作物学报 ACTA AGRONOMICA SINICA 2023, 49(2): 459–471 http://zwxb.chinacrops.org/
ISSN 0496-3490; CN 11-1809/S; CODEN TSHPA9 E-mail: zwxb301@caas.cn

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2023.24041

密度对不同株型花生单粒精播群体质量及产量的影响

刘俊华[1,2,3,**] 吴正锋[3,**] 党彦学[4] 于天一[3] 郑永美[3] 万书波[5,*] 王才斌[3] 李 林[1,*]

[1] 湖南农业大学 / 湖南农业大学旱地作物研究所, 湖南长沙 410128; [2] 滨州学院生物与环境工程学院, 山东滨州 256600; [3] 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; [4] 临沂市农业科学院, 山东临沂 276000; [5] 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: 为明确种植密度对不同株型花生单粒精播群体质量的影响, 选用直立型大花生品种“花育 22” (Huayu 22, HY22)和半匍匐型大花生品种“花育 9513” (Huayu 9513, HY9513), 设置 D1 (7.5 万株 hm^{-2})、D2 (15 万株 hm^{-2})、D3 (22.5 万株 hm^{-2}) 3 个密度, 对不同密度下不同株型花生产量、光合产物累积与分配、叶面积系数、植株性状和粒叶比进行了研究。结果如下: (1) 随密度的增加, “花育 22”荚果产量呈增加趋势, “花育 9513”呈先升高后降低的趋势, “花育 9513”最适种植密度低于“花育 22”。(2) “花育 22”植株群体干重整个生育期均随密度的增加而增加, 密度越大增幅越小, “花育 9513”幼苗期干重随密度的增加而增加, 花针期之后随密度增加先增加后降低, D2 密度植株干重最大。随密度增加, 根的干物质分配比例增加, 果针的分配比例降低; “花育 9513”与“花育 22”收获期干重相当, 但干物质向荚果的分配比例较小、经济系数和粒叶比低。花生生育前期叶面积系数、光合势随密度的增加呈增加的趋势, “HY9513”增幅高于“HY22”; “HY9513”的叶面积系数、光合势在结荚之前与“HY22”差异不显著, 但结荚至收获期显著高于“HY22”。(3) 收获期单株侧枝数和果枝数随密度的增加而降低, 群体侧枝数、果枝数随密度的增加而增加。(4) 相关性分析结果表明, 荚果产量与结荚后的干物质累积, 尤其是饱果期的干物质累积、光合势及收获期的植株干重、叶面积系数呈显著或极显著正相关。综上, 密度对不同株型花生群体质量影响不同, 直立型花生“花育 22”耐密性好, 最适密度高, 而半匍匐型花生“花育 9513”耐密性较差, 最适密度低。

关键词: 密度; 花生; 株型; 单粒精播; 群体质量

Effects of density on population quality and yield of peanut with different plant types under the mode of single-seed precision sowing

LIU Jun-Hua[1,2,3,**], WU Zheng-Feng[3,**], DANG Yan-Xue[4], YU Tian-Yi[3], ZHENG Yong-Mei[3], WAN Shu-Bo[5,*], WANG Cai-Bin[3], and LI Lin[1,*]

[1] Hunan Agriculture University / Upland Crop Research Institute, Hunan Agriculture University, Changsha 410128, Hunan, China; [2] College of Biology and Environment Engineering, Binzhou University, Binzhou 256600, Shandong, China; [3] Shandong Peanut Research Institute / National Peanut Engineering Technology Research Center, Qingdao 266100, Shandong, China; [4] Linyi Academy of Agricultural Sciences, Linyi 276000, Shandong, China; [5] Shandong Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Crop Genetic Improvement and Ecological Physiology of Shandong Province, Jinan 250100, Shandong, China

本研究由国家重点研发计划项目(2018YFD1000906), 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-13), 山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010702)和山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2022A10)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFD1000906), the China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-13), the Major Scientific and Technological Innovation Projects in Shandong Province (2019JZZY010702), and the Agricultural Science and Technology Innovation Project of Shandong Academy of Agricultural Sciences (CXGC2022A10).

* 通信作者(Corresponding authors): 万书波, E-mail: wanshubo2016@163.com; 李林, E-mail: Lilindw@163.com

** 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

Received (收稿日期): 2022-02-21; Accepted (接受日期): 2022-06-07; Published online (网络出版日期): 2022-07-09.

URL: https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20220707.1530.018.html

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Abstract: In order to clarify the effect of planting density on the population quality of peanut with different plant types under the mode of single-seed precision sowing, this experiment were carried out with two plant-types (erect big peanut variety “Huayu 22” and semi-creeping big peanut variety “Huayu 9513”), three densities (75,000 plants hm^{-2}, 150,000 plants hm^{-2}, and 225,000 plants hm^{-2}). Yield, photosynthetic product accumulation and distribution, leaf area index, plant characteristics and grain leaf ratio were studied. The results were as follows: (1) With the increase of density, the pod yield of “Huayu 22” increased, while that of “Huayu 9513” increased first and then decreased, in addition, the optimum planting density of “Huayu 9513” was lower than that of “Huayu 22”. (2) The population dry weight of “Huayu 22” increased with the increase of density during the growth period, and the greater the density, the smaller the increase range. While the population dry weight of “Huayu 9513” increased with the increase of density at seedling stage, increased first and then decreased with the increase of density after flower pegging stage, and the dry weight of D2 density was the largest. With the increase of density, the distribution proportion of dry matter in roots increased and that in fruit needles decreased; “Huayu 9513” and “Huayu 22” had the probably same dry weight at harvest stage, while the distribution proportion of dry matter to pods was less, and the economic coefficient and grain to leaf were lower. The leaf area index and leaf area duration of peanut increased with the increase of density at the early growth stage, and the increase of “Huayu 9513” was higher than that of “Huayu 22”. The leaf area index and leaf area duration of “Huayu 9513” was not significantly different from that of “Huayu 22” before pod setting stage, however from pod setting stage to harvest stage it was significantly higher than that of “Huayu 22”. (3) The number of lateral branches and fruit branches per plant decreased with the increase of density in the harvest period, while that of the population increased with the increase of density. (4) The correlation analysis showed that there were positive or significant positive correlation between peanut pod yield and dry matter accumulation after pod setting stage, especially dry matter accumulation at pod fulling stage, leaf area duration, plant dry weight, and leaf area index at harvest stage. In conclusion, density showed different effects on the population quality of peanut with different plant types, erect peanut “Huayu 22” showed good density tolerance and the optimum density was higher, while semi-creeping peanut “Huayu 9513” showed poor density tolerance. The optimum density of “Huayu 9513” was lower.

Keywords: density; peanut; plant type; single-seed precision sowing; population quality

作物生产是一个群体生产的过程，群体内各个体间既相互独立又密切联系，作物高产是群体数量和质量相互协调的结果[1-3]，作物群体质量受播期、密度、施肥等栽培措施的影响[4-6]，合理密植是作物高产的重要技术措施[7]，研究种植密度对作物群体质量及产量的影响对作物产量的提高具有重要意义。

花生是我国重要的油料和经济作物，对保障我国食用油脂安全具有重要意义[8]。传统花生种植穴播 2 粒或多粒，双株或多株间过窄的株距及较大的种植密度容易造成植株间竞争加剧，个体发育受到限制，生育中、后期群体环境恶化，导致植株过早衰老，影响花生产量的进一步提高。单粒精播技术既可节约种子，又可改善花生冠层微环境，提高群体质量和荚果产量[9-10]。目前关于花生单粒精播的研究已有不少报道，张佳蕾等[11-12]、梁晓艳等[10,13]、冯烨等[14-15]分别从群体结构、冠层环境、根系生长及活性氧代谢等方面探讨了单粒精播增产机制。密度对群体质量具有重要影响，合理密植是优化作物群体质量、提高作物产量的重要技术措施[16-18]。王亮等[19]、赵长星等[20]研究表明，单粒精播花生的主茎高、侧枝长随密度的增加而增加，但侧枝数、百果重、百仁重则呈递减趋势，合理密植有利于优化植株生长环境、提高饱果率和出仁率。研究表明，不同株型作物群体质量对密度的响应有所不同[16,21]。花生根据植株侧枝生长姿态、株型指数不同，可以分为 3 种株型：匍匐型、半匍匐型和直立型[22]。匍匐型(蔓生型)花生品种，个体产量潜力大，适于稀植；直立型花生品种连续开花、生育期短、株型紧凑，适合密植；目前我国花生主推品种以直立型为主，美国以蔓生型品种为主[23-24]。目前花生单粒精播群体质量研究主要集中于直立型品种[18,25-26]，而农艺措施对不同株型花生群体质量影响的报道甚少。本研究以群体质量为指标，比较了直立型和半匍匐型 2 个不同株型花生品种对密度反应特点，以期为不同株型花生单粒精播高产栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2019—2020 年在山东青岛平度古岘镇(36°43'33"N, 120°15'16"E)开展，古岘镇属暖温带半湿润季风区大陆性气候，气候四季分明，春季干旱多风、夏季高温多雨、秋季秋高气爽、冬季寒冷干燥。年平均气温 11.9℃，无霜期 195.5 d，日照时数约 2700 h，年平均降水量 680 mm。试验田土壤为棕壤土，基础地力理化性状如表 1，前茬作物为玉米，冬前结合秸秆还田深耕 30~35 cm。

