

种植密度对绿豆根系形态、光合特性及产量的影响

刘思家¹, 王小林^{1,2}, 李博洋¹, 刘乔¹, 张修春¹, 李欣怡¹, 张雄^{1,2}

(1. 榆林学院 生命科学学院, 陕西 榆林 719000; 2. 陕西省陕北旱区作物节水工程技术研究中心, 陕西 榆林 719000)

摘要: 为探究陕北旱区绿豆种植密度与根系形态和光合特性的关联机制, 以陕西省榆林市横山区特色绿豆品种榆绿1号为试验材料, 采用随机区组设计, 设置5.70万(D1)、6.60万(D2)、7.95万株/hm²(D3)3个种植密度, 并分析种植密度对根系形态、叶片光合特性的影响。结果表明, 与D2、D3处理相比, D1处理的绿豆根长和根表面积分别提高29%、2%; 绿豆的净光合速率、蒸腾速率在整个生育期整体趋势呈现W型, 3个处理间差异不显著; 胞间二氧化碳浓度在鼓粒期达到最大, D2、D3处理比D1处理胞间二氧化碳浓度分别提高14%和27%; 3个处理下, 株高、茎粗、生物量均随种植密度的增加呈现略微下降的趋势, 处理间差异不显著; 相比D2、D3处理, D1处理的绿豆产量分别提高了5%和32%。相关性分析结果发现, 净光合速率、气孔导度分别与蒸腾速率呈极显著正相关, 产量分别与根质量、茎质量呈显著正相关和极显著正相关。综上, 不同种植密度对根系形态均有所调节, 能显著优化调节花荚期光合生理特性, 改变根茎叶干物质积累和分配, 促进干物质向籽粒转移, 进而促进绿豆产量增加。综合比较发现, 绿豆榆绿1号种植密度为5.70万株/hm²时最适宜陕北干旱地区种植。

关键词: 榆绿1号; 种植密度; 光合特性; 根系形态; 产量

中图分类号: S522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2481(2024)05-0024-09

Effects of Planting Density on Root Morphology, Photosynthetic Characteristics and Yield of Mung Bean

LIU Sijia¹, WANG Xiaolin^{1,2}, LI Boyang¹, LIU Qiao¹, ZHANG Xiuchun¹, LI Xinyi¹, ZHANG Xiong^{1,2}

(1. College of Life Sciences, Yulin University, Yulin 719000, China; 2. Engineering and Technology Research

Center of Water Saving for Crops in Arid Area of Northern Shaanxi Province, Yulin 719000, China)

Abstract: To explore the correlation mechanism of mung bean planting density and root morphology and photosynthetic characteristics in arid areas in northern Shaanxi, in this study, taking a characteristic mung bean variety Yulu1 in Hengshan district of Yulin city of Shaanxi province as the tested material, the random group design was applied to set up 3 planting densities including 5.70(D1), 6.60(D2), and 79 500 strains/ha(D3), and the influence of planting density on root morphology and leaf photosynthetic characteristics was analyzed. The results indicated that compared with the D2 and D3 treatments, the root length and root surface area of mung bean in the D1 treatment increased by 29% and 2% respectively. The net photosynthetic rate and transpiration rate of mung bean were generally W-shaped throughout the growth period, there was no significant differences between the 3 treatments. Intercellular CO₂ concentration reached its maximum during the bulge phase, D2 and D3 treatment increased the intercellular CO₂ concentration by 14% and 27% respectively compared with D1 treatment. Under 3 treatments, plant height, stem diameter, and biomass all showed a slight decrease with the increase of planting density, there was no significant differences between the treatments. Compared with the D2 and D3 treatments, D1 treatment increased yield of mung bean by 5% and 32%, respectively. Correlation analysis found that net photosynthetic rate and stomatal conductivity were extremely significantly positively correlated with transpiration rate, respectively, and yield was significantly positively correlated with root mass and was extremely significantly positively correlated with stem mass, respectively. In conclusion, different planting densities could regulate the root morphology, which could significantly optimize and regulate the photosynthetic physiological characteristics at the flower pod stage, change the accumulation and distribution of dry matter in roots, stems, and leaves, promote the transfer of dry matter to grains, and then promote the increase of mung bean yield. Therefore, after comprehensive comparison, when the planting density of the mung bean variety Yulu 1 was 5.70 10 000 plants/ha, it was the most suitable for planting in the arid areas in northern Shaanxi.

收稿日期: 2024-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(地区)项目(32260078); 中央引导地方科技发展基金陕西省工程技术研究中心项目(2022ZY2-GCZX-05); 陕西省农业农村厅科技创新驱动项目(2022NYT01); 榆林市科技局产学研合作项目(CXY-2021-83)

作者简介: 刘思家(1995-), 女, 山东平度人, 在读硕士, 研究方向: 农业节水。

通信作者: 张雄(1970-), 男, 陕西榆林人, 教授, 博士, 主要从事水分生理生态及作物高产高效生物学基础研究工作。

Key words: mung bean Yülü 1; planting density; photosynthetic characteristics; root morphology; yield

我国秦岭淮河线以北的干旱半干旱地区约占国土总面积的56%^[1],在耕地面积难以扩大的前提下,提升旱地农业生产对缓解粮食供给压力有着极为重要的作用^[2]。绿豆是我国陕北地区重要的小杂粮作物,具有耐瘠、耐旱、固氮能力强的特点,也是我国干旱半干旱地区现代农业种植结构调整的重要作物。目前,我国绿豆生产在种植栽培上管理粗放,造成绿豆品种增产潜力难以发挥,因此,如何提高绿豆产量成为绿豆生产中亟待解决的问题。

