

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2012.01286

高产栽培条件下种植密度对不同类型玉米品种根系时空分布动态的影响

李宗新^{1,2,3} 陈源泉¹ 王庆成^{2,3} 刘开昌^{2,3} 高旺盛^{1,*} 隋 鹏^{1,*}

¹ 中国农业大学循环农业研究中心, 北京 100193; ² 山东省农业科学院玉米研究所, 山东济南 250100; ³ 小麦玉米国家工程实验室, 山东济南 250100

摘 要: 以平展大穗型品种鲁单 981 (LD981)和紧凑中穗型品种鲁单 818 (LD818)为材料, 比较研究了不同种植密度下根系时空分布动态, 以期为玉米品种的选育和高产栽培提供理论依据。结果表明, 随生育进程, 2 个品种的根系总体积、总表面积、活跃吸收面积与总干重均呈先升后降趋势, 多为开花期至乳熟期达最大。随种植密度递增, LD981 和 LD818 的根层数与数量、总体积、总表面积、活跃吸收面积以及水平与垂直方向各分布区域的干重均呈递减趋势, LD981 的递减速率明显大于 LD818。生育期内, 不同种植密度下 LD981 和 LD818 的根系干重水平方向 0~6 cm、6~12 cm 和 12~18 cm 分布表现为高密度区、中密度区和低密度区; 垂直方向 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 和 60~80 cm 土层分别表现为高密度层、中密度层、低密度层和稀密度层; LD981 水平方向 0~6 cm 范围根系干重所占比例比 LD818 的低 2.96%, 6~18 cm 则高 14.33%, 垂直方向 0~40 cm 土层根系干重所占比例前者比后者高 3.71%, 40~80 cm 土层则低 35.97%。本研究说明不同类型玉米品种对根系伸展空间方向和大小要求存在差异, 平展大穗型品种 LD981 单株根量多, 吸收能力强, 根系分布较浅, 对种植密度递增导致的水平方向空间受限制的反应更为敏感, 宜适当增大株距稀植; 紧凑中穗型品种 LD818 单株根系呈现“横向紧缩, 纵向延伸”的特点, 更能适应随着种植密度递增导致的水平方向空间受限制的“拥挤”, 宜适当减小株距密植。

关键词: 玉米; 种植密度; 根系; 时空分布

Influence of Planting Density on Root Spatio-Temporal Distribution of Different Types of Maize under High-Yielding Cultivation Conditions

LI Zong-Xin^{1,2}, CHEN Yuan-Quan¹, WANG Qing-Cheng², LIU Kai-Chang², GAO Wang-Sheng^{1,*}, and SUI Peng^{1,*}

¹ Research Center of Circular Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100193, China; ² Maize Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China; ³ National Engineering Laboratory for Wheat and Maize, Jinan 250100, China

Abstract: A field experiment was conducted to compare the influence of planting density on the root spatio-temporal distribution using two types of maize cultivar (LD981, a planophile massive ear type variety, and LD818, an erectophile middle ear type variety) under high-yielding cultivation conditions. The results indicated that the total root volume (TRV), total root-absorbing area (TRAA), active-absorbing area (AAA), and total root dry weight (TRDW) of the both maize varieties increased at first and then decreased during the growth stages. From the flowing stage to the milking stage, the above parameters reached their maximum values. The number of root layers, root number, TRV, TRAA, AAA, and TRDW decreased with the increase of planting density, but the rate of decrease in LD981 was higher than that in LD818. In the horizontal distribution, 0–6, 6–12, and 12–18 cm from the stem were classified as higher, mid, and lower root density zones, respectively; in the vertical distribution, 0–20, 20–40, 40–60, and 60–80 cm below the ground surface were classified as higher, mid, lower, and thinner root density layers, respectively. In the horizontal distribution, the percentage of root dry weight in 0–6 cm soil from the stem of LD818 was higher (2.96%) than that of

本研究由国家科技支撑计划项目(2011BAD16B15, 2011BAD16B09), 农业科技成果转化资金项目(2010GB2C600250)和山东省玉米现代产业技术体系项目资助。

* 通讯作者(Corresponding authors): 高旺盛, E-mail: wshgao@cau.edu.cn; 隋鹏, Tel: 0531-62737516

第一作者联系方式: E-mail: lizx@saas.ac.cn, Tel: 0531-83179402

Received(收稿日期): 2012-02-20; Accepted(接受日期): 2012-04-20; Published online(网络出版日期): 2012-05-15.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20120515.1413.001.html>

LD981, but lower (14.33%) in 6–18 cm soil; in the vertical distribution, the percentage of root dry weight in 0–40 cm soil below the ground surface in LD818 was lower (3.71%) than that in LD981, but higher (14.33%) in 40–80 cm soil. The results of this study suggest that the requirement in root distribution space and orientation is different among different maize varieties. LD981 possesses more roots mainly distributing in lower soil layers. LD981 is more sensitive to horizontal restriction owing to higher planting density, and suitable to be planted under lower planting density condition. LD818 shows the root distribution characteristics of “vertical extension and horizontal contraction”, adapting horizontal restriction owing to higher planting density, suitably cultivating under higher planting density condition.