表 1　试验地基础地力理化性状
Table 1　Soil chemical properties of experimental site

年份 Year	pH	有机质 Organic matter (%)	水解氮 Hydrolysable N (mg kg^{-1})	速效磷 Available P (mg kg^{-1})	速效钾 Available K (mg kg^{-1})	交换性钙 Exchangeable calcium (cmol kg^{-1})
2019	6.5	1.16	80.4	130.0	93.4	8.0
2020	6.9	1.32	97.8	58.5	127.0	9.8

1.2　试验设计

供试材料为大果直立型花生品种“花育 22”和大果半匍匐型花生品种“花育 9513”, 设置 D1 (7.5 万株 hm^{-2})、D2 (15 万株 hm^{-2})、D3 (22.5 万株 hm^{-2}) 3 个密度, 3 次重复, 两因素随机区组设计。起垄覆膜种植, 垄宽 80 cm, 每垄 2 行, 垄上小行距 30 cm。花生播种前整地施肥, 施肥量为 1500 kg hm^{-2} 复合肥(N∶P∶K 为 16∶13∶16)、2400 kg hm^{-2} 工业有机肥和 375 kg hm^{-2} 含钙生物肥。2019 年 5 月 1 日播种, 小区垄长 10 m, 9 月 14 日收获。2020 年 5 月 12 日播种, 小区垄长 8 m, 9 月 11 日收获, 花生生育期间给予良好管理。

1.3　测定项目与方法

1.3.1　*植株性状*　　在幼苗期、花针期、结荚期和收获期各处理选取 3 穴生长一致的植株, 测定主茎高、侧枝长、侧枝数等指标。

1.3.2　*叶面积*　　采用打孔称重法测定叶面积。从植株(包括主茎和侧枝)上、中、下部分别选取 10 片叶, 上、中、下合计 30 片叶, 叶片中脉对准, 用打孔器以叶片中脉中心为圆心打孔。称取 30 片小圆叶片重和植株叶片总重, 根据打孔器孔径算出小圆叶片面积, 从而计算出总叶面积。

1.3.3　*干物质*　　将上述测定过植株性状和叶面积的植株分为根、茎、叶、果、果针五部分, 装入牛皮纸袋, 先在 105℃下杀青 1 h, 然后 80℃烘干至恒重, 称重。

1.3.4　*光合势*　　光合势(m^2 d m^{-2})=单位土地面积某生育时期平均叶面积(m^2)×生长日期(d)。

1.3.5　*“粒叶比”*　　参照凌启鸿在水稻上的粒叶比的概念[27], 以收获期群体的荚果数及荚果重与该群体最大叶面积比值为花生“粒叶比”的测定指标: 粒叶比=荚果数/叶面积(No. dm^{-2})及荚果重/叶面积(g dm^{-2})。

1.3.6　*收获期测产及荚果性状*　　收获期各小区分别选取 5.4 m^2 有代表性的样方, 测定产量。并连续选取 5 穴生长一致的植株, 测定荚果性状。

1.4　数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据计算处理, SAS 10.0 软件进行方差分析, 用 LSD 法比较处理间在 5%水平上的差异显著性。

2　结果与分析

2.1　密度对不同株型花生产量及产量性状的影响

由图 1 可看出, 直立型花生“花育 22”荚果产量随密度的增加呈增加的趋势, 2019 年 D2 的荚果产量比 D1 增产 10.3%, D3 比 D2 增产 3.2%, 2020 年 D2 比 D1 增产 22.5%, D3 比 D2 减产 4.3%, 但差异不显著; 半匍匐型花生“花育 9513”的产量随密度增加呈先升高后降低的趋势, D2 处理产量最高。同一密度不同品种相比, “花育 9513”的产量低于“花育 22”, 密度越大两者产量差异越大, D1、D2 和 D3 密度下, “花育 9513”产量分别比“花育 22”减产 3.1%~7.5%、11.6%~18.1%和 19.0%~24.0%。“花育 22”产量与密度之间的关系符合 $y_{22}=-0.001x^2+0.045x+0.524$ 方程, $R^2=0.335^{**}$, 密度为 22.5 万株 hm^{-2} 时, 花生产量最高; “花育 9513”产量与密度之间的关系符合 $y_{9513}=-0.001x^2+0.028x+0.730$ 方程, $R^2=0.169^{**}$, 最适密度为 14.0 万株 hm^{-2}。这说明半匍匐型花生“花育 9513”耐密性较差。与 2019 年相比, 2020 年花生荚果产量较低可能由于播种期干旱, 花生出苗晚, 且花生生育后期早衰。

从产量构成因素看(表 2), 随密度增加单株果数显著降低, 而公顷果数呈增加的趋势, 其中“花育 22”的单株结果数 D2 比 D1 减少 30.1%~42.6%, D3 比 D2 减少 29.6%~32.1%; “花育 9513” D2 比 D1 减少 41.3%~46.9%, D3 比 D2 减少 22.8%~26.9%。2020 年“花育 22”公顷果数 D2 比 D1 的增幅显著大于“花育 9513”。“花育 9513”千克果数 2019 年 D3 显著高于 D2, D3 比 D2 增加 16.9%, 而其他密度处理间差异不显著, “花育 22”千克果数各密度间差异不显著。与“花育 22”相比, “花育 9513”公顷果数少, 而千克果数多。由此可见, 随密度的增加, “花育 22”产量增加的原因主要是公顷果数的增加, “花育 9513”产量比“花育 22”低主要因为公顷果数少, 且果重小(千克果数多)。

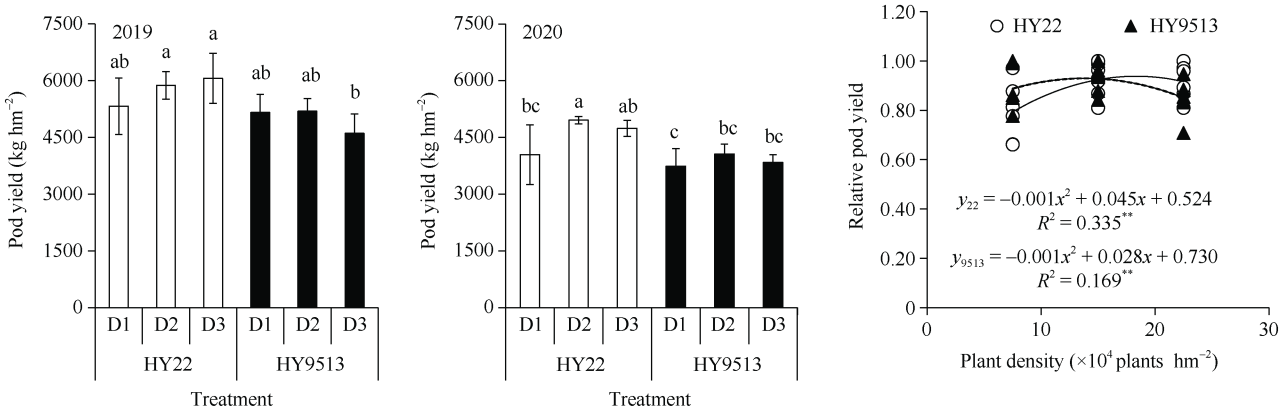


图 1 密度对不同株型花生荚果产量的影响

Fig. 1 Effects of density on pod yield of peanut with different plant types

D1、D2 和 D3 分别代表种植密度为 7.5、15 和 22.5 万株 hm^{-2}。HY22: 花育 22; HY9513: 花育 9513。标以不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

D1, D2, and D3 represent planting densities of 75,000, 150,000, and 225,000 plants hm^{-2}, respectively. HY22: Huayu 22; HY9513: Huayu 9513. Different lowercase letters indicate significantly different at the 0.05 probability level.