有研究表明,种植密度对作物地上部光合特性和根系生长具有显著的影响^[3]。在高密度条件下,有限的环境空间内,大豆单株地上部和地下部生长面积减小,竞争加剧,致使花荚脱落,产量降低^[4];在低密度条件下,个体表现优异,但因缺少个体数量而影响群体产出^[5-6]。合理的栽培密度可以更好地构建根系、冠层结构,从而提高根系、冠层对水、养分、光的吸收和利用效率,提高植株之间的气体交换效率,缓解由于种植密度过高造成根系重叠、遮阴加剧和透光率下降等问题,促进地上和地下器官的协调生长,优化光合产物的合理分配^[7],促进根吸收养分与水分的能力,从而增加绿豆产量和提高绿豆品质。前人对于绿豆增产的研究主要集中在不

同覆膜方式^[8-9]、选育优良品种^[10-11]、集雨补灌^[12]、复合种植^[13]等方面,鲜有在种植密度对绿豆根系形态与光合特性等的报道。

基于此,为探索黄土旱区绿豆种植密度与根系形态和光合特性的关联机制,本试验以本地特色绿豆品种榆绿1号为研究材料,通过分析对比3个种植密度下绿豆根系形态、光合性能、生物量和产量等相关指标的动态变化以及相关性分析,以期对绿豆的合理密植、高产高效栽培提供理论参考与数据支撑。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验于2020年在陕西省榆林市榆阳区鱼河峁镇进行,该地位于毛乌素沙地与黄土丘陵区交界地带,是我国绿豆适种区^[8]。该地地势北高南低,其气候属温带大陆性半干旱季风气候。多年平均气温为8.1℃,极端最低气温为-32.7℃,极端最高气温为38.6℃,无霜期平均为155d。年平均日照时数为2 925.7 h,年平均降水量为358.1 mm,降水多集中在每年的7—9月(表1)。

表1 绿豆生育期内温度与总降雨量变化

Tab.1 Changes in temperature and total rainfall during growth stages of mung bean

气象要素 Meteorologic elements		月份 Month								
		3	4	5	6	7	8	9	10	11
高温/℃	High temperature	13.0	18.0	26.0	30.0	29.0	26.0	23.0	15.0	8.0
低温/℃	Low temperature	-1.0	4.0	11.0	16.0	18.0	16.0	11.0	2.0	-3.0
总降雨量/mm	Total rainfall	0.0	1.1	0.3	8.4	54.7	47.7	89.3	1.7	19.7

1.2 试验材料

供试绿豆品种为榆绿1号,该品种为榆林横山区适种品种,具有成熟荚果不炸裂的特点。

1.3 试验方法

该试验采用随机区组的设计方案,设置3个不同密度的处理:分别为低密度(常规种植密度)5.70万株/hm²(D1),中密度6.60万株/hm²(D2),高密度7.95万株/hm²(D3),每个处理3次重复。行距为0.5 m,株距根据密度不同有所调整。每个小区面积3 m×7 m,过道为1 m,小区四周留有保护行。当出苗后,第1个三复叶完全展开后,开始间苗、定苗。除种植前按照1 200 kg/hm²施有机肥外,整个生育期不再施肥。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 根系形态的测定 在绿豆成熟期取样,每个小区选取具有代表性的植株3棵,分离根系与地上部分,分别标记封装。带回实验室清洗根系,用根系扫描仪(Epson V800)进行扫描,再经根系分析系统(Win RHIZO)分析获得根系形态指标数据。

1.4.2 光合特性的测定 在绿豆关键生育期(幼苗期(T1)、分枝期(T2)、花荚期(T3)、鼓粒期(T4)、成熟期(T5)),使用Li-6400光合仪(美国Li-COR公司)测叶片光合生理参数。测量在晴天9:00—11:00进行;使用SPAD-502叶绿素测定仪测定植株上层三出复叶中间叶片叶绿素相对含量,每个处理选择整体长势相似的植株各重复测3次,取平均值。

1.4.3 生物量的测定 在绿豆成熟区每个处理选取具有代表性的植株各 3 棵,在绿豆生根处剪断,分开根、茎、叶。将分开的鲜样放入 105 °C 烘箱烘 0.5 h,再将温度调到 80 °C 烘干并称质量。

1.4.4 农艺性状的测定 在绿豆成熟期时,选取每个小区内长势相似的绿豆植株,使用卷尺测量植株的株高,游标卡尺测量茎粗,同时计数植株的分枝数,3 次重复取平均值。

1.4.5 产量的测定 绿豆收获期持续时间较长,一般会分 2 批采摘。每个小区选取 6 m² 的区域采摘成熟绿豆,重复 3 次,并分别标记。最后将每个小区的产量换算成公顷产量(kg/hm²),取平均值。

1.5 数据分析

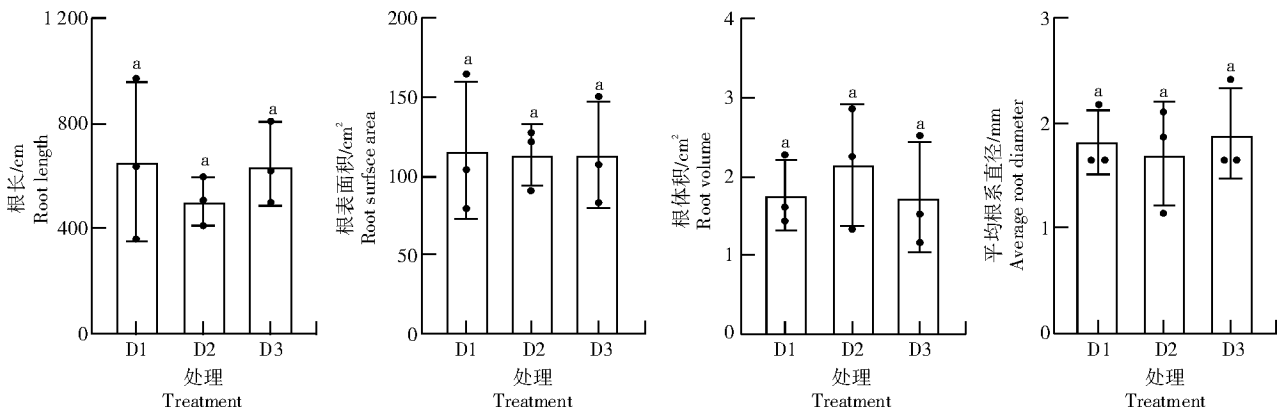
采用 Excel 2010 和 SPSS 24.0 软件进行数据整理、单因素检验与相关性分析,用 Graphpad Prism 9.5.0 进行图像绘制。绿豆瞬时水分利用效率按照下列公式计算。

