

种植模式对高密度下不同耐密性大豆品种根形态的影响

王冬昭¹, 饶德民¹, 李琪瑞², 程彤¹, 于德彬¹, 孟凡钢¹, 赵婧¹, 闫晓艳¹,
邱强¹, 张伟^{1*}

(1. 吉林省农业科学院大豆研究所/大豆国家工程研究中心, 长春 130033; 2. 内蒙古自治区乌海市农业发展中心, 内蒙古 乌海 016000)

摘要: 试验以不耐密大豆吉育 86 和耐密大豆长密豆 30 为材料, 设置 2 个处理, 种植模式处理: 垄上双行和垄上单行种植, 种植密度处理: 20 万株/hm² 和 40 万株/hm²。研究耐密性不同的大豆品种的地下根系生理和形态特征以及地上干物质量和产量特性。结果表明, 根系活力、根系干重、根长、根表面积、根体积和根尖数分别与大豆产量和地上干物质量存在显著正相关关系。高密度种植显著降低吉育 86 的干物质量和产量, 对于长密豆 30 的产量虽有降低但未达显著水平。垄上双行对吉育 86 在高密度条件下的产量提高达显著水平。高密度种植对于不耐密品种吉育 86 的地下根系和地上冠层造成的竞争抑制程度更高。垄上双行对于不耐密大豆品种根系形态的优化作用, 尤其是高密度条件下根系形态的优化效果明显优于耐密大豆。长密豆 30 地下根系分级结构受种植模式的影响更大, 吉育 86 的地下根系分级结构受种植密度影响更大。综上所述, 耐密大豆品种地下根系耐受竞争抑制作用能力更强, 高密度条件下具有较强的根系活性响应能力, 是耐密大豆品种在高密度条件下保持较高地上部干物质量和产量的重要原因。

关键词: 大豆; 种植密度; 种植模式; 根系形态; 产量

中图分类号: S565.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2023)06-0020-07

Effect of Planting Patterns on Root Morphology of Soybean Varieties with Different Density Tolerance under High-density Planting

WANG Dongzhao¹, RAO Demin¹, LI Qirui², CHENG Tong¹, YU Debin¹, MENG Fan'gang¹, ZHAO Jing¹,
YAN Xiaoyan¹, QIU Qiang¹, ZHANG Wei^{1*}

(1. Soybean Research Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Research Center for Soybean, Changchun 130033; 2. Wuhai Agricultural Development Center, Wuhai 016000, China)

Abstract: The experiment used the soybean variety Jiyu 86 which is not tolerant to dense planting and the soybean variety Changmidou 30 which is tolerant to dense planting as materials. Two treatments were set up in this experiment, one was planting mode treatment: double row planting on ridge and single row planting on ridge, the other one is the planting density treatment: 200,000 plants/ha and 400,000 plants/ha. To explore the physiological and morphological characteristics of underground root system and the quality and yield characteristics of above-ground dry matter of soybean varieties with different density tolerance characteristics. The results showed that root activity, root dry weight, root length, root surface area, root volume and root tip number were positively correlated with soybean yield and dry matter, respectively. High density planting significantly decreased the dry matter quality and yield of Jiyu 86, and the yield of Changmidou 30 was decreased but not to a significant level. The yield of Jiyu 86 increased significantly under high density conditions. High-density planting had a higher degree of competition inhibition on the underground root system and above ground canopy of the intolerant variety Jiyu 86. Double row on ridge had obvious optimization effect on root morphology of dense-tolerant soybean varieties, especially under high-density con-

收稿日期: 2023-09-18

基金项目: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-04-PS14); 中青年科技创新创业卓越人才(团队)项目(20210509012RQ); 吉林省农业科技创新工程人才基金项目(0010317)

作者简介: 王冬昭(1979-), 女, 助理研究员, 硕士, 主要从事大豆栽培生理研究。

通讯作者: 张伟, 男, 博士, 研究员, E-mail: zw.0431@163.com

dition, the optimization effect was better than that of dense-tolerant soybean varieties. The underground root hierarchical structure of Changmidou 30 was more affected by planting pattern, and that of Jiyu 86 was more affected by planting density. In summary, the underground roots of dense-tolerant soybean varieties have a better ability to withstand competition inhibition and have a stronger responsiveness to root activity under high-density conditions, which is an important reason for the higher aboveground biomass and yield of dense-tolerant soybean varieties under high-density conditions.