表 2 密度对不同株型花生产量性状的影响

Table 2 Effects of density on pod yield components of peanut with different plant types

年份 Year	品种 Variety	密度 Density	单株结果数 Pods per plant	公顷果数 Pods per hm^2 (×10^4 hm^{-2})	千克果数 Pods per kg
2019	花育 22 Huayu 22	D1	56.9±2.2 a	426.7±16.3 ab	568.7±32.6 b
		D2	32.7±0.6 c	490.0±8.7 a	569.8±34.5 b
		D3	22.2±0.5 de	499.0±11.3 a	610.2±19.6 ab
		平均 Average	37.2±17.8 A	471.9±39.4 A	582.9±23.7 B
	花育 9513 Huayu 9513	D1	43.0±5.8 b	322.5±43.6 c	613.4±31.9 ab
		D2	25.2±0.7 d	378.3±10.4 bc	569.7±22.3 b
		D3	18.4±3.9 e	415.0±86.9 ab	666.0±30.5 a
		平均 Average	28.9±12.7 B	371.9±46.6 B	616.3±48.2 A
	品种 Variety (V)		**	**	**
	密度 Density (D)		**	ns	*
	品种×密度 V×D		ns	ns	ns
2020	花育 22 Huayu 22	D1	50.7±5.8 a	380.0±43.3 b	563.2±1.6 b
		D2	35.4±6.2 b	531.3±92.6 a	596.4±33.7 ab
		D3	24.9±3.8 c	560.6±85.2 a	595.4±19.1 ab
		平均 Average	37.0 ±12.9 A	490.6±96.9 A	585.0±18.9 A
	花育 9513 Huayu 9513	D1	39.3±5.4 b	294.4±40.6 b	628.4±46.5 a
		D2	20.8±3.1 c	312.5±46.9 b	580.7±18.1 ab
		D3	16.1±5.4 c	361.9±120.7 b	607.6±26.0 ab
		平均 Average	25.4±12.2 B	322.9±34.9 B	605.6±23.9 A
	品种 Variety (V)		**	**	ns
	密度 Density (D)		**	ns	ns
	品种×密度 V×D		ns	ns	ns

同一列不同小写字母表示不同密度间在 0.05 水平上差异显著, 组间不同大写字母表示不同品种间在 0.05 水平上差异显著。**表示在 0.01 水平差异显著; *表示在 0.05 水平差异显著; ns 代表差异不显著。缩写同图 1。

Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different plant density at the 0.05 probability level. Uppercase letters between groups indicate significant difference between different peanut cultivars at the 0.05 probability level. **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; ns: not significant. Abbreviations are the same as those given in Fig. 1.

2.2　密度对不同株型花生光合产物累积与分配的影响

由表 3 可看出, 幼苗期两花生品种群体干物质重均随密度的增大而增加, D2 比 D1 的增幅为 75.9%~114.5%, D3 比 D2 的增幅为 32.9%~42.9%。“花育 22”花针期、结荚期和收获期的植株干重均随密度的增加而增加, 而“花育 9513”花针期、结荚期和收获期干物质重随密度增加先增加后降低, D2 密度下植株干重最大。从不同生育时期的阶段干物质累积量来看, 密度极显著影响结荚前的干物质累积量, 对结荚后的干物质累积影响不显著。

由表 4 可知, 随密度的增加, 收获期干物质向根中的分配比例增加, 而干物质向果针的分配比例降低, 营养体/生殖体各密度处理间差异不显著。与直立型花生“花育 22”相比, 半匍匐型花生“花育 9513”根、茎、叶等营养体的干物质分配比例高, 而果和果针的干物质分配比例低, 营养体/生殖体的比值高, 这说明半匍匐型花生“花育 9513”的营养体大, 但干物质分配到荚果中的比例少, 因此产量较低。

表 3　密度对不同株型花生群体干物质累积的影响

Table 3　Effects of density on population dry matter accumulation of peanut with different plant types

年份 Year	品种 Variety	密度 Density	干物质重 Dry matter weight ($t\ hm^{-2}$)				阶段干物质累积量 Dry matter accumulation ($t\ hm^{-2}$)	
			幼苗期 SS	花针期 FPS	结荚期 PSS	收获期 HS	结荚前 BPS	结荚后 APS
2019	花育 22 Huayu 22	D1	/	4.5±0.4 ab	8.0±0.8 a	10.2±1.0 c	4.5±0.4 ab	5.7±0.7 b
		D2	/	5.6±0.6 ab	10.6±3.2 a	12.4±1.8 bc	5.6±0.6 ab	6.9±2.3 ab
		D3	/	6.1±0.7 a	11.6±2.7 a	15.0±1.9 ab	6.1±0.7 a	8.8±1.2 ab
		平均 Average	/	5.4±0.9 A	10.1±2.6 A	12.5±2.5 A	5.4±0.9 A	7.1±1.6 B
	花育 9513 Huayu 9513	D1	/	3.8±0.7 b	8.5±2.5 a	12.4±2.3 bc	3.8±0.7 b	8.6±1.6 ab
		D2	/	5.7±1.4 a	11.7±1.6 a	14.3±0.6 ab	5.7±1.4 a	8.6±1.4 ab
		D3	/	5.5±1.1 ab	10.6±1.8 a	16.1±2.2 a	5.5±1.1 ab	10.6±3.3 a
		平均 Average	/	5.0±1.3 A	10.3±2.2 A	14.3±2.3 A	5.0±1.3 A	9.3±1.2 A
	品种 Variety (V)			ns	ns	ns	ns	*
	密度 Density (D)			*	ns	**	*	ns
	品种×密度 V×D			ns	ns	ns	ns	ns
2020	花育 22 Huayu 22	D1	0.6±0.2 cd	5.8±0.3 bc	10.4±1.6 cd	9.6±1.3 ab	5.8±0.3 bc	3.9±1.6 a
		D2	1.1±0.3 b	7.3±0.5 ab	9.5±0.2 d	11.2±1.8 ab	7.3±0.5 ab	3.8±1.3 a
		D3	1.6±0.4 a	8.5±2.1 a	14.3±1.0 a	12.0±1.3 a	8.5±2.1 a	3.6±2.9 a
		平均 Average	1.1±0.5 A	7.2±1.6 A	11.4±2.4 A	11.0±1.7 A	7.2±1.6 A	3.8±0.2 A
	花育 9513 Huayu 9513	D1	0.5±0.1 d	4.0±0.5 c	9.9±1.6 d	9.8±0.7 ab	4.0±0.5 c	5.9±1.0 a
		D2	1.0±0.1 bc	6.6±0.1 ab	12.7±0.5 ab	10.6±1.3 ab	6.6±0.1 ab	4.0±1.3 a
		D3	1.3±0.2 ab	8.3±1.3 a	11.7±1.7 bc	9.0±0.5 b	8.3±1.3 a	0.7±0.8 b
		平均 Average	0.9±0.4 A	6.3±2.0 A	11.5±1.7 A	9.8±1.0 A	6.3±2.0 A	3.5±2.6 A
	品种 Variety (V)		ns	ns	ns	ns	ns	ns
	密度 Density (D)		**	**	**	ns	**	ns
	品种×密度 V×D		ns	ns	**	ns	ns	ns

同一列不同小写字母表示不同密度间在 0.05 水平上差异显著, 组间不同大写字母表示不同品种间在 0.05 水平上差异显著。**表示 0.01 水平差异显著; *表示 0.05 水平差异显著; ns 代表差异不显著。SS: 幼苗期; FPS: 花针期; PSS: 结荚期; HS: 收获期; BPS: 结荚前; APS: 结荚后。缩写同图 1。

Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different plant density at the 0.05 probability level. Uppercase letters between groups indicate significant difference between different peanut cultivars at the 0.05 probability level. **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; ns: not significant. SS: seedling stage; FPS: flower pegging stage; PSS: pod setting stage; HS: harvest stage; BPS: before pod setting; APS: after pod setting. Abbreviations are the same as those given in Fig. 1.

表 4 密度对不同株型花生收获期干物质分配的影响

Table 4 Effects of density on dry matter distribution of peanut with different plant types at harvest stage