$$\text{叶片瞬时水分利用效率(LWUE)} = \frac{\text{净光合速率(Pn)}}{\text{蒸腾速率(Tr)}}^{[14]} \quad (1)$$

2 结果与分析

2.1 种植密度对绿豆根系形态的调控作用

不同种植密度条件下绿豆成熟期根系形态表现不同(图 1),3 个密度处理的根长、根表面积、根体积、平均根系直径彼此之间差异不显著。根长与平均根系直径整体呈先下降后上升的趋势。总体来说,根长 D1 处理占有优势,D2、D3 处理的根长比 D1 处理降低 23%、2%;平均根系直径,D2 处理的平均根系直径比 D1 处理降低 6%,D3 处理的平均根系直径比 D1 处理提高 4%;根表面积,D2、D3 处理的根表面积均比 D1 处理降低 2%;根体积与根长的变化趋势正好相反,呈先上升后下降的趋势。其中,D2 处理比 D1 处理提高 21%,D3 处理比 D1 处理降低了 1%。



不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。下图同

The different lowercase letters in the same column indicated significant differences between different treatments at the 0.05 level. The same as below

图 1 不同种植密度下绿豆根长、根表面积、根体积、平均根系直径的分析
Fig.1 Analysis of the root length, root surface area, root volume, and average root diameter of mung bean at different planting densities

2.2 种植密度对绿豆光合生理特性的调控作用

2.2.1 种植密度对绿豆叶绿素相对含量(SPAD)的影响 叶绿素在光合作用中具有将光能转化成化学能的作用。其含量的多少决定着叶片功能期的长短^[15]。不同种植密度的绿豆叶绿素含量在不同发育时期的变化趋势各有不同(图 2)。T2 至 T4 时期,SPAD 值随着密度的增加呈先降低后上升的趋势,在 T3、T4 时期差异显著。3 个种植密度 SPAD 值均在 T3 时期最高,与 D2 处理相比,D1 与 D3 处理分别提高 20% 和 37%;在 T4 时期,与 D2 处理相比,D1 与 D3 处理分别提高 16% 和 12%;在 T5 时期差异显著,且 SPAD 值随着种植密度的增加呈增加趋势,与 D1 处理相比,D2、D3 处理 SPAD

值均提高 38%。

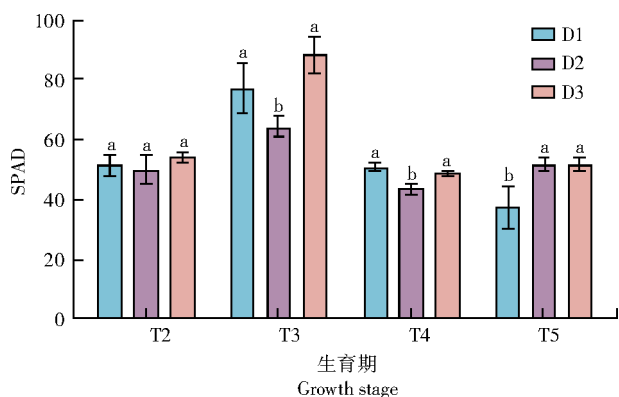


图 2 不同种植密度下绿豆叶绿素相对含量 (SPAD) 的分析
Fig.2 Analysis of the relative chlorophyll content (SPAD) of mung bean at different planting densities

2.2.2 种植密度对绿豆光合生理参数的影响 随着生育期的推进,3个不同种植密度的绿豆光合特性各不相同(图3)。净光合速率(图3-A)整体呈现W型趋势,3个种植密度的净光合速率都在T3时期达到最高,T2与T3时期差异显著。T2时期D3处理与D1、D2处理相比分别增加115%、89%,T3时期D3处理与D1、D2处理相比分别增加37%、47%,T3时期3个密度分别比T2时期增加了145%、101%、56%,T4时期与T3时期相比,又分别降低27%、34%、51%。气孔导度(图3-B)在T1、T2、T3、T5时期随着种植密度的增加呈现先下降后上升的趋势,在T4时期随着密度的增加呈现上升趋势,T2、T3、T4时期3个处理间差异显著。T2时期,D3处理与D1、D2处理相比增加133%、

153%,T3时期,D3处理与D1、D2处理相比增加74%、94%,T4时期,D3处理与D1、D2处理相比增加56%、33%。胞间CO₂浓度(图3-C),在3个种植密度整个生育期走势较为一致,大体是先下降再升高再下降的趋势。T3、T4时期3个处理间差异显著,T3时期,D3处理与D1、D2处理相比分别增加22%、19%,在T4时期,D3处理与D1、D2处理相比增加27%、12%。蒸腾速率(图3-D),T1、T2、T3时期随着密度的增加先下降后上升,T4、T5时期随着密度增加逐渐升高,在T1、T2、T3时期3个处理间差异显著。在T1时期,D3处理与D2处理相比增加23%,在T2时期,D3处理与D1、D2处理相比增加93%、96%。在T3时期,D3处理与D1、D2处理相比增加52%、66%。

