植物营养与肥料学报 2012,18(1):52-59
Plant Nutrition and Fertilizer Science

不同耐密性玉米品种的根系生长及其对种植密度的响应

陈延玲,吴秋平,陈晓超,陈范骏,张永杰,李 前,袁力行,米国华*
(教育部植物-土壤相互作用重点实验室,中国农业大学资源与环境学院,北京 100193)

摘要: 根系形态和分布对土壤中养分和水分的吸收有重要影响。增加耐密性是现代玉米(*Zea may* L.)育种的主要方向,而耐密性与根系的关系尚了解不多。本文以70年代主推的2个不耐密型品种(中单2号与丹玉13)和2个当代耐密型现代品种(先玉335和郑单958)为材料,将田间试验和室内水培试验相结合,在3个密度水平下,研究了不同耐密性玉米品种的根系差异及其对种植密度的响应。结果表明,目前推广的耐密型品种的根系要小于不耐密的老品种。不同耐密性品种之间的差异主要表现在0—40 cm。随着密度的增加,根显著变小、变细。密度主要降低0—20 cm土层中的根系生长,对深层根系影响较小。先玉335和中单2的根系长度对密度的反应较弱,郑单958和丹玉13较强。这说明先玉335主要依靠其小根系适应高密度,而郑单958既依靠较小的根系,同时依靠较高的根系反应性适应高密度。

关键词: 玉米;密度;根长;根可塑性;基因型
中图分类号: S513.01　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)01-0052-08

Root growth and its response to increasing planting density in different maize hybrids

CHEN Yan-ling, WU Qiu-ping, CHEN Xiao-chao, CHEN Fan-jun, ZHANG Yong-jie, LI Qian, YUAN Li-xing, MI Guo-hua*
(*Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education/College of Resource and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China*)

Abstract: Root morphology and distribution have an important influence on the absorption of water and nutrients in soil. Increased resistance to planting density is one of the major traits in modern maize breeding, but little is known about the role of the plastic response of root system in the resistance to density in maize. In this paper, two old non-density resistant hybrids (Zhongdan2 and Danyu13) and two modern density-resistant hybrids (Xianyu335 and Zhengdan958) which had or have been widely used in different eras were adopted to investigate the root growth and its response to increasing planting density under both field condition and hydroponics. Results showed that the size of root system of the modern density-resistant cultivars is smaller than that of the old non-resistant cultivars and the difference mainly happened in 0-40 cm soil layer. Along with the increase of planting density, the root becomes smaller and thinner significantly. High planting density only reduced root length in the 0-20 cm soil layer, without significant effect on deeper roots. The response of root length to planting density was weaker in Xianyu335 and Zhongdan2, but stronger in Zhengdan958 and Danyu13. It is concluded that, to adapt to high planting density, Xianyu335 relies mainly on its small root size while Zhengdan958 depends on both small root size and high root plasticity.

Key words: maize (*Zea mays* L.); density; root length; root plasticity; genotype

收稿日期: 2011-06-09　　**接受日期:** 2011-10-24
基金项目: 国家重点基础研究规划项目(2009CB11860);国家自然科学基金(31071852, 30821003);农业部公益性行业科研专项(201103003)资助。
作者简介: 陈延玲(1987—),女,山东省日照市人,博士研究生,主要从事植物营养生理与养分资源高效利用研究。
E-mail: chenyanlingz1@163.com。　* 通讯作者 E-mail: miguohua@cau.edu.cn

根系形态和分布对土壤中养分和水分的吸收有重要影响[1]。土壤中养分的不均衡分布及作物根系对养分的局部耗竭，导致了养分的空间异质性[2]，植物在长期进化过程中，为了最大限度地获取土壤资源，其根系针对养分的空间异质性产生了各种可塑性反应，包括形态可塑性、生理可塑性、菌根可塑性等[3]。在玉米生长中，氮素高效吸收常需要较大、较深的根系[4-6]，浅层根系的数量则与磷、钾高效吸收密切相关[7-8]。

玉米（*Zea may* L.）是世界上重要的粮食兼经济作物，美国玉米的增长主要依赖于品种耐密性的改良和种植密度的增加[9-10]。我国近年来的高产栽培也表明，选育耐密型品种、采用高密度栽培是进一步提高玉米产量的主要途径[11-12]。高密度种植加剧了根系对养分、水分的竞争，如何利用根系可塑性反应提高水分和养分的利用效率需要深入研究。早期戴俊英等[13]研究表明，根重、根长、根数均随土壤体积的减小而明显降低；宋日等[14]研究表明，限制根区体积可抑制玉米根系下扎，导致过多根系充满0—20 cm 表层土壤孔隙，使玉米根系生长受抑制，氮吸收效率下降；管建慧等研究表明，根系达到干重最大值后的下降过程中，高密处理的下降速度最快；并且密度影响了根系干重在土壤中的垂直分布[15]。Hammer 等[16]通过模拟研究指出，美国玉米带品种更替过程中产量的增加可能主要源于根系角度的改变，而不是叶片角度的改良。这些研究结果表明，高密度栽培条件下，植株不仅要优化冠层大小与结构以适应对光能利用的最大化，同时根系大小及结构也需要优化，以增加对土壤养分水分资源的利用能力。深入分析不同耐密性玉米品种的根系大小与构型、及其对种植密度的反应，对于耐密型品种的根系改良及高密度条件下养分和水分管理具有重要意义。

