

株行距配置对玉米密植群体根系及养分吸收的影响

王鸿宇, 张英俊, 姜兴芳, 雷 鸣, 黄收兵, 陶洪斌, 王 璞, 廖树华

(中国农业大学农学院, 北京 100193)

摘 要: 以玉米品种郑单958为材料, 以玉米株行距配置为重点, 设置高(100 050株/hm²)和中(67 500株/hm²)两个种植密度, 每个密度下设置40 cm、60 cm两种行距处理, 探究不同密度下株行距配置对产量、根系分布和养分吸收的影响。结果表明, 随着种植密度的不断增加, 产量呈先增大后减小的趋势, 与中密度种植相比, 高密度下玉米产量增加13.9%。在中密度下减小行距玉米产量提高1.0%, 高密度下减小行距玉米产量显著提高26.1%。在高密度条件下, 减小行距在水平、垂直方向均增加根长、根表面积、根体积等, 并使植株地上部氮、磷、钾和干物质的积累量分别提高4.9%、8.1%、25.8%和4.5%。根系性状、植株养分含量、植株干重和产量均呈显著正相关。在高密度下通过适当减小行距、增大株距, 减小株间根系竞争, 提高根系对土壤养分吸收, 对玉米密植增产具有重要作用。

关键词: 玉米; 密度; 株行距配置; 根系; 养分吸收; 产量

中图分类号: S513.047

文献标识码: A

Effects of Plant and Row Spacing on the Root System and Nutrient Absorption of Dense Corn Planting Population

WANG Hong-yu, ZHANG Ying-jun, JIANG Xing-fang, LEI Ming, HUANG Shou-bing,

TAO Hong-bin, WANG Pu, LIAO Shu-hua

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: This study focused on effects of plant density and plant spacing configuration on corn yield. In field experiment, two planting densities (high density, 100 050 plants/ha; medium density, 67 500 plants/ha), and two row spacings (40 cm and 60 cm) were used. Grain yield increased with decreased row spacing as well as with increased plant density. Yield increased by 13.9% from 67 500 to 100 050 plants/ha. Yield increased by 1.0% from 40 cm to 60 cm row spacing at 67 500 plants/ha and by 26.1% at 100 050 plants/ha. Under high plant density, reduced row spacing increased root length, root surface area and root volume in both horizontal and vertical directions, and increased above-ground plant accumulation of nitrogen, phosphorus, potassium, and dry matter by 4.9%, 8.1%, 25.8% and 4.5%, respectively. Root traits, plant nutrient content, and plant dry weight all were significantly positively correlated with yield. In conclusion, reducing row spacing and increasing plant spacing at high densities can further improve corn yield by reducing inter-plant root competition and promoting uptake of soil nutrients.

Key words: Corn; Plant density; Plant and row space; Root system; Nutrient absorption; Yield

近些年来, 国内外玉米产量不断增加, 其中40%~50%要归功于田间管理上的优化^[1]。在田间管理措施中提高种植密度是非常重要的一环, 提高种植密度对玉米高产的贡献率在8.5%~17.0%^[2]。

在一定条件下, 随着种植密度的提高, 玉米产量呈先增加后减小的趋势^[3, 4]。相关研究表明, 不同行距配置如双株紧靠种植模式和等行紧靠种植模式会导致作物群体冠层结构变化, 从而影响太阳光的截获量, 且通过影响冠层内的温度、湿度和二氧化碳等, 最终影响着群体的光合效率和作物产量^[5~7]。在最适密度的基础上, 通过优化耕作栽培措施来进一步提高玉米产量成为农业研究的重要突破点。

玉米养分(氮、磷、钾)含量对植株干物质积累及产量形成尤为重要^[8], 氮和磷是植物光合作用所不可或缺的重要元素^[9~11]; 钾可以促进根系对氮素及

录用日期: 2022-10-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300603)

作者简介: 王鸿宇(1999-), 福建人, 硕士, 主要从事玉米栽培与耕作研究。Tel: 15603650006

E-mail: 15603650006@163.com

廖树华为本文通信作者。E-mail: sergzl@cau.edu.cn

水分的吸收,提高作物抗病性与抗旱性^[12]。前人指出,氮和磷在玉米吐丝前的积累量分别占成熟期总积累量的50%~85%和45%~85%,钾在玉米吐丝前的积累量占成熟期总积累量的80%以上^[13],因此,吐丝期氮、磷、钾含量是判断玉米养分吸收状况的重要指标。