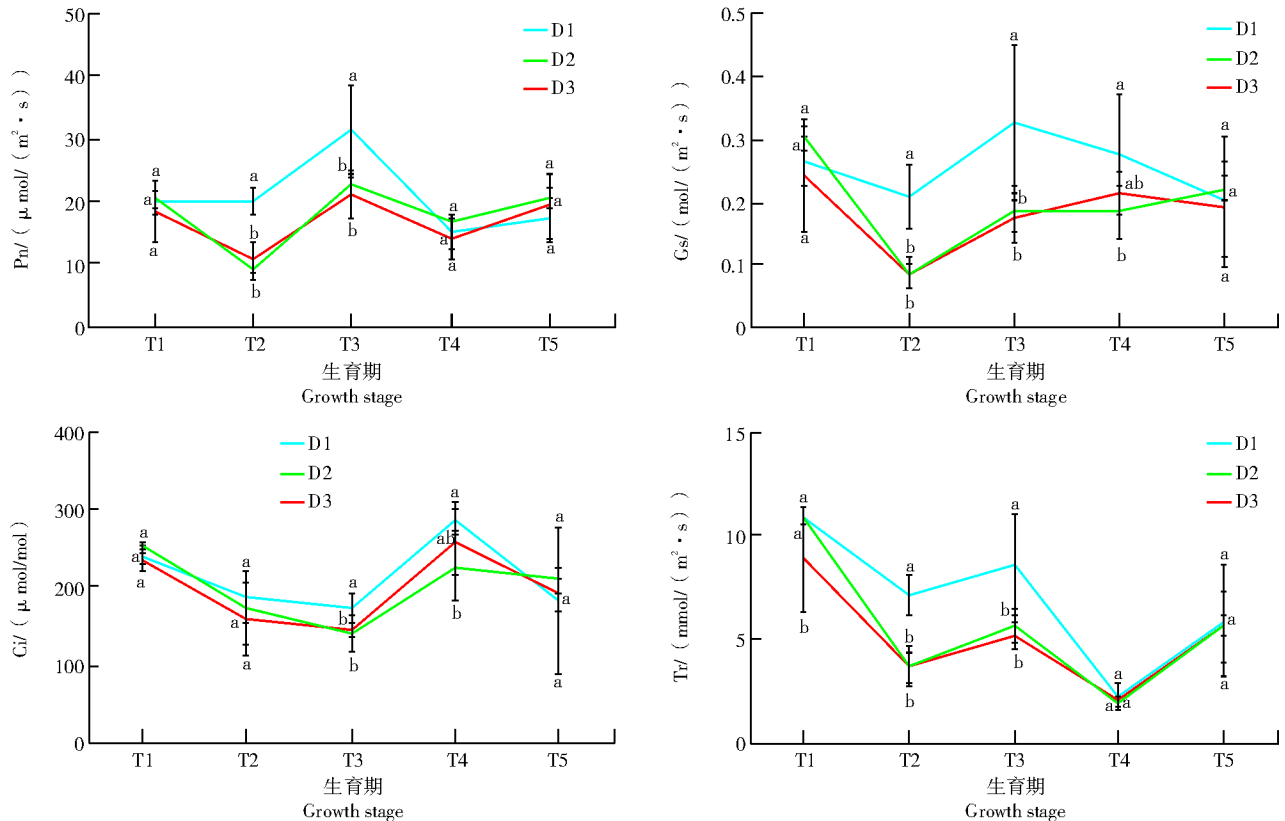


图3 不同种植密度下绿豆净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间CO₂浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr)的分析
Fig.3 Analysis of net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), intercellular CO₂ concentration (Ci), and transpiration rate (Tr) of mung bean at different planting densities

2.3 种植密度对绿豆叶片水分利用效率的调控作用

叶片水分利用效率在整个生育期呈现先上升后下降的趋势,在T1与T4时期处理间差异显著,其他3个时期3个处理间差异性不显著(图4)。T1时期,D2处理比D1、D3处理提高12%、15%;T4时期,D1处理比D2、D3处理分别提高28%、33%。其中T4时期的水分利用效率最高,T4与T1时期

相比3个种植密度的水分利用效率分别提高383%、237%、274%,T4与T2时期相比3个种植密度的水分利用效率分别提高242%、133%、139%,T4与T3时期相比3个种植密度的水分利用效率分别提高120%、70%、83%,T4与T5时期相比3个种植密度的水分利用效率分别增加60%、51%、49%。

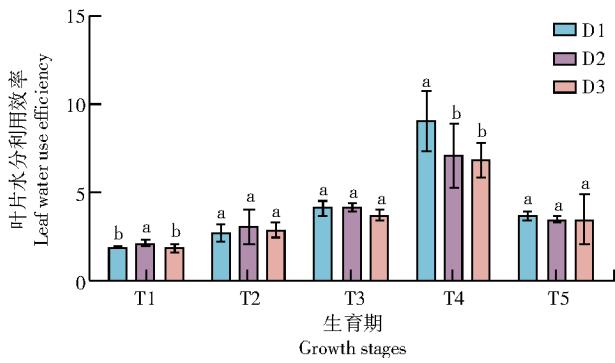


图4 不同种植密度下绿豆叶片水分利用效率的分析
Fig.4 Analysis of water use efficiency of mung bean leaves at different planting densities

