

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.04058

氮肥与密度互作对单粒精播花生根系形态、植株性状及产量的影响

刘俊华^{1,3,**} 吴正锋^{2,**} 沈 浦² 于天一² 郑永美² 孙学武² 李 林¹
陈殿绪² 王才斌^{2,*} 万书波^{1,4,*}

¹ 湖南农业大学 / 湖南省花生工程技术研究中心, 湖南长沙 410128; ² 山东省花生研究所 / 国家花生工程技术研究中心, 山东青岛 266100; ³ 滨州学院生物与环境工程学院, 山东滨州 256600; ⁴ 山东省农业科学院 / 山东省作物遗传改良与生态生理重点实验室, 山东济南 250100

摘 要: 为明确花生单粒精播适宜的氮肥水平和种植密度, 本研究于 2018 年和 2019 年以‘花育 22’为供试花生品种, 设置 3 个氮肥水平(0 kg hm⁻², N0; 60 kg hm⁻², N1; 120 kg hm⁻², N2), 3 个种植密度(7.93 万株 hm⁻², D1; 15.86 万株 hm⁻², D2; 23.79 万株 hm⁻², D3), 采用二因素裂区试验设计, 研究氮肥、密度及其互作对单粒精播花生根系形态、植株性状及产量的影响。氮肥对花生根长、根表面积、根体积、根干重的影响不显著, 而密度的影响显著。单株根长、根表面积、根体积及根系干重随密度的增加而降低, D1 显著高于 D2 和 D3, D2、D3 处理间差异不显著; 单位面积根长、根表面积、根体积及根系干重随密度的增加而增加, D1 显著低于 D2 和 D3, D2、D3 处理间差异不显著。氮肥和密度互作对 2019 年收获期单位面积根长、根表面积的影响显著, 与 D1 相比, N1 处理下 D3 的增幅显著高于 N0 和 N2 处理。氮肥及氮肥与密度互作对植株性状的影响存在年度和时期间的差异, 主茎叶片数、侧枝数和主茎第一节间粗随密度增加有降低趋势。氮肥对荚果产量的影响不显著, 荚果产量随密度的增加呈增加的趋势。产量与根体积、根干重、主茎叶片数、主茎高及侧枝长呈显著正相关。综上所述, 在本试验条件下, 花生单粒精播适宜的氮肥(N)水平为 60 kg hm⁻², 种植密度为 18.8 万株 hm⁻²。

关键词: 氮肥; 密度; 花生; 单粒精播; 根系形态; 植株性状; 产量

Effects of nitrogen and density interaction on root morphology, plant characteristic and pod yield under single seed precision sowing in peanut

LIU Jun-Hua^{1,3,**}, WU Zheng-Feng^{2,**}, SHEN Pu², YU Tian-Yi², ZHENG Yong-Mei², SUN Xue-Wu², LI Lin¹, CHEN Dian-Xu², WANG Cai-Bin^{2,*}, and WAN Shu-Bo^{1,4,*}

¹ Hunan Agriculture University / Hunan Peanut Engineering Technology Research Center, Changsha 410128, Hunan, China; ² Shandong Peanut Research Institute / National Peanut Engineering Technology Research Center, Qingdao 266100, Shandong, China; ³ College of Biology and Environment Engineering, Binzhou University, Binzhou 256600, Shandong, China; ⁴ Shandong Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Crop Genetic Improvement and Ecological Physiology of Shandong Province, Jinan 250100, Shandong, China

Abstract: In order to determine the suitable nitrogen level and planting density for single seed precision sowing of peanut, field comparison experiments were conducted using Huayu 22 with three nitrogen levels at 0 (N0), 60 (N1), 120 (N2) kg hm⁻² and three planting densities at 79,300 (D1), 158,600 (D2), and 237,900 (D3) plants hm⁻² in 2018 and 2019. The effects of nitrogen,

本研究由国家重点研发计划项目(2018YFD1000906), 山东省自然科学基金项目(ZR2016CM07), 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-13)和山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010702)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFD1000906), the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2016CM07), the China Agriculture Research System (CARS-13), and the Major Scientific and Technological Innovation Projects in Shandong Province (2019JZZY010702).

* 通信作者(Corresponding authors): 万书波, E-mail: wanshubo2016@163.com, Tel: 0531-66658127; 王才斌, E-mail: caibinw@126.com, Tel: 0532-87632130

** 同等贡献(Contributed equally to this work)

第一作者联系方式: 刘俊华, E-mail: liujh516@163.com, Tel: 0543-3190096

Received (收稿日期): 2020-03-04; Accepted (接受日期): 2020-06-02; Published online (网络出版日期): 2020-06-30.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20200630.1330.004.html>

density and their interaction on root morphology, plant characteristics and yields of single seed precision sowing peanut were studied by the split plot design for two factors. Nitrogen fertilizer had no significant effect on root length, root surface area, root volume and root dry weight, whereas significant on density. Root length, root surface area, root volume and dry weight per plant decreased with the increase of density, D1 was significantly higher than D2 and D3, but there was no significant difference between D2 and D3 treatments. And root length, root surface area, root volume and dry weight of unit area increased with the increase of density, D1 was significantly lower than D2 and D3, and there was no significant difference between D2 and D3 treatments. The interaction of nitrogen and density had a significant effect on the root length and surface area of unit area in the harvest stage in 2019. Compared with D1, the increase range of D3 in N1 treatment was significantly higher than that of N0 and N2. As to plant characteristics, nitrogen fertilizer and the interaction of nitrogen fertilizer and density were different between years and periods, and with the increase of density, the number of leaves of main stem, the number of lateral branches and the first internode thickness of main stem decreased. The effects of nitrogen fertilizer on pod yield was not significant, whereas pod yield increased with the increase of density. Pod yields were positively correlated with root volume, root dry weight, leaves of main stem, height of main stem and length of lateral branches. In conclusion, considering the yield and benefit comprehensively, the suitable nitrogen fertilizer (N) level is 60 kg hm^{-2} and the planting density is $188,000 \text{ plants hm}^{-2}$.

Keywords: nitrogen; plant density; peanut; single seed sowing; root morphology; plant characteristic; pod yield

花生是我国重要的油料作物,目前生产用种量大、盲目或过量施肥,导致花生成本高、经济效益低、环境污染风险大,因此发展绿色节本增效生产具有重要的意义^[1]。花生单粒精播是一项行之有效的节本增效栽培技术,与传统的双粒播种相比,单粒精播技术在产量不降低或略有增产的情况下,节种 20%左右,生产成本大幅度降低,具有广阔的发展前景^[2-3]。

氮肥和密度是影响作物产量的重要栽培措施^[4-6]。在一定范围内,施氮能促进作物光合作用,提高产量,但过量施氮导致植株倒伏、肥料利用率降低、环境污染风险加大^[7-9]。合理密植可以提高群体叶面积指数,进而提高作物生物量,但过高的种植密度容易削弱中下层叶片的光照条件,造成个体发育差、群体光合能力反而降低^[10-13]。适宜的氮肥水平下,合理密植可改善作物群体质量,提高作物产量^[14-17]。植物根系既是水分和养分吸收的主要器官,又是多种激素、有机酸和氨基酸合成的重要场所,其形态和生理特性与地上部的生长发育、产量和品质形成均有密切的关系^[18-22]。氮、磷可促进花生根系生长^[23-25],干旱条件下,氮肥有利于深层根系生长^[26-27]。冯焘等^[28]研究表明,单粒精播可保证花生根系相对较强的生长优势,协调根冠比,壮个体,强群体,实现花生高产。目前氮肥和密度互作对单粒精播花生根系形态、生长发育的研究鲜有报道。本研究于 2018 年和 2019 年采用单粒播种方式,设置不同的氮肥水平和密度,研究氮肥、密度及其互作对单粒精播花生根系长度、根表面积、根体积、根干重、植株性状及花生产量的影响,以期筛选出适宜的氮肥水平和种植密度,为花生绿色节本增效

