中国油料作物学报
Chinese Journal of Oil Crop Sciences
2026,48(4):184-194
doi:10.19802/j.issn.1007-9084.2025286

ARC菌剂与氮肥协同调控不同结瘤特性花生光合特性及产量研究

徐安宁[1],郭凡[1],韩青[1],侯苏婷[1],刘永琪[1],王婧[1],高士博[1],唐晓光[1],王晓光[1],赵新华[1],蒋春姬[1*],于海秋[1,2*]
(1.沈阳农业大学农学院,辽宁 沈阳,110866;
2.辽宁农业职业技术学院,辽宁 营口,115009)

摘要:探究ARC菌剂与氮肥协同对不同结瘤特性花生光合特性的影响,旨在阐明其对花生产量的调控效应,为花生绿色高产栽培提供技术支撑和参考依据。于2023-2024年连续2年选用高效结瘤品种湘花11(XH11)与不结瘤品系DH9为试验材料,采用室外盆栽方法,分别设置ARC微生物菌剂施用量两个水平(0 kg·hm^{-2},T0;30 kg·hm^{-2},T1),氮肥施用量两个水平(0 kg·hm^{-2},N0;75 kg·hm^{-2},N1),系统探究ARC菌剂与氮肥互作对不同结瘤特性花生光合特性及产量形成的影响。结果表明ARC菌剂与氮肥协同均能提高光合效率,促进干物质积累,优化产量构成因素。施用ARC菌剂与氮肥,能显著提高花生的主茎高、侧枝长、叶片叶绿素含量、净光合速率、蒸腾速率以及气孔导度,T1N1处理下各项指标均显著高于单一施用ARC菌剂(T1)或氮肥的处理(N1)。两年间T1N1处理较单施ARC菌剂(T1)或单施氮肥(N1)XH11的干物质积累量平均增加13.90%、28.86%,单株荚果数平均增加20.79%、18.29%,单株饱果数增加了16.73%、23.85%,单株产量增加13.58%、8.77%;DH9的干物质积累量平均增加8.81%、22.32%,单株荚果数平均增加18.14%、7.95%,单株饱果数平均增加26.78%、17.95%,单株产量增加12.50%、12.75%。综上,ARC菌剂与氮肥互作T1N1处理优于单施ARC菌剂(T1)或单施氮肥(N1),保证产量的同时减少了氮肥投入,是一种适于大田推广的绿色、增产增效途径。

关键词:花生;ARC微生物菌剂;施氮量;结瘤特性;光合;产量
中图分类号: S565.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:**1007-9084(2026)04-0184-11

Synergistic regulation of photosynthetic characteristics and yield of peanuts with different nodulation traits by ARC inoculant and nitrogen fertilizer

XU An-ning[1], GUO Fan[1], HAN Qing[1], HOU Su-ting[1], LIU Yong-qi[1], WANG Jing[1], GAO Shi-bo[1], TANG Xiao-guang[1], WANG Xiao-guang[1], ZHAO Xin-hua[1], JIANG Chun-ji[1*], YU Hai-qiu[1,2]
(1. *College of Agriculture, Shenyang Agricultural University, Shenyang* 110866, *China*;
2. *Liaoning Agricultural Vocational and Technical College, Yingkou* 115009, *China*)

Abstract: To clarify the regulatory effects of the synergistic interaction between ARC microbial inoculant and nitrogen fertilizer on peanut yield, and to provide a theoretical basis for green and high-yield peanut cultivation, this study investigated the responses of photosynthetic characteristics in peanut varieties with contrasting nodulation traits to combined inoculant and nitrogen application. A two-year field pot experiment (2023 - 2024) was conducted using a highly nodulating cultivar Xianghua 11 (XH11) and a non-nodulating line DH9, with two ARC inoculant rates (0 kg·hm^{-2}, T0; 30 kg·hm^{-2}, T1) and two nitrogen application levels (0 kg·hm^{-2}, N0; 75 kg·hm^{-2} pure N, N1). Results showed that the combined application of ARC inoculant and nitrogen fertilizer significantly improved photosynthetic efficiency, promoted dry matter accumulation, and optimized yield components compared with single-factor treatments. Specifically, the T1N1 treatment (30 kg·hm^{-2} ARC + 75 kg·hm^{-2} N) significantly increased main

收稿日期:2025-12-11
基金项目:国家重点研发计划(2024YFD2301000);辽宁省教育厅一般项目(LJ212410157069);辽宁省科技计划联合计划(2024-MSLH-417)
作者简介:徐安宁(2000-),女,硕士研究生,研究方向为花生高产栽培,E-mail: Xuan06182025@163.com
* 通讯作者:蒋春姬(1974-),女,副教授,博士,研究方向为花生高产栽培生理,E-mail: jiangchunji2002@syau.edu.cn;
于海秋(1971-),女,教授,博士,研究方向为花生生物学与遗传改良,E-mail: yuhaiqiu@syau.edu.cn

stem height, lateral branch length, leaf chlorophyll content, net photosynthetic rate, evaporation rate, and stomatal conductance in both peanut genotypes. For XH11, two-year average dry matter accumulation under T1N1 was 13.90% and 28.86% higher than that under T1 and N1 alone, respectively, accompanied by increases of 20.79% and 18.29% in pod number per plant, 16.73% and 23.85% in filled pod number, and 13.58% and 8.77% in kernel yield per plant. For DH9, T1N1 increased dry matter accumulation by 8.81% and 22.32%, pod number by 18.14% and 7.95%, filled pod number by 26.78% and 17.95%, and kernel yield by 12.50% and 12.75% compared with T1 and N1 alone, respectively. These findings indicate that the synergistic effect of ARC inoculant and nitrogen fertilizer in T1N1 treatment is superior to single-factor applications, as it ensures stable yield while reducing nitrogen input, providing a green, high-yield, and efficient cultivation strategy suitable for large-scale field promotion.

Key words: peanut; microbial agent ARC inoculum; nitrogen application rate; nodulation characteristics; photosynthesis; yield

花生(*Arachis hypogaea* L.)作为我国重要的油料与经济作物,在保障食用油供给安全、促进农民增收及推动产业升级方面具有关键作用[1]。氮是植物生长发育的必需营养元素,参与叶绿素、蛋白质和核酸等关键物质的合成,并直接调控光合作用与物质代谢过程[2,3]。花生作为豆科植物,能够通过与根瘤菌共生固氮,将空气中的氮气转化为可利用形态,部分满足其氮素需求[4-6],但其固氮量通常只能满足作物总氮需求的50%~60%,无法满足生长所需,也依赖土壤中的有机与无机氮,同时还来源于人工施用的化学氮肥。为减少对化学氮肥的依赖并进一步提高花生的氮素利用效率,近年来微生物菌剂的应用成为研究热点。其中,由中国农业科学院油料作物研究所合作团队研制出一种含有侧孢短芽孢杆菌、路德维希肠杆菌、解淀粉芽孢杆菌和胶质芽孢杆菌4种PGPR菌株——ARC菌剂,该菌剂在花生中表现出超级结瘤现象,并大幅提高固氮能力。因此,探究ARC菌剂与氮肥协同调控不同结瘤特性花生光合特性及产量,将是实现花生减氮增效、绿色生产的关键途径。