Keywords: Maize (*Zea mays* L.); Planting density; Root; Spatio-temporal distribution

根系是固定植株并从土壤中吸收和运输水分、养分及合成氨基酸、有机磷化合物和多种生理活性物质的重要器官^[1-2], 其生长发育状况直接影响作物生长与产量。根系是国际农业科研领域的研究热点, 也是一个极具潜力的基础性课题。由于根系生长在地下, 大田条件下难于准确取样、测定、观察, 特别是研究方法不完善、破坏性采样及工作量大, 阻碍了根系研究的深入开展, 使其远不如地上部研究深入^[3]。目前, 关于水稻^[4-5]、小麦^[6-7]等作物的根系研究较为系统, 而玉米尤其是高产条件下的根系形态变化的研究还相对较少。玉米根系强大, 不仅根系总重量和入土深度超过其他禾谷类作物, 而且有比其他禾谷类作物根系更为发达的气腔, 使根系研究更为困难^[8]。已有的相关研究多借助于盆栽^[9-10]、尼龙网架^[11]、水培^[12-13]、土柱^[14-16]等辅助措施, 大田条件下玉米根系时空分布的研究相对较少。根系形态特征与玉米的生长发育^[17]、产量形成^[18]、养分吸收^[19]等关系密切, 除了与品种自身的基因型有关外, 耕作方式^[20]、肥料^[21]、种植密度^[22]等栽培措施都直接影响玉米根系生长发育, 从而影响地上部个体和群体的产量形成。前人从品种类型^[23]和种植密度^[21-22]入手, 对玉米根系的形态特征、生长发育等业已开展了一些研究工作, 但多侧重于中低产条件下、单一生育期或单一分布方向, 对当代不同类型品种在种植密度递增条件下的相关研究较少。随着玉米品种选育周期缩短、更新速度加快、种植密度不断增大、单产迅速提高, 更应注重高产栽培条件下、当代不同类型玉米品种根系对种植密度递增适应能力的研究。为此, 本试验选用黄淮海地区玉米主推的平展大穗型品种鲁单 981 和紧凑中穗型品种鲁单 818, 研究分析高产再高产过程中群体密度增大对根系时空分布特性与生长发育规律的影响, 探讨不同种植密度下不同类型玉米品种个体根系生长的合理空间范围, 以期为不同类型玉米品种的高产育种和栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验于 2010—2011 年在山东省农业科学院玉米研究所六一农场(117°1'E, 37°1'N)进行。试验田为灌排良好、常年培育、土壤肥沃的高产田(近 3 年玉米平均单产 12 780 kg hm⁻² 以上, 高出当地平均单产 48.17%), 沙壤土, 耕层土壤含有机质 1.11%、全氮 0.11%、速效氮 53.16 mg kg⁻¹、速效磷 29.38 mg kg⁻¹、速效钾 87.17 mg kg⁻¹。

鲁单 981 (LD981)和鲁单 818 (LD818)每个品种各设置 3 万株 hm⁻² (D1)、6 万株 hm⁻² (D2)、9 万株 hm⁻² (D3) 3 个种植密度; 采用随机区组设计, 每个小区 12 行, 小区面积 40.02 m², 行距 66.7 cm, 重复 4 次。两年均为 6 月中旬播种, 10 月上旬收获。依据 12 000 kg hm⁻² 的产量目标, 按照每生产 100 kg 籽粒需吸收 3 kg N、1 kg P₂O₅、3 kg K₂O 施用无机肥料, 其中氮肥以 4:6 的比例于播种前和大喇叭口期施入, 磷、钾肥全部做底肥施入; 其他栽培管理按大田高产要求进行。

1.2 测定项目与方法

采用根钻法和大田挖掘法结合采集根系样品, 于玉米拔节期、大喇叭口期、开花期、乳熟期和成熟期, 每处理每次取样 3 株。前人在大田用根钻采样^[10,22]的垂直深度为 80 cm, 以取样植株为中心, 水平层面面积为 30 cm×30 cm。根钻法采集根系样品, 本试验主要依据李鹏等^[24]对 1/4 样圆法的研究修订结论, 钻头长 15 cm, 直径 6.2 cm, 以取样植株主茎为中心, 水平层面划分为 0~6 cm、6~12 cm、12~18 cm 3 个取样区域(D1、D2 接近于正方形, D3 为垂直于行向的长方形), 每个区域均匀取 8 个样点(图 1), 从上往下按 20 cm 分层取样, 深 80 cm, 将所得的样本用 0.5 mm 和 0.25 mm 土壤筛依次过筛冲洗, 捡出根样, 并称取鲜重, 然后以烘干法测定干重。运用正态分布密度函数 $f(x)=1/[\sqrt{2\pi}]\exp\{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)\}$ (x 为离取样植株主茎距离; μ 、 σ 为参数)累加计算同

一取样区域各土层样点的根重,用于分析根系在土壤中的水平分布,累加计算同一土层各取样区域样点的根重,用于分析根系在土壤中的垂直分布。

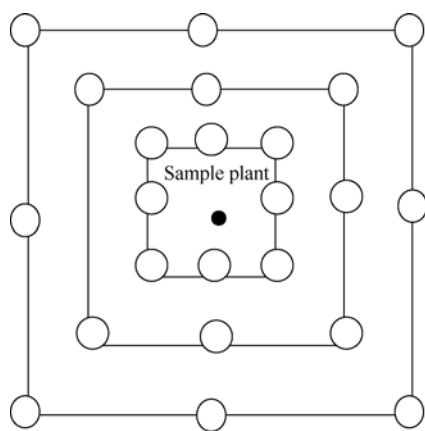


图 1 根钻法取样点分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing root sample position in soil core method

大田挖掘法采集根系样品,以取样植株为中心,取 1/2 行距(垂直于行向)×株距(平行于行向)划出根系分布区域,破坏性挖深 80 cm,通过环切和冲洗,完整挖掘其中的全部根系;计数开花期所取根样的根层数和各层根的数量;用排水法测定根系总体积;用亚甲基蓝吸附法测定根系吸收总面积和活跃吸收面积^[25]。

1.3 数据分析

两年数据结果变化趋势基本一致,本文主要以 2011 年度试验数据进行整理分析。采用 Microsoft Excel 2007 处理数据,采用 SPSS 13.0 软件统计分析和检验显著性,用 Sigmaplot 10.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同种植密度下 2 种类型玉米根层建成的比较