年份 Year	品种 Variety	密度 Density	干物质分配比例 Dry matter distribution ratio (%)					营养体/生殖体 V/ R
			根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	果 Pod	果针 Peg	
2019	花育 22 Huayu 22	D1	1.7±0.5 b	21.8±3.7 b	6.7±2.2 c	66.0±3.1 a	3.9±1.3 a	0.4±0.1 b
		D2	1.8±0.6 b	24.2±1.4 b	8.7±7.4 c	62.3±6.9 a	3.1±0.4 a	0.5±0.2 b
		D3	3.0±0.7 a	25.0±4.0 b	9.1±4.3 bc	60.6±4.7 a	2.4±1.5 a	0.6±0.1 b
		平均 Average	2.1±0.7 A	23.6±1.7 B	8.1±1.3 B	63.0±2.8 A	3.1±0.7 A	0.5±0.1 B
	花育 9513 Huayu 9513	D1	2.1±0.4 a	36.4±1.0 a	17.0±2.9 ab	41.4±1.6 b	3.1±0.6 a	1.3±0.1 a
		D2	2.0±0.1 a	40.9±4.4 a	13.6±1.0 abc	41.0±4.0 b	2.5±1.1 a	1.3±0.2 a
		D3	2.8±1.0 a	39.4±2.6 a	18.0±2.8 a	37.7±3.8 b	2.1±0.1 a	1.5±0.2 a
		平均 Average	2.3±0.4 A	38.9±2.3 A	16.2±2.3 A	40.0±2.0 B	2.6±0.5 A	1.4±0.1 A
	品种 Variety (V)		ns	**	**	**	ns	**
	密度 Density (D)		*	ns	ns	ns	ns	ns
	品种×密度 V×D		ns	ns	ns	ns	ns	ns
2020	花育 22 Huayu 22	D1	1.4±0.1 e	27.4±1.9 b	1.8±0.8 cd	65.7±1.5 a	3.7±0.3 a	0.4±0.0 c
		D2	1.5±0.1 e	27.6±1.7 b	1.1±0.4 d	66.3±1.7 a	3.5±0.3 a	0.4±0.0 c
		D3	1.8±0.1 d	28.6±1.2 b	0.9±0.5 d	65.7±0.5 a	3.0±0.3 bc	0.5±0.0 c
		平均 Average	1.5±0.2 B	27.9±0.6 B	1.3±0.5 B	65.9±0.4 A	3.4±0.3 A	0.4±0.0 B
	花育 9513 Huayu 9513	D1	1.9±0.1 c	43.9±1.2 a	6.5±1.4 a	44.4±1.1 c	3.2±0.3 ab	1.1±0.0 a
		D2	2.3±0.2 b	43.3±2.1 a	5.2±1.8 ab	46.1±3.6 bc	3.1±0.1 bc	1.0±0.1 ab
		D3	2.6±0.1 a	43.1±0.4 a	3.5±0.2 bc	48.2±0.6 b	2.6±0.4 c	1.0±0.0 b
		平均 Average	2.3±0.3 A	43.5±0.4 A	5.1±1.5 A	46.2±1.9 B	3.0±0.3 B	1.0±0.1 A
	品种 Variety (V)		**	**	**	**	**	**
	密度 Density (D)		**	ns	*	ns	**	ns
	品种×密度 V×D		*	ns	ns	ns	ns	ns

同一列不同小写字母表示不同密度间在 0.05 水平上差异显著，组间不同大写字母表示不同品种间在 0.05 水平上差异显著。**表示在 0.01 水平差异显著; *表示在 0.05 水平差异显著; ns 代表差异不显著。V: 营养器官干重; R: 生殖器官干重。缩写同图 1。

Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different plant density at the 0.05 probability level. Uppercase letters between groups indicate significant difference between different peanut cultivars at the 0.05 probability level. **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; ns: not significant. V: dry matter of vegetative organs; R: dry matter of reproductive organs. Abbreviations are the same as those given in Fig. 1.

2.3 密度对不同株型花生叶面积系数变化动态及光合势的影响

由图 2 可知，幼苗期叶面积系数随密度增加显著增加，直立型花生“花育 22” D2 比 D1 增加 71.5%，D3 比 D2 增加 43.6%，而“花育 9513”叶面积 D2 比 D1 增加 112.5%，D3 比 D2 增加 42.4%。花针期叶面积系数随密度增加而增加，“花育 9513” D2 比 D1 的增幅高于“花育 22”。结荚期叶面积系数受密度影响不显著。收获期叶面积系数 2019 年“花育 22”随密度增加而增加，2020 年两花生品种叶面积系数均随密度增加而降低。同一密度不同品种间比较，结荚之前“花育 9513”的叶面积系数和“花育 22”相差不大，结荚至收获期的叶面积系数大于“花育 22”。

由图 3 可看出，密度显著影响结荚前花生叶片光合势，随密度的增加，光合势呈逐步增加的趋势，密度越大增幅越小。结荚前光合势随密度的增幅“花育 9513”大于“花育 22”。结荚期和饱果期“花育 22”光合势随密度的增加而增加，“花育 9513”的光合势 D3 和 D2 差异不显著，甚至有所降低。同一密度，两品种相比，“花育 9513”的光合势在结荚前与“花育 22”差异不显著，但结荚至收获期显著高于“花育 22”。

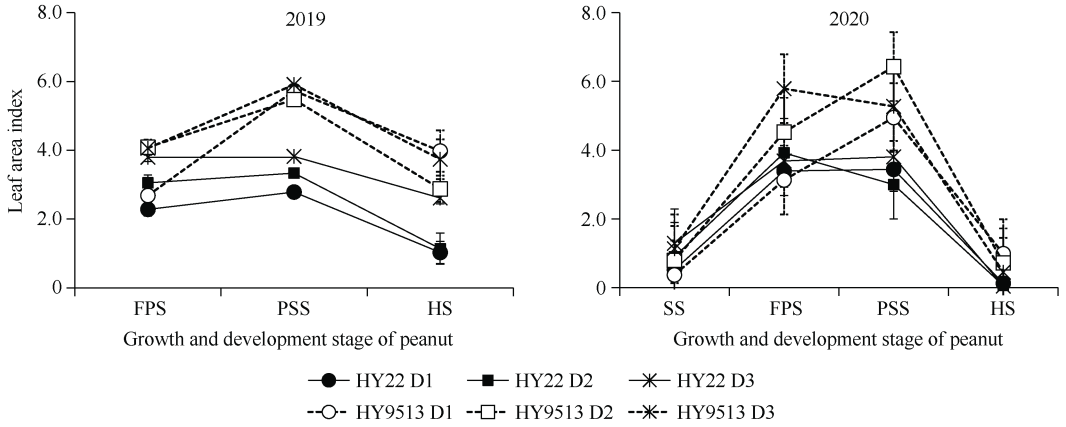


图 2　密度对不同株型花生叶面积系数的影响

Fig. 2　Effects of density on leaf area index of peanut with different plant types

缩写同表 3 和图 1。Abbreviations are the same as those given in Table 3 and Fig. 1.

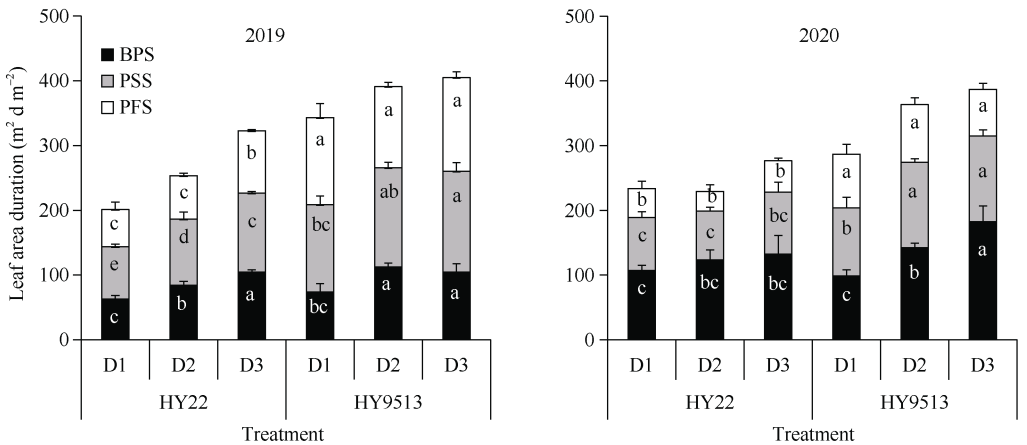


图 3　密度对不同株型花生光合势的影响

Fig. 3　Effects of density on leaf area duration of peanut with different plant types

同一时期标以不同小写字母表示不同密度间在 0.05 水平上差异显著。BPS: 结荚前; PSS: 结荚期; PFS: 饱果期。缩写同图 1。

Different lowercase letters indicate significant difference among different plant density at the 0.05 probability level at the same stage. BPS: before pod setting; PSS: pod setting stage; PFS: pod fulling stage. Abbreviations are the same as those given in Fig. 1.