Key words: Soybean; Planting density; Planting pattern; Root morphology; Yield

大豆根系获取生长发育所必需养分的能力决定了其产量的高低,大豆地下根系的生长除了与土壤养分密切相关,也受根系竞争的影响^[1]。因此不同的种植模式和种植密度引起的地下根系空间位置排布的变化,势必导致其在有限资源区产生竞争^[2]。此外大豆在密植条件下,地上部对太阳光能的竞争,导致群体徒长、花荚脱落也影响大豆的产量^[3]。大豆高产栽培的基本原理是在合理利用光热资源和适应自然条件的基础上,运用科学的栽培措施,创造有利于大豆生长发育的光、热、水、肥条件,使大豆品种的产量和品质遗传潜力得到充分发挥,达到高产、优质、高效的目的^[4]。密度是大豆生产中最重要栽培因素之一,它与产量密切相关^[5],维持适宜的群体密度是确保高产和稳产的前提。当群体密度过高时,大豆单株的生长空间和地下根系营养面积小,植株长势弱,单株荚数、粒数及粒重显著下降;当群体密度较小时,个体所需的光、水、气、肥不是限制因子,虽然个体长势很健壮,但缺少大豆单株个体量变引起的群体产量的质变^[6]。随着密度增加,耐密大豆垦豆 25 在 25 万~45 万株/hm² 范围内产量呈现先上升后下降的变化趋势^[7]。研究表明,大豆根系在与邻近的根系重叠时,觅食范围会缩小以此减少能耗,并促进主茎部附近根的增殖^[8]。说明当种植密度提高,无论是大豆群体的

地上部还是地下部都不可避免地存在生长竞争和自我调节。因此通过改变种植模式,协调大豆地上部干物质积累和地下部养分吸收的平衡,减弱大豆地下根系竞争也是大豆高产栽培的研究重点。随着大豆品种的更新及全球气候环境的变化,传统种植模式在某种程度上限制了大豆的增密和增产^[9]。因此,垄三栽培和垄上双行等适于大豆高产的栽培措施随之被提出,尤其是垄上双行的应用越来越广泛。对于这些种植方式的研究主要集中在大豆地上部农艺性状、光合生理特性和产量构成等方面^[10-11]。根系是大豆植株养分吸收的重要器官,本研究围绕不同种植模式和不同种植密度下具有耐密差异的大豆品种在根系形态上和生理上表现出的竞争效应,研究其响应特征,对优化资源利用效率和粮食产量上限最大化至关重要。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况和供试材料

2019 年在公主岭市吉林省农业科学院试验基地(43°30'23" N, 124°48'34"E)进行田间试验。土壤类型为薄层黑土,0~30 cm 土壤含有有机质 2.41%、全氮 0.133%、有效氮 182.56 mg/kg、速效磷 30.22 mg/kg、速效钾 126.33 mg/kg, pH 6.54。供试大豆品种特性见表 1。

表 1 供试大豆品种特性

品种	耐密特性	遗传来源	熟期(d)	脐色	结荚习性	叶形	花色	百粒重(g)	发芽率(%)
长密豆 30	耐密	♂CK-P-2, ♀合交 95-984	121	黄脐	亚有限	尖叶	紫花	16.7	99.8
吉育 86	不耐密	♂九农 25, ♀公交 93142B-28	128	黄脐	亚有限	尖叶	紫花	21.3	99.8

1.2 试验设计

试验设置种植模式(A)和种植密度(B)两种处理。种植模式:垄上单行(A₁:行距 0.65 m),垄上双行(A₂:大行距 0.65 m,小行距 0.15 m);种植密度:20 万株/hm²(B₁),40 万株/hm²(B₂)。小区 6

行,行长 5 m,小区面积 19.5 m²,各处理重复 3 次。

2019 年 4 月 28 日人工播种,每穴 3~5 粒,在大豆三叶期间苗留单株。播种前一次性施肥 200 kg/hm²,氮磷钾比例为 17:17:17。田间管理按大豆田常规管理进行。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 根系形态测定

在大豆始荚期(R5),此时期大豆根形态基本稳定,所吸收的养分主要用于籽粒的干物质积累,每个小区随机选取3点,避开边行,采用常规方法,小心挖出大豆根系,用清水洗净根系,用根系扫描系统(爱普生LA2400)扫描,并用WinRHIZO软件分析扫描图片,获得根长、根表面积、根体积、根平均直径,最后将根系置于烘箱80℃烘干至恒重测定根干物质质量,每株大豆的地上部也置于烘箱80℃烘干至恒重测定地上部干重。根冠比=根系干重/地上部干重。