栽培提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

山东省花生研究所莱西试验站($36^{\circ}48'N$, $120^{\circ}30'E$)属于温带季风气候,土壤为棕壤土。2018 年含有机质 1.1% 、速效氮 67.1 mg kg^{-1} 、速效磷 47.8 mg kg^{-1} 、速效钾 98.6 mg kg^{-1} 、交换性钙 8.3 cmol kg^{-1} , pH 5.6; 2019 年含有机质 1.2% 、速效氮 76.9 mg kg^{-1} 、速效磷 38.4 mg kg^{-1} 、速效钾 128.0 mg kg^{-1} 、交换性钙 $14.5 \text{ cmol kg}^{-1}$, pH 5.6。

1.2 试验设计

采用直径 40 cm、高 50 cm 硬化 PVC 无底圆桶,圆桶埋入土中,上边露出地表 5 cm。试验前所有土壤混匀、过筛。采用二因素裂区设计,氮肥水平为主区,种植密度为副区。设 0 (N0)、60 (N1)、120 (N2) kg hm^{-2} 3 个氮肥水平,7.93 (D1)、15.86 (D2)和 23.79 (D3)万株 hm^{-2} 3 个种植密度,即每桶单粒、双粒、三粒。共 9 个处理,每个处理 3 次重复,每个重复 3 桶。氮肥为尿素,各处理除氮肥外均施磷肥 90 kg hm^{-2} (P_2O_5),钾肥 120 kg hm^{-2} (K_2O),肥料施入地表 0~20 cm 土层中,桶周围保护行施与各处理相同用量的肥料。2018 年和 2019 年分别于 5 月 23 日和 5 月 24 日催芽足墒播种,齐苗后间苗,每桶分别留 1、2、3 棵长势均匀的花生植株,按大田花生生产正常管理,分别于 9 月 18 日和 9 月 25 日收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 地上部植株性状的测定 在花针期 (flower-pegging stage, FS)、结荚期 (pod setting stage, PS)和收获期 (harvest stage, HS),从各处理选取 3 桶

生长一致的植株, 从子叶节部位将植株分为地上部和地下部。地上部植株测定主茎总叶片数、侧枝数、主茎高、侧枝长和第一节间粗等指标, 荚果烘干称重, 将根系从无底圆桶中取出, 并拣出土层内散落的根系, 将根系用流水冲洗干净, 放入封口袋, 冷冻保存, 以备测定根系形态指标。

1.3.2 根系形态的测定 根系解冻后, 用 Epson 7500 双面光源扫描仪[爱普生(中国)有限公司]扫描根系, 保存图像, 再用 WinRHIZO 根系分析系统(Regent 公司, 加拿大)分析图像。测定根系形态指标后, 80 ℃ 烘干至恒重, 称根干重。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件计算和处理数据, 采用 SAS 10.0 软件进行方差分析, 用 LSD 法比较处理间在 $P=0.05$ 水平上的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 氮肥和密度对花生根系形态及根干重的影响

2.1.1 根长 由表 1 可知, 氮肥对根长的影响不显著, 密度对根长具有重要的影响。单位面积根长随密度的增加呈增加的趋势, D2 和 D3 分别比 D1 增加 0.6%~106.2%和 2.3%~96.2%, D2、D3 显著高于 D1 (2018 年收获期和 2019 年结荚期除外), 而 D2 和 D3 处理间差异不显著; 单株根长随密度的增加呈降低的趋势, D2 和 D3 分别比 D1 降低 3.1%~50.3%和 34.6%~66.0%, 而 D2 和 D3 处理间差异不显著。氮肥和密度互作对 2019 年收获期单位面积根长的影响显著, 中氮(N1)条件下, D3 比 D1 增加 134.0%, 无氮(N0)和高氮(N2)条件下, D3 分别比 D1 增加 39.6%和 12.1%, 中氮处理的增加幅度显著高于无氮(N0)和高氮(N2)处理。

2.1.2 根表面积 由表 2 可知, 氮肥对根表面积的影响不显著, 密度对根表面积具有重要的影响, 花生单位面积根表面积随密度的增加而增加, D2 单位面积根表面积比 D1 增加 8.6%~94.9%, D3 比 D1 增加 11.3%~86.2%, D2、D3 显著高于 D1 (2018 年收获期和 2019 年结荚期除外), 而 D2 和 D3 处理间差异不显著; 单株根表面积随密度的增加呈降低趋势, D2 和 D3 分别比 D1 降低 2.6%~45.7%和 37.9%~61.1%。氮肥和密度互作对 2019 年收获期单位面积根表面积的影响显著, 在中氮(N1)条件下, D3 比 D1 增加 125.0%, 无氮(N0)和高氮(N2)条件下, D3 分别比 D1 增加 35.4%和 16.1%, 中氮处理的增幅显著高

于无氮(N0)和高氮(N2)处理。

2.1.3 根体积 由表 3 可知, 氮肥对单位面积根体积的影响不显著, 对单株根体积的影响不显著 (2019 年收获期除外)。密度对单位面积根体积具有重要的影响, D2 单位面积根体积比 D1 增加 16.7%~92.7%, D3 比 D1 增加 18.7%~134.8%, D2、D3 显著高于 D1 (2018 年收获期和 2019 年结荚期除外), D2 和 D3 处理间差异不显著; 单株根体积随密度的增加呈降低的趋势, D2 和 D3 分别比 D1 降低 5.1%~41.6%和 21.7%~58.1%, D2 和 D3 处理间差异不显著。氮肥与密度互作对 2018 年结荚期单位面积根体积的影响显著, 无氮(N0)条件下, D2、D3 比 D1 的增幅显著高于低氮(N1)和高氮(N2)处理, 氮肥与密度互作对单株根体积的影响不显著。

2.1.4 根干重 由表 4 可知, 氮肥对单位面积和单株根干重的影响不显著, 而密度对根干重的影响显著, 随密度的增加单位面积根干重呈增加的趋势, D2 和 D3 的单位面积根干重分别比 D1 增加 -1.5%~66.0%和 0.1%~92.8%, D2、D3 显著高于 D1 (除 2018 年收获期外); 单株根干重随密度的增加呈降低的趋势, D2 和 D3 分别比 D1 降低 17.0%~50.8%和 35.7%~66.6%, D2 和 D3 处理间差异不显著; 氮肥与密度互作对单位面积及单株根干重的影响不显著。

2.2 氮肥和密度对花生植株性状的影响

由表 5 可知, 氮肥对主茎叶片数的影响不显著, 对侧枝数、主茎高、侧枝长和第一节间粗的影响存在年度和时期间的差异。密度对主茎高、侧枝长 (2019 年花针期除外) 的影响不显著, 对主茎叶片数、侧枝数和第一节间粗具有重要影响, 且存在年际间差异。随密度的增加, 主茎叶片数、侧枝数和第一节间粗呈逐步降低的趋势, 与 D1 相比, D2 和 D3 主茎叶片数减少 0~14.0%和 4.9%~15.6%、侧枝数减少 16.4%~28.2%和 37.3%~44.4%、第一节间粗减少 -1.8%~34.5%和 4.0%~39.8%; 不同年度比较, 2018 年的降幅大于 2019 年。氮肥与密度互作对 2018 年花针期主茎高、结荚期的侧枝数和侧枝长及成熟期主茎叶片数的影响显著, 对 2019 年花针期的侧枝长、收获期的主茎高、侧枝长的影响显著, 2018 年成熟期主茎叶片数无氮(N0)条件下, D2、D3 比 D1 的降幅小于低氮(N1)和高氮(N2)处理, 主茎高、侧枝长和侧枝数随氮肥和密度的变化趋势不明显。

表 1 氮肥和密度互作对花生根长的影响
Table 1 Effects of the interaction of nitrogen fertilizer and density on root length in peanut