本研究利用不同年代育成的 4 个大面积主推品种，2 个不耐密型老品种（中单 2 号与丹玉 13）和 2 个耐密型当代品种（先玉 335 和郑单 958），比较了它们的根系大小与构型特征及其对密度的可塑性反应，探讨玉米耐密的理想根构型，为耐密栽培与耐密品种选育提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　田间试验

试验在吉林省梨树县四棵树乡付家街村进行。供试土壤为风砂土。播种前 0—30 cm 的土壤基本性状为：有机质含量 8.3 g/kg、全氮 0.66 g/kg、速效氮 59.16 mg/kg、速效磷 30.97 mg/kg、pH（H_2O）6.24。于 2010 年 5 月 7 日播种，施氮量为纯氮 220 kg/hm^2，氮肥为尿素，分两次施用，30% 作为基肥施入土壤，70% 为追肥在拔节期条施入土；磷肥为磷酸二铵，施肥量（P_2O_5）为 92 kg/hm^2；钾肥为硫酸钾，施肥量（K_2O）为 100 kg/hm^2。磷肥和钾肥全部作为基肥在播种前一次施入。

本试验采用裂区设计，主区为品种，副区为密度。供试玉米（*Zea may* L.）品种：2 个当代耐密型品种，郑单 958（河南农科院 1996 年育成）和先玉 335（美国先锋公司 2000 年育成）；2 个不耐密老品种，中单 2（中国农林科学院 1973 年育成）和丹玉 13（丹东市农科所 1979 年育成）。4 个品种在生产上的适宜种植密度分别为：郑单 958 为 6.0 ～ 7.0 万株/hm^2[17]、先玉 335 为 6.0 ～ 6.75 万株/hm^2[18]、中单 2 为 5.25 ～ 6.0 万株/hm^2[19]、丹玉 13 为 4.2 ～ 4.8 万株/hm^2[20]。本试验设置的 3 个密度为 4.5 万株/hm^2、6 万株/hm^2、7.5 万株/hm^2。行距 60 cm，对应株距分别为 37 cm、28 cm、22 cm，小区面积为 2.4 m × 9 m。每小区 4 行，行长 9 m。4 次重复。

玉米根系采用剖面法挖掘。在吐丝期（出苗后 72 d），每个小区选取长相一致的植株 2 株，以每株所占土地面积划出界限，每 20 cm 为一层分层取土，直到 60 cm 深。每层土体中的所有可以看得见的根系由人工挑出，用水冲洗干净后装入封口袋，根系上附着的水用吸水纸吸干，然后放入 -20℃ 冰箱中保存。每层根系分别用扫描仪（Epson 1680，Indonesia）扫描，并经分析程序（WinRhizo Pro Vision5.0，Canada）分析，获得总根长指标。然后，烘干称重，测得根系干重。。

1.2　水培试验

供试玉米品种同田间试验。种子经 10%（v/v）H_2O_2 表面消毒 30 min 后，用去离子水冲洗种子直至洗净表面残留的 H_2O_2，用饱和 $CaSO_4$ 浸泡种子 6 h，转到用蒸馏水湿润的滤纸中间，在室温和黑暗条件下催芽。待种子露白后，将种子用均一（均匀一致的）滤纸卷起放至盒中蒸馏水中暗处培养。当玉米长出一叶一心时，挑选出大小一致的幼苗，去掉胚乳后转移到体积为 2 L 的、盛有 1/2 浓度营养液的瓷质培养罐中，全营养液组成为（mmol/L）：K_2SO_4 0.75、KCl 0.1、KH_2PO_4 0.25、$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.65、EDTa-Fe 0.1、H_3BO_3 1.0×10^{-2}、$MnSO_4 \cdot H_2O$ 1.0×10^{-3}、$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 1.0×10^{-3}、$CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 1.0 ×

10^{-4}、$(NH_4)Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ 5.0×10^{-6}、$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 2.0，pH 用 NaOH 调节至 6.0 ± 0.1。第 2 d 换成全营养液培养，以后每隔一天换一次营养液，并更换盆钵的位置，用电动气泵连续通气，幼苗生长在昼夜温度为28℃，相对湿度为60%，光照时间为 14 h/d，冠层光强为 400 umol/($m^2 \cdot s$) 生长室中。