1.3.2 根系活力测定

在大豆始荚期(R5),每个小区随机选取3点,取出大豆根系,清水洗净后,参照朱秀云等^[12]的方法测定根系活力。

1.3.3 产量测定

在成熟期,选取未取过样的2行,避开每行的头尾,实收长度4.16 m,面积为5 m²,人工脱粒称重,然后按照标准含水量(13.5%)折合公顷产量。

1.4 数据处理

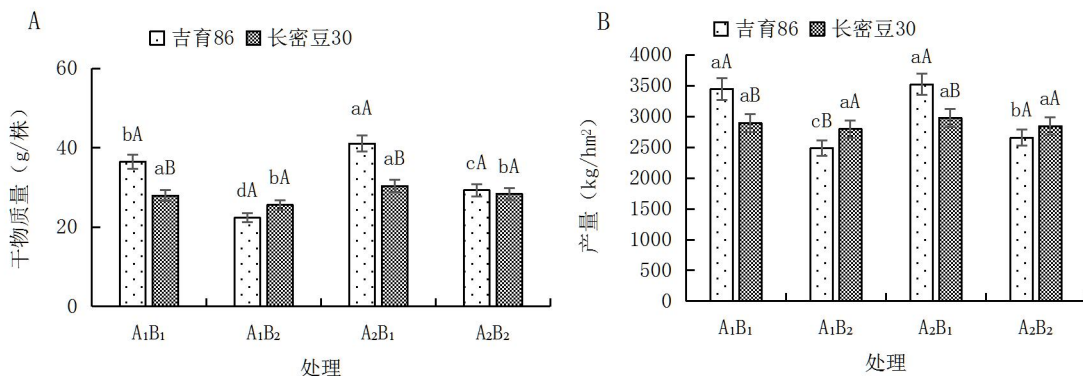
采用Excel 2012进行数据的整理汇总和作图,用SPSS 19.0软件进行方差分析,采用STAMP v2.1.3对大豆按照根长分级,并制作热图。

2 结果与分析

2.1 种植模式和种植密度对大豆干物质质量及产量的影响

由图1A可知,高密度种植使不耐密大豆吉育86的干物质质量在垄上单行和垄上双行种植模式下显著降低,幅度分别达28.7%和38.7%;高密度种植使耐密大豆长密豆30的干物质质量在垄上单行和垄上双行种植模式下降低幅度分别为6.6%和8.6%,显著低于不耐密大豆吉育86的降低幅度。相比于垄上单行,垄上双行高密度和低密度种植模式下的两品种地上干物质质量均有显著提高,高密度下吉育86的提高幅度高达30.9%,低密度下长密豆30提高幅度较小,为8.6%。

由图1B可知,相比于低密度种植,高密度种植显著降低吉育86的产量,在两种种植模式下降低幅度分别为24.6%和27.8%,在高密度条件下两种种植模式的长密豆30的产量均有降低,但未达显著水平。相比于垄上单行,垄上双行在高密种植模式下不耐密品种吉育86产量显著提高,提高幅度达6.8%,对低密下的吉育86产量影响不显著;耐密品种长密豆30无论在高密度还是低密度条件下,其产量受垄上单双行影响不显著。



注:小写字母不同表示同一品种不同处理间差异显著($P<0.05$);大写字母不同表示同一处理不同品种间差异显著($P<0.05$),下同

图1 不同处理下不同品种干物质质量及产量的差异

2.2 种植密度和种植模式对大豆根系形态的影响

由图2可知,高密度种植显著降低耐密(长密豆30)和不耐密(吉育86)大豆品种的根长、根表面积、根系体积、根干重和根尖数(单行种植模式下长密豆30的根尖数除外),显著提高两个大豆品种地下根直径。相比于垄上单行种植,吉育86在垄上双行高密度和低密度种植条件下根形态指标都有显著提高,垄上双行低密度条件下长密豆30的根长、根表面积和根体积都显著提高,但对

根直径、根尖数和根干重无显著影响,垄上双行显著提高高密度条件下长密豆30的根体积,显著降低根尖数,但对根长、根表面积、根直径和根干重无显著影响。

由表2可知,高密度种植对不耐密大豆根形态指标的影响要大于耐密品种,高密度种植使不耐密大豆吉育86的根长(41.0%~52.0%)、根表面积(36.2%~36.9%)、根体积(18.2%~28.3%)、根尖数(41.7%~43.1%)和根系干重(28.4%~36.9%)的