光合作用是产量形成的物质和能量基础,受氮素供应显著影响。已有研究表明,适宜的氮肥施用可以改善叶片光合性能,但过量则可能导致徒长或功能期缩短[7,8]。近年来,微生物菌剂作为一种环境友好型农业投入品,在促进作物生长、提高产量与品质方面展现出广阔前景[9]。研究表明,菌剂中所含的有益微生物可通过分泌植物生长激素直接刺激植株生长发育,这些微生物能与花生根系建立互利共生关系,增强植株对养分的吸收能力,进而提升生物量与经济产量[10-12]。ARC菌剂是一类非根瘤菌类的微生物制剂,能够提升作物根瘤的固氮酶活性。在长江流域的湖北红安、湖南邵东和江西丰城等示范点的试验表明,ARC菌剂可促进花生结瘤、增强固氮能力,进而促进生长发育并提高产量[13],室内控制试验也进一步验证了其在盆栽条件下的积极效果[14]。利用微生物菌剂部分替代氮肥,不仅能满足大豆正常生长的养分需求,还可同步提高产量与品质[15]。这些结果为花生生产中推广"菌剂+减氮"的绿色增产模式提供了有力支持。尽管已有研究在微生物菌剂应用方面取得了显著进展,但关于ARC菌剂与氮肥协同调控不同结瘤特性花生光合特性及产量形成的研究仍较为缺乏。因此,系统探讨ARC菌剂与氮肥互作对不同结瘤特性花生生理响应,特别是光合特性及产量构成的影响,有望为花生绿色高效生产提供创新性解决方案,进而实现提质增产与经济效益提升的双重目标。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

于2023-2024年在沈阳农业大学科学试验基地进行,基地位于辽宁省沈阳市(41°82′N;123°56′E),属温带半湿润大陆性气候,2023年全市年平均气温9.7℃,全市年平均降水量651.7 mm;2024年全市年平均气温9.6℃,全省年平均降水量977.6 mm。供试土壤类型均为棕壤土,其他土壤理化性质如表1。

供试材料为高结瘤花生湘花11(XH11)和不结瘤花生品系DH9,由沈阳农业大学花生研究所提供。生物菌剂为ARC-BBBE,由中国农业科学院油料作物研究所提供。

1.2 试验设计

本试验为品种、ARC菌剂(T)和氮肥用量(N)多因素设计,采用室外盆栽方式。品种为高结瘤花生品种湘花11(XH11)和不结瘤花生品系(DH9);ARC

表1 土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil

年份 Year	有机质含量 Organic matter /(g·kg^{-1})	碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen /(mg·kg^{-1})	有效磷 Available phosphorus /(mg·kg^{-1})	速效钾 Available potassium /(mg·kg^{-1})
2023	15.6	117.7	26.2	118.12
2024	16.4	119.1	25.3	117.32

菌剂施入量包括不施菌剂0 kg·hm^{-2}(T0)处理和施30 kg·hm^{-2}(T1)菌剂处理;氮肥用量包括不施氮肥0 kg·hm^{-2}(N0)处理和施纯氮量75 kg·hm^{-2}(N1:46%尿素)处理(图1),每个处理5次重复,每盆中心位置处一穴播种5粒以保证出苗率,苗齐后间苗至每盆一株。试验用盆为不透明塑料花盆,盆高40 cm,直径37 cm,每盆装入30 kg土壤,ARC菌剂充分混匀(0~20 cm土层),并适量浇水使菌剂充分溶解,不施ARC菌剂处理用相同量水浇湿。将尿素(46%N)、600 kg·hm^{-2}过磷酸钙(P_2O_5)和225 kg·hm^{-2}硫酸钾(K_2O)作为底肥,于播种前与土壤充分混合施入。2023年5月20日播种,于9月20日收获;2024年5月12日播种,于9月15日收获。

1.3 测定的项目及方法

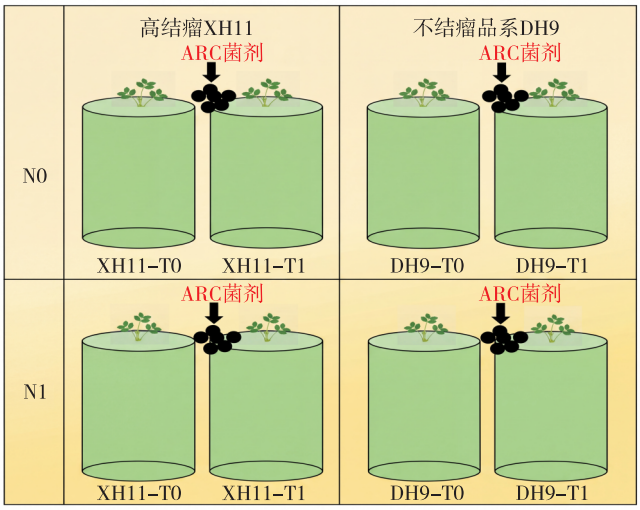
1.3.1 形态指标 用尺子测量结荚期花生的主茎高、侧枝长等形态指标。将根系冲洗干净后,用Epson Perfection v700型扫根仪进行扫描,Rhizo pheno软件进行分析。

1.3.2 叶绿素含量 在开花下针期和结荚期,上午对花生植株进行取样。取花生主茎完全展开的倒三叶,避开叶脉剪碎后称取0.1 g,浸泡在95%的乙醇中避光提取48 h,将提取液用紫外分光光度计分别在665 nm、649 nm波长下测定吸光值,计算叶绿素含量[16]。

1.3.3 叶片光合相关指标参数 于花生结荚期,使用CIRAS-2便携式光合作用测定系统(PPsystems,Amesbury,美国),设定叶室温度25℃,光强1200 μmol·m^{-2}·s^{-2},CO_2浓度380 μmol·mol^{-2},在天气晴朗的上午测定花生植株主茎倒三叶的净光合速率(Pn)、蒸腾速率(E)、气孔导度(Gs)、胞间CO_2浓度(Ci),每个处理测定3次重复。

1.3.4 地上部各器官干物质积累量 分别在花针期、结荚期和成熟期取长势一致的植株5株,对茎、叶、根和果进行分样。于105℃条件下杀青30min,80℃烘干至恒重,用电子天平称重。

1.3.5 产量及产量构成 花生成熟期每品种各处理连续取5株花生植株,装入大号纱网袋中,自然风干至恒重。测定单株荚果数、单株饱果数、单株荚



注:XH11和DH9:结瘤花生品种湘花11和不结瘤花生品系DH9;T0和T1:ARC菌剂施入量,不施菌剂为T0处理,施菌剂30 kg·hm^{-2}为T1处理;氮肥用量,N0处理为不施氮肥,N1处理为施纯氮量75 kg·hm^{-2}(以46%尿素计算);下同

Note: XH11 and DH9: nodulating peanut cultivar Xianghua 11 (XH11) and non-nodulating line DH9; T0 and T1: application rates of ARC inoculant, with no inoculant application as T0 treatment, and 30 kg·hm^{-2} inoculant application as T1 treatment; Nitrogen application rates, with no nitrogen fertilizer application as N0 treatment, and 75 kg·hm^{-2} pure nitrogen application (46% urea) as N1 treatment; Same as below