国内外在种植密度对玉米养分吸收的影响方面已经做了大量的研究。结果表明,随着密度增加,单株养分积累量会出现下降趋势^[14,15],其原因是密度增加,影响植株的地上部光合作用及根系的发育。根系在垂直方向上主要分布在0~20 cm表土层内^[16],表层根系对产量的形成最为重要,深层根系对提高氮素吸收和叶片光合能力起一定作用^[17]。随着密度的增加,植株间根系竞争加剧,单株玉米的根长、根干重、根表面积等性状下降^[18]。目前,关于种植密度对玉米养分吸收影响的研究主要都集中在植株地上部方面,探究行距对根系水平分布及垂直分布的影响方面的研究相对薄弱,研究根系分布(水平分布和垂直分布)与地上部养分积累关系的鲜有报道。前人提出了扩行距、缩株距的宽行轻简种植模式,该模式能显著改善增密后群体的通风透光性能,减少花粉散落至叶片对光合作用的负面影响,增强群体后期光合能力,较好地实现高产、高效及技术简化的协同^[19,20]。本研究通过不同株行距处理,探究其对玉米产量的影响,进一步阐明根系分布与养分吸收及产量之间的关系,为优化玉米种植模式提供参考和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2011~2013年在中国农业大学上庄试验站进行(39°54'N, 116°24'E),玉米生长季降雨量分别为588、567、532 mm,平均气温分别为25.1、24.9、24.8℃。试验地土壤类型为砂质壤土,在0~20 cm土壤中有有机质、全氮、速效磷、速效钾含量分别为11.15 g/kg、0.91 g/kg、38.68 mg/kg、100.02 mg/kg。

1.2 试验设计

试验材料为玉米品种郑单958,试验采用随机区组排列,3次重复,设置中密度(67 500 株/hm²)和高密度(100 050 株/hm²)两种种植密度,小区面积为84 m²,每个密度下设置40 cm和60 cm两种行距处理。2011、2012年施基肥纯N、P₂O₅、K₂O各60 kg/hm²、90 kg/hm²、90 kg/hm²,在大喇叭口期追加纯N 120 kg/hm²。因2013年土壤中K含量较低,基肥中增加30 kg/hm²的K₂O,其余施肥处理与2011、2012

年一致。

1.3 测定项目与方法

植株地上部养分含量测定:在吐丝期对玉米植株地上部进行取样,将样品清洗干净,在105℃高温杀青30分钟后,在80℃下烘干至恒重,称其干重,再将样品磨成粉末,经H₂SO₄-H₂O₂消煮后对氮、磷、钾含量进行测定,其测定方法分别为凯氏定氮法、火焰光度法、钼锑钨比色法。

根系性状(根长、根表面积、根体积)测定:在吐丝期对各个小区随机选取两株玉米植株,去掉地上部对其根系向下挖掘,根系垂直分布(0~60 cm)每10 cm土层进行取样直到60 cm;水平分布取样范围为行距×株距,其中内层根系范围是以植株为中心到四周1/4株(行)距的矩形面积,外层根系范围是1/4到1/2株(行)距的面积。用根系扫描仪(STD4800Scallner)对清洗干净的根系样品扫描,用软件(WinRhizoPrO Vision2009c, Regent Instruments Inc, Canada)对所得图片进行分析,得到根长、根表面积和根体积数据。

产量测定:每个小区随机选取4行×5 m进行测产,并随机选取20个穗进行考种测定。

1.4 数据统计与分析

试验数据经Microsoft Excel 2019整合处理,采用SPSS 26.0统计软件进行方差分析,所有图形采用Origin 2021进行绘制。

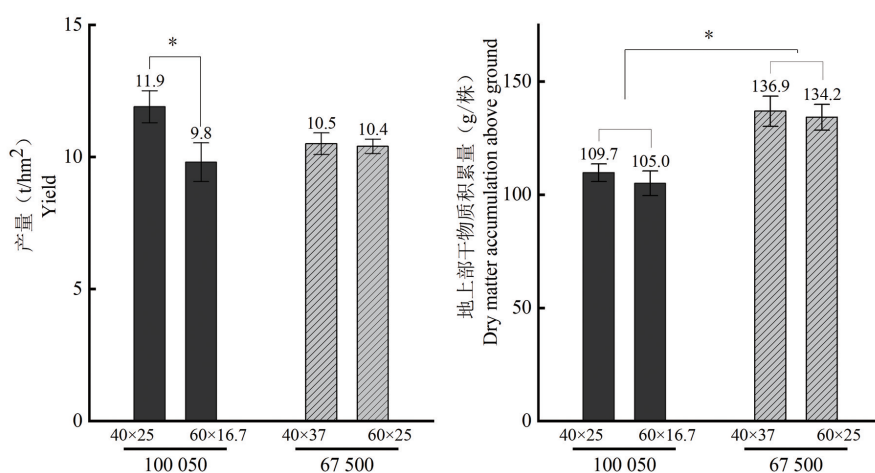
2 结果与分析

2.1 不同株行距配置下玉米产量及吐丝期干物质的积累

由图1可知,玉米在高密度条件下(100 050 株/hm²)较中密度(67 500 株/hm²)产量增加了13.9%。在中密度下减小行距对产量略有提升,在高密度下减小行距可显著提高玉米产量(21.4%)。在玉米吐丝期,中密度条件下地上部干物质积累量显著高于高密度条件下;在高、中密度下减小行距均能增加地上部干物质含量,增幅分别为4.5%和2.0%。