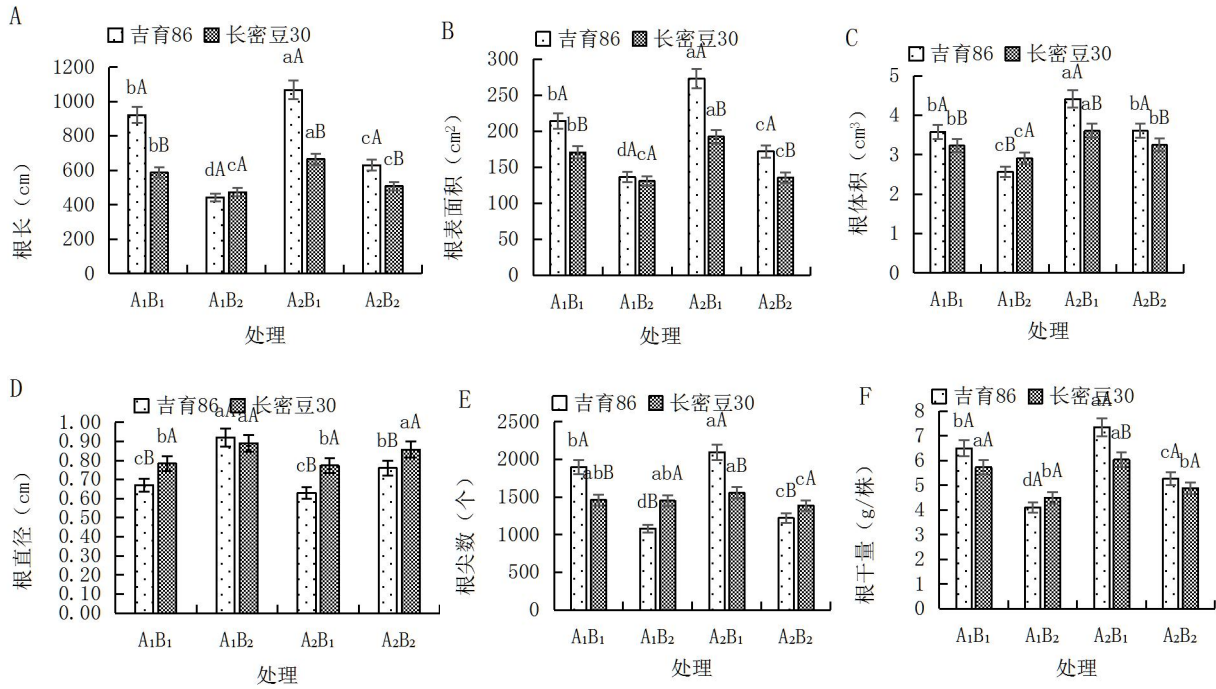


图2 不同处理下不同品种根形态的差异

表2 大豆根形态指标受种植模式和密度影响的变化幅度

品种	对照	处理	根长	根表面积	根直径	根体积	根尖数	根系干重
吉育 86	A ₁ B ₁	A ₁ B ₂	-52.0	-36.2	37.1	-28.3	-43.1	-36.9
	A ₂ B ₁	A ₂ B ₂	-41.0	-36.9	20.7	-18.2	-41.7	-28.4
	A ₁ B ₁	A ₂ B ₁	15.8	27.4	-6.1	23.5	10.4	13.1
	A ₁ B ₂	A ₂ B ₂	42.5	26.1	-17.3	40.8	13.1	28.3
长密豆 30	A ₁ B ₁	A ₁ B ₂	-19.5	-23.2	13.5	-10.0	-0.7	-21.6
	A ₂ B ₁	A ₂ B ₂	-23.6	-29.5	11.1	-10.0	-10.8	-19.2
	A ₁ B ₁	A ₂ B ₁	13.2	12.8	-1.2	11.5	6.4	5.4
	A ₁ B ₂	A ₂ B ₂	7.4	3.6	-3.3	11.6	-4.5	8.6

下降幅度高于耐密大豆长密豆 30 的根长 (19.5%~23.6%)、根表面积 (23.2%~29.5%)、根体积 (10.0%)、根尖数 (0.7%~10.8%) 和根系干重 (19.2%~21.6%) 的下降幅度; 高密度种植提高不耐密大豆吉育 86 的根直径 (20.7%~37.1%), 提高幅度高于长密豆 30。垄上双行对于不耐密大豆根形态指标的影响要大于耐密大豆, 垄上双行使吉育 86 的地下根形态指标的优化幅度 (-6.1%~42.5%) 高于长密豆 30 (-4.5%~13.2%)。