图1 试验设计示意图

Fig. 1 Test design diagram

果重、百果重、百仁重,用百分之一天平准确称重。

1.4 数据处理

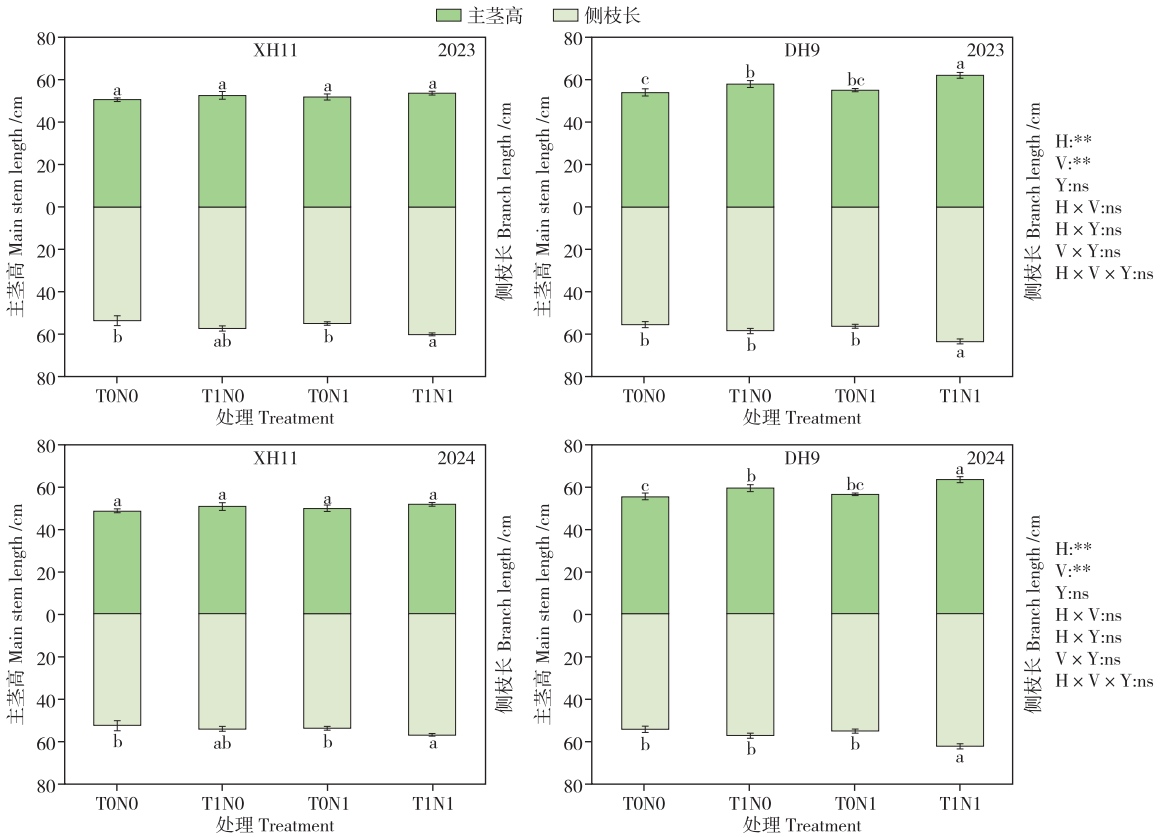
用 SPSS 20.0、Excel 2019 和 Origin 2024 软件进行数据整理分析以及作图。

2 结果与分析

2.1 ARC 菌剂和氮肥对植株形态特征的协同影响

2.1.1 主茎高和侧枝长 由图2可知,ARC菌剂与氮肥施用对DH9的主茎高与侧枝长均具有显著影响;对XH11侧枝长影响显著。处理间高低依次为T1N1>T1N0>T0N1>T0N0,在2年试验中,DH9在T1N1处理下的主茎高和侧枝长均显著高于单一处理,XH11的主茎高平均增幅分别为3.68%、1.99%、6.10%,侧枝长的平均增幅分别为6.46%、3.41%、9.01%;DH9的主茎高平均增幅分别为12.50%、6.94%、14.77%,侧枝长的平均增幅分别为12.84%、8.62%、14.55%。分析表明,不结瘤品系DH9所受的促进作用显著高于高效结瘤品种XH11。

2.1.2 根系形态 如图3所示,两年试验中花生根系发育呈现一致的动态规律。在T1N1处理下,总根长显著高于其他单一处理,XH11在2023年和2024年较与T0N0处理分别增加24.43%和22.03%;DH9分别增加36.79%与24.21%。XH11和DH9的总根长在结荚期达到最大值。根表面积方面,XH11在不同时期均大于DH9,且各处理间差异显著。与T0N0相比T1N1处理下,XH11根表面积最大增加了30.28%;DH9最大增加了45.20%,表明ARC菌剂对不结瘤品种根表面积的促进作用更强。根系体积整体表现为XH11>DH9。在花针期



注:不同小写字母表示各品种间施氮处理下差异显著($P<0.05$)。在多因素方差分析中,V、H、Y分别代表品种、处理和年份,*表示$P<0.05$,**表示$P<0.01$,ns表示不显著。每个处理3个重复的数据进行方差分析,采用LSD法检验$P<0.05$水平上的差异显著性,数值为平均值±SE(n=6)。下同

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among varieties under nitrogen application ($P< 0.05$). In the multi-factor analysis of, V, T, and Y represent variety, treatment, and year, respectively. *: $P< 0.05$; **: $P< 0.01$; ns: no significant difference. Data of each treatment with 3 replicates are analyzed by variance analysis, and the significant differences at 0.05 level are tested by LSD method, values are expressed as mean ± SE (n=6). Same as below

图2 ARC 菌剂与氮肥协同作用下不同结瘤特性花生的主茎高和侧枝长

Fig. 2 The main stem height and lateral branch length of peanuts with different nodulation characteristics under ARC inoculum and nitrogen fertilizer

