形式与土壤充分混匀后过 2 mm 筛装袋,培养一周后播种。种子挑选子粒饱满的玉米种子,在 2% 的 H_2O_2 溶液中消毒 20 min。取出后用蒸馏水反复冲洗干净,将种子浸泡于饱和 CaSO_4 培养皿中,在 25℃ 下培养 24 h。取出后在滤纸上发芽 3 d,选取露白一致的种子进行播种,出苗 10 d 后定苗,每袋留苗 2 株。每个处理 4 次重复,随机排列。玉米生长期定期定量灌水。

玉米生长 2 个月后,在玉米苗期进行土壤和植株样品的采集,直接对收获的根系进行扫描分析。

1.2 试验测定的项目与方法

植株生物量的测定:地上部与根部在 105℃ 下杀青 30 min,然后在 60℃ 下烘干至恒重,称重。

植株全磷的测定:植株样品采用 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 方法消化,钼锑钒比色法测全磷。

根系形态的测定方法:将植株根系鲜样充分清洗整理后,用扫描仪扫描,并使用根系分析软件(winrhizo)对根的扫描结果进行分析。此技术是现今根系研究中较为先进的一种研究方法,可直接得出根长、根尖数、根面积等根形态的重要参数。

土壤中磷酸单质酶的测定方法^[14]:采用对硝基苯磷酸盐法进行。称取 1.00 g 新鲜土样置于 50 mL 三角瓶中,然后加入 0.2 mL 甲苯、4 mL 缓冲溶液(酸性磷酸酶加 pH 6.5 的缓冲液;碱性磷酸酶加 pH 11 的缓冲溶液)和 1 mL 对硝基苯磷酸二钠盐,轻摇混匀,在 37℃ 下培养 1h。然后加入 1 mL 的 CaCl_2 溶液和 4 mL NaOH 溶液,轻摇几秒钟后过滤。用分光光度计在 400~420nm 进行比色,测定溶液的吸光值。

土壤 pH 值:选用土壤干样,水:土比为 1:2.5, pH 计测定。

所得数据利用 SPSS 软件进行差异显著性分析。

2 试验结果

2.1 不同自交系玉米植株生物量差异

不同自交系玉米植株生物量差异如表 1 所示。在不施磷条件下,磷高效型玉米自交系植株地上部的生物量有高于磷低效型玉米自交系的趋势,其中

hp2 比 lp3 高出 49% ;植株的根部干重 ,hp1 显著高于 lp2 ;hp2 显著高于 lp1、lp2、lp3。在足量施磷条件下 6 个玉米自交系的生物量均无显著性差异。足量施磷肥力水平下 hp1 的根冠比显著高于 lp2、lp3 ;而所有自交系的根冠比均低于相应不施磷水平的根冠比。表 1 还看出 ,不施磷条件下 ,hp1、hp2 的地上

部与根系的吸磷量均显著高于 lp2、lp3 ;在足量施磷条件下 ,hp2 的地上部吸磷量与 lp1、lp2、lp3 存在显著差异 ,而根部吸磷量无显著差异。总的看来 ,磷高效性玉米自交系的生物量普遍优于磷低效型的玉米自交系。

表 1 不同自交系玉米植株的生物量、根冠比及植株吸磷量

Table 1 Biomass , R/S ration and phosphorus uptake of maize inbred lines under two P levels

处理 Treatment	基因型 Genotype	干重 Dry weight(g)			吸磷量 P uptake(mg)		
		地上部 Shoot	根部 Root	总量 Total	根冠比 R/S	地上部 Shoot	根部 Root
P0	hp1	0.56 ± 0.12	0.27 ± 0.02 bc	0.83 ± 0.14	0.50 ± 0.10 b	13.63 ± 3.77 c	2.60 ± 0.20 b
	hp2	0.67 ± 0.06	0.31 ± 0.02 c	0.98 ± 0.08	0.46 ± 0.03 b	15.38 ± 3.60 c	2.63 ± 0.91 b
	hp3	0.57 ± 0.38	0.16 ± 0.05 ab	0.73 ± 0.43	0.35 ± 0.10 ab	5.35 ± 4.50 a	1.61 ± 0.53 ab
	lp1	0.56 ± 0.17	0.16 ± 0.02 ab	0.71 ± 0.19	0.30 ± 0.15 ab	5.46 ± 1.37 a	1.53 ± 0.06 ab
	lp2	0.54 ± 0.45	0.15 ± 0.05 a	0.73 ± 0.50	0.34 ± 0.12 ab	3.60 ± 1.76 a	1.03 ± 0.37 a
	lp3	0.45 ± 0.2	0.14 ± 0.11 ab	0.64 ± 0.31	0.35 ± 0.10 ab	3.16 ± 1.33 a	1.01 ± 0.25 a
P1	hp1	1.22 ± 1.18	0.42 ± 0.08	1.64 ± 1.26	0.48 ± 0.20 b	5.87 ± 3.43 ab	3.00 ± 1.73 b
	hp2	1.46 ± 0.48	0.28 ± 0.03	1.74 ± 0.51	0.22 ± 0.09 ab	10.65 ± 3.38 bc	2.60 ± 0.89 b
	hp3	1.63 ± 0.75	0.24 ± 0.06	1.87 ± 0.81	0.17 ± 0.06 a	5.96 ± 1.75 ab	2.09 ± 0.48 ab
	lp1	1.2 ± 0.64	0.33 ± 0.22	1.53 ± 0.86	0.27 ± 0.03 ab	5.49 ± 1.60 a	1.65 ± 0.66 ab
	lp2	1.37 ± 0.56	0.22 ± 0.04	1.59 ± 0.60	0.18 ± 0.07 a	5.16 ± 2.24 a	2.19 ± 0.81 ab
	lp3	1.55 ± 0.77	0.26 ± 0.21	1.81 ± 1.98	0.17 ± 0.04 a	5.52 ± 1.56 a	2.17 ± 0.78 ab