2.3 种植模式和种植密度对大豆根冠比和根系活力的影响

由图 3A 可知, 种植密度和种植模式对不耐密大豆吉育 86 的根冠比无显著影响, 垄上双行高密度种植显著降低了长密豆 30 的根冠比。由图 3B 可知, 相比于低密度种植, 高密度种植显著降低垄上单行和垄上双行模式下不耐密品种吉育 86

的根系活力, 降幅分别达 28.0% 和 27.7%; 高密度种植显著提高垄上单行和垄上双行模式下耐密品种长密豆 30 的根系活力, 升幅分别达 25.1% 和 25.7%。相比于垄上单行, 垄上双行显著提高两种密度下吉育 86 的根系活力, 幅度为 13%, 但垄上双行对两种密度下长密豆 30 的根系活力无显著影响。

2.4 种植密度和种植模式对大豆根系结构和根长分级的影响

由图 4A 可知, 在所有处理中, 两大豆品种地下根系数量主要以 0~2 级别的为主, 其中又以 0~0.5 和 0.5~1.0 级别的最多, 4~4.5 级别的最少; 高密度种植降低了长密豆 30 在两种种植模式下 0~0.5、0.5~1.0、1.0~1.5、1.5~2.0 和 4~4.5 级别的根系数量, 高密度种植也降低了吉育 86 在垄上单行模式下 0~0.5、0.5~1.0、1.0~1.5、1.5~2.0 和 4~4.5 级别的根系数量。由图 4B 可知, 各处理的三个重复分

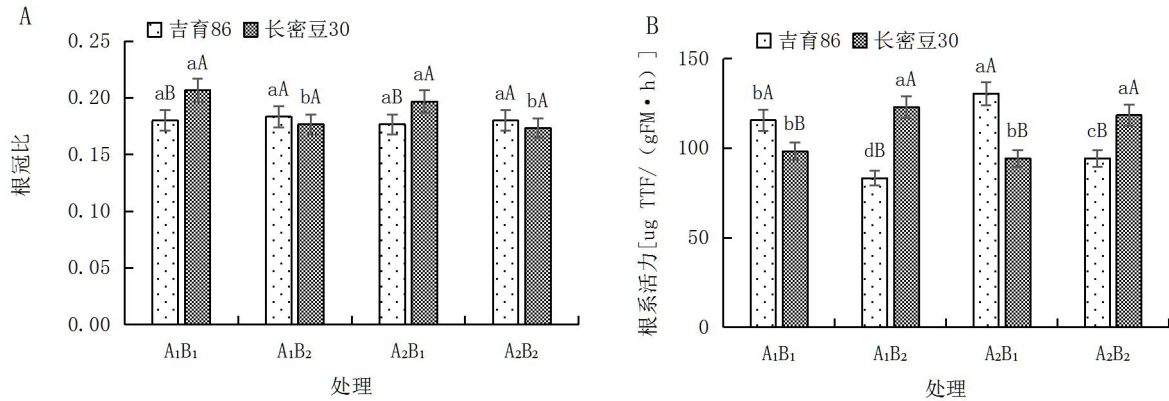


图3 不同处理下不同品种根冠比及根系活力的差异

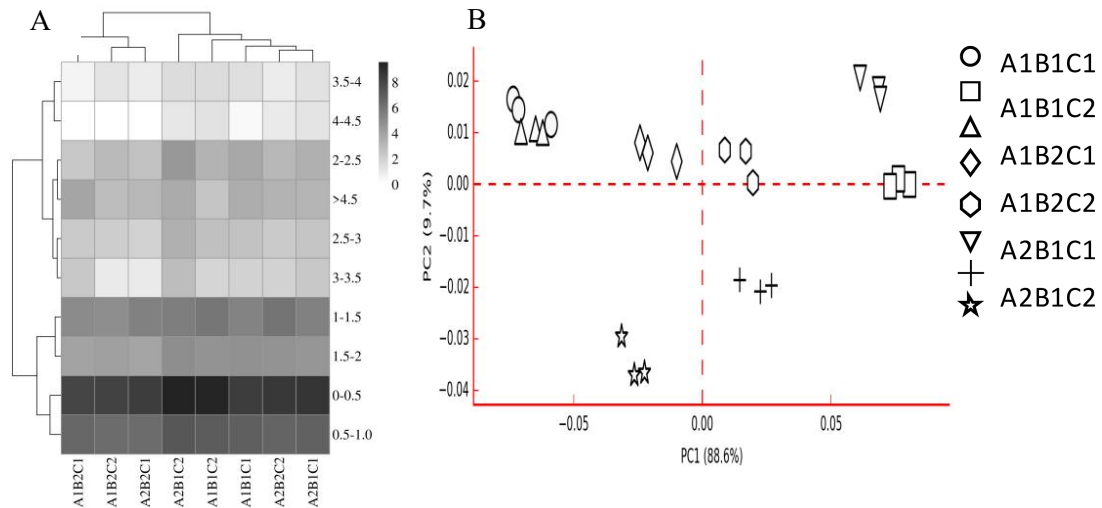


图4 不同种植密度和模式下大豆根长分级热图(A)和根长主成分分析(B)