氮肥水平 Nitrogen level	种植密度 Plant density	单位面积根长 Root length of unit area (cm pot ⁻¹)						单株根长 Root length per plant (cm plant ⁻¹)					
		2018			2019			2018			2019		
		花针期 FS	结荚期 PS	收获期 HS	花针期 FS	结荚期 PS	收获期 HS	花针期 FS	结荚期 PS	收获期 HS	花针期 FS	结荚期 PS	收获期 HS
N0	D1	3836.5 b	3992.0 abc	5570.8 a	7138.1 bc	9868.4 a	5652.8 bc	3836.5 abc	3992.0 a	5570.8 a	7138.1 a	9868.4 ab	5652.8 a
	D2	5450.9 ab	7812.2 a	5665.0 a	12581.2 a	13505.4 a	5744.3 bc	2725.5 bc	3906.1 ab	2832.5 bc	6290.6 ab	6752.7 ab	2872.2 bc
	D3	7219.2 a	6562.6 ab	5576.5 a	12081.9 a	16025.5 a	7891.4 ab	2406.4 bc	2187.5 ab	1858.8 c	4027.3 bc	5341.8 b	2630.5 bc
N1	D1	4062.2 b	2503.4 c	4200.8 a	6372.5 bc	14427.9 a	3657.3 c	4062.2 ab	2503.4 ab	4200.8 ab	6372.5 ab	14427.9 a	3657.3 abc
	D2	6106.2 ab	4918.5 abc	4855.0 a	14010.9 a	13476.2 a	5805.5 bc	3053.1 bc	2459.2 ab	2427.5 bc	7005.4 a	6738.1 ab	2902.8 bc
	D3	6304.3 ab	5111.1 abc	3652.7 a	12969.6 a	14895.5 a	8559.1 ab	2101.4 c	1703.7 b	1443.3 c	4323.2 bc	4965.2 b	2853.0 bc
N2	D1	5665.7 ab	3474.5 bc	5725.8 a	4652.8 c	7260.8 a	5480.4 bc	5665.7 a	3474.5 ab	5725.8 a	4652.8 abc	7260.8 ab	5480.4 a
	D2	5186.6 ab	4026.9 abc	4877.7 a	10869.7 ab	11249.2 a	9457.4 a	2593.3 bc	2013.5 ab	2438.9 bc	5434.8 abc	5624.6 b	4728.7 ab
	D3	7871.3 a	5422.0 abc	5916.2 a	10593.1 ab	10846.1 a	6144.8 abc	2623.8 bc	1807.3 ab	1972.1 c	3531.0 c	3615.4 b	2048.3 c
氮肥 Nitrogen (N)		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
密度 Density (D)		**	**	ns	**	ns	**	**	**	**	**	**	**
氮肥×密度 N×D		ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns

N0: 施氮量为 0 kg hm⁻²; N1: 施氮量为 60 kg hm⁻²; N2: 施氮量为 120 kg hm⁻²。D1、D2 和 D3 分别代表种植密度为 79,300、158,600 和 237,900 株 hm⁻²。同一列不同小写字母表示在 5%水平差异显著。
**表示在 1%水平差异显著; *表示在 5%水平差异显著; ns 代表差异不显著。
N0: 0 kg hm⁻² of N fertilizer; N1: 60 kg hm⁻² of N fertilizer; N2: 120 kg hm⁻² of N fertilizer. D1, D2, and D3 represent planting densities of 79,300, 158,600, and 237,900 plants hm⁻². FS: flower-pegging stage; PS: pod setting stage; HS: harvest stage. Different lowercase letters in the same column indicate significantly different at the 5% probability level. **: significantly different at the 1% probability level; *: significantly different at the 5% probability level; ns: not significant.

表 2 氮肥和密度互作对花生根表面积的影响
Table 2 Effects of the interaction of nitrogen fertilizer and density on root surface area in peanut

氮肥水平 Nitrogen level	种植密度 Plant density	单位面积根表面积 Root surface area of unit area (cm ² pot ⁻¹)						单株根表面积 Root surface area per plant (cm ² plant ⁻¹)					
		2018			2019			2018			2019		
		花针期 FS	结荚期 PS	收获期 HS	花针期 FS	结荚期 PS	收获期 HS	花针期 FS	结荚期 PS	收获期 HS	花针期 FS	结荚期 PS	收获期 HS
N0	D1	491.2 c	666.8 bc	734.2 a	1008.4 bcd	1227.3 a	739.7 bc	491.2 abc	666.8 a	734.2 a	1008.4 a	1227.3 ab	739.7 a
	D2	733.9 abc	1288.6 a	787.5 a	1671.6 ab	1861.8 a	783.3 bc	366.9 bc	644.3 a	393.8 b	835.8 abc	930.9 b	391.7 bc
	D3	1008.4 a	1062.2 ab	818.2 a	1691.9 ab	2183.7 a	1001.2 ab	336.1 bc	354.1 ab	272.7 b	564.0 c	727.9 b	333.7 c
N1	D1	558.2 bc	476.3 c	607.5 a	946.5 cd	1960.0 a	524.6 c	558.2 ab	476.3 ab	607.5 a	946.5 ab	1960.0 a	524.6 abc
	D2	835.4 ab	839.2 abc	741.0 a	2043.9 a	1888.9 a	786.5 bc	417.7 abc	419.6 ab	370.5 b	1021.9 a	944.5 b	393.3 bc
	D3	844.0 ab	838.2 abc	629.9 a	1793.9 a	2069.3 a	1180.4 a	281.3 c	279.4 b	248.0 b	598.0 bc	689.8 b	393.5 bc
N2	D1	631.1 bc	581.4 bc	776.9 a	729.9 d	1103.4 a	759.5 bc	631.1 a	581.4 ab	776.9 a	729.9 abc	1103.4 ab	759.5 a
	D2	634.8 bc	656.6 bc	772.1 a	1517.0 abc	1597.7 a	1185.6 a	317.4 c	328.3 ab	386.1 b	758.5 abc	798.9 b	592.8 ab
	D3	996.9 a	857.1 abc	911.0 a	1512.6 abc	1584.3 a	882.1 abc	332.3 bc	285.7 b	303.7 b	504.2 c	528.1 b	294.0 c
氮肥 Nitrogen (N)		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
密度 Density (D)		**	**	ns	**	ns	**	**	**	**	**	**	**
氮肥×密度 N×D		ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns

同一列不同小写字母表示在 5% 水平差异显著。**表示在 1% 水平差异显著; *表示在 5% 水平差异显著; ns 代表差异不显著。缩写同表 1。
Different lowercase letters in the same column indicate significantly different at the 5% probability level. **; significantly different at the 1% probability level; *: significantly different at the 5% probability level; ns: not significant. Abbreviations are the same as those given in Table 1.

表 3 氮肥和密度互作对花生根体积的影响

Table 3 Effects of the interaction of nitrogen and density on root volume in peanut

氮肥水平 Nitrogen level	种植密度 Plant density	单位面积根体积 Root volume of unit area (cm ³ pot ⁻¹)						单株根体积 Root volume per plant (cm ³ plant ⁻¹)					
		2018			2019			2018			2019		
		花针期	结荚期	收获期	花针期	结荚期	收获期	花针期	结荚期	收获期	花针期	结荚期	收获期
		FS	PS	HS	FS	PS	HS	FS	PS	HS	FS	PS	HS
N0	D1	12.3 c	30.6 b	36.5 ab	23.3 b	24.8 b	17.6 cd	12.3 ab	30.6 a	36.5 a	23.3 ab	24.8 bc	17.6 a
	D2	25.6 b	54.9 a	37.4 ab	34.4 ab	45.0 ab	20.7 bcd	12.8 ab	27.4 ab	18.7 c	17.2 ab	22.5 bc	10.4 c
	D3	38.3 a	55.6 a	42.0 ab	37.0 ab	50.9 a	23.8 abc	12.8 ab	18.5 abc	14.0 c	12.3 b	17.0 bc	7.9 c
N1	D1	17.4 bc	26.5 b	28.4 b	20.9 b	40.9 ab	15.4 d	17.4 a	26.5 ab	28.4 b	20.9 ab	40.9 a	15.4 ab
	D2	26.4 b	44.1 ab	41.3 ab	52.8 a	44.7 ab	21.2 bcd	13.2 ab	22.0 abc	20.6 c	26.4 a	22.3 bc	10.6 c
	D3	26.3 b	38.5 ab	34.9 ab	40.5 ab	47.2 ab	28.6 a	8.8 b	12.8 c	14.0 c	13.5 b	15.7 c	9.5 c
N2	D1	10.1 c	31.1 b	35.5 ab	19.2 b	30.6 ab	17.8 cd	10.1 b	31.1 a	35.5 ab	19.2 ab	30.6 ab	17.8 a
	D2	19.0 bc	33.5 b	38.4 ab	33.2 ab	40.0 ab	27.5 ab	9.5 b	16.7 bc	19.2 c	16.6 ab	20.0 bc	13.8 b
	D3	28.6 ab	44.9 ab	42.2 a	37.1 ab	41.8 ab	24.1 abc	9.5 b	15.0 bc	14.1 c	12.4 b	13.9 c	8.0 c
氮肥 Nitrogen (N)		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
密度 Density (D)		**	**	ns	**	ns	**	ns	**	**	**	**	**
氮肥×密度 N×D		ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