2), 除分枝数外, 其他都随着种植密度的增加依次减小。除茎粗、茎质量、叶片干质量外, 其他性状的不同处理间均差异显著。株高 D2、D3 处理分别比 D1 处理的株高降低 12% 和 23%; 茎粗 D2、D3 处理分别比 D1 处理降低了 11%、12%; 茎干质量 D2、D3 处理分别比 D1 处理降低 9%、59%; 叶片干质量 D2、D3 处理分别比 D1 处理降低 16%、38%; 分枝数 D3 处理分别与 D1、D2 处理差异显著, 且均提高 116%; 根质量 D1、D2 处理分别与 D3 处理差异显著, D2、D3 处理分别比 D1 处理降低 5%、52%; 产量整体呈现随种植密度增加逐渐下降的趋势, 且 D1、D2 处理与 D3 处理差异显著, 分别比 D1 处理降低 5% 和 32%。

2.4 种植密度对绿豆农艺性状、生物量及籽粒产量的调控作用

绿豆成熟期农艺性状、生物量及产量变化(表

表2 不同种植密度下绿豆农艺性状、生物量以及籽粒产量的分析
Tab.2 Analysis of agronomic traits, biomass, and grain yield of mung bean at different planting densities

处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem diameter	茎干质量/g Stem dry weight	叶片干质量/g Leaf dry weight	分枝数 Branch number	根干质量/g Root dry weight	产量/(kg/hm ²) Yield
D1	50.20±8.15a	11.30±0.87a	21.24±12.93a	18.38±13.78a	4.00±1.00b	2.78±0.25a	1 793.70±8.03a
D2	44.07±2.30ab	10.03±0.64a	19.24±2.18a	15.46±5.44a	4.00±1.00b	2.65±0.97a	1 699.75±9.83a
D3	38.47±1.25b	9.95±1.98a	8.64±0.68a	11.34±1.93a	8.67±2.52a	1.34±0.51b	1 219.95±8.35b

注: 同列不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。
Note: The different lowercase letters in the same colutnn indicated significant differences between different treatments at the 0.05 level.

2.5 根系形态、光合参数、生物量和产量的相关性分析
根系形态、光合参数、生物量和产量的相关性

分析如表 3 所示。

表3 根系形态、光合参数、生物量和产量的相关性分析
Tab.3 Correlation between root morphology, photosynthetic parameters, biomass, and yield

性状 Trait	MPLE	MPSU	MPAV	MPVO	FFPCH	FFPPn	FFPGs	FFPCi	FFPTr
MPLE	1	0.548	-0.994	0.88	0.859	0.565	0.544	0.345	0.555
MPSU		1	-0.455	0.084	0.042	-0.381	-0.404	-0.596	-0.392
MPAV			1	-0.926	-0.909	-0.650	-0.631	-0.444	-0.641
MPVO				1	0.999*	0.889	0.878	0.750	0.884
FFPCH					1	0.908	0.897	0.777	0.903
FFPPn						1	1.000*	0.969	1.000**
FFPGs							1	0.975	1.000**
FFPCi								1	0.972
FFPTr									1
FFPWE									
MPPH									
MPSD									
MPRW									
MPSW									
MPLW									
MPBN									
OP									

续表3 根系形态、光合参数、生物量和产量的相关性分析
 Tab.3(Continued) Correlation between root morphology, photosynthetic parameters, biomass, and yield

性状 Trait	FFPWE	MPPH	MPSD	MPRW	MPSW	MPLW	MPBN	OP
MPLE	-0.483	0.089	0.509	-0.370	-0.307	-0.035	0.445	-0.303
MPSU	0.468	0.882	0.999*	0.575	0.628	0.817	-0.506	0.632
MPAV	0.574	0.018	-0.414	0.467	0.408	0.142	-0.538	0.403
MPVO	-0.841	-0.395	0.038	-0.767	-0.723	-0.506	0.817	-0.719
FFPCH	-0.863	-0.434	-0.004	-0.794	-0.751	-0.542	0.841	-0.748
FFPPn	-0.995	-0.772	-0.423	-0.976	-0.959	-0.844	0.990	-0.957
FFPGs	-0.997*	-0.787	-0.445	-0.981	-0.966	-0.857	0.993	-0.964
FFPCi	-0.989	-0.904	-0.632	-1.000*	-0.999*	-0.950	0.994	-0.999*
FFPTr	-0.996	-0.779	-0.434	-0.978	-0.962	-0.851	0.992	-0.961
FFPWE	1	0.829	0.508	0.992	0.982	0.892	-0.999*	0.981
MPPH		1	0.903	0.892	0.920	0.992	-0.853	0.922
MPSD			1	0.612	0.663	0.843	-0.545	0.667
MPRW				1	0.998*	0.941	-0.997	0.997*
MPSW					1	0.962	-0.989	1.000**
MPLW						1	-0.911	0.963
MPBN							1	-0.988
OP								1

注:*和**分别表示在0.05级别和0.01级别(双尾),相关性显著。MPLE.成熟期根长;MPSU.成熟期根表面积;MPAV.成熟期平均根系直径;MPVO.成熟期根体积;FFPCH.花荚期叶绿素含量;FFPPn.花荚期净光合速率;FFPGs.花荚期气孔导度;FFPCi.花荚期胞间CO₂浓度;FFPTr.蒸腾速率;FFPWE.花荚期叶片水分利用效率;MPPH.成熟期株高;MPSD.成熟期茎粗;MPRW.成熟期根干质量;MPSW.成熟期茎干质量;MPLW.成熟期叶干质量;MPBN.成熟期分枝数;OP.产量。

Note: * and ** indicated a significant correlation at the levels 0.05 and 0.01, respectively(double tail). MPLE. root length at the mature stage; MPSU. root surface area at the mature stage; MPAV. mean root diameter at the mature stage; MPVO. root volume at the mature stage; FFPCH. chlorophyll content at the flower pod stage; FFPPn. net photosynthetic rate at the flower pod stage; FFPGs. stomatal conductivity at the flower pod stage; FFPCi. intercellular CO₂ concentration at the flower pod stage; FFPTr. transpiration rate; FFPWE. leaf water use efficiency at the flower pod stage; MPPH. plant height at the mature stage; MPSD. stem diameter at the mature stage; MPRW. root dry weight at the mature stage; MPSW. stem dry weight at the mature stage; MPLW. leaf dry weight at the mature stage; MPBN. branch number at the mature stage; OP. yield.