别较好地聚集在一起,第一主成分PC1解释了种植密度引起根系分级结构88.6%的变异,第二主成分PC2解释了种植模式引起根系分级结构9.7%的变异。在第一主轴方向,长密豆30的垄上单行和垄上双行处理分别很好地聚在一起,说明种植模式对长密豆30地下根系分级结构的影响要大于种植密度处理;吉育86的高密度和低密度处理分别很好地聚在一起,说明种植密度对吉育

86的地下根系分级结构的影响要大于种植模式。

2.5 大豆根系生理、形态指标及地上部产量之间的相关性

由表3可知,根系活力、根干重、根长、根表面积、根体积和根尖数分别与产量和地上干物质量存在极显著正相关关系,根直径与根干重、根长和根表面积存在极显著负相关关系,根冠比与根系活力存在显著负相关关系。

表3 大豆根系生理、形态指标及地上部产量之间的相关性

	产量	地上干物质量	根干重	根冠比	根系活力	根长	根表面积	根直径	根体积
地上干物质量	0.941**								
根干重	0.905**	0.945**							
根冠比	-0.026	-0.079	0.188						
根系活力	0.681**	0.612**	0.44	-0.457*					
根长	0.918**	0.975**	0.946**	-0.052	0.504				
根表面积	0.859**	0.940**	0.957**	0.109	0.397	0.971**			
根直径	-0.816**	-0.902**	-0.923**	-0.014	-0.365	-0.931**	-0.910**		
根体积	0.788**	0.927**	0.912**	0.031	0.495	0.882**	0.906**	-0.860**	
根尖数	0.979**	0.925**	0.501	-0.033	0.721**	0.908**	0.862**	-0.39	0.589*

注:“*”表示显著相关,“**”表示极显著相关

3 讨 论

适宜的密度有利于大豆形成良好的群体冠层结构^[13],促进冠层光合利用效率的提高^[14]。此外,大豆正常生长发育离不开其重要营养器官根系对养分和水的吸收,根系在地下的生理状态和形态决定大豆植株获得水分和养分的能力^[15],所以种植密度在影响地上部的同时对根系的生长发育也有很大影响。关于种植密度对作物地下根系的生理、形态以及地上光合生理的影响前人做了大量研究^[16-18],随着密度的增加除了地上部群体结构的恶化^[19],地下根系在有限的空间和养分资源的竞争也加剧^[20],主要表现为主根长度增长,单位面积根干重显著降低,根冠比明显增大,根系还原能力明显降低^[21-22]。本研究结果显示,高密度种植条件下耐密大豆地下根系生长受个体竞争抑制作用的影响相对较小,尤其耐密大豆高密度条件下根系表现较强根系活力,在很大程度上能弥补根生长受抑制所导致的养分吸收能力减弱的不良影响。

合理的株行距配置,能够构建不同的冠层结构,有利于冠层光能截获利用和群体内气体交换^[23],缓解由于密度增加造成的遮阴加重和透光率下降等影响,提高群体光能利用效率,促进地上部和地下部的协同生长以及光合产物的合理分配,从而提高产量^[24]。在相同密度下,合理的株行距配置可以提高单位面积根系干重,增加外环的根量,提高根系伤流量和根系还原力,促进地上部生长,降低根冠比;较窄的行距使高密度下大豆根系在水平方向的分布趋于均匀,增加外环深层的根量,部分地缓解了高密度对根系生长的抑制作用,对大豆的产量形成有利^[17]。本研究结果表明,通过垄上双行的种植模式优化群体空间排布,对于不耐密大豆吉育86的根形态指标的优化作用更为突出。大豆根系生理和形态指标的差异以及与地上部干物质量和产量的显著或极显著相关性,表明不耐密品种由于地上部竞争抑制导致干物质量的下降,严重影响后期产量的获得,这种地上部竞争抑制作用在高密度条件下可以通过种植模式(垄上双行)对地下根系生理和形态的优化调节而减弱,但在低密度条件下垄上双行的作用则不显著。