试验设：低密处理（1 株/罐）、中密处理（3 株/罐）、高密处理（5 株/罐），4 次重复。玉米苗在全营养液生长 14 d 后收获。收获后，小心将根系用蒸馏水洗净，将其放入封口袋，置于 4℃ 的冰箱中，以便进行根系形态指标的测定。主胚根、种子根、节根、侧根分别用扫描仪（Epson 1680，Indonesia）扫描，并经分析程序（WinRhizo Pro Vision5.0，Canada）分析，获得各类型根长指标。然后，烘干称重，测得根系干重。

统计分析采用 SAS 软件，按裂区试验的分析程序进行统计分析，用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 田间条件下密度对不同品种根系生长的影响

由表 1 可看出，不同基因型的总根长、总根干重和比根长都有显著差异，这种差异在不同土壤层次均有表现。说明根长、根干重及比根长的差异主要是由遗传决定的。从图 1 可看出，不同品种的总根长大小依次为：中单 2 > 丹玉 13 > 郑单 958 > 先玉 335，说明目前推广的耐密型品种的根系要小于不耐密的老品种。新老品种之间的差异主要表现在 0—40 cm，郑单 958 和先玉 335 的根长明显小于两个老品种。在 41—60 cm 深层土壤中，新老品种根长的差异较小，说明现代品种根系的变小可能与表层根系的减少有密切关系。

表 1 品种、密度及其互作对根长、根干重、比根长的方差分析

Table 1 Variance analysis of the effect of cultivar, planting density, and their interactions on root length, root dry weight, and the specific root length

变异来源 Source	根长 Root length				根干重 Root dry weight				比根长 Specific root length
	TRL	0—20 cm	21—40 cm	41—60 cm	TRDW	0—20 cm	21—40 cm	41—60 cm	
基因型 Genotype	<0.0001	<0.0001	0.0001	0.0024	0.0007	0.0028	0.0075	0.0049	<0.0001
密度 Density	0.0470	<0.0001	0.5308	0.6542	0.0188	0.0266	0.4824	0.4081	0.9746
密度×基因型 Density × Genotype	0.5453	0.0001	0.7516	0.6057	0.5021	0.6775	0.5519	0.9542	0.0761

注(Note)：TRL—单株总根长 Total root length per plant；TRDW—单株总根干重 Total root dry weight per plant.

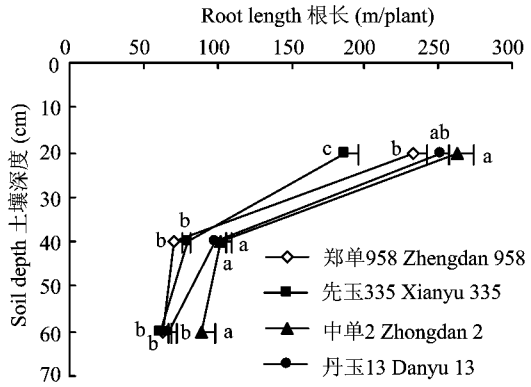

图 1 不同土壤层次中不同玉米杂交种的根长分布

Fig.1 Root distribution of different maize hybrids in different soil layers

[注(Note)：同一土层不同字母表示在不同品种间差异达到5%显著水平 Different letters denote significant difference at the 5% level between genotypes within the same soil layer.]

不同基因型比根长的大小依次为：丹玉 13 > 中单 2 > 郑单 958 > 先玉 335，并且在各层差异都达显著水平。说明当前耐密性品种的比根长小于不耐密型的老品种（图 2），也就是说，在相同的干物质供应条件下，耐密型品种根系生长得更短。间接说明其单位根长的养分和水分吸收能力增加，其原因尚需进一步探讨。

密度对玉米单株总根长、总根干重都有显著影响，其显著影响主要表现在 0—20 cm（表 1）。随着密度的升高，表层 0—20 cm 总根长、总根干重都显著降低。深层根系生长几乎不受密度变化的影响（图 3），说明密度的升高可能主要加剧了表层根系的竞争，而对深层根系影响不大。在高密度种植条件下，植株通过降低表层根系的比例，增加深层根系的比例，可能有利于其利用深层次的水分和养分，减少株间竞争。

总根长的基因型×密度互作效应不显著，但是

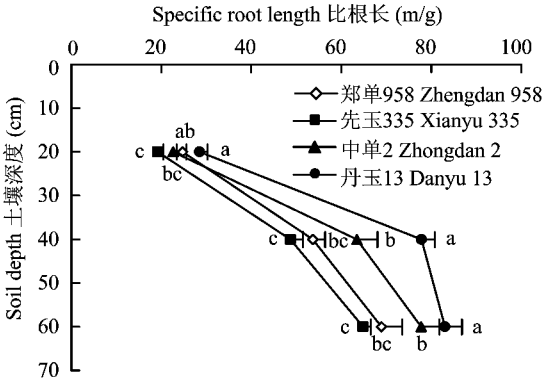

图 2　不同土壤层次中不同玉米杂交种的比根长

Fig. 2　Distribution of the specific root length of different maize hybrids in different soil layers

[注(Note)：同一土层不同字母表示在不同品种间差异达到 5% 显著水平 Different letters denote significant difference at the 5% level between genotypes within the same soil layer.]