同一列不同小写字母表示在 5%水平上差异显著。**表示在 1%水平差异显著; *表示在 5%水平差异显著; ns 代表差异不显著。缩写同表 1。

Different lowercase letters in the same column indicate significantly different at the 5% probability level. **: significantly different at the 1% probability level; *: significantly different at the 5% probability level; ns: not significant. Abbreviations are the same as those given in Table 1.

表 4 氮肥和密度互作对花生根干重的影响

Table 4 Effects of the interaction of nitrogen and density on root dry weight in peanut

氮肥水平 Nitrogen level	种植密度 Plant density	单位面积根干重 Root dry weight of unit area (g pot ⁻¹)						单株根干重 Root dry weight per plant (g plant ⁻¹)					
		2018			2019			2018			2019		
		花针期	结荚期	收获期	花针期	结荚期	收获期	花针期	结荚期	收获期	花针期	结荚期	收获期
		FS	PS	HS	FS	PS	HS	FS	PS	HS	FS	PS	HS
N0	D1	2.09 c	6.03 ab	5.69 a	4.17 c	3.62 b	3.45 bc	2.09 ab	6.03 a	5.69 a	4.17 a	3.62 bc	3.45 a
	D2	3.24 abc	8.63 ab	5.88 a	5.92 b	6.78 ab	4.39 abc	1.62 bc	4.32 ab	2.94 b	2.96 bcd	3.39 bc	2.19 bc
	D3	4.54 a	8.71 ab	6.19 a	6.81 ab	7.33 a	4.59 ab	1.51 bc	2.90 b	2.06 b	2.27 d	2.44 c	1.53 c
N1	D1	2.50 bc	5.60 ab	6.26 a	3.54 c	5.88 ab	2.72 c	2.50 a	5.60 a	6.26 a	3.54 ab	5.88 a	2.72 ab
	D2	3.40 abc	8.95 a	5.83 a	6.62 ab	6.96 a	4.39 abc	1.70 bc	4.48 ab	2.92 b	3.31 bc	3.48 bc	2.20 bc
	D3	3.50 ab	8.12 ab	5.11 a	7.73 a	7.32 a	5.89 a	1.17 c	2.71 b	1.70 b	2.58 cd	2.44 c	1.96 bc
N2	D1	2.57 bc	4.99 b	6.29 a	3.43 c	5.06 ab	3.08 bc	2.57 a	4.99 ab	6.29 a	3.43 ab	5.06 ab	3.08 ab
	D2	2.52 bc	6.71 ab	6.25 a	5.96 b	6.56 ab	5.38 a	1.26 c	3.35 ab	3.13 b	2.98 bcd	3.28 bc	2.69 ab
	D3	3.55 ab	8.70 ab	6.96 a	6.94 ab	6.35 ab	4.47 abc	1.18 c	2.90 b	2.32 b	2.31 d	2.12 c	1.49 c
氮肥 Nitrogen (N)		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
密度 Density (D)		**	**	ns	**	*	**	**	**	**	**	**	**
氮肥×密度 N×D		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

同一列不同小写字母表示在 5%水平差异显著。**表示在 1%水平差异显著; *表示在 5%水平差异显著; ns 代表差异不显著。缩写同表 1。

Different lowercase letters in the same column indicate significantly different at the 5% probability level. **: significantly different at the 1% probability level; *: significantly different at the 5% probability level; ns: not significant. Abbreviations are the same as those given in Table 1.

表 5 氮肥和密度互作对花生植株性状的影响

Table 5 Effects of the interaction of nitrogen fertilizer and density on plant characteristics in peanut

年份 Year	氮肥水平 Nitrogen level	种植密度 Plant density	主茎叶片数				侧枝数				主茎高				侧枝长				第一节间粗			
			Leaves of main stem				Number of lateral branches				Main stem height (cm)				Lateral branch length (cm)				First internode thickness (mm)			
			花针期 FS	结荚期 PS	收获期 HS	花针期 FS	结荚期 PS	收获期 HS	花针期 FS	结荚期 PS	花针期 FS	结荚期 PS	收获期 HS	花针期 FS	结荚期 PS	花针期 FS	结荚期 PS	收获期 HS	花针期 FS	结荚期 PS	收获期 HS	花针期 FS
2018	N0	D1	12.0 a	25.0 ab	26.3 bc	21.7 a	42.5 a	35.3 a	19.3 abc	43.5 a	53.6 a	21.9 b	53.1 b	57.9 ab	7.8 a	—	—	—	7.8 a	—	—	13.7 a
		D2	11.3 a	24.3 ab	23.7 c	15.7 b	22.3 cd	19.0 cd	18.6 bc	54.5 a	52.6 a	20.2 b	67.6 a	54.1 ab	7.0 abc	—	—	—	7.0 abc	—	—	9.9 b
		D3	11.0 a	22.0 b	26.3 bc	9.8 c	18.3 cd	18.7 cd	23.0 a	48.3 a	51.1 a	24.6 a	50.1 b	57.1 a	5.9 bc	—	—	—	5.9 bc	—	—	8.8 b
	N1	D1	11.7 a	25.3 ab	30.0 a	24.7 a	25.3 cd	26.0 abc	18.3 c	46.1 a	50.7 a	19.9 b	54.9 ab	69.0 a	7.9 a	—	—	—	7.9 a	—	—	13.4 a
		D2	11.2 a	25.3 ab	24.7 c	16.8 b	39.0 ab	23.3 bcd	20.5 abc	48.8 a	56.0 a	21.4 b	55.2 ab	59.4 ab	6.5 abc	—	—	—	6.5 abc	—	—	9.1 b
		D3	10.7 a	22.3 b	23.0 c	14.3 b	16.7 d	20.0 bcd	17.7 c	47.0 a	50.6 a	19.3 b	51.2 b	53.3 ab	5.6 c	—	—	—	5.6 c	—	—	8.0 b
	N2	D1	10.5 a	27.0 a	29.3 ab	17.5 b	29.0 bc	31.0 ab	22.5 ab	45.6 a	54.0 a	21.6 b	58.4 ab	60.7 a	7.4 ab	—	—	—	7.4 ab	—	—	14.8 a
		D2	11.2 a	24.0 ab	25.3 c	15.2 b	19.7 cd	24.0 abcd	18.7 bc	42.1 a	52.1 a	19.3 b	49.4 b	57.9 ab	5.7 c	—	—	—	5.7 c	—	—	8.4 b
		D3	10.8 a	22.7 ab	23.0 c	13.2 bc	23.3 cd	12.7 d	20.4 abc	50.3 a	45.9 a	21.8 b	59.9 ab	47.8 b	7.3 ab	—	—	—	7.3 ab	—	—	8.4 b
	氮肥 Nitrogen (N)		ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
2019	N0	D1	15.0 a	19.0 a	21.7 ab	18.3 ab	18.0 bcd	19.3 ab	21.3 a	33.5 ab	39.6 a	26.7 a	34.8 bc	42.8 a	7.3 a	6.6 cd	6.8 ab	6.8 ab	7.3 a	6.6 cd	6.5 abc	6.8 ab
		D2	13.7 a	19.0 a	19.0 b	11.7 b	14.0 cd	16.3 ab	22.5 a	34.1 ab	31.7 bc	23.7 ab	36.4 b	34.4 c	6.5 ab	7.1 abcd	6.5 abc	6.5 abc	6.5 ab	7.1 abcd	6.5 abc	6.5 abc
		D3	12.3 a	16.7 b	20.0 ab	10.3 b	11.3 d	13.3 b	19.6 a	31.0 b	38.0 ab	22.1 b	32.3 c	40.0 ab	5.5 b	6.0 d	5.8 c	5.8 c	5.5 b	6.0 d	5.8 c	5.8 c
	N1	D1	14.0 a	18.5 ab	22.7 a	21.0 a	28.5 a	26.0 a	21.4 a	35.1 ab	36.3 abc	23.2 ab	37.5 b	41.1 ab	6.4 ab	8.0 ab	6.5 abc	6.5 abc	6.4 ab	8.0 ab	6.5 abc	6.5 abc
		D2	13.7 a	18.7 ab	19.7 ab	16.7 ab	21.0 abc	18.7 ab	23.1 a	35.1 ab	35.5 abc	26.2 a	37.4 b	36.3 bc	7.2 a	7.0 abcd	6.5 abc	6.5 abc	7.2 a	7.0 abcd	6.5 abc	6.5 abc
		D3	13.0 a	17.3 ab	19.7 ab	16.3 ab	12.7 cd	14.7 b	20.7 a	34.5 ab	32.8 bc	21.5 b	37.5 b	36.5 bc	7.2 a	6.8 cd	6.5 abc	6.5 abc	7.2 a	6.8 cd	6.5 abc	6.5 abc
	N2	D1	14.7 a	19.5 a	20.0 ab	22.7 a	24.5 ab	22.7 ab	21.8 a	33.6 ab	30.7 c	24.0 ab	41.3 a	34.6 c	6.4 ab	8.2 a	7.3 a	7.3 a	6.4 ab	8.2 a	7.3 a	7.3 a
		D2	13.7 a	19.3 a	20.0 ab	20.0 a	19.0 bcd	18.7 ab	22.0 a	38.1 a	37.0 abc	23.1 ab	40.7 a	42.0 a	6.7 ab	7.3 abc	6.4 abc	6.4 abc	6.7 ab	7.3 abc	6.4 abc	6.4 abc
		D3	14.7 a	19.5 a	19.3 b	11.7 b	17.5 bcd	14.7 b	21.0 a	36.6 ab	37.4 ab	24.1 ab	41.1 a	39.5 abc	6.6 ab	6.8 bcd	6.2 bc	6.2 bc	6.6 ab	6.8 bcd	6.2 bc	6.2 bc
	氮肥 Nitrogen (N)		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	*	*	ns	ns
	密度 Density (D)		ns	ns	ns	**	**	*	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	氮肥×密度 N×D		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