本研究还发现对于耐密大豆品种,由于高密度环境下竞争抑制导致的干物质量下降幅度远小于不耐密品种,对于后期籽粒产量影响较小,所

以产量在合理高密度和不同种植模式下比较稳定。相比于不耐密大豆品种,耐密大豆品种更容易通过改变地上和地下部的协调性,来适应高密度种植引起的生长环境的变化,再结合不耐密品种的地下根系养分吸收能力在高密度栽培条件下更容易受到竞争抑制的影响,而耐密品种的地下根系活力在高密度栽培条件下竞争能力更强,能抵消由于根体量减小引起的养分吸收能力减弱的不良影响。这在一定程度上证实了预测大豆的根系如何对附近植物的根系做出反应的博弈论模型的可靠性,即植物在茎部附近的根部会局部过度增殖,当根部与邻近的根系重叠时,它们的觅食范围会缩小^[7]。种植模式和种植密度对于耐密和不耐密大豆品种根系分级结构的影响差异,可能是耐密品种地下根系为了协调地上部生长从而通过优化根系分级结构来表现更强竞争能力。

4 结 论

根系活力、根干重、根长、根表面积、根体积和根尖数与大豆产量和地上干物质量之间存在极显著正相关关系。高密度种植显著降低吉育86的干物质量和产量,对于长密豆30的产量虽有降低但未达显著水平,垄上双行显著提高高密度条件下吉育86产量。高密度种植对于不耐密品种吉育86的地下根系和地上冠层的竞争抑制程度更大,但对于耐密品种长密豆30的竞争抑制程度较小,这是耐密大豆提高高密度条件下竞争力的一个重要特性。垄上双行对于不耐密大豆根系形态的优化,尤其是高密度条件下的优化效果明显优于耐密大豆,最终显著提高了吉育86在高密度条件下的产量,而长密豆30的产量无显著变化。长密豆30地下根系分级结构受种植模式的影响更大,吉育86的地下根系分级结构受种植密度影响更大。综上所述,相比于不耐密大豆,耐密大豆长密豆30的地下根系耐受竞争抑制作用程度以及高密度条件下较强的根系活力响应能力是其在高密度条件下保持较高地上部干物质量和产量的重要原因。不耐密大豆品种在高密度条件下所受的竞争抑制作用可以通过种植模式(垄上双行)对地下根系生理和形态的优化调节而减弱。

参考文献:

- [1] Cahill J J F, McNickle G G. The behavioral ecology of nutrient foraging by plants[J]. Annual Review of ecology, evolution, and systematics, 2011, 42: 289-311.

- [2] Marvel J N, Beyrouy C A, Gbur E E. Response of soybean growth to root and canopy competition[J]. *Crop Science*, 1992, 32(3): 797-801.
- [3] 王四清,高聚林,刘克礼,等.大豆花荚形成与花荚脱落的研究[J].内蒙古农业科技,2006(2):8-10.
- [4] 金 剑,刘晓冰,王光华,等.大豆高产群体的生态生理特征[J].中国油料作物学报,2003,25(3):109-114.
- [5] 张 伟,张惠君,王海英,等.株行距和种植密度对高油大豆农艺性状及产量的影响[J].大豆科学,2006,25(3):283-287.
- [6] 韩 雪,杨金剑,齐照明.种植密度对不同大豆品种产量性状的影响[J].汉斯农业科学,2021,11(5):417-430.
- [7] 刘玲雪,贺海生,徐明贵,等.半矮秆大豆北豆 25 窄行密植试验研究[J].农业科技通讯,2012(7):88-90.
- [8] Cabal C, Martínez-García R, de Castro Aguilar A, et al. The exploitative segregation of plant roots[J]. *Science*, 2020, 370(6521): 1197-1199.
- [9] 黄 甜.大垄三行下不同类型大豆品种产量及生理特征研究[D].长春:吉林农业大学,2020.
- [10] 苗保河.大豆高产模式化栽培的研究进展[J].大豆通报,1997(4):25-26.
- [11] 李瑞平,李志刚,王贵平,等.不同栽培模式对大豆生长动态及干物质积累分配的影响[J].大豆科学,2008,27(6):979-982.
- [12] 朱秀云,梁 梦,马 玉.根系活力的测定(TTC法)实验综述报告[J].广东化工,2020,47(6):211-212.
- [13] 王 英,何语涵,许晓敏,等.外源赤霉素对大豆矮秆品系 F₀₃ 生长发育的影响[J].东北农业科学,2019,44(3):1-4.
- [14] 肖亦农,谢甫缙,肖万欣.不同肥密处理对超高产大豆氮素吸收和产量的影响[J].大豆科学,2011,30(5):769-776.
- [15] 任金涛,张家新,白盼盼,等.种植密度对膜下滴灌春大豆根系生长及产量的影响[J].大豆科学,2022,41(6):679-687.
- [16] 赵占营,楚光红,李思忠,等.栽培密度对高产大豆根系生长及花荚形成的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(5):62-69.
- [17] 盖志佳.氮肥密度互作对大豆产量影响的生理机制研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2017.
- [18] 黄 甜,黄俊霞,闫晓艳,等.多效唑对繁茂度不同株型大豆产量及生理调控的影响[J].东北农业科学,2021,46(3):20-23,33.
- [19] 涂心海,牛 超.夏大豆干物质生产、光合生理特性对群体调控的反应[J].陕西农业科学,2022,68(4):70-75.
- [20] 马兆惠,车仁君,王海英,等.种植密度和种植方式对超高产大豆根系形态和活力的影响[J].中国农业科学,2015,48(6):1084-1094.
- [21] 章建新,李劲松.窄行密植对高产春大豆根系生长的影响[J].大豆科学,2007,26(4):500-505.
- [22] 杜吉到,蔡纯意.不同密度下大豆根部性状的研究[J].干旱地区农业研究,2011,29(4):219-222.
- [23] 王 瑞,朱文文,马腾武,等.高产春大豆冠层光合物质生产及转运特性研究[J].东北农业科学,2023,48(2):13-17.
- [24] 于晓波,梁建秋,何泽明,等.株行距配置对大豆农艺性状和产量的影响[J].大豆科学,2021,40(4):482-489.