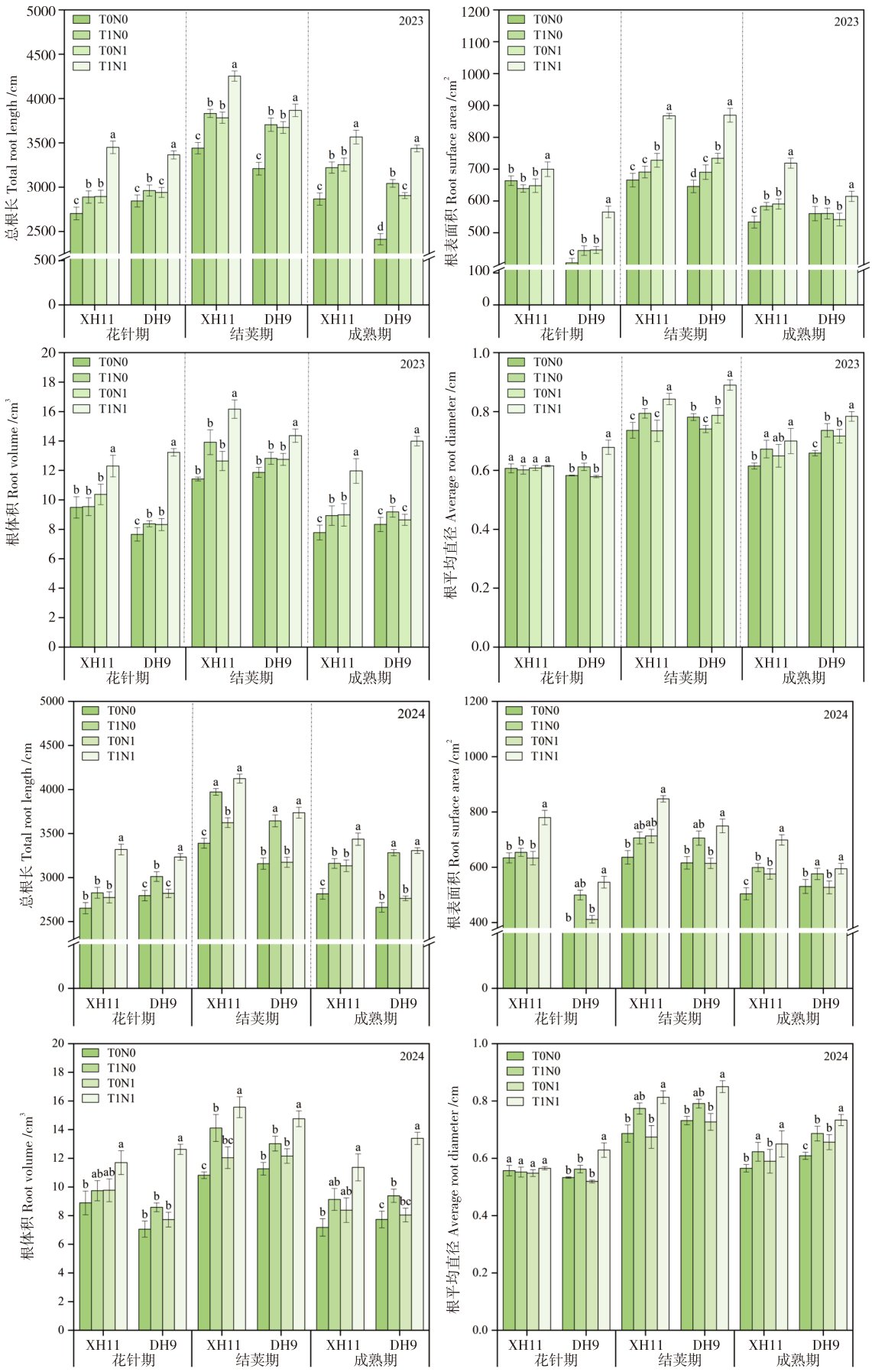


图3 ARC菌剂与氮肥协同作用下不同结瘤特性花生的根系指标

Fig. 3 Root indicators of peanuts with different nodulation characteristics under ARC inoculum and nitrogen fertilizer

XH11 根平均直径各处理间无显著差异,结荚期的根平均直径显著高于 T0。结果表明不结瘤品系 DH9 在总根长和根表面积方面对 ARC 菌剂响应更为敏感,这可能与其固氮补偿机制有关。

2.2 对花生叶绿素含量的协同影响

由表 2 可知,各处理叶绿素含量总体表现为 DH9>XH11。与单一处理相比,ARC 菌剂与氮肥的互作能够显著提高两个品种叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 及总叶绿素含量。两年中,随着生育进程推进,叶绿素含量整体呈下降趋势,其中 T1N1 处理下的 XH11 与 DH9 叶绿素含量始终最高,且显著高于 T0 水平。2023-2024 年花针期,DH9 在 T1N1 处理中的叶绿素 a+b 含量均为最高值,分别为 2.49 mg/g 与 2.57 mg/g,且与 T0 水平之间差异显著。结荚期各处理叶绿素 a+b 含量均表现为 T1N1>T1N0>T0N1>T0N0。结果表明,ARC 菌剂与氮肥互作可显著提升花生叶片叶绿素含量,且不结瘤品系 DH9 的响应程度高于高效结瘤品种 XH11。

2.3 对花生光合参数的协同影响

如图 4 所示,施用 ARC 菌剂与氮肥可显著改善花生叶片的光合参数。与 T0 水平相比,T1 水平的 Pn、GS、E 在两品种中均表现出显著提高,各处理表

表 2 ARC 菌剂与氮肥协同作用下不同结瘤特性花生的叶绿素含量

Table 2 Chlorophyll content in peanuts with different nodulation characteristics under ARC inoculum and nitrogen fertilizer

年份 Year	生育时期 Growth stage	材料 Material	处理 Treatment	叶绿素 a Chlorophy IIa /(mg·g^{-1})	叶绿素 b Chlorophy IIb /(mg·g^{-1})	叶绿素 a+b ChlorophyII /a+b(mg·g^{-1})
2023	花针期 Pegging stage	XH11	T0N0	1.63±0.02c	0.44±0.04c	2.07±0.27b
			T1N0	1.66±0.01b	0.51±0.03ab	2.21±0.25a
			T0N1	1.69±0.05b	0.49±0.07b	2.18±0.41ab
			T1N1	1.70±0.01a	0.56±0.02a	2.26±0.04a
		DH9	T0N0	1.75±0.01c	0.52±0.02c	2.27±0.02c
			T1N0	1.81±0.02b	0.59±0.01ab	2.40±0.04ab
			T0N1	1.77±0.10bc	0.56±0.11b	2.33±0.04b
			T1N1	1.92±0.05a	0.67±0.21a	2.49±0.13a
	结荚期 Pod-setting stage	XH11	T0N0	1.57±0.06c	0.38±0.04c	1.93±0.27b
			T1N0	1.60±0.01b	0.48±0.03ab	2.08±0.25a
			T0N1	1.59±0.05b	0.45±0.07b	2.04±0.41ab
			T1N1	1.67±0.01a	0.51±0.02a	2.18±0.18a
		DH9	T0N0	1.69±0.01c	0.50±0.02c	2.20±0.02c
			T1N0	1.80±0.02b	0.58±0.01ab	2.38±0.04ab
			T0 N1	1.73±0.10bc	0.54±0.11b	2.28±0.04b
			T1N1	1.89±0.05a	0.64±0.21a	2.53±0.13a
2024	花针期 Pegging stage	XH11	T0N0	1.45±0.02c	0.48±0.02b	1.93±0.11c
			T1N0	1.59±0.01b	0.52±0.03a	2.11±0.05ab
			T0 N1	1.54±0.03b	0.51±0.04a	2.05±0.03b
			T1N1	1.68±0.01a	0.55±0.02a	2.32±0.08a
		DH9	T0N0	1.65±0.01c	0.52±0.02c	2.16±0.02c
			T1N0	1.82±0.02b	0.59±0.01b	2.41±0.04ab
			T0 N1	1.68±0.05c	0.64±0.11a	2.32±0.04b
			T1N1	1.88±0.04a	0.69±0.21a	2.57±0.13a
	结荚期 Pod-setting stage	XH11	T0N0	1.37±0.07c	0.44±0.01a	1.81±0.27b
			T1N0	1.57±0.05ab	0.48±0.03a	2.05±0.25a
			T0 N1	1.44±0.10b	0.45±0.07a	1.89±0.04b
			T1N1	1.63±0.07a	0.49±0.02a	2.12±0.15a
		DH9	T0N0	1.60±0.12b	0.45±0.02b	2.05±0.02c
			T1N0	1.71±0.08b	0.58±0.01a	2.29±0.04ab
			T0N1	1.62±0.11b	0.47±0.03b	2.09±0.04bc
			T1N1	1.83±0.46a	0.66±0.21a	2.49±0.13a

注:表中数字后的不同字母表示同一品种不同处理间在 5% 水平上的差异

Note: Different letters after data indicate difference at 0.05 level between treatments of the same variety