在 0—20 cm 土层，基因型 × 密度互作效应显著影响根的长度(表 1)，说明在土壤表层，不同耐密型品种的根系生长对密度的反应有所不同。

由于密度与基因型互作的显著性差异主要表现在 0—20 cm，所以进一步分析了 0—20 cm 土层中不同基因型根系对密度的反应。从图 4 可以看出，随着密度的升高，先玉 335 和中单 2 的总根长没有显著性变化，说明在试验设计的范围内，密度对这两个品种的根系长度影响较小。对于郑单 958 和丹玉 13，当密度由 4.5 株/m^2 升高到 6.0 株/m^2 时，二者总根长都显著减少；而当密度由 6.0 株/m^2 升高到 7.5 株/m^2时，二者的总根长也没有显著的改变。根干重对密度的反应与根系长度一致(图 4)。当前超高产栽培要求密度从 6.0 株/m^2 升高到 7.5 株/m^2 左右，本试验结果说明，在这一过程中，在这个范围内增加密度可能对根系大小的影响较小，但对根的分布有一定影响(图 3)。

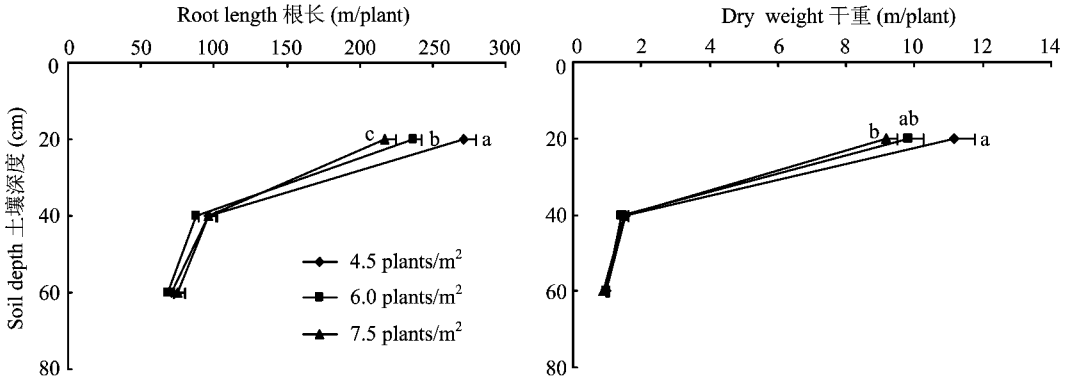

图 3　种植密度对玉米总根长、总根干重的影响

Fig. 3　Effect of planting density on the total root length and the total root dry weight of maize

[注(Note)：图中的不同字母表示同一品种不同密度处理间差异达到 5% 水平 Different letters denote significant difference at the 5% level between density treatments within the same genotype.]

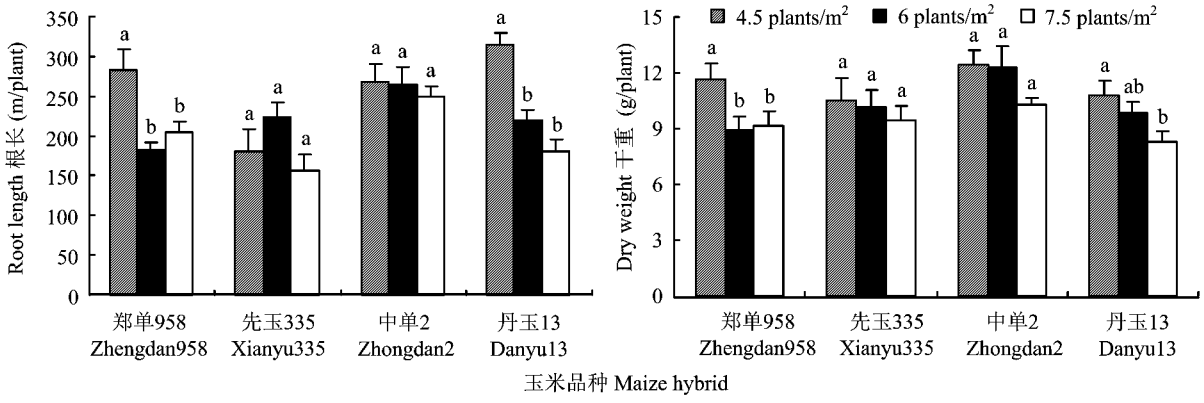

图 4　不同杂交种根长及根干重对种植密度的反应

Fig. 4　The plastic response of the roots and the root dry weight to increasing planting density of different maize hybrids

[注(Note)：图中的不同字母表示同一品种不同密度处理间差异达到 5% 水平 Different letters denote significant difference at the 5% level between density treatments within the same genotype.]