2.2 不同株行距配置下的玉米植株根系性状

在玉米吐丝期,不同株行距配置下垂直分布根系性状(根长、根表面积、根体积)仅在0~10 cm土层范围内有不同程度的差异。如图2所示,在中密度(67 500 株/hm²)下减小行距,根系性状变化不显著($P>0.05$);在高密度(100 050 株/hm²)下减小行距,0~10 cm土层内的根系性状(根长、根表面积和根体积)均有较大提升,平均增幅依次为47.6%、35.2%和39.0%。图3显示,在水平分布上,中密度下的内层

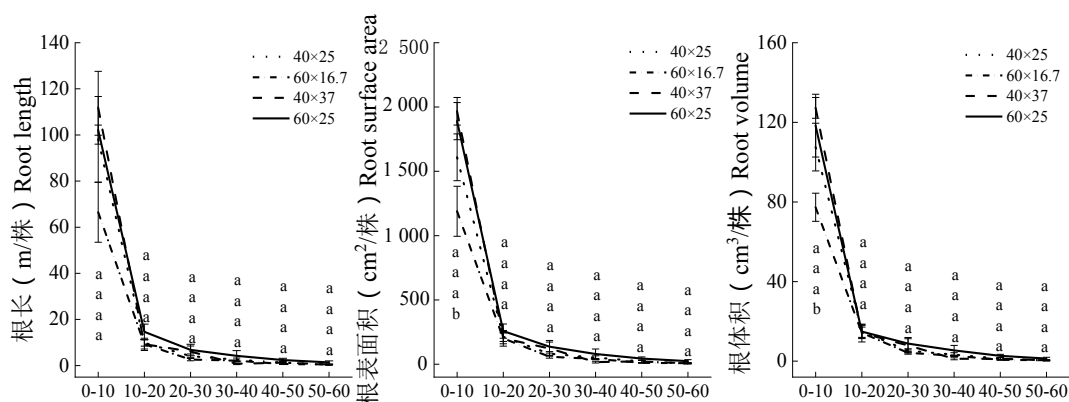


注:黑色条柱代表高密度(100 050 株/hm²)下两种株行距配置(株距乘以行距);灰色条柱代表中密度(67 500 株/hm²)下两种株行距配置(株距乘以行距);*表示两组间差异显著($P<0.05$)。下图同。

Note: Black bars represent two plant and row spacing (plant spacing multiplied by row spacing) at high density (100 050 plants/ha); grey bars represent two plant and row spacing (plant spacing multiplied by row spacing) at medium density (67 500 plants/ha); * indicates a significant difference between the two groups ($P<0.05$). The same below.

图1 株行距配置对2011年至2013年玉米产量及吐丝期地上部干物质积累量的影响

Fig.1 The effect of plant and row spacing on corn yield and dry matter weight of aboveground parts during spinning period



注:图例为株距(cm)乘以行距(cm);横坐标表示0~60 cm间不同土层深度(cm);同列数据不同字母表示差异显著($P<0.05$),相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。下图同。

Note: Legends are plant spacing (cm) multiplied by row spacing (cm); horizontal coordinates indicate different soil depths between 0 and 60 cm (cm); within the same column, different letters represent significant differences ($P<0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P>0.05$). The same below.

图2 不同株行距配置下0~60 cm土层内根系分布(2011)

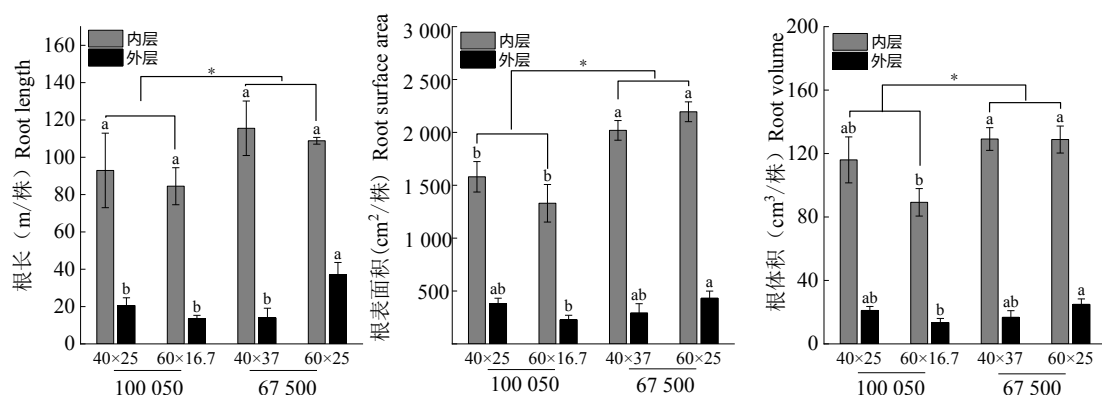
Fig.2 Distribution of roots in 0-60 cm soil layer under different plant and row spacing (2011)