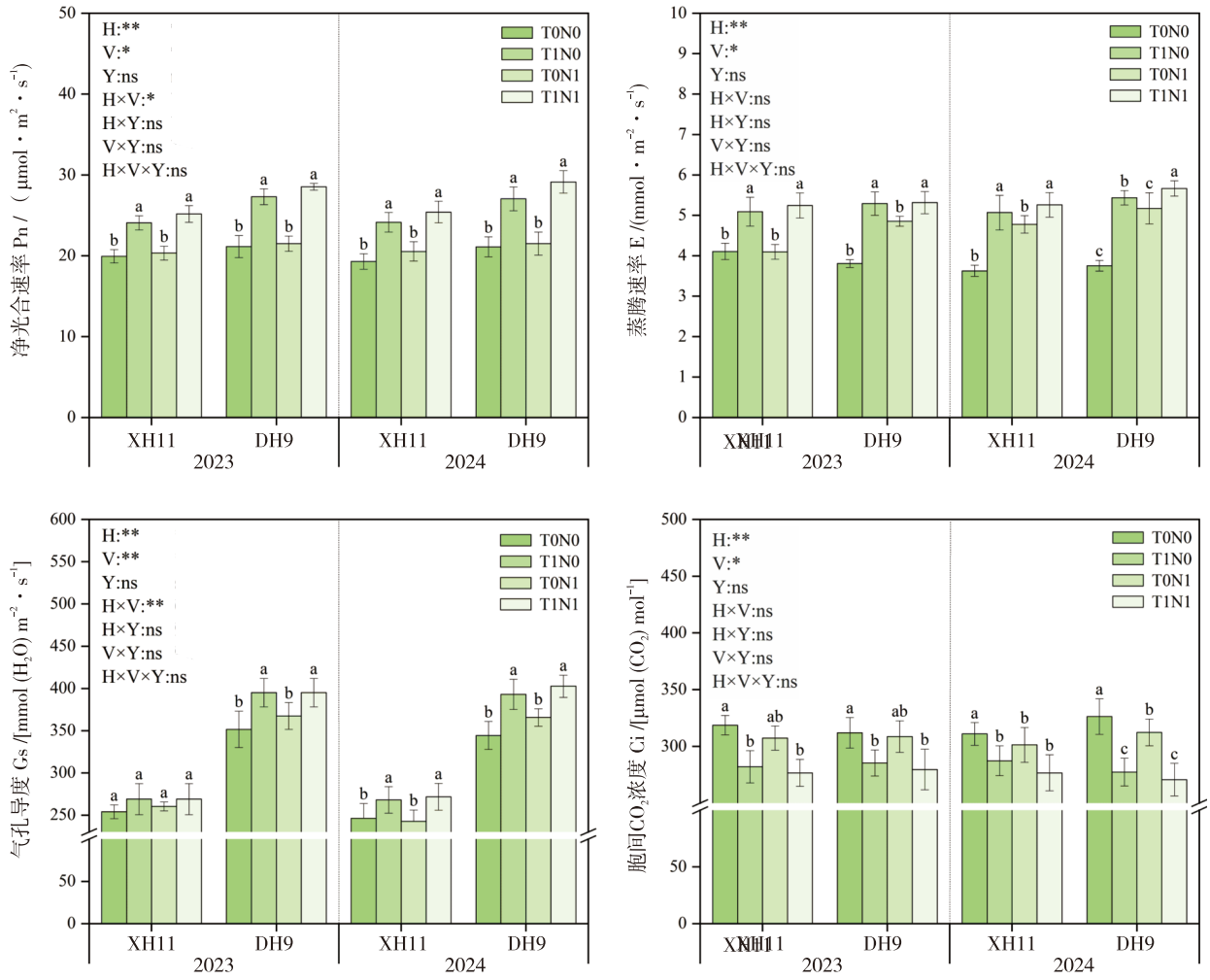


图4 ARC菌剂与氮肥协同作用下不同结瘤特性花生的结荚期光合参数

Fig. 4 Photosynthetic parameters of peanuts with different nodulation characteristics under ARC inoculum and nitrogen fertilizer

现为T1N1>T1N0>T0N1>T0N0。两年数据表明,与T1N0、T0N1处理相比,在T1N1处理下XH11的Pn、GS、E平均提高了4.91%、1.63%、3.41%以及23.73%、7.63%、19.05%;DH9的Pn、GS、E平均提高了6.14%、2.53%、2.37%以及34.11%、8.83%、9.51%,处理间差异显著。DH9与XH11的GS品种间差异显著。Ci在品种间无显著差异,但处理间差异显著,在T1N1处理下XH11的Ci较T1N0、T0N1处理平均降低2.89%、10.00%;DH9降低2.24%、12.88%。综上可知,ARC菌剂与氮肥互作可显著增强花生叶片光合性能,其中对不结瘤品系DH9的气孔导度等参数影响较为显著。

2.4 对干物质积累量的协同影响

由图5表明,施用ARC菌剂和氮肥对不同结瘤特性花生的植株总干物质积累具有显著影响,随着生育进程推进,花生植株总干物质积累于结荚期达到最大值。2年度花生3个时期干物质积累量大小顺序表现一致为T1N1>T1N0>T0N1>T0N0;各处理相比,均以T1N1处理的干物质积累量增幅最大。与T1N0、T0N1处理相比,在T1N1处理下XH11的三个时期干物质积累量两年间平均增幅分别达14.64%、16.80%、13.90%和26.39%、30.11%、28.86%;DH9的三个时期干物质积累量平均增幅分别达7.51%、21.71%、8.81%和13.47%、35.84%、22.32%。不结瘤品系DH9在花针期的茎、叶干物质积累高于XH11,结荚期XH11因荚果形成,总干物质积累反超DH9的植株总干物质积累,XH11的荚果干物质积累显著高于DH9。ARC菌剂和氮肥互作能显著增加花生的总干物质积累,差异显著。

2.5 对产量及产量相关性状的协同影响

由表3表明,与T0N0相比施用ARC菌剂和氮肥提高了各花生品种的单株荚果数、单株饱果数与单株产量。两年数据表明,菌剂与氮肥的施用对各指标均有提升作用,各指标在T1N1处理下均达到最高值,且显著高于其他处理。在T1N1处理下,2年