2.2 田间条件下密度对不同品种单株产量的影响

增加密度显著降低玉米单株产量(图5),但密度与基因型之间的互作不显著,说明所有基因对密度的反应趋势一致。不同耐密性基因型的单株生产能力有显著性差异。在较低密度下,两个耐密品种郑单958和先玉335自身的单株生产能力就高,随着密度的升高,二者的单株生产能力虽然都显著下降,但仍然高于同密度下的两个不耐密的品种。

2.3 水培条件下新老品种根系对密度的响应

鉴于田间根系测定误差较大,难以监测早期的微小变化,因此,进一步在水培条件下分析了上述品种苗期根系生长对密度的反应。从表2可以看出,各指标密度处理间和基因型处理间均达到显著或极显著水平,这基本与田间试验结果一致。除了在极低密度下郑单958具有较大的根系以外,其它2个密度下,各品种的总根长大小依次为:丹玉13 > 中单2 > 郑单958 > 先玉335。同样说明,目前推广的耐密型品种的根系要小于不耐密的老品种。密度及密度×基因型互作都对总根长具有显著性影响。随着密度的增加,不同基因型的总根长显著降低。

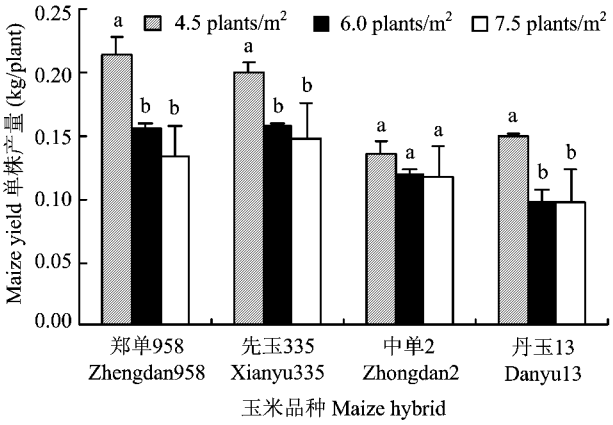

图5 不同种植密度下不同杂交种的单株产量

Fig. 5 Grain yield per plant different maize hybrids grown under different planting densities

[注(Note):柱上的不同字母表示同一品种不同密度处理间差异达到5%水平 Different letters above the bars denote significant difference at the 5% level between density treatments within the same genotype.]

表2 水培条件下不同品种的根系特征及其对密度响应的方差分析

Table 2 Variance analysis of the root system characteristic and its response to planting density of different maize hybrids under solution culture condition

基因型 Genotype	密度处理 Density treatment	总根长 Total root length (m/plant)	根干重 Root dry weight (g/plant)	比根长 Specific root length (m/g)	根直径 Root diameter (mm/plant)
郑单958 Zhengdan958	低密 LD	64 a	0.19 a	334 a	2.37 a
	中密 MD	40 b	0.15 b	267 b	1.38 b
	高密 HD	28 b	0.11 c	263 b	1.01 c
先玉335 Xianyu335	低密 LD	32 a	0.11 a	301 a	0.90 a
	中密 MD	29 a	0.11 a	256 ab	0.78 a
	高密 HD	14 b	0.06 b	223 b	0.63 a
中单2 Zhongdan2	低密 LD	44 a	0.21 a	208 a	1.90 a
	中密 MD	46 a	0.20 a	238 a	1.47 b
	高密 HD	30 b	0.13 b	236 a	1.08 b
丹玉13 Danyu13	低密 LD	48 a	0.20 a	237 a	1.17 a
	中密 MD	52 a	0.20 a	228 a	1.17 a
	高密 HD	36 b	0.17 b	219 a	0.90 a
		变异来源 Source of variation			
基因型 Genotype		<0.0001	<0.0001	0.0006	<0.0001
密度 Density		<0.0001	<0.0001	0.0353	<0.0001
基因型×密度 Genotype × Density		0.0075	0.0590	0.0662	<0.0001

注(Note):LD—Low density; MD—Moderate density; HD—High density. 数值后不同字母表示同一品种内不同密度间差异达到5%显著性差异 Values followed by different letters denote significant difference at the 5% level between density treatments within the same genotype. *, **分别表示在0.05和0.01水平差异显著,ns表示没有显著差异 Indicate significance at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. ns indicates not significant.]