开花期是玉米根系生长建成的主要阶段,之后根层数和数量不再增加^[19]。因此取开花期比较分析 2 种类型玉米品种的根层数和发生数量。由表 1 可见,2 种类型玉米品种根系数量与根层序密切相关,各根层根系数量均随根层序增高而增加,且二者呈显著的回归关系, $y = 1.3873x - 0.2857$ (y : 每层根系数量, x : 根层序, $R^2=0.9201^{**}$)。2 个玉米品种的胚根与 1~4 根层的根系数量无明显差异,5~9 根层的根系数量均表现为 LD981 显著高于 LD818。3 种密度处理下,LD981 平均单株根系数量比紧凑型玉米品种 LD818 高 10.20%。不同种植密度间,2 种类型玉米品种 1~4 根层的根系数量无明显差异,D1 处理比 D2、D3 多生成 1~2 个根层,随着种植密度的增加,2 个品种单株根系数量显著递减,LD981 根系数量的减少幅度明显高于 LD818,前者分别减少 29.35%和 19.98%,后者则是 23.95%和 17.14%。

表 1 不同种植密度下 2 种类型玉米开花期不同层位根系数量的差异

Table 1 Number of root in different root layers for the two maize varieties under different planting densities

根层 Root layers	D1		D2		D3	
	LD981	LD818	LD981	LD818	LD981	LD818
初生胚根 Primary root	1.00Aa	1.00 Aa	1.00 Aa	1.00 Aa	1.00 Aa	1.00 Aa
次生胚根 Secondary root	2.33 Ab	2.33 Ab	2.67 Aab	2.33 Aab	2.67 Aab	3.00 Aa
1 层节根 First layer root	4.00 Aa	4.00 Aa	4.00 Aa	4.00 Aa	4.00 Aa	4.00 Aa
2 层节根 Second layer root	4.33 Aa	4.00 Aa	4.67 Aa	4.00 Aa	4.00 Aa	4.00 Aa
3 层节根 Third layer root	4.00 Aa	4.00 Aa	4.00 Aa	4.00 Aa	4.00 Aa	4.00 Aa
4 层节根 Fourth layer root	6.67 Aab	6.00 ABbc	7.00 Aa	6.00 ABbc	6.67 Aab	5.33 Bc
5 层节根 Fifth layer root	10.00 Aa	8.67 ABb	8.33 BCb	8.00 BCbc	7.67 BCbc	7.00 Cc
6 层节根 Sixth layer root	12.67 Aa	11.33 Bbc	12.00 ABab	11.00 Bc	9.33 Cd	9.33 Cd
7 层节根 Seventh layer root	17.33 Aa	16.00 ABb	16.00 ABb	15.33Bb	12.67 Cc	12.33 Cc
8 层节根 Eighth layer root	19.00 Aa	15.33 Bb	5.33 Cc	4.67 Cc	—	—
气生根 Brace root	10.67 Aa	6.67 Bb	—	—	—	—
总根数 Total root	92 Aa	79.33 Bb	65 Cc	60.33 Dd	52.01 Ee	49.99 Ff

大、小写字母不同时分别表示同一行数据在 1%和 5%水平上差异显著。D1、D2 和 D3 分别表示种植密度分别为 3 万株 hm^{-2} 、6 万株 hm^{-2} 和 9 万株 hm^{-2} 。

Values followed by different letters are significantly different at 1% (capital letter) and 5% (small letter) probability levels within the same row, respectively. D1, D2, and D3 represent the plant densities of 3×10^4 , 6×10^4 , and 9×10^4 plant per hectare, respectively.

2.2 不同种植密度下 2 种类型玉米根系体积的动态变化

不同种植密度下, 2 种类型玉米品种的单株根系总体积, 随玉米生育进程, 均呈现先增后减的变化趋势(图 2), 且均于乳熟期呈现峰值。随着种植密度的递增, 2 种类型玉米品种的单株根系总体积均呈递减趋势, 且递减幅度逐渐增大, 2 次种植密度递增过程中, 二者的单株根系总体积平均峰值分别递减 35.17 cm³ 株⁻¹和 90.69 cm³ 株⁻¹; 随玉米生育进程, 2 个玉米品种不同密度处理间单株根系总体积的差异均不断增大。进一步比较分析可以看出, 不同密度处理下, LD981 单株根系总体积均明显高于 LD818, 前者各生育期的单株平均根系总体积比后者高 10.11%; 随着种植密度的递增, LD981 单株根系总体积的递减幅度明显高于 LD818, 两次种植密度递增过程中, LD981 的单株根系总体积峰值分别递减 11.22%和 31.66%, 均明显高于 LD818 的 8.34%和 24.52%。

2.3 不同种植密度下 2 种类型玉米根系表面积动态变化

表 2 表明, 大喇叭口期至成熟期, 2 种类型玉米品种的单株根系总表面积和活跃吸收面积均随着生育进程呈先升后降的变化趋势, 开花期最大, 各生育期间差异极显著。LD981 的单株根系总表面积和活跃吸收面积均一直显著高于 LD818。

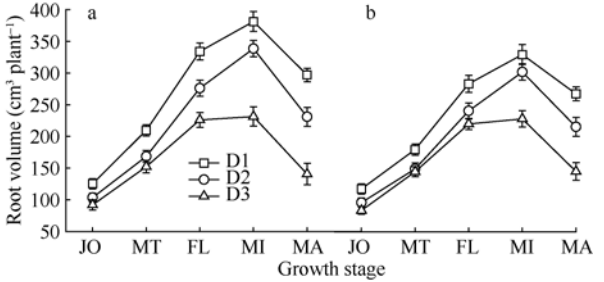


图 2 不同种植密度下 LD981 (A)和 LD818 (B)单株根系总体积的动态变化

Fig. 2 Changes of root volume per plant for LD981(A) and LD818(B) under different planting densities
JO: 拔节期; MT: 大喇叭口期; FL: 开花期; MI: 乳熟期; MA: 成熟期。
JO: jointing; MT: male tetrad; FL: flowering; MI: milky; MA: maturity.