注 :表中数据为三株之和 ,同列中不同小写字母表示差异达 5% 显著水平 ,下同。

Note : Data in the table is the weight of three plants . Different letters in the same column mean significant at 5% level . The same below .

2.2 不同自交系玉米根系形态的差异

不施磷条件下 ,磷高效型玉米的根系发达 ,hp1 和 hp2 的根尖数、根长显著高于磷低效型的 lp1、lp2 玉米自交系 ,根表面积无显著性差异。足量施磷条件下 ,hp2、hp3 磷利用率高的玉米自交系的根尖数量显著高于磷低效型的 lp2 自交系(表 2)。

2.3 不同自交系玉米根际酸性磷酸单质酶活性差异

不同自交系玉米根际酸性磷酸酶的活性差异(图 1)看出 ,在不施磷条件下 ,hp1、hp2、hp3 磷高效型玉米自交系根际土壤的酸性磷酸酶活性显著高于 lp2、lp3 磷低效型的玉米自交系 ;在足量施磷条件下 ,磷高效型 hp2 的酸性磷酸酶活性显著高于磷低效的 lp2。磷高效型自交系的磷酸酶活性 ,在不施磷条件下比足量施磷条件下有较大增加。hp1、hp2、

hp3 在不施磷水平下比足量施磷水平分别增加了 13%、4% 和 14% ;磷低效型品种则基本无变化。

土壤中的酸性磷酸酶与植株的根际特征存在一定的相关性。不施磷条件下 ,根际酸性磷酸酶与植株根长呈显著正相关($r = 0.649^{**}$);足量施磷条件下 ,根际酸性磷酸酶活性与植株根尖数呈显著正相关($r = 0.676^{**}$) ,这印证了玉米根际磷酸酶的活性在植株根尖部份的活性最高的研究结论^[15]。

2.4 不同自交系玉米根际土壤 pH 值差异

与土壤基础性状的 pH 值相比 ,种植玉米后的根际土壤 pH 值均有所下降 ;与磷低效自交系 lp1、lp2、lp3 的根际 pH 相比 ,虽无显著性差异 ,但磷高效的 hp1、hp2、hp3 的根际土壤 pH 值的降幅更大 ,根际酸化能力更强(图 2)。

表 2 不同玉米自交系根系形态特征差异

Table 2 The root system characteristics at the two P levels

处理 Treatment	基因型 Genotype	根尖数(No.) Root tip	根长(cm) Root length	根表面积(cm) Root surface
P0	hp1	1253 ± 210	734 ± 47 c	138 ± 69 b
	hp2	1243 ± 142	633 ± 52 c	133 ± 30 b
	hp3	430 ± 154	678 ± 87 bc	78 ± 16 ab
	lp1	717 ± 58	531 ± 90 ab	69 ± 27 a
	lp2	549 ± 90	519 ± 54 a	79 ± 21 ab
	lp3	453 ± 45	404 ± 28 ab	110 ± 58 ab
P1	hp1	796 ± 157 ab	439 ± 113 b	106 ± 11 b
	hp2	923 ± 147 b	586 ± 100 ab	82 ± 14 ab
	hp3	901 ± 162 b	457 ± 59 ab	77 ± 29 ab
	lp1	658 ± 110 ab	662 ± 11 ab	78 ± 16 ab
	lp2	402 ± 87 a	461 ± 24 ab	55 ± 11 a
	lp3	673 ± 68 ab	234 ± 59 a	86 ± 17 ab