根系的性状大小均显著高于高密度($P<0.05$)。中密度下减小行距,对内、外层根系性状的影响不显著($P>0.05$);高密度下减小行距,对内层根系的根长、根表面积和根体积增幅依次为84.0%、18.8%和30.0%,对外层根系的增幅依次为53.1%、25.2%和57.1%。

2.3 不同株行距配置下玉米吐丝期植株地上部氮、磷、钾的积累量

不同株行距处理对玉米吐丝期地上部氮、磷、钾积累量有一定影响(图4),中密度(67 500 株/hm²)下的

氮、磷、钾积累量均显著高于高密度条件下(100 050 株/hm²)($P<0.05$);两个密度下减小行距对氮、磷、钾积累量均有不同程度提升,在中密度下的提升幅度分别为10.5%、7.3%和9.1%,在高密度下的提升幅度分别为4.9%、8.1%和25.8%。图5表明,玉米吐丝期地上部氮、磷、钾积累量均与干重及产量呈显著正相关($P<0.05$)。但磷含量与干重及产量的相关性更强,相关系数分别为 $r=0.904^{***}$ 和 $r=0.887^{***}$,大于氮含量与钾含量对于干重及产量的影响。

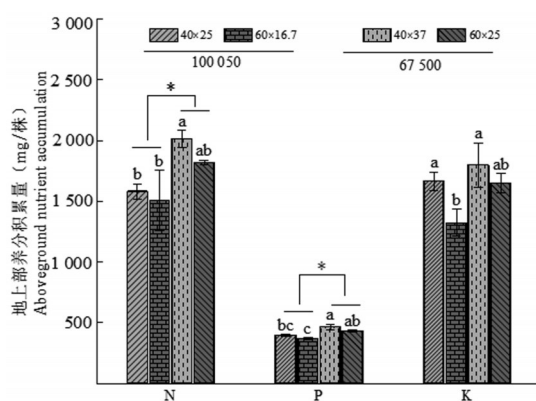


注:内层根系为深色条柱,外层根系为浅色条柱;横坐标表示高密度(100 050株/hm²)下两种株行距配置(株距乘以行距)和中密度(67 500株/hm²)下两种株行距配置(株距乘以行距)。

Note: Inner root systems are dark-colored bars, outer root systems are light-colored bars; horizontal coordinates indicate two plant and row spacing (plant spacing multiplied by row spacing) at high density(100 050 plants/ha) and two plant and row spacing (plant spacing multiplied by row spacing) at medium density(67 500 plants/ha).

图3 不同株行距配置下根系的水平分布(2011)

Fig.3 Horizontal distribution of roots under different plant and row spacing(2011)

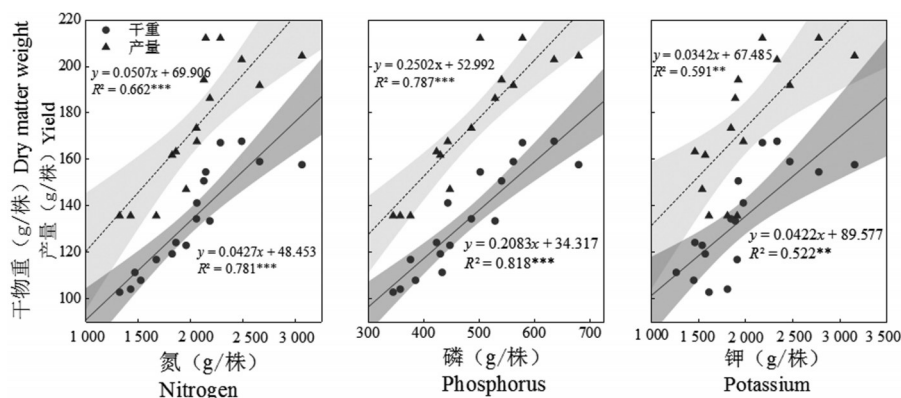


注:图例为株距乘以行距。

Note: Legends are plant spacing multiplied by row spacing.