2 种类型玉米品种的单株根系总表面积、活跃吸收面积及其比例均随种植密度递增而不断降低, 且递减幅度逐渐增大, 两次种植密度递增过程中, 2 个玉米品种开花期的单株根系总表面积平均分别递减 22.82 m² 株⁻¹和 44.30 m² 株⁻¹, 单株活跃吸收面积平均分别递减 7.82 m² 株⁻¹和 13.91 m² 株⁻¹。分析比较发现, LD981 单株根系总表面积、单株活跃吸收面积的衰减幅度明显高于 LD818, 2 次种植密度递增过程中, LD981 开花期的单株根系总表面积、活跃吸收面积分别递减 12.21%、29.88%和 16.17%、34.62%, 均明显高于 LD818 的 11.45%、27.19%和 15.24%、31.64%。D1 处理, LD981 单株活跃吸收面积占总表

表 2 不同种植密度下 2 种类型玉米单株根系表面积的差异
Table 2 Differences of root surface area per plant for the two maize varieties under different planting densities

项目 Item	LD981			LD818		
	大喇叭口期 Male tetrad	开花期 Flowering	成熟期 Maturity	大喇叭口期 Male tetrad	开花期 Flowering	成熟期 Maturity
D1						
总表面积 TSA (m ² plant ⁻¹)	107.11 Ee**	193.19 Aa**	146.30 Cc**	85.39 Ff**	157.52 Bb**	127.21 Dd**
活跃吸收面积 AASA (m ² plant ⁻¹)	37.51 Cc**	54.90 Aa**	31.68 Dd**	28.82 Ee**	44.30 Bb**	26.76 Ff**
活跃吸收面积比例 RAASA (%)	35.02 Aa*	28.42 Cc**	21.65 Ee	33.75 Bb	28.12 Dd	21.04 Ff
D2						
总表面积 TSA (m ² plant ⁻¹)	91.32 Ee**	169.6 Aa*	113.44 Cc**	75.20 Ff**	139.48 Bb**	109.62 Dd**
活跃吸收面积 AASA (m ² plant ⁻¹)	29.23 Cc**	46.02 Aa**	23.93 Ee**	25.02 Dd**	37.95 Bb**	23.14 Ff**
活跃吸收面积比例 RAASA (%)	32.01 Bb*	27.13 Dd*	21.09 Ef	33.27 Aa	27.21 Cc	21.11 Ee
D3						
总表面积 TSA (m ² plant ⁻¹)	70.74 Cc**	118.93 Aa**	54.28 Ee**	59.91 Dd**	97.56 Bb**	53.71 Ff**
活跃吸收面积 AASA (m ² plant ⁻¹)	20.18 Cc**	30.09 Aa**	10.42 Ff**	17.44 Dd**	25.67 Bb**	11.24 Ee**
活跃吸收面积比例 RAASA (%)	28.53 Bb**	25.30 Dd*	19.20 Ff*	29.11 Aa**	26.31 Cc*	20.93 Ee*

*和**分别表示同一列同类数据在 1%和 5%水平上差异显著。D1、D2 和 D3 分别表示种植密度分别为 3 万株 hm⁻²、6 万株 hm⁻² 和 9 万株 hm⁻²。

* and ** for the same sort data in the same column are determined significantly different at $P < 0.01$ and $P < 0.05$, respectively.

D1, D2, and D3 represent the plant densities of 3×10^4 , 6×10^4 , and 9×10^4 plant per hectare, respectively. TSA: total surface area; AASA: actively absorbing surface area; RAASA: rate of actively absorbing surface area.

面积的比例显著大于 LD818, D2、D3 处理, 则反之; 由于 2 种类型玉米品种的单株根系活跃吸收面积的衰减速率明显高于总表面积, 其所占比例均随着生育进程呈持续降低的趋势, 因此, 种植密度更多地影响单株根系活跃吸收面积的变化。

2.4 不同种植密度下 2 种类型玉米根系的空间分布

2.4.1 水平方向 图 3 显示, 2 种类型玉米品种的根系干重在不同种植密度下、不同生育时期水平方向的分布规律基本一致, 均表现以植株主茎为中心, 由里向外发散性逐渐减少; 距离主茎 0~6 cm 的水平范围是玉米根系分布最集中的区域, 生育期内一直有 70% (72.39%~88.39%) 以上的根系分布于此, 6~12 cm 和 12~18 cm 的水平范围则分别剧减至 10.56%~18.47% 和 0.82%~9.61%。2 个品种在拔节期各水平分布范围的根系干重差异不大; 大口期至成熟期, 2 个

品种各水平分布范围的根系干重随种植密度的递增均呈不同程度递减趋势, 两次种植密度递增过程中, LD981 分别递减 16.48% 和 30.72%, 明显高于 LD818 的 10.68% 和 28.43%, 说明 LD981 根系干重随种植密度递增递减的幅度大于 LD818; 中高种植密度 D2、D3 处理下, LD981 乳熟期 0~6 cm 水平范围的根系干重已低于 LD818, 6~12 cm 和 12~18 cm 水平范围仍是前者高于后者。

随着生育进程的推进, 不同种植密度处理下 LD981 与 LD818 各水平分布范围根系干重的变化规律不同, LD981 均呈先升后降趋势, D1、D2 处理乳熟期达到峰值, D3 处理开花期即达峰值。而在 0~6 cm 水平范围, D1、D2 处理 LD818 表现持续升高趋势, 成熟期达到峰值, D3 处理呈先升后降趋势, 乳熟期达峰值; 6~12 cm 水平范围, D1 处理表现持续升高趋势, 成熟期达到峰值, D2、D3 处理呈现先升后降的趋势, 乳熟期达峰值; 12~18 cm 水平范围, 3 个密度处理均呈先升后降趋势, D1、D2 处理乳熟期达到峰值, D3 处理开花期达峰值。