由表3可知,相关性分析显示,根系形态中,成熟期根体积与花荚期叶绿素相对含量呈显著正相关($P < 0.05$),成熟期根表面积与茎粗呈显著正相关($P < 0.05$),其他性状与根系形态相关性不显著;光合特性中,蒸腾速率与花荚期净光合速率、花荚期气孔导度呈极显著正相关($P < 0.05$)。花荚期气孔导度与净光合速率呈显著正相关($P < 0.05$),与水分利用效率呈显著负相关($P < 0.05$);花荚期水分利用效率与成熟期分枝数呈显著负相关($P < 0.05$),与其他性状则相关性不显著;成熟期根干质量与茎质量呈显著正相关($P < 0.05$),而是成熟期根干质量和茎质量均与胞间CO₂浓度呈显著负相关($P < 0.05$);产量与花荚期胞间CO₂浓度呈显著负相关($P < 0.05$),与成熟期根干质量呈显著正相关($P < 0.05$),与茎质量呈极显著正相关($P < 0.01$)。

3 结论与讨论

种植密度是影响群体根系、冠层结构和产量的

主要栽培措施之一。合理密植能保证农作物最大限度地利用光能、水分和养分等资源,充分发挥品种的增产潜力^[16]。其中根系是植物最重要的养分和水分吸收器官,能感受土壤环境变化,并为此迅速做出响应,影响植株水分在各器官之间的运输、光合作用、蒸腾作用等一系列生理过程^[17-18]。根系扎的广且深更有利于提高农作物产量。张勇等^[19]通过对夏玉米的研究发现,随着种植密度的增加,根系干质量与根系长度均呈下降趋势。任金涛等^[20]研究发现,适宜的种植密度,能显著提高春大豆的侧根长度与根表面积,从而提高产量。本研究结果显示,低密度的种植模式能优化群体空间排布,绿豆的根系形态以及生物量更为突出,特别是根长和根表面积。高密度种植则引起根系重叠,觅食范围减小,激发了主茎附近根的增殖,致使部分高密度根系指标偏大,这与CABAL等^[21]研究结果一致,根系生长冗余,但总体单位面积分到的营养物质减少,植株长势变弱,表现出根系变短,这与王

丹等^[22]的研究结果一致,根干物质质量因此减少。

光合作用是作物中各种复杂新陈代谢过程的综合,也是作物生长发育和干物质形成过程的重要生理基础。叶绿素作为光的受体,在光合作用中起着重要的作用,其含量的高低直接反映了其对光合性能的影响^[23-24]。本研究结果表明,高密度可以刺激叶片更好的吸收太阳光,提高叶片的净光合速率、蒸腾速率,从而使叶片新陈代谢更旺盛。不同种植密度下,叶绿素含量、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率都在花荚期占优势,这可能因为花荚期是由营养生长转变为生殖生长的时期,叶绿素含量的增多以及光合作用的增强,满足了它对能源物质的需求以便于开花鼓粒。段义忠等^[24]研究了不同绿豆品种光合特性,指出净光合速率与气孔导度、蒸腾速率呈正相关。本研究结果表明,蒸腾速率与气孔导度、净光合速率分别呈极显著正相关;净光合速率在 T4 时期均急剧下降,而胞间 CO₂ 浓度在这个时期含量逐渐升高,这可能是由于水分缺失造成的。光合作用与产量之间关系非常复杂,它不仅仅是由这单一因素影响产量,张向前等^[25]通过研究发现籽粒产量 20%~30% 与光合作用有关。高小丽等^[26]研究指出,绿豆在开花后除 CO₂ 浓度以外其他光合特性会逐渐降低。这与本试验结果一致。较高的气孔导度是土壤水分充足的一个重要表现,这会造成不必要的水分流失和水分利用率降低^[27]。有生态经济理论认为,植物会降低对丰富资源的利用,进而提高对有限资源的利用^[28-29]。方园艺等^[30]通过研究表明,水分利用效率与光能利用效率成负相关。本研究结果表明,高种植密度气孔导度数值较高,表明土壤水分相对充足。高密度种植,势必会导致植株个体获得较低的光照,且在陕北地区 7—9 月份降雨量较多,且多以暴雨形式出现,在这种情况下,高密度的绿豆植株会降低水资源利用效率,提高光能利用效率,而低密度种植的绿豆植株拥有较高的光照资源,相比之下水资源有限,因此低密度绿豆植株会有较高的水分利用效率。

刘长远等^[31]通过研究牡豆的种植密度发现,在一定的密度种植范围下,随着密度的增加株高呈下降趋势。宋瑞军等^[32]研究发现茎粗会随着种植密度的增加而降低,这与本试验研究结果一致。作物的生长发育除了株高茎粗发生变化外,其他器官也在不断的变化。高产品种的绿豆在花荚期之后各器官的干物质积累和运转能力强,特别是叶干质量增多,具有较大的“源”促植株向籽粒传输营养物

质就强,产量就因此更多^[15]。任金涛^[33]通过研究发现,随着密度的增加,单株和各器官生物量会逐渐降低。王冬昭等^[34]通过研究发现,地上干物质和根部干物质均与产量具有极显著正相关关系。本研究结果显示,随着种植密度的增加根、茎、叶干物质积累逐渐减少,其向籽粒传输营养物质变弱。产量也因此逐渐降低。绿豆产量与根质量具有显著正相关关系,与茎质量具有极显著正相关关系。