图4 不同株行距配置下吐丝期玉米植株地上部的氮、磷、钾含量(2011)

Fig.4 Nitrogen, Phosphorus, and Potassium contents of corn plants at the silking stage under different plant and row spacing(2011)



注:阴影部分表示拟合曲线95%的置信区间。下图同。

Note: The shaded portion represents the 95% confidence interval of the fitting curve. The same below.

图5 吐丝期玉米地上部氮、磷、钾含量与干重及产量的相关性分析

Fig.5 Correlation analysis of N, P, K content and dry weight and yield in corn shoots during spinning period

2.4 吐丝期玉米根系发育与地上部氮、磷、钾积累的相关性分析

玉米吐丝期地上部氮、磷、钾积累量仅与垂直分布0~10 cm土层根系和水平分布内层根系显著相关($P<0.05$)。对垂直分布上0~10 cm土层根系性状(根长、根表面积、根体积)与氮、磷、钾积累量进行相关性分析(图6),结果表明,根系性状与氮、磷、钾积

累量均呈显著正相关。根长、根表面积、根体积均与氮积累量的相关系数($r=0.820^{***}$ 、 $r=0.823^{***}$ 、 $r=0.799^{***}$)最高,其次是根系性状与磷积累量和钾积累量的相关系数。对水平分布上内层根系性状与氮、磷、钾积累量进行相关性分析(图7),得到结果与上述垂直分布上(0~10 cm土层根系)根系性状与氮、磷、钾积累量的相关系数规律一致。

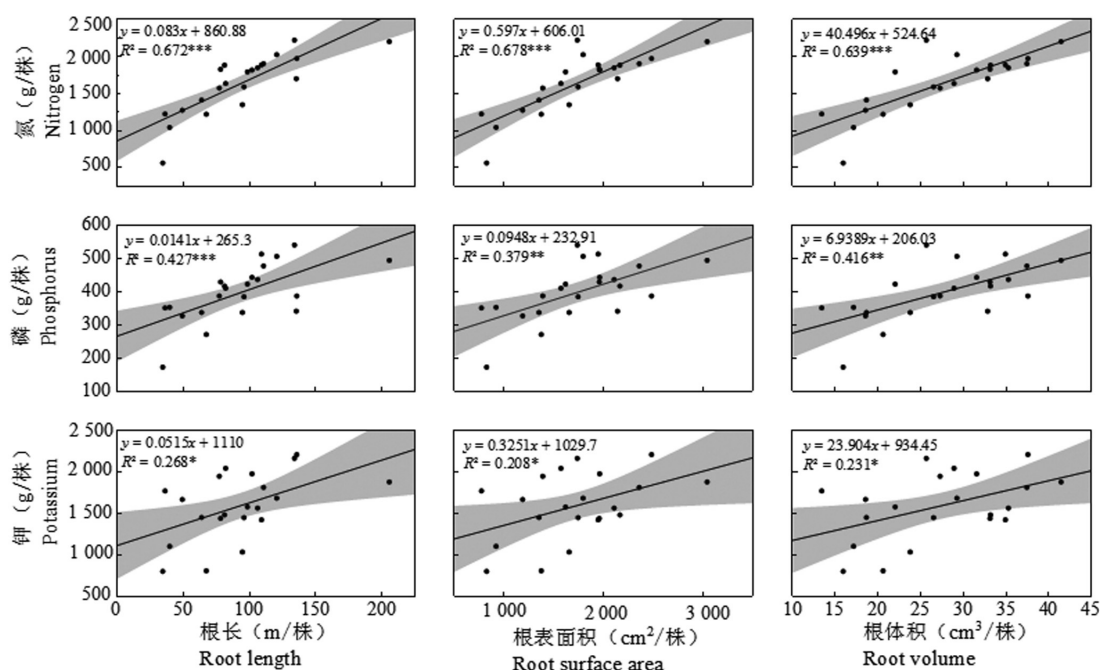


图6 玉米吐丝期0~10 cm土层内根系与地上部氮、磷、钾含量的相关性

Fig.6 Correlation between the root system and the N, P, and K content in the 0-10 cm soil layer during the spinning period of corn