2.4.2 垂直方向 2 种类型玉米品种的根系干重在不同种植密度下、不同生育时期垂直方向的分布规律基本一致, 均表现上多下少的分布趋势(图 4), 生育期内有 75% (75.73%~85.10%) 以上的根系分布于近地表 0~20 cm 土层内, 20~40 cm、40~60 cm 和 60~80 cm 土层则分别剧减至 10.25%~16.39%、3.25%~8.76% 和 0.80%~2.20%。随着种植密度的递增, 2 个玉米品种同一生育期 0~40 cm 土层的根系干重均呈现递减趋势, 40~80 cm 土层的根系干重则变化不大, 说明种植密度更多地影响上层土体的根系干重。比较 2 个品种间的根系干重递减趋势, 其差异随着种植密度递增不断变小, 这与水平方向的变化规律基本一致。随着生育进程的推进, 各土层根系干重的变化规律不同。LD981 均呈先升后降趋势, D1、D2 处理乳熟期达到峰值, D3 处理开花期即达峰值; 而 LD818 D1 处理下表现持续升高趋势, 成熟期达到峰值, D2、D3 处理呈先升后降趋势, 乳熟期达到峰值。

进一步分析发现, 随着种植密度的递增, 2 个品种同一生育期的单株根系干重不断递减, LD981 递减幅度高于 LD818, D1、D2 处理下, 前者成熟期的单株根系总干重分别比后者高 10.30%、2.31%, D3 处理下, 前者则比后者低 5.96%。

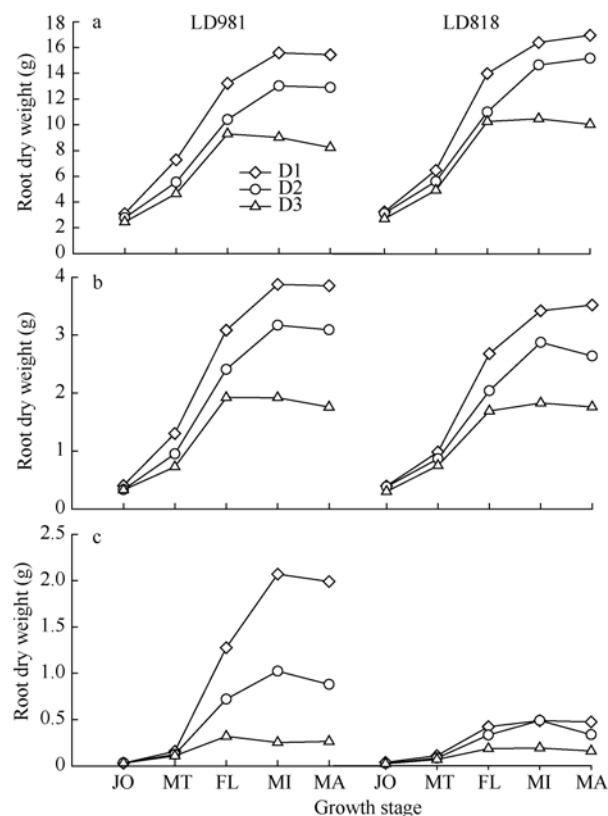


图 3 不同种植密度下 2 种类型玉米根系的水平分布

Fig. 3 Horizontal-distribution of root dry weight for the two maize varieties under different planting densities

a: 0~6 cm 水平范围; b: 6~12 cm 水平范围; c: 12~18 cm 水平范围。

JO: 拔节期; MT: 大喇叭口期; FL: 开花期; MI: 乳熟期; MA: 成熟期。

a: horizontal area of 0~6 cm; b: horizontal area of 6~12 cm; c: horizontal area of 12~18 cm. JO: jointing; MT: male tetrad; FL: flowering; MI: milky; MA: maturity.

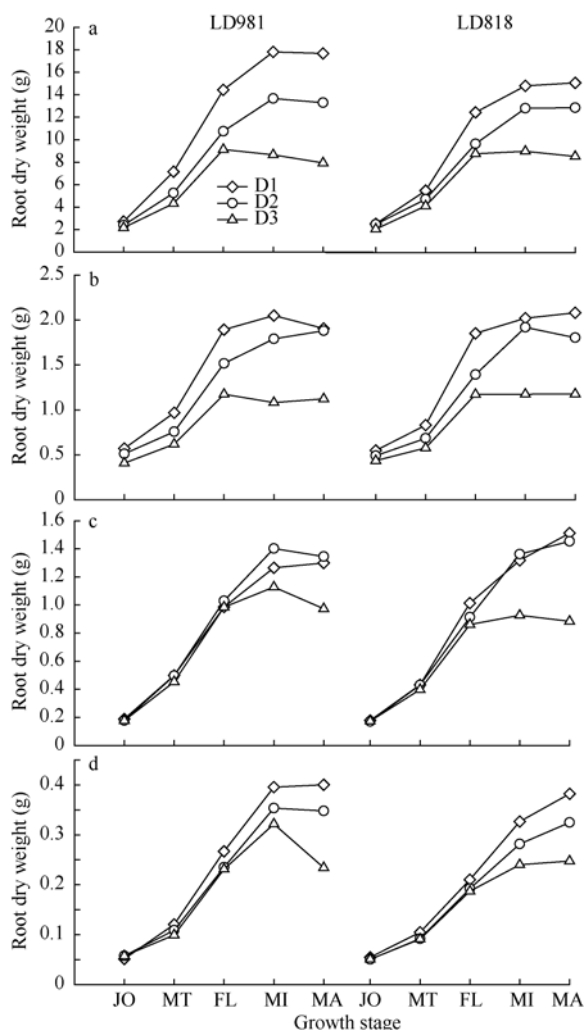


图4 不同种植密度下2种类型玉米根系的垂直分布

Fig. 4 Vertical-distribution of root dry weight for the two maize varieties under different planting densities

a: 0~20 cm 土层; b: 20~40 cm 土层; c: 40~60 cm 土层; d: 60~80 cm 土层。JO: 拔节期; MT: 大喇叭口期; FL: 开花期; MI: 乳熟期; MA: 成熟期。
a: soil depth of 0~20 cm; b: soil depth of 20~40 cm; c: soil depth of 40~60 cm; d: soil depth of 60~80 cm. JO: jointing; MT: male tetrad; FL: flowering; MI: milky; MA: maturity.