随着密度的增加，根干重显著降低，说明增加密度减少了地上部光合产物向根的运输。各品种间反应一致，不存在基因型 × 密度间的互作。不管是根长还是根干重，郑单 958 对密度增加的反应都最明显，其它 3 个品种，只有在密度从中密度到高密度的情况下，才表现出显著的降低趋势（图 6）。这说明，苗期根系生长对密度的反应更强烈，在高密度条件下，所有品种的根系生长均受到显著抑制。

各品种的比根长有显著性差异，两个耐密型品种的比根长较小，品种间大小依次为：郑单 958 > 先玉 335 > 丹玉 13 > 中单 2。这与田间试验结果表现基本一致。虽然基因型 × 密度间的互作效应不显著，但总的趋势表现为，随着密度的增加，现代耐密型品种的比根长显著降低，另 2 个品种的比根长变化不显著。

4 个品种的根系直径比较，郑单 958 最大，先玉 335 最小，其余 2 个品种居中。增加密度减少根的直径，不同品种反应不一。郑单 958 和中单 2 的根直径显著减小，先玉 335 和丹玉 13 的根直径变化不显著。以上结果表明，品种的耐密型与根的直径之间没有一致性关系。

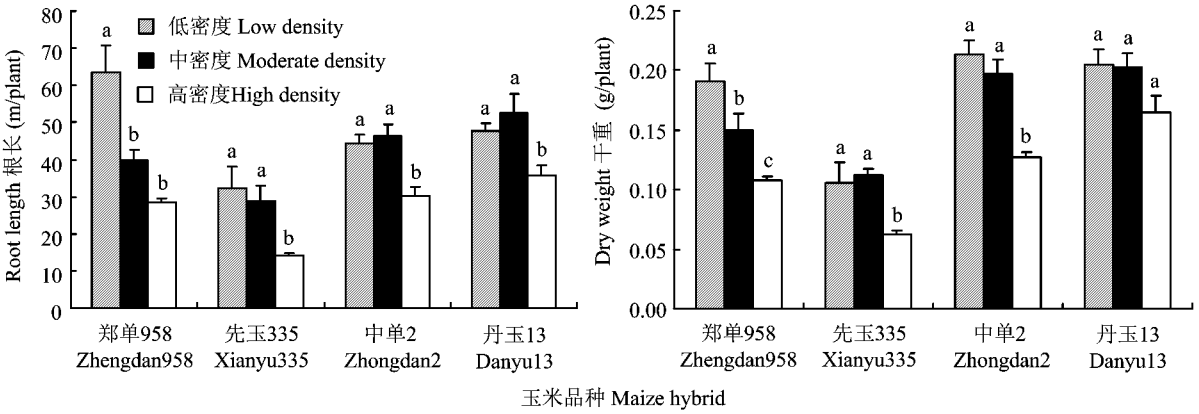

图 6　水培条件下不同杂交种根长、根干重对密度的反应

Fig. 6　The plastic response of root length and root dry weight to increasing planting density of different maize hybrids grown in solution culture system

［注（Note）：同一品种不同字母表示不同密度处理间差异达到 5% 显著水平

Different letters denote significant difference at the 5% level between density treatments within the same genotype.］

3　讨论

群体密度的增大往往导致株间对光、肥、水的竞争[21-22]，造成植株大小不一，是减产的主要因素。本研究表明，不管是在水培条件下还是在田间条件下，随着密度的升高，总根长、根干重都显著减少（图 3、图 4、图 6），这与戴俊英、宋日等[13-14]在盆栽条件下关于根重和根长的研究结果一致，也与管建慧等[15]在田间条件下关于根干重的研究一致。关于不同年代品种根系性状的演变研究，数据尚较少。早期王空军等[23]研究表明，现代玉米杂交种的根系大小增加了。但仔细分析其数据发现，与 50 年代的农家种（金皇后、白马牙、黄县二马牙）相比，70 年代杂交种（郑单 2 号、中单 2 号、丹玉 6 号）的根数量有很大提高，但 90 年代的杂交种（掖单 13、农大 60、沈单 7 号）的根数增加不明显。本研究则表明，与 70 年代的杂交种相比，进入本世纪后的 2 个主推耐密型品种先玉 335 和郑单 958 的根系均开始变小。这种变化可能有助于其适应高密度条件下减少株间对水肥的竞争，使单株的生长保持均一，达到较优群体，进而在高密度下仍保持较高产量。

在田间条件下，玉米 50% ～ 80% 的根系占据在 0—20 cm 土层中[24-25]。深层根系的多少与水分密切相关[26]。前人对密度研究很少关注到密度增加对根系剖面分布的影响。本研究结果表明，随着密度的增加，0—20 cm 土层根系显著降低，而深层根的变化较小（图 3）。说明植株主要是通过调节 0—20 cm 的根系生长来适应增加密度的变化，这与养分主要富集在该土层是一致的。另外，根系对密度的影响的基因型差异也主要发生在这一土层（表 1、图 4）。与我们的设想不同，品种的耐密性与该层次根系的反应的表现并不一致。先玉 335 和中单 2 的根系生长对密度的反应较差，在一定的密度范围内，郑单 958 和丹玉 13 的反应较好。这说明，对于 2 个