(责任编辑:范杰英)

(上接第19页)

- [13] Griffith O W. Determination of glutathione and glutathione disulfide using glutathione reductase and 2-vinylpyridine[J]. *Analytical Biochemistry*, 1980, 106: 207-212.
- [14] 刘俊美,单长卷.硒对镉胁迫下玉米幼苗生理特性的影响[J].东北农业科学,2020,45(3):1-5.
- [15] Zheng C, Jiang D, Liu F, et al. Exogenous nitric oxide improves seed germination in wheat against mitochondrial oxidative damage induced by high salinity[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 67(1): 222-227.
- [16] 曲 敏,秦丽楠,刘羽佳,等.两种检测SOD酶活性方法的比较[J].食品安全质量检测学报,2014,5(10):3318-3323.
- [17] 刘晓娟,程 滨,赵瑞芬,等.硒对镉胁迫下茄子生理特性及镉吸收的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):357-363.
- [18] 刀静梅,王思媛,邓 军,等.镉、铅和铬胁迫在甘蔗伸长期积累特征[J].中国糖料,2019,41(1):19-22.
- [19] 汤 茜,朱四喜,赵 斌,等.湿地植物再力花对镉胁迫的生理生化响应[J].科学技术与工程,2018,18(35):108-115.
- [20] 周希琴,吉前华.镉胁迫对不同玉米品种种子萌发生理生态的影响[J].湖北农业科学,2005(4):41-45.
- [21] 田保华,张彦洁,张丽萍,等.镉/铬胁迫对谷子幼苗生长和NADPH氧化酶及抗氧化酶体系的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(2):240-246.
- [22] 王碧霞. NaCl 和 Cr³⁺ 胁迫对藜草幼苗的生长及抗氧化酶活性的影响[J].天津农业科学,2017,23(9):1-6,15.
- [23] 管利凤,唐才宝,曾红丽,等.外源氯化镉对干旱胁迫下水稻幼苗生长及生理特性的影响[J].激光生物学报,2019,28(5):468-474,467.
- [24] 曹艳玲,曹嘉雯,裴红宾.硝酸镉浸种对低磷胁迫下红小豆幼苗生长的影响[J].种子,2019,38(5):23-27.
- [25] 徐传婕,许文峰,施志鹏,等.镉、硒浸种对冬小麦种子萌发及铜胁迫下幼苗生长和生理的影响[J].天津农业科学,2019,25(11):7-11.
- [26] 高永生,陈集双.盐胁迫下镉对小麦幼苗叶片抗氧化系统活性的影响[J].中国稀土学报,2005(4):490-495.
- [27] 单长卷,李 滢,赵元增,等.氯化镉对矮抗58幼苗叶片抗旱生理特性的影响[J].灌溉排水学报,2014,33(Z1):99-102.

(责任编辑:范杰英)