同一列不同小写字母表示在 5%水平差异显著。**表示在 1%水平差异显著,*表示在 5%水平差异显著;ns 代表差异不显著。缩写同表 1。

Different lowercase letters in the same column indicate significantly different at the 1% probability level. **: significantly different at the 1% probability level; *: significantly different at the 5% probability level; ns: not significant. Abbreviations are the same as those given in Table 1.

2.3 氮肥和密度对花生荚果产量的影响

由图 1 可知, 氮肥和种植密度对花生产量具有重要的影响。荚果产量随氮肥水平增加的变化趋势因年份的不同而不同, 2018 年随氮肥水平的增加呈逐步降低的趋势, 2019 年不同氮肥处理间差异不显著。同一施氮水平, 不同种植密度间比较,

荚果产量随密度的增加呈增加的趋势, 2018 年 D2 和 D3 分别比 D1 增产 16.5%~47.7% 和 24.6%~41.5%, 2019 年 D2 和 D3 分别比 D1 增产 41.8%~99.9% 和 29.2%~49.0%。方差分析表明, 种植密度显著影响花生荚果产量, 氮肥、氮肥与密度互作的影响不显著。

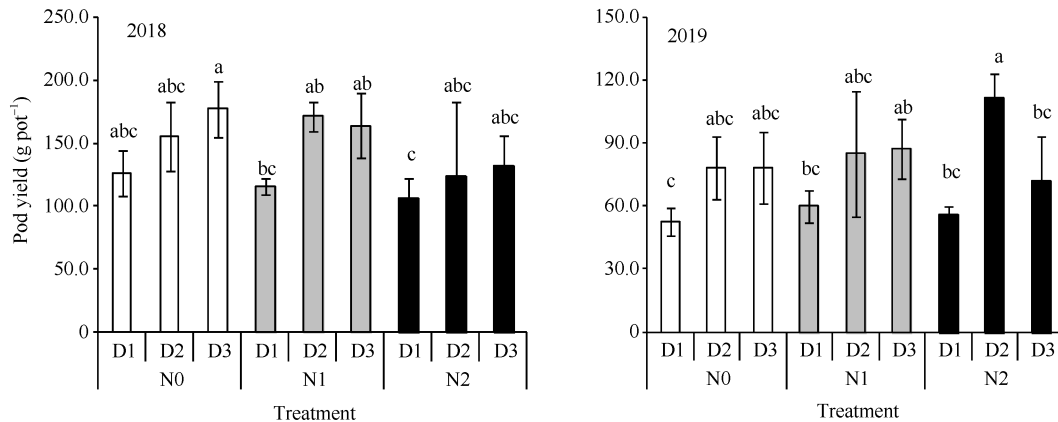


图 1 氮肥与密度互作对花生荚果产量的影响

Fig. 1 Effects of the interaction of nitrogen fertilizer and density on pod yield in peanut

标以不同小写字母表示在 5% 水平差异显著。处理同表 1。

Different lowercase letters indicate significantly different at the 5% probability level. Treatments are the same as those given in Table 1.

相对荚果产量定义为每年度各处理荚果产量与最大荚果产量的比值。由图 2 可知, 氮肥与相对荚果产量的关系可用 $y = -0.00001x^2 + 0.0012x + 0.681$ 二次方程模拟, 最佳施氮量为 60.0 kg hm^{-2} ; 密度与相对荚果产量的关系可用 $y = -0.0021x^2 + 0.0788x + 0.0361$ 二次方程模拟, 最佳种植密度为 18.8 万株 hm^{-2} 。

2.4 荚果产量与根系性状、植株性状的相关性分析

由图 3 可知, 荚果产量与根干重、根体积呈极

显著正相关, 根干重每增加 1 g , 荚果产量增加 16.2 g , 根体积每增加 1 cm^3 , 荚果产量增加 3.56 g ; 荚果产量与根长、根表面积无显著相关关系。荚果产量与主茎叶片数呈显著正相关, 与主茎高、侧枝长呈极显著相关, 主茎叶片数每增加 1 片 , 荚果产量增加 4.9 g , 主茎高和侧枝长每增加 1 cm , 荚果产量每桶分别增加 2.6 g 和 2.1 g ; 荚果产量与侧枝数和第一节间粗相关性不大。

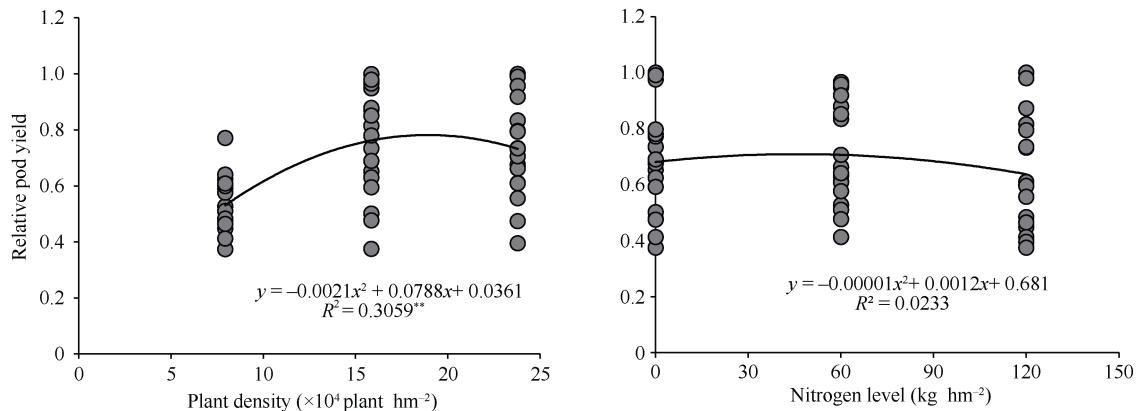


图 2 氮肥与密度互作对花生相对荚果产量的影响

Fig. 2 Effects of the interaction of nitrogen fertilizer and density on relative pod yield in peanut