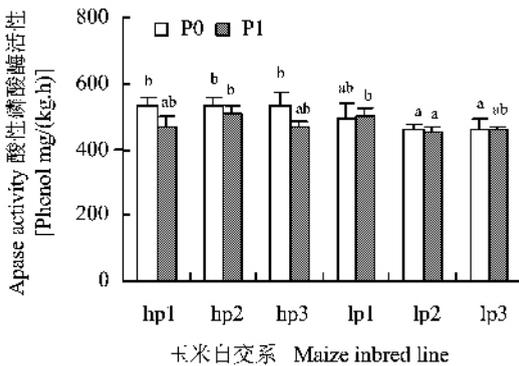


图 1 不同自交系玉米根际酸性磷酸酶的活性差异

Fig.1 Difference of rhizosphere acid phosphatase activities of maize inbred lines under two P levels

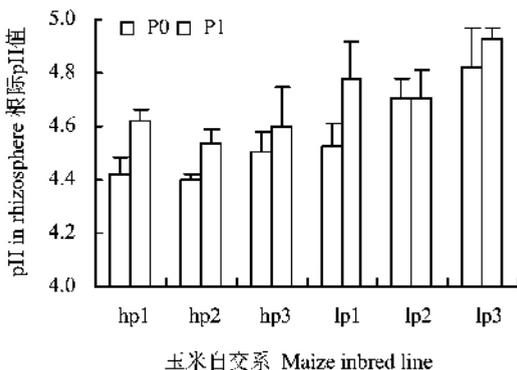


图 2 不同玉米自交系根际 pH 值的差异

Fig.2 Difference of rhizosphere soil pH of maize inbred lines under two P levels

3 讨论

试验结果表明,磷高效玉米自交系在低磷环境下其根干重、植株整体吸磷量显著高于磷低效玉米

自交系,这与王荣萍等^[16]人的研究一致。说明磷高效型玉米其优势在苗期就有所表现,更适合在低磷环境中生长。从植株的吸磷量上看出,磷高效的 hp1 与 hp2 在不施磷条件下的吸磷量显著高于磷低效自交系;但在足量施磷条件下, hp1 的吸磷量低于 hp2,与低效品种无显著差异,说明不同品种的吸磷能力在不同磷水平条件下表现不同。两种磷水平下,低磷条件使玉米生物量显著降低,根冠比增大,同化物转运到根系的比增大,促进了根的生长;而地上部同化物含量相对减小,地上部生长受抑制。

低磷条件下,吸磷量高的 hp1、hp2 都有着强大的根系,其根部干重、根尖数、根长都显著高于吸磷量较低的 lp2、lp3。根系形态上的变化增强了植株对磷的吸收能力,发达的根系增加了磷的吸收面积,使得植株可以从土壤中吸收更多的磷,以满足自身生长的需要。根长度和根尖数量的增加是植物对缺磷胁迫的适应性反应之一,同样是磷利用率高的植物的特性之一^[17]。土壤中的磷难以移动,所以植株根系形态与植株的根系分泌物对磷的吸收起着至关重要的作用。有试验表明,植株根系的大小对其能否高效利用磷素起着关键性的作用^[18]。

在两种磷水平下,磷高效型自交系的根际土壤 pH 值均低于磷低效型自交系,磷高效型玉米根际土壤酸化作用更明显。H⁺ 的释放可以使根际土壤酸化以增加土壤中水溶性磷的量^[12]。

不施磷条件下,磷高效型的 hp1、hp2 的酸性磷酸酶活性显著高于磷低效的 lp2、lp3。磷酸酶活性的增强能提高植株对土壤中有机磷的利用。Barrett-lennard 等^[19]认为,在磷酸酯酶作用下,缺磷时植株

可更有效的利用有机磷化合物的分解产物以维持植物生长。hp1、hp2、hp3 根际土壤中酸性磷酸酶的活性在不施磷条件下比足量施磷分别增加了 13%、4% 和 14% ,而磷低效自交系的酶活性则基本没有变化。表明低磷胁迫的磷高效型品种酸性磷酸酶活性有较大幅度的增加,这与 Gaume 等人^[11]的研究结论相同。但也有研究认为,根际酸性磷酸酶并不是玉米适应磷胁迫的有效机制^[15]。对此,有待进一步深入研究。

参 考 文 献:

- [1] Schachtman D P, Reid R J, Ayling S M. Phosphorus uptake by plants : from soil to cell[J]. *Plant Physiol.* , 1998 , 116 : 447-453.
- [2] Vance C P. Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition. Plant nutrition in a world of declining renewable resources[J]. *Plant Physiol.* , 2001 , 127 : 390-397.
- [3] Fageria N K, Baligar V C. Phosphorus use efficiency in wheat genotypes[J]. *J. Plant Nutr.* , 1999 , 22 : 331-340.
- [4] Marschner H. Mineral nutrition of higher plants[M]. London : Academic Press , 1995 , 889.
- [5] Johnson J F, Allan D L, Vance C P, Weiblen G. Root carbon dioxide fixation by phosphorus deficient *Lupinus albus* : Contribution to organic acid exudation by proteoid roots[J]. *Plant Physiol.* , 1996 , 112 : 19-30.
- [6] Goldstein A H, Davon A, Baertlein D A, Medaniel R G. Phosphate starvation inducible metabolism in *Lycopersicon esculentum*. II. Characterization of the phosphate starvation inducible excreted acid phosphatase[J]. *Plant Physiol.* , 1988 , 87 : 716-720.
- [7] Ming F, Mi G H, Zhang F S, Zhu L H. Differential response of rice plants to low-phosphorus stress and its physiological adaptive mechanism[J]. *J. Plant Nutr.* , 2002 , 25 : 1213-1224.
- [8] Asmar F, Gahoonia T S, Nielsen N E. Barley genotypes differ in activity of soluble extracellular phosphatase and depletion of organic phosphorus in the rhizosphere soil[J]. *Plant Soil* , 1995 , 172 (1) : 117-122.
- [9] Lynch J, van Beem J J. Growth and architecture of seedling roots of common bean genotypes[J]. *Crop Sci.* , 1993 , 33 : 1253-1257.
- [10] Hajabbasi M A, Schumacher T E. Phosphorus effects on root growth and development in two maize genotypes[J]. *Plant Soil* , 1994 , 158 : 39-46.
- [11] Gaume A, Mächler F, León C D *et al.* Low-P tolerance by maize genotypes : significance of root growth , and organic acids and acid phosphatase root exudation[J]. *Plant Soil* , 2001 , 228 : 253-264.
- [12] Liu Y, Mi G H, Chen F J *et al.* Rhizosphere effect and root growth of two maize (*Zea mays* L.) genotypes with contrasting P efficiency at low P availability[J]. *Plant Sci.* , 2004 , 167 : 217-223.
- [13] 梁秀兰,林英春,解丽霞.酸性红壤低磷胁迫对玉米苗期生长的影响[J]. *玉米科学* (2004 年第 1 期): 98-100.
- Liang X L, Lin Y C, Xie L X. The effects of acid red soil and low phosphorus stress on the seedling growth of maize[J]. *J. Maize* , 2004 (1 期): 98-100.
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M]. 北京 : 中国农业科技出版社 , 2000.
- Lu R K. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing : China Agricultural Sciencetech Press , 2000.
- [15] 樊明寿,徐冰,王艳.缺磷条件下玉米根系酸性磷酸酶活性的变化[J]. *中国农业科技导报* , 2001 , 3 (3) : 33-35.
- Fan M S, Xu B, Wang Y. Acid phosphatase activities of intact roots and ground root tissues of maize grown in high P or low P nutrient solution[J]. *Rev. China Agric. Sci. Tech.* , 2001 , 3 (3) : 33-35.
- [16] 王荣萍,王艳,黄建国.低磷胁迫对不同基因型玉米产量性状的影响[J]. *西南农业大学学报* , 2004 , 26 (3) : 715-717.
- Wang R P, Wang Y, Hang J G. Effect of low-phosphorus stress on yield-contributing characters of different maize genotypes[J]. *J. Southwest Agric. Univ.* , 2004 , 26 (3) : 715-717.
- [17] 王艳,李晓林,张福锁.不同基因型植物低磷胁迫机理的研究进展[J]. *生态农业研究* , 2000 , 8 (4) : 34-36.
- Wang Y, Li X L, Zhang F S. Current research on suitable mechanisms on different plant under phosphorus stress condition[J]. *Eco-Agric. Res.* , 2000 , 8 (4) : 34-46.
- [18] 米国华,邢建平,陈范骏,等.玉米苗期根系生长与耐低磷的关系[J]. *植物营养与肥料学报* , 2004 , 5 : 468-472.
- Mi G H, Xing J P, Chen F J *et al.* Maize root growth in relation to tolerance to low phosphorus[J]. *J. Plant Nutr. Fert. Sci.* , 2004 , 5 : 468-472.
- [19] Barrett-lennard E G, Greenway H. Partial separation and characterization of soluble phosphatase from leaves of wheat grown under phosphorus deficiency and deficit[J]. *J. Exper. Bot.* , 1982 , 33 : 694-704.