2.4　密度对不同株型花生粒叶比的影响

由表 5 可看出, 随密度的增加, 花生的粒叶比(结实数/叶面积、果数/叶面积、果重/叶面积)的变化趋势因年份和品种不同而不同, 2019 年“花育 22”的粒叶比随密度的增加呈降低的趋势, “花育 9513”随密度的增加呈增加的趋势; 2020 年“花育 22”和“花育 9513”的粒叶比均随密度的增加呈增加的趋势, 但各密度处理间差异不显著。品种对粒叶比的影响达显著水平, “花育 22”的粒叶比显著高于“花育 9513”。

2.5　密度对不同株型花生植株性状的影响

由图 4 可知, 结荚前花生主茎高、侧枝长随密度的增加呈增加的趋势, 结荚后“花育 22”主茎高、侧枝长随密度的增加变化不显著, “花育 9513”的主茎高随密度的增加呈增加的趋势, 而侧枝长随密度的增加呈降低的趋势。“花育 9513”株型指数随生育期的推进呈逐步降低的趋势, 结荚期之前显著高于“花育 22”, 并随密度的增加呈逐步降低的趋势, 2019 年和 2020 年 D3 分别比 D1 的株型指数降低 16.64%和 15.42%; 而“花育 22”株型指数随密度变化规律不明显。

由表 6 可见, 收获期单株侧枝数和果枝数随密度的增加呈降低的趋势, “花育 9513”单株侧枝数随密度的增加降幅大于“花育 22”, “花育 9513”的侧枝数 D2 比 D1 和 D3 比 D2 分别降低 38.1%和 46.2%, “花育 22”的侧枝数两者分别降低 50.5%和–22.0%。群体侧枝数和果枝数随密度增加, “花育 22”呈逐渐增加的趋势, “花育 9513”呈先升高后降低的趋势, D2 最多, D2 和 D3 差异不显著, 均大于 D1。有效枝比率

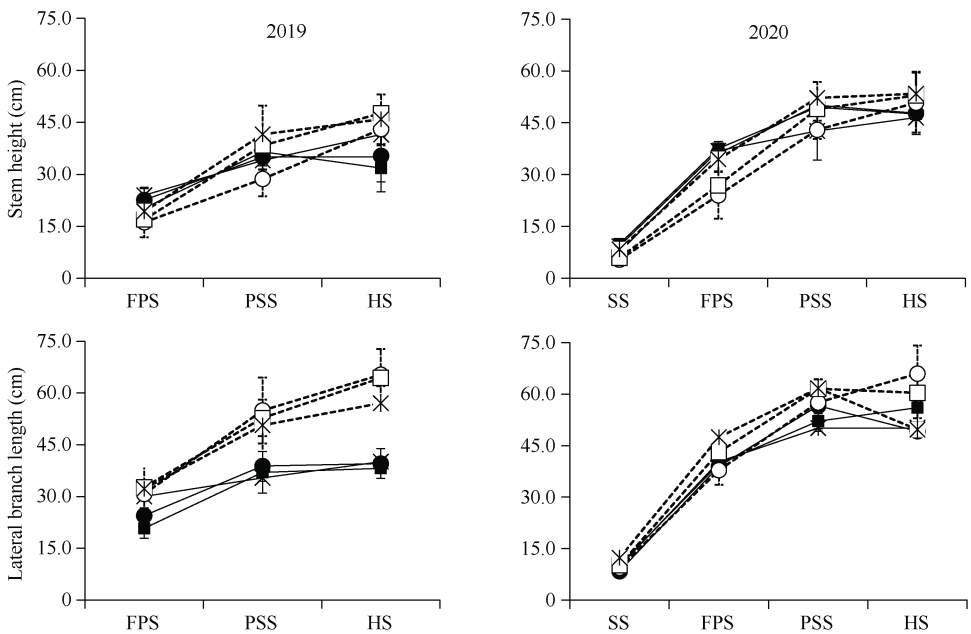
表 5 密度对不同株型花生粒叶比的影响

Table 5 Effects of density on grain to leaf of peanut with different plant types

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	结实数/叶面积 Number of fruits/Leaf area (No. dm^{-2})	果数/叶面积 Number of pods/Leaf area (No. dm^{-2})	果重/叶面积 Dry weight of pods/Leaf area (g dm^{-2})
2019	花育 22 Huayu 22	D1	1.8±0.2 a	1.6±0.2 a	2.4±0.3 a
		D2	1.8±0.6 a	1.3±0.4 ab	2.0±0.4 ab
		D3	1.4±0.7 ab	1.2±0.6 ab	1.9±0.7 abc
		平均 Average	1.7±0.5 A	1.4±0.4 A	2.1±0.5 A
	花育 9513 Huayu 9513	D1	0.9±0.1 b	0.7±0.1 b	1.1±0.2 cd
		D2	0.8±0.2 b	0.6±0.1 b	1.0±0.2 d
		D3	1.1±0.3 ab	0.8±0.4 b	1.2±0.5 bcd
		平均 Average	0.9±0.2 B	0.7±0.2 B	1.1±0.3 B
	品种 Variety (V)		**	**	**
	密度 Density (D)		ns	ns	ns
	品种×密度 V×D		ns	ns	ns
2020	花育 22 Huayu 22	D1	1.4±0.2 a	1.1±0.2 a	1.9±0.3 a
		D2	1.8±0.1 a	1.4±0.1 a	1.9±0.1 a
		D3	1.8±0.4 a	1.4±0.5 a	2.0±0.6 a
		平均 Average	1.7±0.3 A	1.3±0.3 A	1.9±0.3 A
	花育 9513 Huayu 9513	D1	0.7±0.1 b	0.5±0.2 b	0.8±0.2 b
		D2	0.7±0.1 b	0.5±0.1 b	0.8±0.1 b
		D3	0.9±0.2 b	0.6±0.1 b	0.8±0.1 b
		平均 Average	0.7±0.2 B	0.5±0.1 B	0.8±0.1 B
	品种 Variety (V)		**	**	**
	密度 Density (D)		ns	ns	ns
	品种×密度 V×D		ns	ns	ns

同一列不同小写字母表示不同密度间在 0.05 水平上差异显著，组间不同大写字母表示不同品种间在 0.05 水平上差异显著。**表示在 0.01 水平差异显著; *表示在 0.05 水平差异显著; ns 表示差异不显著。缩写同图 1。

Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different plant density at the 0.05 probability level. Uppercase letters between groups indicate significant difference between different peanut cultivars at the 0.05 probability level. **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; ns: not significant. Abbreviations are the same as those given in Fig. 1.



(图 4)

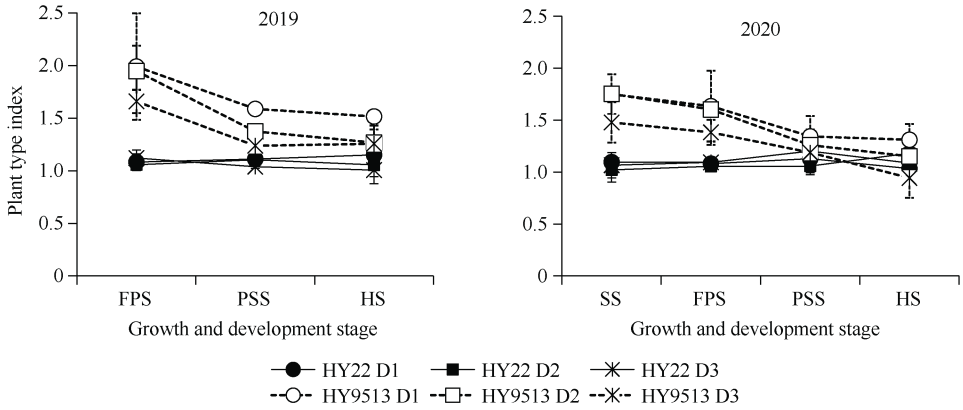


图 4　密度对不同株型花生植株性状的影响

Fig. 4　Effects of density on plant characteristics of peanut with different plant types

缩写同表 3 和图 1。Abbreviations are the same as those given in Table 3 and Fig. 1.

表 6　密度对不同株型花生收获期分枝数的影响

Table 6　Effects of density on branch number of peanut with different plant types at harvest stage

品种 Variety	密度 Density	侧枝数 Number of lateral branches		果枝数 Number of fruit branches		有效枝比率 Effective branch ratio (%)
		单株 Single (No. plant^{-1})	群体 Population ($\times10^4$ hm^{-2})	单株 Single (No. plant^{-1})	群体 Population ($\times10^4$ hm^{-2})	
花育 22 Huayu 22	D1	30.3±2.5 bc	227.5±18.9 c	11.7±1.2 b	87.5±8.7 b	38.8±6.8 b
	D2	15.0±3.0 d	225.0±45.0 c	10.0±3.0 b	150.0±45.0 ab	69.6±26.7 a
	D3	18.3±0.6 d	412.5±13.0 b	9.3±1.5 b	210.0±34.4 a	51.1±9.5 ab
花育 9513 Huayu 9513	D1	63.0±5.0 a	472.5±37.5 ab	19.7±6.0 a	147.5±26.5 ab	31.2±2.6 b
	D2	39.0±7.0 b	585.0±105.0 a	12.0±0.0 b	180.0±0.0 a	30.8±5.2 b
	D3	21.0±5.6 cd	472.5±125.3 ab	8.0±1.0 b	180.0±22.5 a	41.1±17.0 b

同一列不同小写字母表示不同密度间在 0.05 水平上差异显著。缩写同图 1。

Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different plant density at the 0.05 probability level. Abbreviations are the same as those given in Fig. 1.