**表示在 1% 水平显著相关。 ** indicate significant correlation at the 1% probability level.

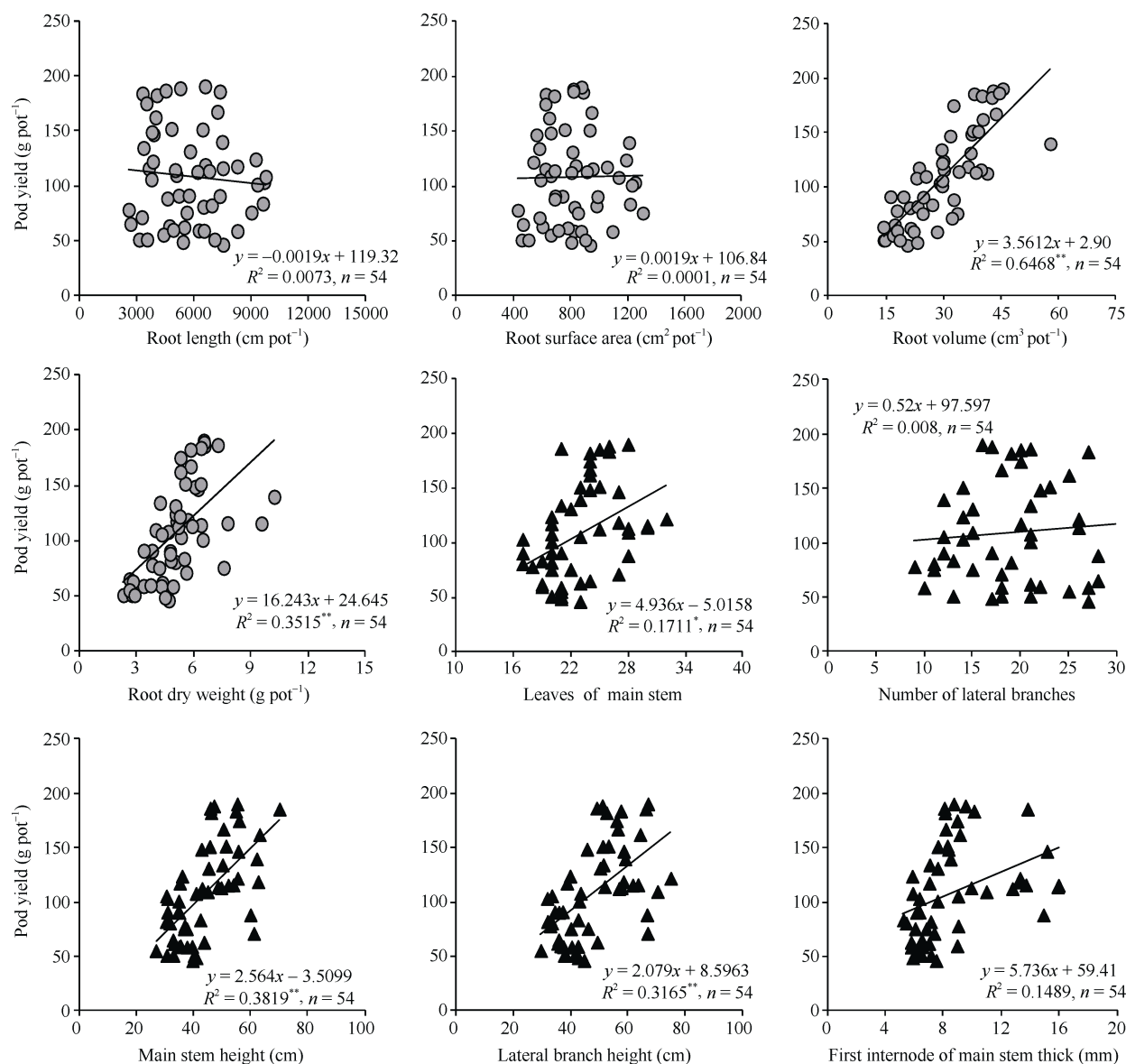


图 3 荚果产量与根系性状、植株性状的相关关系

Fig. 3 Correlation coefficient between pod yield and root traits and plant characteristics

圆圈和三角形分别表示根系性状、地上部植株性状与荚果产量的关系。*, ** 分别表示在 5% 和 1% 水平上显著相关。

Circle and triangle mean the relationship between root, traits, plant characteristics of overground and pod yield, respectively. *, ** indicate significant correlation at the 5% and 1% probability levels, respectively.

3 讨论

根系是固定植株并从土壤中吸收和运输水分养分的重要器官, 遗传因素、施肥、种植密度等均可影响根系的形态建成^[29-31]。研究表明, 增施氮肥, 根质量、根表面积、根长、根体积均显著增加^[32-33]。Wu 等^[30]研究表明, 增施氮肥, 玉米根干重降低, 但根长增加。茄子总根长、总根干质量和产量随施氮量的增加先上升后下降^[34]。本研究结果表明, 与对照相比, 增施氮肥对花生根干重、根表面积、根长、根体积的影响不显著。这可能由于土壤供氮水平较

高, 增施的肥料氮不足以引起根系性状的显著变化, 今后将在此试验基础上开展长期定位氮肥试验, 进一步明确花生根系生长发育对氮肥的响应特征。密度对作物根系结构和生长发育具有重要的影响, 石德扬等^[35]研究表明, 单株根系生物量、根长、根表面积、根系活性吸收面积均随种植密度的增加而降低。梁慧敏等^[36]研究表明, 单株根风干重与密度呈直线负相关, 群体根风干重与其呈曲线回归。本研究发现, 单株根长、根表面积、根体积及根系干重随密度的增加而降低, D1 显著高于 D2 和 D3, D2、

D3 处理间差异不显著; 单位面积根长、根表面积、根体积及根系干重随密度的增加而增加, D1 显著低于 D2 和 D3; 氮肥和密度互作对 2019 年收获期单位面积根长、根表面积的影响显著, 随密度增加, N1 处理根长、根表面积的增加幅度显著高于 N0 和 N2 处理。

作物的根部特征与地上部分性状具有显著的相关性^[37], 氮肥和密度对作物植株性状和生长发育具有重要的影响。研究表明, 增加密度, 作物单株分蘖数和地上部干重降低, 而单位面积分蘖数、叶片数和叶面积增加^[38-39]。左青松等^[17]研究表明, 根颈粗和冠层高度随密度的增加而降低。赵长星等^[12]研究表明, 在一定的范围内, 随密度的增加, 花生主茎高、侧枝长呈增加的趋势。本研究表明, 氮肥对主茎叶片数的影响不显著, 对侧枝数、主茎高、侧枝长和第一节间粗的影响存在年度和时期间的差异。密度对主茎高、侧枝长(2019 年花针期除外)的影响不显著, 对主茎叶片数、侧枝数和第一节间粗具有重要的影响, 且存在年际间差异。主茎叶片数、侧枝数和第一节间粗随密度的增加呈逐步降低的趋势, 合理密植有利于减少无效分枝, 增加有效枝数。修俊杰^[40]也证实, 花生分枝数、叶片数随密度的增加呈减少趋势。