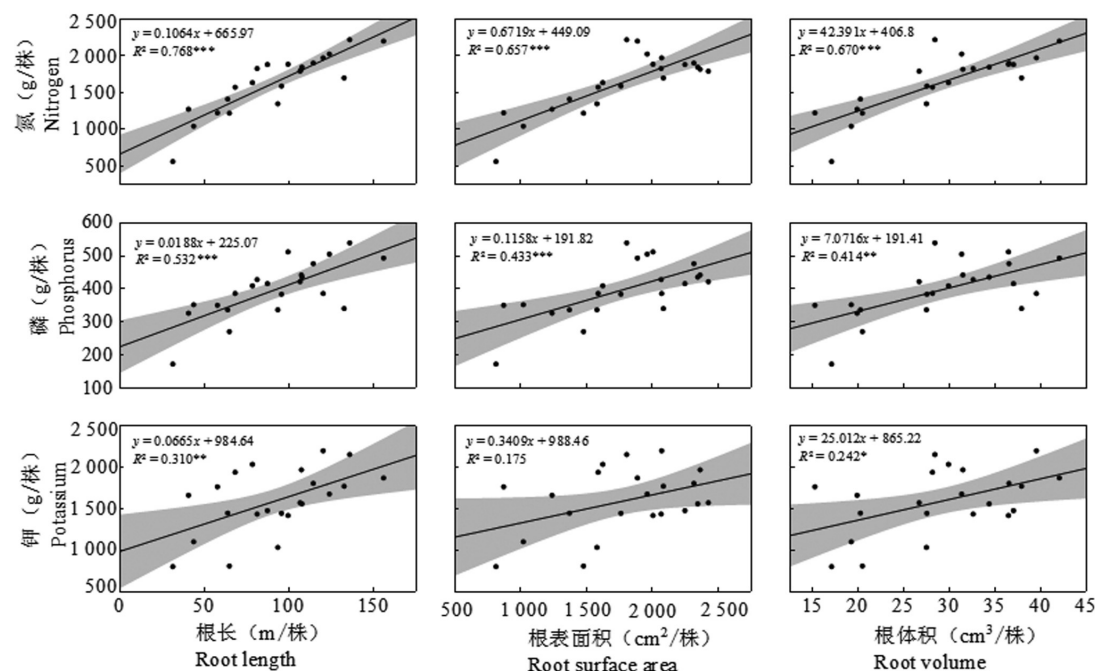


图7 玉米吐丝期内层根系与地上部氮、磷、钾含量的相关性

Fig.7 Correlation of N, P, K content between the layer root system and the shoots during the spinning period of corn

3 结论与讨论

3.1 不同密度下减小行距对玉米产量及干物质积累的影响

玉米产量随密度增加呈先增加后降低的趋势^[21]。在不同密度下,减小行距均可不同程度地提高玉米产量,在高密度下对产量的提升效果尤为明显^[22]。有研究表明,行距从76 cm减小到51 cm,可使玉米产量提高4%^[23]。本研究中,在中密度(67 500株/hm²)下,减小行距对玉米产量略有提升,在高密度(100 050株/hm²)下,减小行距会显著提高玉米产量,平均增产21.4%。玉米干物质积累量决定着最终产量^[24],随着密度的增加玉米单株干物质含量将减少,进而对玉米总产量产生影响^[25]。前人研究指出,在高密度下可以通过减小行距来提高玉米干物质的积累^[26]。本试验条件下,在高密度和中密度下减小行距均能提高单株地上部干物质含量,增幅分别为4.5%和2%。因此,在中、高密度下可以通过减小行距来缓解玉米植株间的养分竞争,进而为地上部提供更多的养分支持,增加单株干物质积累量,且在高密度下效果更明显^[27]。

3.2 不同密度下减小行距对玉米根系的影响

根系对养分的吸收是玉米产量形成的重要来源。根系结构对养分的吸收作用比冠层的光合作用对玉米产量具有更直接影响^[28]。随着密度的增加,玉米根系的各项性状指标(根长、根表面积、根体积)均有所下降^[29]。吐丝期是玉米根系发育的关键时期,张庆玲等研究指出,在吐丝期,随着密度的增加,垂直方向0~10 cm土层内的根系性状指标下降明显,但对10 cm以下土层根系影响不大^[30]。本研究中,中密度(67 500株/hm²)下的各项根系性状指标均高于高密度(100 050株/hm²)。高密度条件下,减小行距对玉米在垂直分布和水平分布上的根系发育均有促进作用,尤其对耕层的根系促进作用更为明显。

3.3 不同密度下减小行距对氮、磷、钾积累量的影响

吐丝前的干物质积累影响玉米子粒产量的形成,氮、磷、钾是干物质形成的基础^[31]。氮在土壤中主要以硝酸盐的形式存在,在农业生态系统中氮会在淋洗作用下渗入深层土壤;与氮相比,磷和钾则多存在于土壤浅层中^[32],所以氮被玉米根系的捕获与吸收的机会更多,对产量的影响更大。本研究中,随着密度的增加,植株间的竞争性加强,单株的养分积累量随之减小,密度增加后植株地上部氮、磷的含量显著下降,但是对钾含量的影响不明显。有国外学