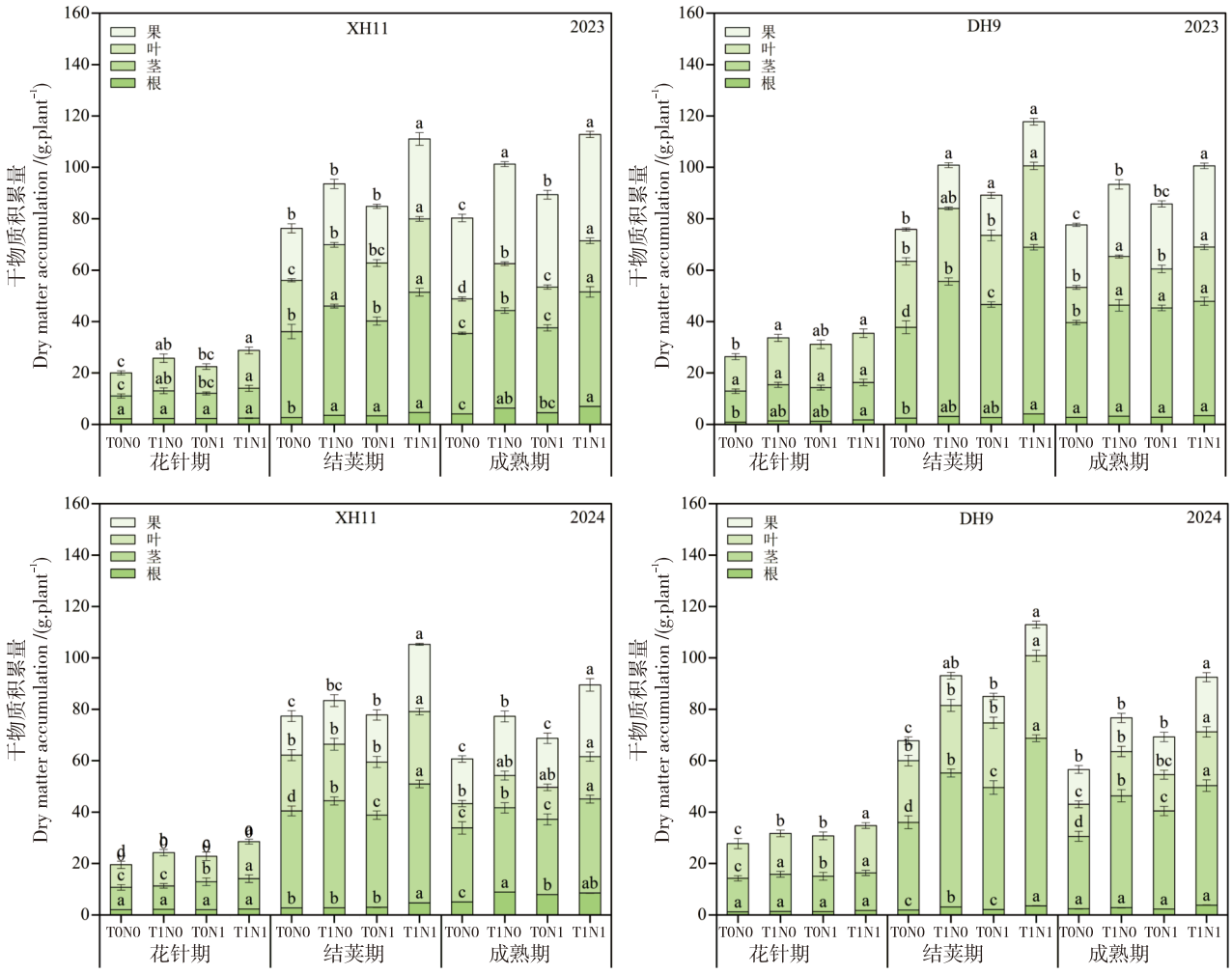


图5 ARC菌剂与氮肥协同作用下不同结瘤特性花生植株的总干物质积累

Fig. 5 Total dry matter accumulation of peanut with different nodule characteristics under ARC inoculum and nitrogen fertilizer

度XH11较T1N0、T0N1处理下的单株荚果数平均增加了20.79%、18.29%,单株饱果数增加了16.73%、23.85%,单株产量增加13.58%、8.77%;DH9表现趋势一致,单株荚果数平均增加18.14%、7.95%,单株饱果数平均增加26.78%、17.95%,单株产量增加12.50%、12.75%,百果重与百仁重在处理间均无显著差异,但品种间差异显著。在T1N1处理下XH11的百果重与百仁重分别较DH9高出50.10%与57.47%,可能原因是XH11是大粒型花生品种,而DH9是小粒型花生品种。

2.6 对光合特性与产量的相关性分析

如图6表明,将不同结瘤特性花生光合特性与产量进行相关性分析。结果表明XH11和DH9的光合特性参数与产量均呈正相关关系,但XH11的产量与MSL、BL、Pn、E、DM正相关,DH9的产量与MSL、BL、DM正相关,DH9的Pn和Ci、Ci和E呈极显著正相关。

3 讨论

3.1 ARC菌剂和氮肥对花生光合特性的协同影响

叶绿素是花生进行光能捕获与光合作用的核心色素,氮素作为叶绿素合成的必需结构元素,氮素的吸收和利用效率是调控光合色素代谢的关键因素[17-19]。施用微生物菌剂能够通过增强根瘤固氮能力、促进氮素吸收与利用,进而与氮肥形成协同效应,共同优化花生叶片的光合色素代谢过程[20-22]。前人研究表明,减施氮肥与根瘤菌剂配施能显著提高黑大豆的光合作用,同时提升叶绿素含量[23]。张东旭等研究发现喷施链霉菌剂对2种茬口晚播小麦能够有效增加晚播小麦的光合持续能力,促进穗部发育和籽粒灌浆,增加穗粒数和千粒重,进而提高产量[24]。本研究得出相似的结论,在T1N1处理下花生叶绿素a、叶绿素b及总叶绿素含量均达到最大值,且叶绿素a+b的值高于单施氮处理。说明氮素与ARC菌剂能提高叶绿素含量,增强花生对短波光的捕获能力,为

表3 ARC菌剂与氮肥协同作用下不同结瘤特性花生的产量及产量相关性状

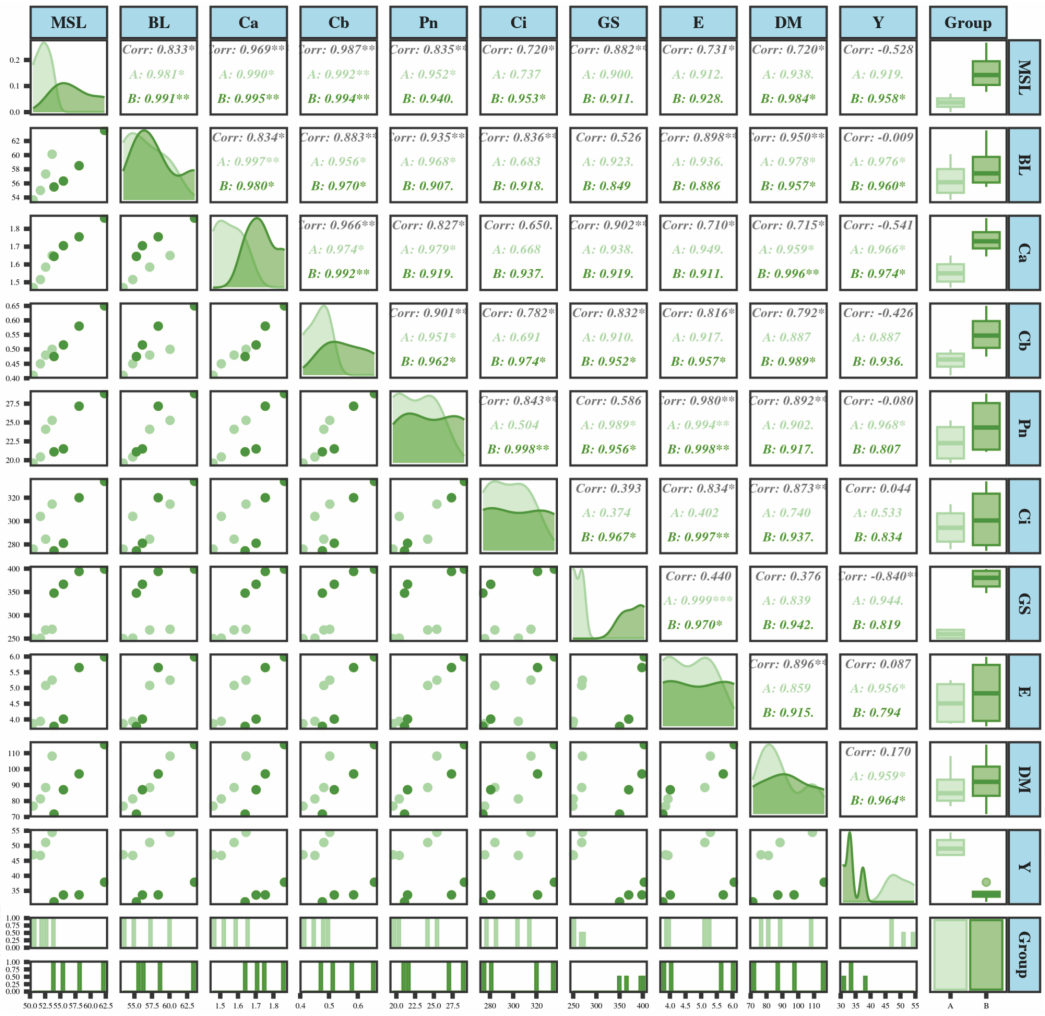
Table 3 Peanut yield and yield-related traits under ARC inoculum and nitrogen fertilizer