为果枝数与侧枝数的比值, 由表 6 可看出, 随密度的增加, 有效枝比率呈升高的趋势, “花育 9513”的有效枝比率低于“花育 22”。

2.6　产量与群体质量指标的相关性分析

由表 7 可知, 直立型花生“花育 22”荚果产量与结荚期的光合势、收获期的植株干重呈显著正相关, 与收获期的叶面积系数、饱果期的光合势及结荚后的干物质累积呈极显著正相关, 与主茎高、侧枝长呈负显著相关, 说明主茎高、侧枝长并非越长越好, 而是要有适宜的值, 超过后反而会降低产量; 半匍匐型花生“花育 9513”荚果产量与果重/叶面积呈显著正相关, 与收获期叶面积系数、结荚期和饱果期的光合势、收获期植株干重及结荚后的干物质累积呈极显著正相关, 与结荚前的光合势呈显著负相关。这说明维持花生结荚后较高的叶片光合持续时间、光合产物累积量, 收获期具有较高的叶面积系数和生物量是提高花生荚果产量的重要途径。

3　讨论

合理密植是构建合理群体结构、提高作物产量的重要技术措施[28-30], 不同株型作物产量对密度的响应不同[31-32]。本研究结果表明, 直立型花生“花育 22”荚果产量随密度的增加呈增加的趋势, 半匍匐型花生“花育 9513”随密度增加先升高后降低, 通过一元二次方程模拟, “花育 22”的最适种植密度为 22.5 万株 hm^{-2}, 而“花育 9513”的最适种植密度为 14 万株 hm^{-2}。同一密度下, “花育 9513”的荚果产量显著低于“花育 22”, 从产量构成要素看, “花育 9513”产量低主要因为公顷果数少、且果重小(千克果数多)。进一步研究发现, 密度越高两品种间的产量差异越大, 这可能由于“花育 22”株型比较紧凑, 耐密性比较好, 而“花育 9513”株型比较松散, 在高密度条件下容易出现群体荫蔽、透风透光性差等问题。作物群体质量和群体光合性能与冠层结构的优劣密切相

表 7 荚果产量与群体质量指标相关性分析

Table 7 Correlation analysis between pod yield and population quality index

群体质量指标 Population quality index	花育 22 Huayu 22	花育 9513 Huayu 9513
单位面积株数 Number of plants per hm^2	0.357	−0.138
单株果数 Number of pods per plant	−0.298	0.287
公顷果数 Number of pods per hm^2	0.328	0.420
千克果数 Number of pods per kg	0.005	−0.107
结实数/叶面积 No. of fruits/the maximum leaf area	−0.124	0.288
果数/叶面积 No. of pods/the maximum leaf area	−0.097	0.386
果重/叶面积 Dry weight of pods/the maximum leaf area	−0.119	0.488*
主茎高 Stem height	−0.488*	−0.426
侧枝长 Lateral branch length	−0.503*	0.189
株型指数 Plant type index	−0.069	0.368
侧枝数 The number of lateral branches	0.235	0.107
花针期叶面积系数 LAI of flower pegging stage	0.071	−0.355
结荚期叶面积系数 LAI of pod setting stage	0.345	−0.024
收获期叶面积系数 LAI of harvest stage	0.590**	0.684**
结荚前光合势 LAD before pod setting stage	−0.312	−0.480*
结荚期光合势 LAD of pod setting stage	0.564*	0.605**
饱果期光合势 LAD of pod fulling stage	0.612**	0.769**
花针期植株干重 DMW of flower pegging stage	−0.252	−0.291
结荚期植株干重 DMW of pod setting stage	0.103	−0.276
收获期植株干重 DMW of harvest stage	0.537*	0.712**
结荚前干物质累积 DMW accumulation before pod setting stage	−0.252	−0.291
结荚后干物质累积 DMW accumulation after pod setting stage	0.634**	0.686**
结荚期干物质累积 DMW accumulation of pod setting stage	0.281	−0.018
饱果期干物质累积 DMW accumulation of pod fulling stage	0.336	0.697**

**表示在 0.01 水平差异显著; *表示在 0.05 水平差异显著。LAI: 叶面积系数; LAD: 光合势; DMW: 干物质重。

**: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$. LAI: leaf area index; LAD: leaf area duration; DMW: dry matter weight.

关[33-35], 今后将围绕冠层结构、光能截获、群体光合性能等方面开展不同株型花生群体质量研究。

农作物高产的基础是提高群体的光合产物累积, 并以较大的比例转移到经济器官中[36-37]。干物质生产速率峰值高, 后期下降速度慢, 是超高产群体的显著特征[38]。本研究表明, 直立型花生“花育 22”植株群体干重整个生育期均随密度的增加而增加, 密度越大增幅越小, 在高密度(22.5 万株 hm^{-2})下具有高的干物质积累和产量。“花育 9513”植株干重花针期之后随密度增加先增加后降低, D2 密度植株干重最大, 说明耐密性较差。收获期“花育 9513”和“花育 22”的植株干物质重差异不显著。从不同阶段干物质累积来看, 增加密度增加了花生结荚前的干物质累积, 结荚后的干物质累积变化规律不明显。与“花育 22”相比, “花育 9513”根、茎、叶等营养体的干物质分配比例高, 而果和果针的干物质分配比例低, 营养体/生殖体的比值高, 这可能是“花育 9513”产量低于“花育 22”的原因。

光合作用是作物产量的基础[39-40], 作物光合产物的累积取决于光合源强度的大小, 而光合面积的大小和持续时间是反映源强弱的重要指标。王才斌等[41]研究指出花生高产不仅要有较高的叶面积系数, 而且生育后期降低慢, 高值持续时间长。本研究结果表明, 结荚期之前叶面积系数随密度的增加显著增加, 收获期叶面积系数 2019 年“花育 22”随密度增加而增加, 2020 年两品种随密度的增加而降低, “花育 9513”的降幅大于“花育 22”, 说明“花育 9513”在较高密度下容易造成叶片早衰脱落。花生叶片的衰老源于活性氧代谢的失调, 一方面提高了活性氧的生产速率, 另一方面破坏了以 SOD 为主导的细胞保护酶系统[42-43], 今后将加强不同株型花生叶片活性氧代谢和细胞保护酶活性的研究。光合势为反映光合持续时间长短的重要指标, 花生结荚前光合势随密度增加呈增加的趋势, 密度越大增幅越小。结荚期和饱果期“花育 22”光合势随密度的增加而增加, “花育 9513”的光合势 D3 和 D2 差异不显著, 甚至有所降低, 这可能因为“花育 9513”的株型比较松散、耐密性差, 高密度条件下荫蔽、光合性能降低。光

合参数、光合色素含量和光合关键酶活性等是反映光合性能的重要指标, 今后将进一步从生理生化和分子机制等方面研究不同密度下两种株型花生功能叶片的光合性能。粒叶比是衡量作物群体库源是否协调、光合生产力好坏的重要指标[27]。研究表明, 作物的粒叶比随密度的增加而降低[28]。本研究结果表明, 密度对两不同株型花生品种的粒叶比影响不显著, 可能本实验设计的密度不够高, 还不足以对粒叶比产生显著影响。

茎秆特性是衡量作物群体质量好坏的重要指标。直立型花生的株型指数小于半匍匐型品种。本研究表明, “花育9513”的主茎高随密度的增加呈增加的趋势, 而侧枝长结荚后随密度的增加呈降低的趋势, 株型指数随密度的增加呈逐步降低的趋势; 直立型品种“花育22”株型指数随密度变化规律不明显。这说明半匍匐型花生“花育9513”在高密度条件下侧枝发育受到限制。成熟期侧枝数和果枝数是衡量花生群体结构的重要指标[44], 随密度的增加, 收获期单株侧枝数和果枝数显著减少, 群体侧枝数和果枝数呈增加的趋势, 与“花育22”相比, “花育9513”单株侧枝数随密度的增加降幅大, 而群体侧枝数随密度增加的增幅小。另外有效枝比率(果枝数/侧枝数)随密度的增加呈升高的趋势, “花育9513”的有效枝比率显著低于“花育22”, 这说明与直立型花生“花育22”相比, 半匍匐型品种“花育9513”的植株更易受密度的负面影响, 而较高密度条件下的群体质量恶化, 故产量降低。

与荚果产量的相关性分析结果表明, 两种花生荚果产量均与结荚后的干物质累积, 尤其是饱果期的干物质累积、光合势, 及收获期植株干重、叶面积系数呈显著或极显著正相关, 但与主茎高、侧枝长呈显著负相关。这说明主茎高、侧枝长并非越长越好, 而是要有适宜的值, 超过后反而会降低产量; 维持花生结荚后较高的叶片光合持续时间、光合产物累积量, 收获期具有较高的叶面积系数和生物量是提高花生荚果产量的重要途径。吴正锋等[45]也研究表明, 延长叶面积系数高值持续期, 保持结荚后较高的光合生产能力是花生高产的主要途径。

4　结论

密度对不同株型花生群体质量影响不同, 与直立型花生品种“花育22”相比, 半匍匐型花生品种“花育9513”干物质向荚果的分配比例少、经济系数和粒叶比低, 公顷果数少、荚果产量低; 半匍匐型花生“花育9513”耐密性不如直立型花生“花育22”, 高密度下群体质量差、产量低, 现行种植模式下最适种植密度低于“花育22”。

References

[1] 凌启鸿, 张洪程, 蔡建中, 苏祖芳, 凌厉. 水稻高产群体质量及其优化控制探讨. 中国农业科学, 1993, 26(6): 1–11.
Ling Q H, Zhang H C, Cai J Z, Su Z F, Ling L. Investigation on the population quality of high yield and its optimizing control programme in rice. *Sci Agric Sin*, 1993, 26(6): 1–11 (in Chinese with English abstract).