耐密型品种而言,先玉335主要依靠其小根系适应高密度,而郑单958既依靠较小的根系,同时依靠较高的根系可塑性适应高密度。

根的直径与解剖结构对根系生理学功能有显著影响,较细的根有利于扩展空间吸收面积,提高土壤养分的空间有效性,这对于高效吸收以在土壤中扩散为主的元素(如磷、钾等)尤其重要。美国Lynch小组的结果表明,根内通气组织的多少会显著影响根内养分的高效利用、进而影响养分效率[27-28]。但很少有研究表明根解剖结构的基因型差异以及密度对根解剖结构的影响。本研究表明,在高密度条件下,4个品种中,先玉335的根直径最小(表2),说明先玉335的根最细。一般而言,直径变细将增加比根长,然而在田间条件下却发现,先玉335的比根长要明显小于老品种(图2),这说明先玉335的根密度(即单位体积的根干重)在变大,即根的充实度在提高,这很有可能是因为其根中维管组织所占比例较大的缘故,这应该有助于在根较细的条件下提高养分、水分运输速率,但这一点还值得深入研究和证实。

4 结论

在不同密度下,当前耐密型品种郑单958和先玉335的单株产量均高于不耐密老品种中单2号和丹玉13。耐密型品种郑单958和先玉335的根系要小于不耐密的老品种。两类品种之间的差异主要表现在0—40 cm。密度对玉米单株总根长、总根干重都有显著影响,其显著影响主要表现在0—20 cm。随着密度的升高,表层0—20 cm总根长、总根干重都显著降低。深层根系生长几乎不受密度变化的影响。先玉335和中单2的根系长度对密度的反应较弱,郑单958和丹玉13的反应较强。这说明,耐密型品种先玉335主要依靠其小根系适应高密度,而郑单958既依靠较小的根系,同时依靠较高的根系反应性适应高密度种植。

参考文献:

[1] 鄂玉江,戴俊英,顾慰连. 玉米根系的生长规律及其与产量关系的研究Ⅰ. 玉米根系的生长和吸收能力与地上部分的关系[J]. 作物学报,1988,14(2):149-154.
E Y J, Dai J Y, Gu W L. The research about the root growth rule of maize and its relationship with the yield. I. the relationship between maize root growth and absorptive capacity and the aboveground part [J]. Acta Agron. Sin., 1988, 14(2): 149-154.

[2] Lynch J. Root architecture and plant productivity [J]. Plant Physiol. 1995, 109: 7-13.

[3] 王庆成,程云环. 土壤养分空间异质性与植物根系的觅食反应[J]. 应用生态学报,2004,15(6):1063-1068.
Wang Q C, Cheng Y H. The soil nutrient spatial nonstationarity and plant roots foraging reaction [J]. J. China App. Ecol., 2004, 15(6): 1063-1068.

[4] Wang Y, Mi G H, Zhang F S *et al*. Response of root morphology to nitrate supply and its contribution to nitrogen uptake in maize [J]. J. Plant Nutr., 2004, 27: 2189-2202.

[5] Mi G H, Chen F J, Zhang F S *et al*. Ideotype root architecture for efficient nitrogen acquisition by maize in intensive cropping systems [J]. Sci. China Life Sci., 2010, 53(12): 1369-1373.

[6] Wiesler F, Horst W J. Root growth and nitrate utilization of maize cultivars under field conditions [J]. Plant Soil, 1994, 163: 267-277.

[7] Gerardo R, Liao H, Yan X, Lynch J. Topsoil foraging and its role in plant competitiveness for phosphorus in common bean [J]. Crop Sci., 2003, 43: 598-607.

[8] Schenk M K, Barber S A. Potassium and phosphorus uptake by corn genotype grown in the field as influenced by root characteristics [J]. Plant Soil, 1980, 54: 65-75.

[9] Tollenaar M, Lee E A. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize[J]. Field Crops Res., 2002, 75: 161-169.

[10] Duvick D N. The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.) [J]. Adv. Agron., 2005, 86: 83-145.

[11] 赵久然,孙世贤. 对超级玉米育种目标及技术路线的再思考[J]. 玉米科学,2007,15(1):21-23,28.
Zhao J R, Sun S X. Rethinking about super corn breeding objectives and the technical route [J]. J. Maize Sci., 2007, 15(1): 21-23, 28.