年份 Year	材料 Material	处理 Treatment	单株荚果数 Pod number per plant	单株饱果数 Full-pod number per plant	百果重 100-pod weight /g	百仁重 100-kernel weight /g	单株产量 Single plant yield /(g·plant^{-1})
2023	XH11	T0N0	34.67±3.30b	30.00±4.08b	155.33±7.41a	66.33±2.49a	45.33±3.40b
		T1N0	45.00±3.27a	31.00±5.79b	156.67±7.13a	67.67±2.05a	47.22±0.73a
		T0N1	35.33±2.62b	32.67±2.05ab	156.33±9.03b	67.13±1.64a	45.83±1.65b
		T1N1	48.00±2.94a	38.00±0.82a	157.03±0.69a	68.23±0.93a	53.33±3.30a
	DH9	T0N0	33.33±2.62b	26.00±1.94b	100.00±7.12a	41.07±1.72a	32.67±3.09b
		T1N0	37.67±1.70b	31.00±2.45ab	101.80±5.13a	40.57±1.58a	34.33±3.30ab
		T0N1	44.00±1.63b	34.67±3.09a	100.00±6.48a	41.17±2.66a	33.04±3.58b
		T1N1	45.00±1.63a	37.33±2.05b	102.15±0.71a	41.43±2.93a	39.35±0.59a
2024	XH11	T0N0	34.33±1.89b	27.33±1.25c	151.13±2.77b	61.53±2.17a	47.69±2.01b
		T1N0	35.33±0.94b	32.67±1.25b	152.80±1.28b	61.13±2.47a	48.65±1.58b
		T0N1	47.33±2.62a	30.26±1.70b	151.10±1.42b	61.30±0.37a	54.92±0.98a
		T1N1	47.67±1.25a	39.76±1.25a	153.13±1.93a	61.80±2.24a	55.57±1.92a
	DH9	T0N0	31.67±1.25c	23.57±1.70d	104.63±1.88b	41.03±1.47ab	30.00±1.62b
		T1N0	35.67±1.89b	29.54±1.25c	103.20±2.04a	40.50±2.34a	32.96±1.98a
		T0N1	36.67±1.70b	30.67±1.25b	104.10±4.62b	40.27±2.21b	34.19±1.44b
		T1N1	41.67±1.25a	39.33±0.94a	104.53±2.65b	41.13±1.64ab	36.38±1.58b
	H		**	**	*	ns	*
	V		**	*	**	**	**
	Y		ns	ns	ns	ns	*
	H*V		**	**	*	ns	*
	H*Y		ns	ns	ns	ns	ns
	V*Y		ns	ns	ns	ns	ns
	H*V*Y		ns	ns	ns	ns	ns

光合作用奠定能量基础。光合作用是植物生命活动与生长发育的根本基础,净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、蒸腾速率(E)及胞间CO_2浓度(Ci)是反映光合效率的核心参数[25-27]。本研究发现施用ARC菌剂和菌剂氮肥处理均提高花生Pn、Gs、E,且各光合参数显著高于同期单一施氮处理。说明施用ARC菌剂能促进气孔开放、优化CO_2供应效率,减少胞间CO_2积累造成的光合抑制,降低花生对氮素的依赖,从而维持较高的光合效率。吕亮雨等[28]发现菌剂与有机肥配施可促进燕麦生长发育,提高燕麦旗叶光合特性。郭佩等[29]也发现氮肥和根瘤菌剂拌种配施能够显著提高花生的光合性能、氮素吸收和结瘤固氮能力。研究同时发现不同结瘤特性花生光合参数表现略有不同,对不结瘤花生叶绿素含量和光合能力的提升显著。通过ARC菌剂与氮肥协同调控光合生理,也许是不结瘤或弱结瘤品种实现产量突破的关键途径之一,然而,本研究仍存在一定局限。

3.2 ARC菌剂和氮肥对花生植株形态、干物质积累及产量的协同影响

植株形态是作物生长状况与生理功能的综合体现,既依赖氮素提供的基础营养,也受生物菌剂和激素调节的影响。干物质积累是产量形成的物质基础。适量施氮促进生长,高氮抑制生长易致徒长,打破其营养与生殖生长的平衡[30]。研究表明,施用微生物菌剂对花生植株的主茎高和侧枝长有一定的促进作用,单株荚果数、饱果数和百果重都有一定程度的增加[31,32]。邵玮玮[33]等通过研究表明,微生物菌剂可通过改善花生形态与产量相关性状,从而实现增产。本试验研究表明,施用ARC菌剂和氮肥后能够增加各花生品种的主茎高和侧枝长,可显著促进花生全生育期干物质积累,其效果优于单一施用,与前人研究相似。干物质积累可以衡量花生的生长状况,与花生荚果产量的形成有密切关系,且与产量密切相关[34,35]。郭陞垚等[36]研究结果表明,减施氮肥配施ARC微生物菌剂处理效果较好,与T0相比,荚果产量显著增加。本试验结果与前人研究结果一致,在T1处理下,ARC菌剂与氮肥的施用显著提高了花生的单株荚果数。ARC菌剂可能主要通过增加单株荚果数和单株饱果数来提高产量。



注:MSL:主茎高;BL:侧枝长;Ca:叶绿素 a;Cb:叶绿素 b;Pn:净光合速率;Ci:胞间 CO_2 浓度;GS:气孔导度;E:蒸腾速率;DM:干物质积累;Y:产量

Note: MSL: main stem length; BL: branch length; Ca: chlorophyll a; Cb: chlorophyll b; Pn: net photosynthetic rate; Ci: intercellular CO_2 concentration; GS: stomatal conductance; E: transpiration rate; DM: dry matter accumulation; Y: yield

图 6 花生光合特性与产量相关性分析

Fig. 6 Correlations between peanut photosynthetic characteristics and yield

4 结论

本研究表明,ARC 菌剂与氮肥互作(T1N1 处理)能有效改善不同结瘤特性花生的生长形态,提升叶片叶绿素含量与光合能力,促进各器官干物质积累,从而显著提高产量。其中,DH9 叶片光合作用的提升幅度大于 XH11。综上所述,针对不同结瘤特性花生配施适宜菌肥,或可作为实现其绿色增产增效的重要栽培措施。

参考文献:

[1] 廖伯寿.我国花生生产发展现状与潜力分析[J].中国油料作物学报,2020,42(2):161-166.DOI:10.19802/j.issn.1007-9084.2020115.

[2] 罗绪强,王世杰,刘秀明.陆地生态系统植物的氮源及氮素吸收[J].生态学杂志,2007,(7):1094-1100.DOI:10.13292/j.1000-4890.2007.0196.

[3] Guo P, Ren J Y, Shi X L, et al. Optimized nitrogen application ameliorates the photosynthetic performance and yield potential in peanuts as revealed by OJIP chlorophyll fluorescence kinetics[J]. BMC Plant Biol, 2024, 24(1): 774. DOI:10.1186/s12870-024-05482-x.