者的研究表明,减小行距能够缓解植株间的竞争关系,提高植株的磷、钾含量,氮含量有所下降^[33]。也有国内学者研究显示,减少行距对玉米氮、磷、钾积累量的提高皆有作用^[34]。本试验条件下,减小行距提高了根系对氮、磷、钾元素的吸收;在高密度下,减小行距对钾的吸收效果更为显著(25.8%)。减少行距,优化了根系的空间配置,极大地增强了根系对表层土壤(0~10 cm)的养分利用效率,提高了玉米植株地上部的氮、磷、钾积累量。

增加种植密度是提高玉米产量的一项重要措施,增密加剧了植株间的竞争,对产量造成不利影响。本研究从根系形状和养分吸收等方面探究了高密度下减小行距提高玉米产量的机制,即减小行距可优化玉米根系的空间布局,缓解植株间的竞争,利于根系的发育,增加植株的养分积累,并促进干物质的形成,进而提高玉米产量。因此,通过适当增加密度减小行距并配合其他田间管理措施,确保玉米根系对整个生育期尤其是吐丝期的养分供应,是提高玉米产量的重要手段。

参考文献:

- [1] DUVICK D N. Genetic progress in yield of united states maize(*Zea mays* L.)[J]. *Maydica*, 2005, 50(3): 193-202
- [2] ASSEFA Y, CARTER P, HINDS M, et al. Analysis of long term study indicates both agronomic optimal plant density and increase maize yield per plant contributed to yield gain[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-11
- [3] ASSEFA Y, VARA PRASAD P V, CARTER P, et al. Yield responses to planting density for United States modern maize hybrids: A Synthesis-Analysis[J]. *Crop Science*, 2016, 56(5): 2802-2817
- [4] 谭 华,黄爱花,郑德波,等. 行距配置与种植密度对玉米产量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(17): 24-27.
TAN H, HUANG A H, ZHENG D B, et al. Effects of row spacing and planting density on maize yield[J]. *Anhui Agricultura Science*, 2020, 48(17): 24-27. (in Chinese)
- [5] 章家恩. 作物群体结构的生态环境效应及其优化探讨[J]. *生态科学*, 2000(1): 30-35.
ZHANG J E. Discussion on the eco-environmental effects of crop community structure and its optimization[J]. *Ecologic Science*, 2000, 3(1): 30-35. (in Chinese)
- [6] 李艳大,汤 亮,张玉屏,等. 水稻冠层光截获与叶面积和产量的关系[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(16): 3296-3305.
LI Y D, TANG L, ZHANG Y P, et al. Relationship of PAR Interception of canopy to leaf area and yield in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(16): 3296-3305. (in Chinese)
- [7] 梁 熠,齐 华,王敬亚. 行距配置对春玉米群体冠层环境与光合特性的影响[J]. *西北农业学报*, 2014, 23(8): 66-72.
LIANG Y, QI H, WANG J Y. Effect of row spacing configuration on canopy environment and photosynthetic characteristics of spring maize populations[J]. *Northwest Journal of Agriculture*, 2014, 23(8):