本研究中,不同种植密度对绿豆根系形态、光合生理特性、农艺性状以及产量的影响不同。根系形态会随着密度梯度的不同略有调节,低密度处理下根系分布广,特别是根长与根表面积占有相对的优势,高密度处理下的根系平均直径较大。光合生理特性则对密度梯度响应差异较大,高密度的光合特性在花荚期增加更为显著,除花荚期之外光合特性增加不显著或略有升高。种植密度梯度能够显著改变株高、茎粗以及干物质积累,提高干物质向籽粒方向转移。农艺性状、生物量以及产量随着密度的增加逐渐降低。相关分析表明,花荚期的蒸腾速率与气孔导度、净光合速率之间呈极显著正相关,产量分别与成熟期根干质量呈显著正相关与成熟期茎干质量呈极显著正相关。

参考文献:

- [1] 张义丰,王又丰,刘录祥,等. 中国北方旱地农业研究进展与思考[J]. 地理研究,2002,21(3):305-312.
ZHANG Y F, WANG Y F, LIU L X, et al. Research progress on arid-land agriculture in Northern China[J]. Geographical Research, 2002, 21(3):305-312.
- [2] WU S H, YIN Y H, ZHENG D, et al. Aridity/humidity status of land surface in China during the last three decades[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2005, 48(9): 1510-1518.
- [3] 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.
GAI Z J. Effects of fertilizer-N and density interaction on soybean yield and studies on physiological mechanism[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017.
- [4] 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,2006,34(2):8-10.
WANG S Q, GAO J L, LIU K L, et al. Study on the formation and shedding of soybean flower pods[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2006, 34(2):8-10.
- [5] 殷丽丽,邢宝龙,陈晓亮. 种植密度对晋北区绿豆农艺性状及产量的影响[J]. 中国农业科技导报,2020,22(7):124-129.
YIN L L, XING B L, CHEN X L. Effects of planting density on agronomic traits and yield of mung bean in North Shanxi province[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(7):124-129.
- [6] 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.
ZHANG W, ZHANG H J, WANG H Y, et al. Effects of spacings and planting densities on agronomic traits and yield in high-oil soybeans[J]. Soybean Science, 2006, 25(3): 283-287.
- [7] 于晓波, 梁建秋, 何泽民, 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.
YU X B, LIANG J Q, HE Z M, et al. Effects of different spacing configurations on soybean agronomic traits and yield[J]. Soybean Science, 2021, 40(4): 482-489.
- [8] 王小英, 王斌, 王孟, 等. 不同覆膜栽培模式对绿豆主要农艺性状及产量的影响[J]. 农业科技通讯, 2023(9): 79-82, 91.
WANG X Y, WANG B, WANG M, et al. Effects of different plastic film mulching cultivation modes on main agronomic characters and yield of mung bean[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2023(9): 79-82, 91.
- [9] 高伟, 张泽燕, 郝青婷, 等. 不同种植密度及覆膜对绿豆产量的影响[J]. 山西农业科学, 2020, 48(10): 1602-1605.
GAO W, ZHANG Z Y, HAO Q T, et al. Effects of different planting density and film mulching on mung bean yield[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, 48(10): 1602-1605.
- [10] 王彩萍, 侯小峰, 宋瑞军, 等. 抗旱耐连作绿豆新品种‘汾绿豆4号’选育研究[J]. 农学学报, 2023, 13(2): 1-4.
WANG C P, HOU X F, SONG R J, et al. The new mung bean variety ‘Fen mung bean No.4’ with tolerance to drought and continuous cropping: breeding research[J]. Journal of Agriculture, 2023, 13(2): 1-4.
- [11] 何大智, 王涛, 卢平, 等. 种植密度对安豆8号主要农艺性状、经济性状及产量的影响[J]. 大豆科技, 2023(1): 21-25.
HE D Z, WANG T, LU P, et al. Effects of planting density on the main agronomic, economic characters and yield of Andou 8 [J]. Soybean Science & Technology, 2023(1): 21-25.
- [12] 纪晓玲, 张静, 刘建华, 等. 膜际集雨补灌对绿豆水分利用效率及产量的影响[J]. 榆林学院学报, 2019, 29(2): 65-69.
JI X L, ZHANG J, LIU J H, et al. Effects of inter-membrane supplementary irrigation with rainfall harvesting on water use efficiency and yield of mung bean[J]. Journal of Yulin University, 2019, 29(2): 65-69.
- [13] 郑海泽, 曲运琴, 张红芳. 冬小麦-绿豆轮作下密度对绿豆产量及土壤理化性质的影响[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(17): 34-37.
ZHENG H Z, QU Y Q, ZHANG H F. Effects of planting density on the yield of mung bean and soil physicochemical properties in winter wheat-mung bean rotation system[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2023, 51(17): 34-37.
- [14] 柳絮. 种植方式和密度对谷子光合性能和产量的影响[J]. 基层农技推广, 2023, 11(7): 12-15.
LIU X. Effect of planting mode and density on photosynthetic performance and yield of millet millet [J]. Grassroots level, 2023, 11(7): 12-15.
- [15] 高小丽. 不同基因型绿豆开花结荚期生理特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
GAO X L. Study on physiological characteristics of different genotypes of mung bean at flowering and podding stage[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2007.
- [16] 张翼飞, 于崧, 张文超, 等. 播期和密度对绿豆生长、干物质积累及产量的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2016(11): 26-33.
ZHANG Y F, YU S, ZHANG W C, et al. Effects of seeding date and planting density on growth, dry matter accumulation and yield component of mung bean[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016(11): 26-33.
- [17] 闫士朋, 冯焕琴, 杨宏伟, 等. 氮肥不同施用量及基追比对藜麦根系生理及同化物分配的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(4): 105-115.
YAN S P, FENG H Q, YANG H W, et al. Effects of nitrogen fertilizer application amount and ratio of base to topdressing fertilizer on physiological traits and assimilate distribution of root of quinoa[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019(4): 105-115.
- [18] 王玉阳, 陈亚鹏. 植物根系吸水模型研究进展[J]. 草业学报, 2017, 26(3): 214-225.
WANG Y Y, CHEN Y P. Research progress in water uptake models by plant roots[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(3): 214-225.
- [19] 张勇, 徐田军, 吕天放, 等. 种植密度对夏播玉米茎秆质量和根系表型性状的影响[J]. 生物技术通报, 2023, 39(8): 70-79.
ZHANG Y, XU T J, LYU T F, et al. Effects of planting density on the stem quality and root phenotypic characters of summer sowing maize[J]. Biotechnology Bulletin, 2023, 39(8): 70-79.
- [20] 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.
REN J T, ZHANG J X, BAI P P, et al. Effects of density on root growth and yield of spring soybean under mulched drip irrigation[J]. Soybean Science, 2022, 41(6): 679-687.
- [21] CABAL C, MARTÍNEZ-GARCÍA R, DE CASTRO AGUILAR A, et al. The exploitative segregation of plant roots [J]. Science, 2020, 370: 1197-1199.
- [22] 王丹, 张永清, 张萌, 等. 根土空间与种植密度互作对藜麦根系分布及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(21): 79-86.
WANG D, ZHANG Y Q, ZHANG M, et al. Influences of interaction between soil root-growing space and planting density on root distribution and yield of quinoa[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(21): 79-86.
- [23] 王彦钦, 孟宪刚, 李武阳, 等. 衣藻对盐胁迫下小麦幼苗光合生理指标的影响[J]. 河南农业科学, 2023, 52(10): 22-29.
WANG Y Q, MENG X G, LI W Y, et al. Research progress on the effects of abiotic stress factors on wheat photosynthesis [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(10): 22-29.
- [24] 段义忠, 张雄, 亢福仁, 等. 不同绿豆品种光合特性及水分利用效率研究[J]. 陕西农业科学, 2014, 60(9): 1-7.
DUAN Y Z, ZHANG X, KANG F R, et al. Study on photosynthetic characteristics and water use efficiency of different mung bean varieties[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2014, 60(9): 1-7.
- [25] 张向前, 赵秀玲, 王钰乔, 等. 耕作方式对冬小麦灌浆期光合性能日变化和籽粒产量的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 885-893.