本研究表明, 氮肥对花生荚果产量的影响不显著, 在一定范围内, 减施氮肥, 荚果产量不会降低, 这可能与土壤肥力水平较高能够充分满足花生生长发育需求有关, 今后将进一步从花生的氮素需求、土壤氮的供应做深入的研究, 可为花生氮肥减施提供理论依据; 荚果产量随密度的增加呈增加的趋势, 但 D2 和 D3 差异不显著, 通过一元二次方程模拟得出, 适宜的单粒精播种植密度为 18.8 万株 hm^{-2} , 而王才斌等^[41]研究表明, 花生单粒精播适宜的密度为 21~24 万株 hm^{-2} , 原因可能是本研究采用催芽足墒播种和间苗措施, 提高了花生的出苗和齐苗率。本研究中荚果产量与根体积、根干重呈极显著正相关, 与主茎叶片数呈显著正相关, 与主茎高、侧枝长呈极显著相关。因此, 在一定范围内, 增加单位面积根干重和根体积、促进地上植株的生长发育是花生增产的重要途径。

4 结论

氮肥对花生根系性状、根干重及产量的影响不显著, 对植株性状的影响存在年度和时期间的差异,

而密度对花生根系性状、根干重、植株性状及产量的影响显著。单位面积根长、根表面积、根体积、根干重和荚果产量随密度的增加而增加, 但增加到一定程度后不再增加; 而单株根长、根表面积、根体积、根干重、主茎叶片数、侧枝数、第一节间粗随密度的增加而降低。综合考虑产量和效益, 花生单粒精播适宜的氮肥(N)水平为 60 kg hm^{-2} , 种植密度为 18.8 万株 hm^{-2} 。

References

- [1] 万书波, 张佳蕾. 中国花生产业降本增效新途径探讨. 中国油料作物学报, 2019, 41: 657-662.
Wan S B, Zhang J L. Discussion on new ways to reduce cost and increase efficiency of peanut industry in China. *Chin J Oil Crop Sci*, 2019, 41: 657-662 (in Chinese with English abstract).
- [2] 邵长亮. 花生单粒精播节种高产理论与技术研究. 莱阳农学院硕士学位论文, 山东烟台, 2005.
Shao C L. Study on Theory and Technology of Single-seed Precision Sowing for Saving Seed and High Yield in Peanut. MS Thesis of Laiyang Agricultural College, Yantai, Shandong, China, 2005 (in Chinese with English abstract).
- [3] 张佳蕾, 郭峰, 杨佃卿, 孟静静, 杨莎, 王兴语, 陶寿祥, 李新国, 万书波. 单粒精播对超高产花生群体结构和产量的影响. 中国农业科学, 2015, 48: 3757-3766.
Zhang J L, Guo F, Yang D Q, Meng J J, Yang S, Wang X Y, Tao S X, Li X G, Wan S B. Effects of single-seed precision sowing on population structure and yield of peanuts with super-high yield cultivation. *Sci Agric Sin*, 2015, 48: 3757-3766 (in Chinese with English abstract).
- [4] Xu C L, Huang S B, Tian B J, Ren J H, Meng Q F, Wang P. Manipulating planting density and nitrogen fertilizer application to improve yield and reduce environmental impact in Chinese maize production. *Front Plant Sci*, 2017, 8: 1234.
- [5] Pasley H R, Camberato J J, Cairns J E, Zaman-Allah M, Das B, Vyn T J. Nitrogen rate impacts on tropical maize nitrogen use efficiency and soil nitrogen depletion in eastern and southern Africa. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2020, 116: 397-408.
- [6] Ciampitti I A, Vyn T J. Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: a review. *Field Crops Res*, 2012, 133: 48-67.
- [7] Wang C B, Zheng Y M, Shen P, Zheng Y P, Wu Z F, Sun X U, Yu T Y, Feng H. Determining N supplied sources and N use efficiency for peanut under applications of four forms of N fertilizers labeled by isotope ^{15}N . *J Integr Agric*, 2016, 15: 432-439.
- [8] 吴正锋. 花生高产高效氮素养分调控研究. 中国农业大学博士学位论文, 北京, 2014.
Wu Z F. Nitrogen Management for High Yield and High Efficiency of Peanut. PhD Dissertation of China Agricultural University, Beijing, China, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [9] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, Christie P. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain. *Environ*

- Pollut*, 2006, 143: 117–125.
- [10] Hecht V L, Temperton V M, Nagel K A, Rascher U, Pude R, Postma J A. Plant density modifies root system architecture in spring barley (*Hordeum vulgare* L.) through a change in nodal root number. *Plant Soil*, 2019, 439: 179–200.
 - [11] Farshbaf-Jafari S, Pirzad A, Tajbakhsh M, Ghassemi-Golezani K. Effects of water supply and plant density on leaf characteristics of Amaranth (*Amaranthus caudatus* L.). 2nd International Conference on Sustainable Environment and Agriculture IPCBEE. Singapore: LACSIT Press, 2014. pp 17–20.
 - [12] 赵长星, 邵长亮, 王月福, 宋传雪, 王铭伦. 单粒精播模式下种植密度对花生群体生态特征及产量的影响. *农学学报*, 2013, 3(2): 1–5.
Zhao C X, Shao C L, Wang Y F, Song C X, Wang M L. Effects of different planting densities on population ecological characteristic and yield of peanut under the mode of single-seed precision sowing. *J Agric*, 2013, 3(2): 1–5 (in Chinese with English abstract).
 - [13] 张俊, 王铭伦, 于旸, 王月福, 赵长星. 不同种植密度对花生群体透光率的影响. *山东农业科学*, 2010, (10): 52–54.
Zhang J, Wang M L, Yu Y, Wang Y F, Zhao C X. Effect of different planting density on light transmittance of peanut population. *Shandong Agric Sci*, 2010, (10): 52–54 (in Chinese with English abstract).
 - [14] Leskovsek R, Datta A, Simoncic A, Knezevic S Z. Influence of nitrogen and plant density on the growth and seed production of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.). *J Pest Sci*, 2012, 85: 527–539.
 - [15] 王士红, 杨中旭, 史加亮, 李海涛, 宋宪亮, 孙学振. 增密减氮对棉花干物质和氮素积累分配及产量的影响. *作物学报*, 2020, 46: 395–407.
Wang S H, Yang Z X, Shi J L, Li H T, Song X L, Sun X Z. Effects of increasing planting density and decreasing nitrogen rate on dry matter, nitrogen accumulation and distribution, and yield of cotton. *Acta Agron Sin*, 2020, 46: 395–407 (in Chinese with English abstract).
 - [16] 张含笑, 林参, 左青松, 杨光, 冯倩南, 冯云艳, 冷锁虎. 种植密度和施肥量对油菜毯状苗生长的影响. *作物学报*, 2019, 45: 1691–1698.
Zhang H X, Lin S, Zuo Q S, Yang G, Feng Q N, Feng Y Y, Leng S H. Effects of plant density and N fertilizer spraying concentration on growth of rapeseed blanket seedlings. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 1691–1698 (in Chinese with English abstract).
 - [17] 左青松, 蒯婕, 杨士芬, 曹石, 杨阳, 吴莲蓉, 孙盈盈, 周广生, 吴江生. 不同氮肥和密度对直播油菜冠层结构及群体特征的影响. *作物学报*, 2015, 41: 758–765.
Zuo Q S, Kuai J, Yang S F, Cao S, Yang Y, Wu L R, Sun Y Y, Zhou G S, Wu J S. Effects of nitrogen fertilizer and planting density on canopy structure and population characteristic of rapeseed with direct seeding treatment. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 758–765 (in Chinese with English abstract).
 - [18] Lynch J P. Steep, cheap and deep: an ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems. *Ann Bot*, 2013, 112: 347–357.
 - [19] White P J, George T S, Gregory P J, Bengough A G, Hallett P D, McKenzie B M. Matching roots to their environment. *Ann Bot*, 2013, 112: 207–222.
 - [20] Kanbar A, Toorchi M, Shashidhar H E. Relationship between root and yield morphological characters in rainfed low land rice (*Oryza sativa* L.). *Cereal Res Commun*, 2009, 37: 261–268.
 - [21] 杨建昌. 水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系. *中国农业科学*, 2011, 44: 36–46.
Yang J C. Relationships of rice root morphology and physiology with the formation of grain yield and quality and the nutrient absorption and utilization. *Sci Agric Sin*, 2011, 44: 36–46 (in Chinese with English abstract).
 - [22] Chen X C, Zhang J, Chen Y L, Li Q, Chen F J, Yuan L X, Mi G H. Changes in root size and distribution in relation to nitrogen accumulation during maize breeding in China. *Plant Soil*, 2014, 374: 121–130.
 - [23] Hill J O, Simpson R J, Moorel A D, Chapman D F. Morphology and response of roots of pasture species to phosphorus and nitrogen nutrition. *Plant Soil*, 2006, 286: 7–19.
 - [24] 郑亚萍, 王春晓, 郑祖林, 王鹏, 冯昊, 郑永美, 于天一, 王才斌. 磷对花生根系形态特征的影响. *中国油料作物学报*, 2019, 41: 622–628.
Zheng Y P, Wang C X, Zheng Z L, Wang P, Feng H, Zheng Y M, Yu T Y, Wang C B. Effect of phosphorus (P) on root morphology characteristics of peanut. *Chin J Oil Crop Sci*, 2019, 41: 622–628 (in Chinese with English abstract).
 - [25] 郑永美, 王春晓, 刘岐茂, 吴正锋, 王才斌, 孙秀山, 郑亚萍. 氮肥对花生根系生长和结瘤能力的调控效应. *核农学报*, 2017, 31: 2418–2425.
Zheng Y M, Wang C X, Liu Q M, Wu Z F, Wang C B, Sun X S, Zheng Y P. Effect of nitrogen fertilizer regulation on root growth and nodulating ability of peanut. *J Nucl Agric Sci*, 2017, 31: 2418–2425 (in Chinese with English abstract).
 - [26] Elazab A, Serret M D, Araus J L. Interactive effect of water and nitrogen regimes on plant growth, root traits and water status of old and modern durum wheat genotypes. *Planta*, 2016, 244: 125–144.
 - [27] 丁红, 张智猛, 戴良香, 杨吉顺, 慈敦伟, 秦斐斐, 宋文武, 万书波. 水氮互作对花生根系生长及产量的影响. *中国农业科学*, 2015, 48: 872–881.
Ding H, Zhang Z M, Dai L X, Yang J S, Ci D W, Qin F F, Song W W, Wan S B. Effects of water and nitrogen interaction on peanut root growth and yield. *Sci Agric Sin*, 2015, 48: 872–881 (in Chinese with English abstract).
 - [28] 冯烨, 郭峰, 李宝龙, 孟静静, 李新国, 万书波. 单粒精播对花生根系生长、根冠比和产量的影响. *作物学报*, 2013, 39: 2228–2237.
Feng Y, Guo F, Li B L, Meng J J, Li X G, Wan S B. Effects of single-seed sowing on root growth, root-shoot ratio, and yield in peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 2228–2237 (in Chinese with English abstract).
 - [29] Li H B, Wang X, Brooker R W, Rengel Z, Zhang F S, Davies W J, Shen J B. Root competition resulting from spatial variation in nutrient distribution elicits decreasing maize yield at high planting density. *Plant Soil*, 2019, 439: 219–232.
 - [30] Wu Q P, Chen F J, Chen Y L, Yuan L X, Zhang F S, Mi G H. Root growth in response to nitrogen supply in Chinese maize hybrids released between 1973 and 2009. *Sci China Life Sci*, 2011, 54: 642–650.