- 66-72. (in Chinese)
- [8] MARSCHNER H. Marschner's mineral nutrition of higher plants[M]. Academic Press, 2011.
- [9] 周德超. 氮、磷、钾在植物体中的主要生理作用及植物对养分的吸收[J]. 生物学通报, 1983(5): 9-10.
- ZHOU D C. The main physiological functions of nitrogen, phosphorus and potassium in plants and their absorption of nutrients[J]. Bulletin of Biology, 1983(5): 9-10. (in Chinese)
- [10] KARLEN D L, SADLER E J. Dry matter nitrogen, phosphorus and potassium accumulation rate by maize on Norfolk loamy sand[J]. Agronomy Journal, 1987, 79: 649-656
- [11] ALBUQUERQUE A W, SÁ L A, RODRIGUES W A R, et al. Growth and yield of sugarcane as a function of phosphorus doses and forms of application[J]. Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient, 2016, 20(1): 29-35.
- [12] 于广武, 王光华, 刘晓冰. 大豆与钾肥[J]. 北京农业, 1995(6): 16-17.
- YU G W, WANG G H, LIU X B. Soybeans and potash[J]. Beijing Agriculture, 1995(6): 16-17. (in Chinese)
- [13] 邵 慧. 玉米根系对种植密度的反应及基因型差异[D]. 北京: 中国农业大学, 2020.
- [14] 徐春丽. 氮肥和种植密度对不同品种玉米生长及养分吸收的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [15] 李 帅. 施氮量和密度互作对玉米干物质累积、养分吸收利用及产量的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2017.
- [16] 齐 华, 刘 明, 张卫建, 等. 深松方式对土壤物理性状及玉米根系分布的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(4): 191-196.
- QI H, LIU M, ZHANG W J, et al. Effect of deep loosening mode on soil physical characteristics and maize root distribution[J]. Acta Agriculturae Boreali-sinica, 2012, 27(4): 191-196. (in Chinese)
- [17] 徐振和, 梁明磊, 路笃旭, 等. 在植株不同水平距离处垂直断根对夏玉米产量形成和子粒库容特性的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(12): 1805-1816.
- XU Z H, LIANG M L, LU D X, et al. Effect of cutting roots vertically at a place with different horizontal distance from plant on yield and grain storage capacity of summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(12): 1805-1816. (in Chinese)
- [18] 周 琪. 种植密度对玉米根系性状的影响[J]. 现代农业, 2017(7): 20-21.
- ZHOU Q. Effect of planting density on the morphology of maize root system[J]. Modern Agriculture, 2017(7): 20-21. (in Chinese)
- [19] 杨恒山, 张瑞富, 张玉芹, 等. 西辽河平原灌区玉米宽行少耕高产高效种植模式的研究[J]. 内蒙古民族大学学报: 自然科学版, 2014, 29(5): 559-561.
- YANG H S, ZHANG R F, ZHANG Y Q, et al. Study on high yield and high efficiency cropping modes of wide row and reduced tillage for maize in west Liaohe River Plain irrigated regions[J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities, 2014, 29(5): 559-561. (in Chinese)
- [20] 何冬冬, 杨恒山, 张玉芹, 等. 扩行缩株对春玉米干物质积累与转运的影响[J]. 玉米科学, 2017, 25(3): 73-79.
- HE D D, YANG H S, ZHANG Y Q, et al. Effects of widening row spacing and shortening plant spacing on dry matter accumulation and transportation in spring maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2017, 25(3): 73-79. (in Chinese)
- [21] 王 楷, 王克如, 王永宏, 等. 密度对玉米产量(>15 000 kg/hm²)及其产量构成因子的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(16): 3437-3445.
- WANG K, WANG K R, WANG Y H, et al. Effects of density on maize yield and yield components[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(16): 3437-3445. (in Chinese)
- [22] TESTA G, REYNERI A, BLANDINO M. Maize grain yield enhancement through high plant density cultivation with different inter-row and intra-row spacings[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 72: 28-37.
- [23] SHAPIRO C A, WORTMANN C S. Maize response to nitrogen rate, row spacing, and plant density in eastern Nebraska[J]. Agronomy Journal, 2006, 98(3): 529-535.
- [24] 李向岭, 赵 明, 李从锋, 等. 播期和密度对玉米干物质积累动态的影响及其模型的建立[J]. 作物学报, 2010, 36(12): 2143-2153.
- LI X L, ZHAO M, LI C F, et al. Effect of sowing-date and planting density on dry matter accumulation dynamic and establishment of its simulated model in maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(12): 2143-2153. (in Chinese)
- [25] 金 容. 密度和株行距配置对夏玉米群体结构、抗倒特性及产量的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2019.
- [26] 高亚男. 行距对玉米生理特性及产量的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [27] 张晓丽. 株行距配置对夏玉米生长发育及抗倒能力的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2011.
- [28] HAMMER G L, DONG Z, MCLEAN G, et al. Can changes in canopy and/or root system architecture explain historical maize yield trends in the US maize belt?[J]. Crop Science, 2009, 49(1): 299-312.
- [29] 王振西. 种植密度对玉米根系性状的影响[J]. 农业与技术, 2019, 39(17): 107-108.
- WANG Z X. Effect of planting density on the morphology of maize root system[J]. Agriculture and Technology, 2019, 39(17): 107-108. (in Chinese)
- [30] 张庆玲. 不同种植密度对春玉米根构型影响的研究[D]. 太原: 山西大学, 2014.
- [31] 侯云鹏, 杨晓丹, 杨 建, 等. 不同施肥模式下玉米氮、磷、钾吸收利用特性研究[J]. 玉米科学, 2017, 25(5): 128-135.
- HOU Y P, YANG X D, YANG J, et al. Research on characteristics of nitrogen, phosphorus and potassium absorption and utilization of maize under different fertilization modes[J]. Journal of Maize Sciences, 2017, 25(5): 128-135. (in Chinese)
- [32] POSTMA J A, LYNCH J P. Root cortical aerenchyma enhances the growth of maize on soils with suboptimal availability of nitrogen, phosphorus, and potassium[J]. Plant Physiology, 2011, 156(3): 1190-1201.
- [33] FREITAS M A M, SILVA D V, SOUZA M F, et al. Levels of nutrients and grain yield of maize intercropped with signalgrass (Brachiaria) in different arrangements of plants[J]. Planta Daninha, 2015, 33(1): 49-56.
- [34] 张海红. 行距配置对黄淮南部夏玉米群体资源利用效率的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2015.

(责任编辑: 栾天宇)