- ZHANG X Q, ZHAO X L, WANG Y Q, et al. Effects of tillage practices on photosynthetic performance diurnal variation during filling stage and grain yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(3): 885-893.
- [26] 高小丽, 孙健敏, 高金锋, 等. 不同基因型绿豆叶片光合性能研究[J]. 作物学报, 2007, 33(7): 1154-1161.
- GAO X L, SUN J M, GAO J F, et al. Photosynthetic performance in the leaves of different mung bean genotypes[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(7): 1154-1161.
- [27] MCAUSLAND L, VIALET-CHABRAND S, DAVEY P, et al. Effects of kinetics of light-induced stomatal responses on photosynthesis and water-use efficiency[J]. The New Phytologist, 2016, 211(4): 1209-1220.
- [28] JIANG Y, TIAN Y, ZHA T S, et al. Dynamic changes in plant resource use efficiencies and their primary influence mechanisms in a typical desert shrub community[J]. Forests, 2021, 12(10): 1372.
- [29] BLOOM A J, CHAPIN F S, MOONEY H A. Resource limitation in plants-an economic analogy[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1985, 16: 363-392.
- [30] 方园艺, 王立平, 刘春和, 等. 北京山区黄栌叶片水分和光能利用效率季节变化及影响因子[J]. 生态学报, 2024, 44(4): 1623-1632.
- FANG Y Y, WANG L P, LIU C H, et al. Seasonal dynamics of leaf water- and light-use efficiencies and their responses to biophysical factors of *Cotinus coggygia* in Beijing mountainous areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1623-1632.
- [31] 刘长远, 王磊, 齐玉鑫, 等. 播期、密度及施肥量对牡丹 15 主要农艺性状和光合特性的影响[J]. 大豆科学, 2023, 42(2): 212-219.
- LIU C Y, WANG L, QI Y X, et al. Effects of sowing date, density and fertilizer application amount on main agronomic traits and photosynthetic characters of Mudou 15[J]. Soybean Science, 2023, 42(2): 212-219.
- [32] 宋瑞军, 王彩萍, 侯小峰, 等. 播期密度互作对红小豆产量及农艺性状的影响[J]. 甘肃农业科技, 2022, 53(2): 32-38.
- SONG R J, WANG C P, HOU X F, et al. Effects of sowing date and planting density on yield and agronomic traits in adzuki bean[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2022, 53(2): 32-38.
- [33] 任金涛. 膜下滴灌条件下密度对春大豆生长发育及产量的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
- REN J T. Effects of density on growth and yield of spring soybean under mulched drip irrigation[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022.
- [34] 王冬昭, 饶德民, 李琪瑞, 等. 种植模式对高密度下不同耐密性大豆品种根形态的影响[J]. 东北农业科学, 2023, 48(6): 20-26.
- WANG D Z, RAO D M, LI Q R, et al. Effect of planting patterns on root morphology of soybean varieties with different density tolerance under high-density planting[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(6): 20-26.

著作权使用声明

本刊已许可中国知网以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含中国知网著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议, 请在投稿时说明, 本刊将按作者说明处理。

《山西农业科学》编辑部