3 讨论

鄂玉江等^[26]研究认为, 根系条数可以反映其相对吸收能力; 陆卫平等^[19]研究发现, 群体气生根的多少可作为玉米根群质量的形态诊断指标。本研究发现, 平展大穗型品种 LD981 和紧凑中穗型品种 LD818 开花期的根系数量均有随着根层序增高而增加的趋势, 并呈显著的回归关系, 这与鄂玉江等的研究结果相一致。低种植密度(3 万株 hm^{-2})下, LD981 的根系总数量比 LD818 高 15.97%, 且主要表现在 5~9 根层, 种植密度递增, 二者根系总数量减少, 其差异也不断减小至高种植密度(9 万株 hm^{-2})下的 4.04%。

说明随种植密度递增, 单株根系质量下降, LD981 的单株根系质量优于 LD818。

根系体积越大, 所接触的土壤面积越大, 越有利于植物大范围的吸收土壤水分和养分^[9]。管建慧等^[27]和王群等^[28]的研究结果显示, 玉米单株根体积生育期内呈单峰曲线变化。本研究结果表明, LD981 和 LD818 的单株根系总体积在不同种植密度下均呈现单峰趋势变化, 乳熟期最大。种植密度递增, 2 个玉米品种的单株根系总体积均呈现递减趋势, 且递减幅度逐渐增大; LD981 单株根系总体积明显高于 LD818, 平均高 10.11%。由于 LD981 单株根系总体积的递减幅度明显高于 LD818, 高种植密度(9 万株 hm^{-2})下 LD818 的单株根系总体积显著大于 LD981, 说明 LD981 的根系总体积对种植密度的变化更为敏感一些。

刘镜波等^[21]研究发现, 玉米蜡熟期单株根系表面积随种植密度增加而降低, 但单位根系表面积吸收功能升高。本研究结果表明, 大喇叭口期后, 玉米单株根系总表面积和活跃吸收面积均随着生育进程呈单峰变化趋势, 开花期最大; 种植密度递增, 2 个品种的单株根系总表面积、活跃吸收面积及其比例均表现与根系总体积相似的变化趋势; 种植密度更多地影响单株根系活跃吸收面积的变化, 导致活跃吸收面积的衰减速率明显高于总表面积, 其所占比例随着生育进程呈持续降低的趋势。不同种植密度下, LD981 的单株根系总表面积和活跃吸收面积均一直高于 LD818, 低种植密度处理下, LD981 单株活跃吸收面积占总表面积的比例较高, 中、高种植密度处理下, LD818 较高。根系吸收面积是根系形态和生理特性的重要指标, 其中根系吸收总表面积能反映根系吸收能力的大小, 而根系活跃吸收面积则在一定程度上反映根系活力状况^[29]。因此, 比较而言, 种植密度对 LD981 根系吸收能力与活力状况的影响更大。

对维持玉米地上部的生长和功能来说, 根系重量比根条数的参考意义更大^[1], 有关根系重量积累动态的研究较多。Dowdy 等^[30]研究认为, 玉米根系干重增长呈单峰曲线, 其中 80%以上的根重分布在近地面的 40 cm 土层内; 李少昆等^[22]观察表明, 不同熟期的玉米品种根系在土壤中的纵向分布呈指数函数关系($y = ae^{-bx}$), 横向分布为 S 形曲线; 赵秉强等^[31]研究结果表明, 套作玉米根系垂直分布呈上多下少的“T”型分布, 可划分为根系高密度层、中密度

层、低密度层和稀密度层。本研究结果表明,不同种植密度下2种类型玉米品种的根系干重水平方向的分布规律在各生育时期基本一致,均以植株主茎为中心,由里向外发散性逐渐减少,0~6 cm的范围分布着70%以上的根系,是高密度区,6~12 cm和12~18 cm则分别是中密度和低密度区。随着生育进程的推进,高密度区根系干重所占比例呈逐渐降低的趋势,成熟期略有反弹,中密度和低密度区的则先升后降,开花期或乳熟期达峰值。不同种植密度处理下,2个玉米品种根系干重的水平分布变化规律不同。LD981呈现先升后降的趋势,达到峰值的时间中低密度处理的乳熟期晚于高密度处理的开花期;LD818则多表现为持续升高的趋势,成熟期还表现出根系干重积累倾向。低种植密度下,LD981各水平分布范围的根系干重明显高于LD818,种植密度递增,2个品种各水平分布范围的根系干重均呈现不同程度的递减趋势,LD981快于LD818,二者差异也不断变小;至中高种植密度下,LD981乳熟期0~6 cm的根系干重已小于LD818。2个品种根系干重所占比例随着种植密度的递增呈现不同的变化趋势,高密度区的不断递增,中密度和低密度区的不断递减,且LD981均明显高于LD818的变化幅度;进一步分析发现,不同种植密度下LD981高密度区根系干重所占的比例比LD818的低2.96%,中密度和低密度区则高14.33%,说明LD981根系的水平分布更发散一些,分布较浅。不同种植密度下2种类型玉米品种的根系干重垂直方向的分布规律在各生育时期也基本一致,均表现为上多下少的分布趋势,0~20 cm土层内分布有75%以上的根系,是高密度层,20~40 cm、40~60 cm和60~80 cm土层则分别是中密度层、低密度层和稀密度层。2个品种各土层根系干重及所占比例随着种植密度递增和生育期推进的变化趋势与水平方向的分布规律基本一致;不同种植密度下,LD818各生育期高密度层和中密度层根系干重所占比例平均比LD981的低3.71%,低密度层和稀密度层则高35.97%,说明LD818根系的垂直分布在深层土壤中的比率大,分布较深。耕层土壤的空间是有限的,种植密度不断增加与保障玉米根系伸展空间存在着矛盾,而玉米是依靠群体获取高产,必然要求不断提高种植密度^[12,14]。种植密度递增,势必造成“根系拥挤效应”,横向空间受限,唯有挖掘纵向空间的潜力。因此,有目标地选育根系“横向紧缩,纵