[4] 李曜舟,张伦.大豆接种根瘤菌剂田间试验研究[J].河南农业,2025(17):32+38. DOI: 10.15904/j. cnki. hnny.2025.17.021.

[5] Zhang P, Gang D M, Wang Y L, et al. Establishment of a comprehensive evaluation system for low nitrogen and screening of nitrogen-efficient germplasm in peanut[J]. Horticulturae, 2024, 10(7): 669. DOI: 10.3390/horticulturae10070669.

[6] Guo P, Shi X L, Ren J Y, et al. Nitrogen acquisition and allocation traits in peanuts with different nodulation efficiency revealed by the ^{15}N tracer analysis[J]. J Soil

Sci Plant Nutr, 2024, 24(3): 4211-4223. DOI: 10.1007/s42729-024-01823-9.
[7] 骆永丽,杨东清,尹燕枰,等.外源6-BA和不同用量氮肥配合对小麦花后叶片功能与荧光特性的调控效应[J].中国农业科学,2016,49(6):1060-1083.
[8] 陈日远,马倩,杨艳,等.花后氮肥调控对春玉米叶片光合性能及产量的影响[J].玉米科学,2023,31(4):131-139.DOI:10.13597/j.cnki.maize.science.20230416.
[9] 侯会静,韩正砥,杨雅琴,等.生物有机肥的应用及其农田环境效应研究进展[J].中国农学通报,2019,35(14):82-88.
[10] Ahsan T, Tian P C, Gao J, et al. Effects of microbial agent and microbial fertilizer input on soil microbial community structure and diversity in a peanut continuous cropping system[J]. J Adv Res, 2024, 64: 1-13. DOI: 10.1016/j.jare.2023.11.028.
[11] Wu J Z, ARIMA Y. Effect of *Rhizobium* inoculation and application of N, P, K fertilizer on the growth and nitrogen fixation of field-grown Chinese milk vetch[J]. Soil Sci Plant Nutr, 1992, 38(1): 75-84. DOI: 10.1080/00380768.1992.10416954.
[12] 张俊杰,王楠,李硕,等.一种花生高效复合微生物菌剂及其应用[J].花生学报,2022,51(2):86-92.DOI:10.14001/j.issn.1002-4093.2022.02.012.
[13] 赵秀兰,吉萍萍,洪宇轩,等.ARC-BBBE在长江流域花生产区试验示范效果[J].中国油料作物学报,2024,46(6):1357-1363.DOI:10.19802/j.issn.1007-9084.2023085.
[14] 徐国凤,禹晨晏,汪柏丞,等.钙与ARC菌剂配施对花生氮钙养分吸收利用及产量的影响[J].中国油料作物学报,2025,47(5):1179-1188.DOI:10.19802/j.issn.1007-9084.2024247.
[15] 周欣,耿银民,邝光伟,等.微生物菌剂替代部分化肥对冀北春大豆农艺性状及产量和品质的影响[J].河北农业科学,2024,28(5):57-61+67.
[16] 邹琦.植物生理生化实验指导[M].北京:中国农业出版社,1995:36-38.
[17] 张昆.光强对花生光合特性、产量和品质的影响及生长模型研究[D].泰安:山东农业大学,2009.
[18] 修俊杰,刘学良,韩彦龙,等.水氮互作对花针期花生叶片光合性能及荧光特性的影响[J].农学学报,2023,13(6):25-31.
[19] Wu Y W, Li Q, Jin R, et al. Effect of low-nitrogen stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of maize cultivars with different low-nitrogen tolerances[J]. J Integr Agric, 2019, 18(6): 1246-1256. DOI:10.1016/s2095-3119(18)62030-1.
[20] Zhang G C, Liu Q B, Zhang Z M, et al. Effect of reducing nitrogen fertilization and adding organic fertilizer on net photosynthetic rate, root nodules and yield in peanut[J]. Plants, 2023, 12(16): 2902. DOI: 10.3390/plants12162902.
[21] 张欢欢,张刁亮,王晓丽,等.绿肥联合麦秸还田对减量施氮春小麦光合特性和产量的影响[J].中国农业科学,2025,58(17):3461-3472.
[22] 张素瑜,岳俊芹,李向东,等.施氮对郑麦366光合速率、花后干物质积累及产量的影响[J].作物杂志,2024,(3):127-132.DOI:10.16035/j.issn.1001-7283.2024.03.016.
[23] 孙庆圣,原程,张玉先.减施氮肥和接种根瘤菌对黑大豆光合特性及产量的影响[J].作物杂志,2022,(4):132-137.DOI:10.16035/j.issn.1001-7283.2022.04.018.
[24] 张东旭,胡丹珠,闫金龙,等.不同茬口晚播小麦喷施链霉菌剂对产量及光合特性的影响[J].作物杂志,2023,(5):255-263.DOI:10.16035/j.issn.1001-7283.2023.05.036.
[25] 徐珂,樊志龙,殷文,等.氮肥后移及间作对玉米光合特性的耦合效应[J].中国农业科学,2022,55(21):4131-4143.
[26] 许永胜,胡跃高,曾昭海,等.施用生物菌肥对裸燕麦氮素积累和光合生理的影响[J].西南农业学报,2015,28(6):2586-2591.DOI:10.16213/j.cnki.scjas.2015.06.045.
[27] 熊伟乞,徐开未,刘明鹏,等.不同氮用量对四川春玉米光合特性、氮利用效率及产量的影响[J].中国农业科学,2022,55(9):1735-1748.
[28] 吕亮雨,施建军,蔡宗程,等.菌剂配施有机肥对高海拔地区燕麦生长及土壤特性影响[J].草地学报,2025,33(12):4172-4182.
[29] 郭佩,熊焕烨,张萍,等.氮肥和根瘤菌剂互作对花生氮素吸收、氮代谢及产量的影响[J].中国油料作物学报,2024,46(3):644-656.DOI:10.19802/j.issn.1007-9084.2024036.
[30] 郭佩.施氮量对不同花生品种生长发育及不同氮源供氮特性的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2021.DOI:10.27327/d.cnki.gshnu.2021.000013.
[31] 王连霞,韩冬伟,赵秀梅,等.同等肥力条件接种根瘤菌对大豆生长发育和产量的影响[J/OL].分子植物育种,1-9[2025-11-27]. https://link.cnki.net/urlid/46.1068.s.20231226.1344.010.
[32] 陈建生,李文金,康涛,等.花生上生物菌肥替代化肥减施增效技术研究[J].山东农业科学,2021,53(7):73-76.DOI:10.14083/j.issn.1001-4942.2021.07.012.
[33] 邵玮玮,于淑婷,王丽,等.根瘤菌剂和种衣剂拌种对不同品种大豆结瘤能力和产量的影响[J].中国土壤与肥料,2022,(6):188-194.
[34] 江晨,张智猛,孟爱芝,等.不同施氮量对花生干物质积累及氮肥利用率的影响[J].山东农业科学,2020,52(7):67-70.DOI:10.14083/j.issn.1001-4942.2020.07.014.
[35] 尤召阳,杨莎,张佳蕾,等.钙肥类型及施用时期对花生干物质积累量和产量的影响[J].中国油料作物学报,2023,45(2):359-367.DOI:10.19802/j.issn.1007-9084.2022047.
[36] 郭陞垚,詹柳琪,黄佳华,等.氮肥减施条件下ARC菌剂对花生产量及品质的影响[J].中国油料作物学报,2025,47(5):1225-1231.DOI:10.19802/j.issn.1007-9084.2024161.

(责任编辑:郭学兰)