[12] 张世煌. 中美两国玉米育种思路和技术水平比较[J]. 北京农业,2007,(14):13-16.
Zhang S H. The comparison about maize breeding ideas and technical level between China and American [J]. Beijing Agric., 2007, (14): 13-16.

[13] 戴俊英,鄂玉江,顾慰连. 玉米根系的生长规律及其与产量关系的研究Ⅱ. 玉米根系与叶的相互作用及其与产量的关系[J]. 作物学报,1988,14(4):310-314.
Dai J Y, E Y J, Gu W L. The research about the root growth rule of maize and its relationship with the yield. Ⅱ. The interactions between maize root system and leaf and their relationships with the production[J]. Acta Agron. Sin., 1988, 14(4): 310-314..

[14] 宋日,刘利,吴春胜,马丽艳. 根系生长空间对玉米生长和养分吸收的影响[J]. 西北农林科技大学学报,2009,37(6):58-64.
Song R, Liu L, Wu C S, Ma L Y. The effect of root growth space on maize growth and nutrient absorption [J]. J. Northwest Sci-Tech Univ. Agric. For., 2009, 37(6): 58-64.

[15] 管建慧,郭新宇,刘洋,等. 不同密度处理下玉米根系干重空间分布动态的研究 [J]. 玉米科学,2007,15(4):105

-108.
Guan J H, Guo X Y, Liu Y *et al*. Study on dynamic variation of root dry weight space distribution on different densities of maize [J]. J. Maize Sci., 2007, 15(4): 105-108.

[16] Hammer G L, Dong Z, Greg M, Al D *et al*. Can changes in canopy and/or root system architecture explain historical maize yield trends in the U. S corn belt? [J]. Crop Sci., 2009, 49: 299-312.

[17] 罗洋, 岳玉兰, 郑金玉, 等. 玉米品种郑单 958 合理种植密度的研究[J]. 吉林农业科学, 2008, 33(6): 11-12.
Luo Y, Yue Y L, Zheng J Y *et al*. Studies on proper planting density of maize variety 'Zhengdan 958' [J]. J. Jilin Agric. Sci., 2008, 33(6): 11-12.

[18] 徐明洁, 刘江, 董秋婷, 等. 先玉 335 适宜栽培密度与性状指标研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(19): 8928-8930.
Xu M H, Liu J, Dong Q T *et al*. Preliminary study on proper cultivation density and character index of Xianyu 335 [J]. J. Anhui Agric. Sci., 2009, 37(19): 8928-8930.

[19] 周洪林, 杨云光. 紧凑型玉米品种高产因素分析[J]. 云南农业科技, 1994, (4): 14-15.
Zhou H L, Yang Y G. The analysis about high yield factors on compact corn varieties [J]. Yunnan Agric. Sci. Tech., 1994, (4): 14-15.

[20] 李艳天. 玉米单交种-丹玉 13[J]. 种子世界, 1986, (4): 16-17.
Li Y T. Maize single cross hybrid-Danyu13 [J]. Seed World, 1986, (4): 16-17.

[21] Jiang W, Wang K J, Jiang G M *et al*. Interplant root competition leads to an overcrowding effect in maize[J]. Can. J. Plant Sci., 2009, 89(6): 1041.

[22] Rossini M A, Maddonni G A, Otegui M E. Inter-plant competition for resources in maize crops grown under contrasting nitrogen supply and density: Variability in plant and ear growth [J]. Field Crops Res., 2011, 121: 373-380.

[23] 王空军. 玉米不同产量潜力基因型根系生理特性与地上部关系研究[D]. 泰安: 山东农业大学博士学位论文, 2000.
Wang K J. Root physiological characters of maize genotypes with different yield potential and its relationship with above-ground growth [D]. Taian: PhD dissertation, Shangdong Agriculture University, 2000.

[24] Durieux R P, Kamprath E J, Jackson W A, Moll R H. Root distribution of corn: The effect of nitrogen fertilization [J]. Agron. J., 1994, 86: 958-962.

[25] 王启现, 王璞, 杨相勇, 等. 不同施氮时期对玉米根系分布及其活性的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(12): 1469-1475.
Wang Q X, Wang P, Yang X Y *et al*. Effects of nitrogen application time on root distribution and its activity in maize [J]. Sci. Agric. Sin., 2003, 36(12): 1469-1475.

[26] Schenk H J, Jackson R B. The global biogeography of roots [J]. Ecol. Monog., 2002, 72: 311-328.

[27] Postma J A, Lynch J P. Root cortical aerenchyma enhances growth of *Zea mays* L. on soils with suboptimal availability of nitrogen, phosphorus and potassium [J]. Plant Physiol., 2011. DOI: 10.1104/pp.111.175489.

[28] Zhu J, Brown K M, Lynch B J. Root cortical aerenchyma improves the drought tolerance of maize (*Zea mays* L.) [J]. Plant, Cell Environ., 2010, 33: 740-749.