向延伸”的品种^[12,14],探讨在高种植密度条件下,深耕土层,增大根系纵向伸展空间来提高个体产量,是值得进一步研究的课题,也为玉米高产育种提供了一个理论依据。本试验研究结果对玉米高产中选择品种类型有一定指导意义,在土层较薄的土壤条件下,宜选择平展大穗型品种,适当增大株距稀植,充分发挥其单株根系的产量潜力来获得较高的个体生产力;在土层较厚或常年深耕的地块,宜选择紧凑中穗型品种,适当减小株距密植,充分发挥其单株根系的垂直空间的伸展能力,提高群体根系质量,来获得较高的群体生产力。

4 结论

不同类型玉米品种对根系伸展空间方向和大小要求存在差异。平展大穗型品种LD981的单株根系数量、体积、表面积和干重均明显高于紧凑中穗型品种LD818,表现出单株根量多、吸收能力强、根系分布浅的特点,对种植密度递增导致的水平方向空间受限制的反应更为敏感,宜适当增大株距稀植,充分发挥其单株根系的产量潜力来获得较高的个体生产力;LD818虽然单株根量少、吸收能力较弱,但在空间分布上呈现“横向紧缩,纵向延伸”的特点,更能适应种植密度递增导致的水平方向空间受限制的“拥挤”,能依靠提高单位面积上的个体来提高群体根系质量和吸收能力,具有高种植密度下获得超高产的根系潜力。

致谢:本文相关试验得到山东省农业科学院张秀清、刘霞、张慧、张海林、刘春晓、刘书聪、邓广成等同事以及山东农业大学陈茂学教授、李全起副教授的帮助,特此感谢。

References

- [1] Guo Q-F(郭庆法), Wang Q-C(王庆成), Wang L-M(汪黎明). Chinese Maize Cultivation (中国玉米栽培学). Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2004. pp 63–69 (in Chinese)
- [2] Fitter A H. Characteristics and functions of root systems. In: Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U, eds. Plant Roots: the Hidden Half, 3rd edn. New York: Marcel Dekker Inc, 2002. pp 15–32
- [3] Li C-J(李春俭), Peng Y-F(彭云峰), Niu J-F(牛君仿), Ma W(马玮), Yan H-F(闫慧峰), Jiao R-X(焦润兴). Real maize roots in the soil and issues should be considered by study. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2010, 16(1): 225–231 (in Chinese with English abstract)

- [4] Zhu D-F(朱德峰), Lin X-Q(林贤青), Cao W-X(曹卫星). Effects of deep roots on growth and yield in two rice varieties. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2001, 34(4): 429–432 (in Chinese with English abstract)
- [5] Li J(李杰), Zhang H-C(张洪程), Chang Y(常勇), Gong J-L(龚金龙), Hu Y-J(胡雅杰), Long H-Y(龙厚元), Dai Q-G(戴其根), Huo Z-Y(霍中洋), Xu K(许轲), Wei H-Y(魏海燕), Gao H(高辉). Influence of planting methods on root system morphological and physiological characteristics of super rice under high-yielding cultivation condition. *Sci Agric Sin* (作物学报), 2011, 37(12): 2208–2220 (in Chinese with English abstract)
- [6] Xiong S-P(熊淑萍), Wang X-C(王小纯), Li C-M(李春明), Ma X-M(马新明), Du S-Y(杜少勇), Zhang Y-W(张营武), Lin S-Z(蔺世召). Responses of the spatial-temporal distribution yield to different ratios of nitrogen sources. *Chin J Plant Ecol* (植物生态学报), 2011, 35(7): 759–768 (in Chinese with English abstract)
- [7] Munoz-Romero V, Benítez-Vega J, López-Bellido L, López-Bellido R J. Monitoring wheat root development in a rainfed vertisol: tillage effect. *Eur J Agron*, 2010, 3: 182–187
- [8] Wang H, Inukai Y, Yamauchi A. Root development and nutrient uptake. *Crit Rev Plant Sci*, 2006, 25: 279–301
- [9] Mu Z-X(慕自新), Zhang S-Q(张岁岐), Hao W-F(郝文芳), Liang A-H(梁爱华), Liang Z-S(梁宗锁). The effect of root morphological traits and spatial distribution on WUE in maize. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2005, 25(11): 2895–2900 (in Chinese with English abstract)
- [10] Li C-H(李潮海), Li S-L(李胜利), Wang Q(王群), Hao S-P(郝四平), Han J-F(韩锦锋). A study on corn root growth and activities at different soil layers with special bulk density. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2005, 38(8): 1706–1711 (in Chinese with English abstract)
- [11] Yang J-G(杨俊刚), Ni X-H(倪小会), Xu K(徐凯), Xu J-X(许俊香), Cao B(曹兵), Liu B-C(刘宝存). Effects of co-situs application of polymer-coated fertilizers on grain yield, root distribution and soil residual Nmin in summer maize. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2010, 16(4): 924–930 (in Chinese with English abstract)
- [12] Wang K-J(王空军), Hu C-H(胡昌浩), Dong S-T(董树亭), Liu K-C(刘开昌), Liu C-H(刘存辉). Effect of sulfate supply level on characteristics of N and S metabolism and on root vigor of corn. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2003, 14(2): 191–195 (in Chinese with English abstract)
- [13] Chun L(春亮), Chen F-J(陈范骏), Zhang F-S(张福锁), Mi G-H(米国华). Root growth, nitrogen uptake and yield formation of hybrid maize with different N efficiency. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2005, 11(5): 615–619 (in Chinese with English abstract)
- [14] Wang K-J(王空军), Zheng H-J(郑洪建), Liu K-C(刘开昌), Zhang J-W(张吉旺), Dong S-T(董树亭), Hu C-H(胡昌浩). Evolution of maize root distribution in space-time during maize varieties replacing in China. *Acta Phytoecol Sin* (植物生态学报), 2001, 25(4): 472–475 (in Chinese with English abstract)
- [15] Wang J-F(王敬锋), Liu P(刘鹏), Zhao B-Q(赵秉强), Dong S-T(董树亭), Zhang J-W(张吉旺), Zhao M(赵明), Yang J-S(杨吉顺), Li G(李耕). Comparison of root characteristics and nitrogen uptake and use efficiency in different corn genotypes. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2011, 44(4): 699–707 (in Chinese with English abstract)
- [16] Song R(宋日), Wu C-S(吴春胜), Wang C-J(王成己), Guo J-X(郭继勋). Effects of deep root system on above-ground vegetative growth and yield in maize. *J Maize Sci* (玉米科学), 2002, 10(3): 63–66 (in Chinese with English abstract)
- [17] Liedgens M, Richner W. Relation between maize (*Zea mays* L.) leaf area and root density observed with minirhizotrons. *Eur J Agron*, 2001, 15: 131–141
- [18] Anderson E L. Corn root growth and distribution as influenced by tillage and nitrogen fertilization. *Agron J*, 1987, 79: 544–549
- [19] Lu W-P(陆卫平), Zhang Q-L(张其龙), Lu J-D(卢家栋), Wang Z(王昭), Zong S-Y(宗寿余). Relationship of root activity to dry matter accumulation and grain yield in maize (*Zea mays* L.). *Acta Agron Sin* (作物学报), 1999, 25(6): 718–722 (in Chinese with English abstract)
- [20] Chassot A É, Stamp P, Richner W. Root distribution and morphology of maize seedlings as affected by tillage and fertilizer placement. *Plant Soil*, 2001, 231: 123–135
- [21] Liu J-B(刘镜波), Wang X-L(王小林), Zhang S-Q(张岁岐), Zhang R-H(张仁和), Xue J-Q(薛吉全). Effect of organic fertilizer and planting density on root growth and function of maize in dryland. *Bull Soil Water Conserv* (水土保持通报), 2011, 31(6): 32–41 (in Chinese with English abstract)
- [22] Li S-K(李少昆), Liu J-D(刘景德). Roots distribution, weight regulation and their relation with shoot growth of maize under different plant density in field. *Maize Sci* (玉米科学), 1993, 1(3): 43–49 (in Chinese with English abstract)
- [23] Wiesler F, Horst W J. Root growth and nitrate utilization of maize cultivars under field conditions. *Plant Soil*, 1994, 2: 267–277
- [24] Li P(李鹏), Li Z-B(李占斌), Zhao Z(赵忠). Study of the method for determining sampling number for root investigation. *Res Soil Water Conserv* (水土保持研究), 2003, 10(1): 146–149 (in Chinese with English abstract)
- [25] Zou Q(邹琦). Guide to Plant Physiology (植物生理学实验指导). Beijing: China Agriculture Press, 2000. pp 62–63 (in Chinese)
- [26] E Y-J(鄂玉江), Dai J-Y(戴俊英), Gu W-L(顾慰连). Studies on the relationship between root growth and yield in maize: I. Relationships between the growth and absorption ability of the roots and the growth and development of the above ground parts of maize. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1988, 14(2): 149–154 (in Chinese with English abstract)
- [27] Guan J-H(管建慧), Guo X-Y(郭新宇), Wang J-H(王纪华), Liu K-L(刘克礼), Guo X-D(郭晓东). Study on growth and development rule of different parts of maize root. *Maize Sci* (玉米科学), 2008, 16(3): 124–128 (in Chinese with English abstract)
- [28] Wang Q(王群), Li C-H(李潮海), Li Q-Z(李全忠), Xue S(薛帅). Effect of soil compaction on spatio-temporal distribution and ac-