[2] 凌启鸿. 作物群体质量. 上海: 上海科学技术出版社, 2000. pp 1–2.
Ling Q H. Crop Population Quality. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2000. pp 1–2 (in Chinese).

[3] 魏海燕, 凌启鸿, 张洪程, 郭文善, 杨建昌, 陈德华, 冷锁虎, 陆卫平, 邢志鹏. 作物群体质量及其关键调控技术. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2018, 39(2): 1–9.
Wei H Y, Ling Q H, Zhang H C, Guo W S, Yang J C, Chen D H, Leng S H, Lu W P, Xing Z P. The quality of crop population and its key regulation technology. *J Yangzhou Univ* (Agric Life Sci Edn), 2018, 39(2): 1–9 (in Chinese with English abstract).

[4] 马尚宇, 王艳艳, 刘雅男, 姚科郡, 黄正来, 张文静, 樊永惠, 马元山. 播期、播量和施氮量对小麦干物质积累、转运和分配及产量的影响. 中国生态农业学报, 2020, 28: 375–385.
Ma S Y, Wang Y Y, Liu Y N, Yao K J, Huang Z L, Zhang W J, Fan Y H, Ma Y S. Effect of sowing date, planting density, and nitrogen application on dry matter accumulation, transfer, distribution, and yield of wheat. *Chin J Eco-Agric*, 2020, 28: 375–385 (in Chinese with English abstract).

[5] 黄艺华, 蒋桂英, 王海琪, 刘钰婷, 车子强. 氮肥基追比对滴灌春小麦群体质量及产量的影响. 西北农业学报, 2021, 30: 807–818.
Huang Y H, Jiang G Y, Wang H Q, Liu Y T, Che Z Q. Effect of base-topdressing ratio of nitrogen fertilizer on population quality and yield of spring wheat under drip irrigation. *Acta Agric Boreali-Occident Sin*, 2021, 30: 807–818 (in Chinese with English abstract).

[6] 朴琳, 李波, 陈喜昌, 丁在松, 张宇, 赵明, 李从锋. 优化栽培措施对春玉米密植群体冠层结构及产量形成的调控效应. 中国农业科学, 2020, 53: 3048–3058.
Piao L, Li B, Chen X C, Ding Z S, Zhang Y, Zhao M, Li C F. Regulation effects of improved cultivation measures on canopy structure and yield formation of dense spring maize population. *Sci Agric Sin*, 2020, 53: 3048–3058 (in Chinese with English abstract).

[7] Antonietta M, Fanello D D, Acciaresi H A, Guiamet J J. Senescence and yield responses to plant density in stay green and earlier-senescing maize hybrids from Argentina. *Field Crops Res*, 2014, 155: 111–119.

[8] 廖伯寿. 我国花生生产发展现状与潜力分析. 中国油料作物学报, 2020, 42: 161–166.
Liao B S. A review on progress and prospects of peanut industry in China. *Chin J Oil Crop Sci*, 2020, 42: 161–166 (in Chinese

with English abstract).

[9] 万书波, 张佳蕾, 张智猛. 花生种植技术的重大变革-单粒精播. 中国油料作物学报, 2020, 42: 927–933.
Wan S B, Zhang J L, Zhang Z M. Great change of peanut planting technology: single seed sowing. *Chin J Oil Crop Sci*, 2020, 42: 927–933 (in Chinese with English abstract).

[10] 梁晓艳, 郭峰, 张佳蕾, 孟静静, 李林, 万书波, 李新国. 单粒精播对花生冠层微环境、光合特性及产量的影响. 应用生态学报, 2015, 26: 3700–3706.
Liang X Y, Guo F, Zhang J L, Meng J J, Li L, Wan S B, Li X G. Effects of single-seed sowing on canopy microenvironment, photosynthetic characteristics and pod yield of peanut (*Arachis hypogaea*). *Chin J Appl Ecol*, 2015, 26: 3700–3706 (in Chinese with English abstract).

[11] 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).

[12] Zhang J L, Geng Y, Guo F, Li X G, Wan S B. Research progress on the mechanism of improving peanut yield by single-seed precision sowing. *J Integr Agric*, 2020, 19: 1919–1927.

[13] Liang X Y, Guo F, Feng Y, Zhang J L, Yang S, Meng J J, Li X G, Wan S B. Single-seed sowing increased pod yield at a reduced seeding rate by improving root physiological state of *Arachis hypogaea*. *J Integr Agric*, 2020, 19: 1019–1032.

[14] 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).

[15] 冯烨, 李宝龙, 郭峰, 孟静静, 李新国, 万书波. 单粒精播对花生活性氧代谢、干物质积累和产量的影响. 山东农业科学, 2013, 45(8): 42–46.
Feng Y, Li B L, Guo F, Meng J J, Li X G, Wan S B. Effects of single-seed precision sowing on active oxygen metabolism, dry matter accumulation and yield of *Arachis hypogaea* L. *Shandong Agric Sci*, 2013, 45(8): 42–46 (in Chinese with English abstract).

[16] 郭江, 郭新宇, 郭程瑾, 张凤路, 赵春江, 肖凯. 密度对不同株型玉米群体结构的调控效应. 华北农学报, 2008, 23(1): 149–153.
Guo J, Guo X Y, Guo C J, Zhang F L, Zhao C J, Xiao K. The effects of density on population structure of maize with different plant types. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2008, 23(1): 149–153 (in Chinese with English abstract).

[17] 徐宗贵, 孙磊, 王浩, 王淑兰, 王小利, 李军. 种植密度对旱地不同株型春玉米品种光合特性与产量的影响. 中国农业科学, 2017, 50: 2463–2475.
Xu Z G, Sun L, Wang H, Wang S L, Wang X L, Li J. Effects of different planting densities on photosynthetic characteristics and yield of different variety types of spring maize on dryland. *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 2463–2475 (in Chinese with English abstract).

[18] 刘俊华, 吴正锋, 李林, 郑永美, 孙学武, 李秋芝, 赵红军, 孙秀山, 王才斌, 万书波. 单粒精播密度对花生冠层结构及产量的影响. 中国油料作物学报, 2020, 42: 970–977.
Liu J H, Wu Z F, Li L, Zheng Y M, Sun X W, Li Q Z, Zhao H J, Sun X S, Wang C B, Wan S B. Effect of different density on canopy structure and pod yield of peanut under single seed precision sowing. *Chin J Oil Crop Sci*, 2020, 42: 970–977 (in Chinese with English abstract).

[19] 王亮, 李艳, 王桥江, 左文庆, 张力, 刘志刚, 韩萍, 魏建军. 滴灌条件下花生单粒播种密度对产量及其相关性状的影响. 安徽农业科学, 2015, 43(30): 380–382.
Wang L, Li Y, Wang Q J, Zuo W Q, Zhang L, Liu Z G, Han P, Wei J J. Effects of single-seed precision sowing densities on yield and major agronomic characters of peanut under the drip-irrigation conditions. *J Anhui Agric Sci*, 2015, 43(30): 380–382 (in Chinese with English abstract).

[20] 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 characteristics and yield of peanut under the mode of single-seed precision sowing. *J Agric*, 2013, 3(2): 1–5 (in Chinese with English abstract).

[21] 柏延文, 张宏军, 朱亚利, 郑学慧, 杨梅, 李从锋, 张仁和. 不同株型玉米冠层光氮分布、衰老特征及光能利用对增密的响应. 中国农业科学, 2020, 53: 3059–3070.
Bai Y W, Zhang H J, Zhu Y L, Zheng X H, Yang M, Li C F, Zhang R H. Responses of canopy radiation and nitrogen distribution, leaf senescence and radiation use efficiency on increased planting density of different variety types of maize. *Sci Agric Sin*, 2020, 53: 3059–3070 (in Chinese with English abstract).

[22] 李国卫, 秦圣豪, 刘译阳, 张佳蕾, 韩燕, 万书波. 花生株型相关性状研究进展. 中国油料作物学报, 2020, 42: 934–939.
Li G W, Qin S H, Liu Y Y, Zhang J L, Han Y, Wan S B. Advances in plant architecture studies of peanut. *Chin J Oil Crop Sci*, 2020, 42: 934–939 (in Chinese with English abstract).