- [31] 张馨月, 王寅, 陈健, 陈安吉, 王莉颖, 郭晓颖, 牛雅丽, 张星宇, 陈利东, 高强. 水分和氮素对玉米苗期生长、根系形态及分布的影响. 中国农业科学, 2019, 52: 34–44.
Zhang X Y, Wang Y, Chen J, Chen A J, Wang L Y, Guo X Y, Niu Y L, Zhang X Y, Chen L D, Gao Q. Effects of soil water and nitrogen on plant growth, root morphology and spatial distribution of maize at the seedling stage. *Sci Agric Sin*, 2019, 52: 34–44 (in Chinese with English abstract).
- [32] 杨明, 陈历儒, 王继玥, 宋海星, 欧中甜. 氮素对油菜根系生长和产量形成的影响. 西北农业学报, 2010, 19(4): 66–69.
Yang M, Chen L R, Wang J Y, Song H X, Ou Z T. Effect of nitrogen on root growth and yield formation of rape. *Acta Agric Boreali-Occident Sin*, 2010, 19(4): 66–69 (in Chinese with English abstract).
- [33] 林国林, 赵坤, 蒋春姬, 韩晓日, 金兰淑. 种植密度和施氮水平对花生根系生长及产量的影响. 土壤通报, 2012, 43: 1183–1186.
Lin G L, Zhao K, Jiang C J, Han X R, Jin L S. Effect of densities and nitrogen application levels on root growth and yield of peanut. *Chin J Soil Sci*, 2012, 43: 1183–1186 (in Chinese with English abstract).
- [34] 杨振宇, 张富仓, 邹志荣. 不同生育期水分亏缺和施氮量对茄子根系生长、产量及水分利用效率的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(7): 141–148.
Yang Z Y, Zhang F C, Zou Z R. Coupling effects of deficit irrigation in different growth stages and different nitrogen applications on the root growth, yield, WUE of eggplant. *J Nor A & F Univ (Nat Sci Edn)*, 2010, 38(7): 141–148 (in Chinese with English abstract).
- [35] 石德杨, 李艳红, 夏德军, 张吉旺, 刘鹏, 赵斌, 董树亭. 种植密度对夏玉米根系特性及氮肥吸收的影响. 中国农业科学, 2017, 50: 2006–2017.
Shi D Y, Li Y H, Xia D J, Zhang J W, Liu P, Zhao B, Dong S T. Effects of planting density on root characteristics and nitrogen uptake in summer maize. *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 2006–2017 (in Chinese with English abstract).
- [36] 梁慧敏, 曹致中. 密度对根蘖型苜蓿根系的影响. 草业学报, 1996, 5(4): 30–34.
Liang H M, Cao Z Z. Effects of plant density on root system of creeping-rooted alfalfa. *Acta Pratac Sin*, 1996, 5(4): 30–34 (in Chinese with English abstract).
- [37] 洪彦彬, 周桂元, 李少雄, 刘海燕, 陈小平, 温世杰, 梁炫强. 花生根部特征与地上部分性状的相关性分析. 热带作物学报, 2009, 30: 657–660.
Hong Y B, Zhou G Y, Li S X, Liu H Y, Chen X P, Wen S J, Liang X Q. Correlation analysis of root and aboveground traits in peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Chin J Trop Crops*, 2009, 30: 657–660 (in Chinese with English abstract).
- [38] Soleymani A, Shahrajabian M H, Naranjani L. Determination of the suitable planting date and plant density for different cultivars of barley (*Hordeum vulgare* L.) in Fars. *Afr J Plant Sci*, 2011, 5: 284–286.
- [39] Moosavi S G, Seghatoleslami M J, Moazeni A. Effect of planting date and plant density on morphological traits, LAI and forage corn (Sc. 370) yield in second cultivation. *Intl Res J Appl Basic Sci*, 2012, 3: 57–63.
- [40] 修俊杰. 不同密度单粒精播对花生农艺性状光合特性及荚果产量的影响. 农业与技术, 2018, 38(9): 4–7.
Xiu J J. Effects of different density on agronomic characters, photosynthetic characteristics and pod yield of peanut under single seed precision sowing. *Agric Technol*, 2018, 38(9): 4–7 (in Chinese).
- [41] 王才斌, 成波, 迟玉成, 孙秀山, 张吉民, 苗丰柞, 宇仁娥. 高产花生单粒植群体密度研究. 花生科技, 1996, (3): 17–19.
Wang C B, Cheng B, Chi Y C, Sun X S, Zhang J M, Miao F Z, Yu R E. Study on population density of high yield peanut under single seed planting. *Peanut Sci Technol*, 1996, (3): 17–19 (in Chinese).