- tivities in maize under different soil types. *Acta Ecol Sin* (中国农业科学), 2011, 44(10): 2039–2050 (in Chinese with English abstract)
- [29] Song H-X(宋海星), Li S-X(李生秀). Effects of root growing space on its absorbing characteristics. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2003, 36(8): 899–904 (in Chinese with English abstract)
- [30] Dowdy R H, Bidwell A M, Linden D R, Allmaras R R. Corn Root Distributions as a Function of Tillage and Residue Management. Edinburgh, Scotland: ISTRO, 11–15th, July, 1988. pp 55–60
- [31] Zhao B-Q(赵秉强), Zhang F-S(张福锁), Li Z-J(李增嘉), Li F-C(李凤超), Shen J-X(史春余), Zhang J(张骏), Zhang X-C(张新春), Shen J-X(申加祥), Pan H-J(潘海军), Zhao J-M(赵甲美). Vertical distribution and its change of root quantity & activity of crops in the “winter wheat/early spring maize/summer maize” cropping system: II. The vertical distribution and its changes of root quantity & activity of the early spring inter-planted maize. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2001, 27(6): 974–979 (in Chinese with English abstract)

科学出版社生物分社新书推介

《被子植物生殖生物学》研究生创新教育系列丛书

编著者: 田惠桥 朱学艺
出版时间: 2012 年 5 月
ISBN: 978-7-03-034056-6
定价: 65 元

本书主要介绍被子植物有性生殖过程和调控机制的研究内容。被子植物的有性生殖是由许多环节组成的复杂过程, 其中的每一环节都有其独特的调控机制。现在对这些环节的发生过程已有一定认识, 由于植物有性生殖发生在子房内的胚珠中, 对各个环节的调控机制还不清楚。在过去形态结构工作的基础上, 采用生物技术和分子生物学方法研究植物有性生殖的调控机制已显示出初步的效果, 植物有性生殖研究将由过去的揭示生殖过程进入到揭示调控生殖机制的新阶段。利用植物生殖细胞特征探索改良作物的研究也获得了一些新进展, 显示出其特有的应用潜力。本书可供综合性高等院校、农林院校及科研机构有关植物学专业的研究人员和教师、研究生和本科生参考。



获取更多图书信息请您关注: <http://www.lifescience.com.cn/>

欢迎各界人士邮购科学出版社各类图书 联系人: 科学出版社科学销售中心 周文宇

电话: 010-64017301 E-mail: zhouwenyu@mail.sciencep.com

网上订购: <http://shop.sciencepress.cn> 卓越网、当当网

联系我们: 010-64012501 E-mail: lifescience@mail.sciencep.com

更多精彩图书请登陆网站, 欢迎致电索要书目