[23] 彭振英, 单雷, 张智猛, 李新国, 万书波. 花生株型与高产. 花生学报, 2019, 48(2): 69–72.
Peng Z Y, Shan L, Zhang Z M, Li X G, Wan S B. High yield and plant type of peanut. *J Peanut Sci*, 2019, 48(2): 69–72 (in Chinese with English abstract).

[24] 李新国, 郭峰, 万书波. 高产花生理想株型的研究. 花生学报, 2013, 42(3): 23–26.
Li X G, Guo F, Wan S B. Peanut ideotypes with high yield. *J Peanut Sci*, 2013, 42(3): 23–26 (in Chinese with English abstract).

[25] 郭峰, 万书波, 王才斌, 李新国, 徐平丽, 张斌. 不同类型花生单粒精播生长发育、光合性质的比较研究. 花生学报, 2008, 37(4): 18–21.
Guo F, Wan S B, Wang C B, Li X G, Xu P L, Zhang B. Comparative study on peanut plant growth and development, photosynthesis for different peanut variety types under single-seed planting. *J Peanut Sci*, 2008, 37(4): 18–21 (in Chinese with English abstract).

[26] 梁晓艳, 郭峰, 张佳蕾, 李林, 孟静静, 李新国, 万书波. 不同密度单粒精播对花生养分吸收及分配的影响. 中国生态农业学报, 2016, 24: 893–901.

Liang X Y, Guo F, Zhang J L, Li L, Meng J J, Li X G, Wan S B. Effects of single-seed sowing at different densities on nutrient uptake and distribution in peanut. *Chin J Eco-Agric*, 2016, 24: 893–901 (in Chinese with English abstract).

[27] 凌启鸿, 杨建昌. 水稻群体“粒叶比”与高产栽培途径的研究. 中国农业科学, 1986, 19(3): 1–8.
Ling Q H, Yang J C. Studies on “grain-leaf ratio” of population and cultural approaches of high yield in rice plants. *Sci Agric Sin*, 1986, 19(3): 1–8 (in Chinese with English abstract).

[28] 淮贺举, 陆洲, 秦向阳, 李奇峰, 于莹, 臧辰龙. 种植密度对小麦产量和群体质量影响的研究进展. 中国农学通报, 2013, 29(9): 1–4.
Huai H J, Lu Z, Qin X Y, Li Q F, Yu Y, Zang C L. Advances of researches in plant density effects on the wheat yield and population quality. *Chin Agric Sci Bull*, 2013, 29(9): 1–4 (in Chinese with English abstract).

[29] Rasekh H, Asghari J, Safarzadeh wishkai M N, Massoumi S L, Zakerinejad R. Effect of planting pattern and plant density on physiological characteristics and yield of peanut (*Arachis hypogaea* L.) in Iran. *Res J Biol Sci*, 2010, 5: 542–547.

[30] 肖继兵, 刘志, 孔凡信, 辛宗绪, 吴宏生. 种植方式和密度对高粱群体结构和产量的影响. 中国农业科学, 2018, 51: 4264–4276.
Xiao J B, Liu Z, Kong F X, Xin Z X, Wu H S. Effects of planting pattern and density on population structure and yield of sorghum. *Sci Agric Sin*, 2018, 51: 4264–4276 (in Chinese with English abstract).

[31] 郭天财, 查菲娜, 马冬云, 宋晓, 岳艳军. 种植密度对两种穗型冬小麦品种干物质和氮素积累、运转及产量的影响. 华北农学报, 2007, 22(6): 152–156.
Guo T C, Zha F N, Ma D Y, Song X, Yue Y J. Effects of plant density on the accumulation and transfer of dry matter and nitrogen and grain yield of two winter wheat cultivars with different spike types. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2007, 22(6): 152–156 (in Chinese with English abstract).

[32] 柏延文, 杨永红, 朱亚利, 李红杰, 薛吉全, 张仁和. 种植密度对不同株型玉米冠层光能截获和产量的影响. 作物学报, 2019, 45: 1868–1879.
Bai Y W, Yang Y H, Zhu Y L, Li H J, Xue J Q, Zhang R H. Effect of planting density on light interception within canopy and grain yield of different plant types of maize. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 1868–1879 (in Chinese with English abstract).

[33] 董树亭, 胡昌浩, 岳寿松, 王群瑛, 高荣岐, 潘子龙. 夏玉米群体光合速率特性及其与冠层结构、生态条件的关系. 植物生态学与地植物学学报, 1992, 16: 372–378.
Dong S T, Hu C H, Yue S S, Wang Q Y, Gao R Q, Pan Z L. The characteristics of canopy photosynthesis of summer corn (*Zea mays*) and its relation with canopy structure and ecological conditions. *Acta Phytoecol Geobotan Sin*, 1992, 16: 372–378 (in Chinese with English abstract).

[34] 邬小春, 苏文楠, 韩清芳, 王兴义, 孟祥萍, 丁瑞霞, 王子煜. 密度对不同株型夏玉米光合特性与群体冠层结构的影响. 西北农业学报, 2016, 25: 1792–1801.
Wu X C, Su W N, Han Q F, Wang X Y, Meng X P, Ding R X, Wang Z Y. Effect of plant density on photosynthetic characteristics and canopy structure of different plant types of summer corn. *Acta Agric Boreali-Occident Sin*, 2016, 25: 1792–1801 (in Chinese with English abstract).

[35] Tharakan P J, Volk T A, Nowak C A, Ofezu G J. Assessment of canopy structure, light interception, and light-use efficiency of first year regrowth of shrub willow (*Salix* sp.). *Bioenerg Res*, 2008, 1: 229–238.

[36] Patil S B, Mansur C P, Gaur P M, Salakinkop S R, Alagundagi S C. Planting density affected dry matter production, partitioning, and yield in machine harvestable chickpea genotypes in the irrigated ecosystem. *Int J Plant Prod*, 2021, 15: 29–43.

[37] 孙彦浩, 刘恩鸿, 隋清卫, 李纪恩. 花生亩产千斤高产因素结构与群体动态的研究. 中国农业科学, 1982, 15(1): 71–75.
Sun Y H, Liu E H, Sui Q W, Li J E. Research on the high-yield factors and the population development of peanuts. *Sci Agric Sin*, 1982, 15(1): 71–75 (in Chinese with English abstract).

[38] 王才斌, 郑亚萍, 成波, 沙继锋, 姜振祥. 花生超高产群体特征与光能利用研究. 华北农学报, 2004, 19(2): 40–43.
Wang C B, Zheng Y P, Cheng B, Sha J F, Jiang Z X. The canopy characters and efficiency for solar energy utilization of supper high-yielding peanut. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2004, 19(2): 40–43 (in Chinese with English abstract).

[39] Zhu X G, Long S P, Ort D R. Improving photosynthetic efficiency for greater yield. *Annu Rev Plant Biol*, 2010, 61: 235–261.

[40] Long S P, Marshall-Colon A, Zhu X G. Meeting the global food demand of the future by engineering crop photosynthesis and yield potential. *Cell*, 2015, 161: 56–66.

[41] 王才斌, 孙彦浩, 陶寿祥, 梁裕元, 郑亚萍. 高产花生叶面积消长规律及其与荚果产量关系的研究. 花生科技, 1992, (3): 8–12.
Wang C B, Sun Y H, Tao S X, Liang Y Y, Zheng Y P. Study on the growth and decline law of leaf area and its relationship with pod yield of high-yield peanut. *Peanut Sci Technol*, 1992, (3): 8–12 (in Chinese).

[42] 李向东, 王晓云, 张高英, 万勇善, 李军. 花生叶片衰老与活性氧代谢. 中国油料作物学报, 2001, 23(2): 31–34.
Li X D, Wang X Y, Zhang G Y, Wan Y S, Li J. Leaf senescence and the metabolism of active oxygen in peanut. *Chin J Oil Crop Sci*, 2001, 23(2): 31–34 (in Chinese with English abstract).

[43] 李向东, 王晓云, 张高英, 万勇善, 李军. 花生叶片衰老过程中某些酶活性的变化. 植物生理学报, 2001, 27: 353–358.
Li X D, Wang X Y, Zhang G Y, Wan Y S, Li J. Changes in some enzyme activities of peanut leaves during leaf senescence. *Acta Phytophysiol Sin*, 2001, 27: 353–358 (in Chinese with English abstract).

[44] 万书波. 中国花生栽培学. 上海: 上海科学技术出版社, 2003. p 360.
Wan S B. Chinese Peanut Cultivation. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2003. p 360 (in Chinese).

[45] 吴正锋, 王才斌, 刘俊华, 万书波, 江荣风. 不同产量水平花生群体特征研究. 花生学报, 2013, 42(4): 7–13.
Wu Z F, Wang C B, Liu J H, Wan S B, Jiang R F. The population characteristics of peanut with different yield levels. *J Peanut Sci*, 2013, 42(4): 7–13 (in Chinese with English abstract).