

李 一, 陈 苗, 陈任强, 等. 肥料不同配施方式对赤豆光合特性、根系形态和产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(6): 89–95.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.06.010

肥料不同配施方式对赤豆光合特性、根系形态和产量的影响

李 一¹, 陈 苗¹, 陈任强^{1,2}, 王鑫鑫^{3,4,5}, 王晓玲⁶, 刘宏权^{1,2}

(1. 河北农业大学城乡建设学院, 河北保定 071001; 2. 农业农村部华北节水农业重点实验室, 河北保定 071001;
3. 河北省山区农业技术创新中心, 河北保定 071001; 4. 国家北方山区农业工程技术研究中心, 河北保定 071001;
5. 河北农业大学河北省山区研究所, 河北保定 071001; 6. 河北农业大学园艺学院, 河北保定 071001)

摘要:为探究肥料不同配施方式对赤豆叶片光合特性、根系形态和产量的影响, 制定科学高效的赤豆增产方案, 于 2022 年 6—10 月在河北省巨鹿县的河北农业大学综合试验站开展田间试验, 选取保红 947 为供试品种, 设置常规施肥 (CK)、微生物菌剂配施 [常规施肥下增施 112.5 kg/hm² (J1)、262.5 kg/hm² (J2)、412.5 kg/hm² (J3)]、有机肥配施 [减施复合肥下增施 4 000 kg/hm² (F1)、8 000 kg/hm² (F2)、12 000 kg/hm² (F3)] 共 7 个处理。测定赤豆全生育期的叶面积指数、叶绿素相对含量和根系形态指标, 结荚期叶片的光合参数, 以及收获后赤豆籽粒产量及其构成要素。结果表明, 不同配施方式对赤豆开花期、结荚期叶面积指数、叶绿素相对含量的影响最为显著。赤豆光合指标对肥料配施方式的响应随各肥料施加量的增加先增大后减小, J2、F2 处理时较高。肥料配施大大增加了赤豆的根系形态指标。不同肥料能够通过合理配施达到相似的结果, 其中 J2、J3 和 F2 处理赤豆的产量达到最大, 综合考虑赤豆生长状况和产量, 适宜的配施方案为 J2 和 F2 处理, 与常规施肥相比分别增产 15.03%、14.85%。综上, 研究表明增施微生物菌剂 262.5 kg/hm² 和减施复合肥下增施有机肥 8 000 kg/hm² 是促进赤豆生长、提高产量的合理配施方式。

关键词: 赤豆; 微生物菌剂; 有机肥; 光合特性; 根系形态; 产量

中图分类号: S521.06 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2025)06-0089-07

由于世界人口持续增长, 适宜种植粮食的土地有限, 粮食短缺问题一直是人类的威胁。我国是人

口大国之一, 粮食的需求量极大, 大量的粮食需求依赖着粮食主产区的产出, 仅 13 个省份的主产区提供了全国约 75% 的粮食产量和约 80% 的商品粮^[1]。不仅如此, 我国还面临着土壤污染、水资源短缺、自然灾害等问题, 粮食短缺的威胁仍旧不能消除。为解除粮食短缺的威胁, 世界各地的研究人员通过强健作物本身、改善作物生长环境、促进作物养分吸收等不同方法提高作物产量^[2-8]。在诸多作物增产方法中, 施加微生物菌剂和有机肥均能够改善土壤条件,

收稿日期: 2024-03-25

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项 (编号: CARS-08-G-22); 河北省省属高校基本科研业务费研究项目 (编号: KY2022103)。

作者简介: 李 一 (1998—), 女, 河北保定人, 硕士研究生, 主要从事大田水肥调控研究。E-mail: 2306850482@qq.com。

通信作者: 刘宏权, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事农业水土资源高效利用、水肥调控研究。E-mail: lhq@hebau.cn。

[22] 希日格乐, 李春辉, 郭世华. 春玉米穗部性状与单株产量间的相关和通径分析[J]. 内蒙古农业大学学报 (自然科学版), 2010, 31(3): 106–110.

[23] 李资文, 李志刚, 周 伟, 等. 高粱品系的主要农艺性状评价与综合分析[J]. 分子植物育种, 2021, 19(19): 6503–6511.

[24] 王俊花, 邵林生, 闫建宾, 等. 基于主成分分析的糯玉米杂交组合农艺性状综合评价[J]. 山西农业科学, 2022, 50(7): 938–944.

[25] 赵海燕, 王腾飞, 续创业, 等. 西北旱塬区玉米品种表型聚类分析及适应性评价[J]. 玉米科学, 2023, 31(5): 56–63.

[26] 徐 磊, 谭福忠, 师 臣, 等. 黑龙江省西部干旱区玉米产量与

产量构成因素的相关性分析[J]. 黑龙江农业科学, 2020(7): 1–6.

[27] 罗 巍, 周 伟, 王振国, 等. 24 份甜高粱主要农艺性状与生物产量综合分析[J]. 中国农学通报, 2022, 38(30): 21–28.

[28] 景小兰, 史根生, 史关燕. 不同糜黍品种灰色关联度分析及综合评价[J]. 农学学报, 2016, 6(7): 13–18.

[29] 林昇平, 饶宝蓉, 葛名海, 等. 不同鲜食糯玉米品种主要农艺性状与籽粒产量的灰色关联度分析[J]. 热带农业科学, 2022, 42(1): 11–16.

[30] 邹 军, 章洁琼, 龙 英, 等. 20 个鲜食玉米品种产量与主要性状的灰色关联度分析[J]. 种子, 2019, 38(11): 138–142.

提高作物苗期株高、叶片数,增加作物干物质积累^[9-10];能够增加作物根际土壤的有益菌群,分泌生物酶促进作物生长^[7,11-12];还能改变土壤养分形态,使之更容易被作物吸收,最终提高作物产量^[13-15]。

赤豆(*Vigna angularis*)是原产于我国的重要杂粮作物,主要种植于我国北方,河北省是赤豆的主要产区之一。赤豆耐旱耐瘠,适应性强,晚种早熟,生育期短,富含蛋白质、粗纤维、钙、铁、磷、氨基酸等多种营养成分,具有极高的食用价值和药用价值。然而赤豆单产通常约 2 250 kg/hm²,仅约为小麦的 30%、玉米的 21.4%,尤其在贫瘠的土地种植赤豆,往往因其养分、水分不足造成“广种薄收”的结果。目前,赤豆的价值已被越来越多人关注,但鲜有肥料不同配施方式对赤豆生长、产量影响的研究报道。本研究选择能改良土壤、促进作物生长的微生物菌剂和有机肥,设置不同的配施方案,探究其对赤豆叶面积指数、光合特性、根系形态和产量

的影响,提出适宜的配施方式,以期对赤豆有效增产的施肥管理提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2022 年 6 月 26 日至 10 月 9 日在河北省邢台市巨鹿县的河北农业大学综合试验站(37°20' N,115°07' E,海拔 28.5 m)开展。试验地降雨主要集中在 6—8 月,年平均降水量为 509 mm,年平均蒸发量为 1 032.2 mm,地下水埋深约 10 m,多年平均气温为 13.3 ℃。试验区土壤质地为壤土,播前表层 0~20 cm 土壤的基本理化性质为:有机质含量为 10.86 g/kg,全氮含量为 0.73 g/kg,全磷含量为 0.73 g/kg,全钾含量为 19.39 g/kg,碱解氮含量为 40.57 mg/kg,有效磷含量为 5.64 mg/kg,速效钾含量为 161.85 mg/kg,pH 值为 8.18。赤豆生育期内逐日的主要气象要素如图 1 所示。

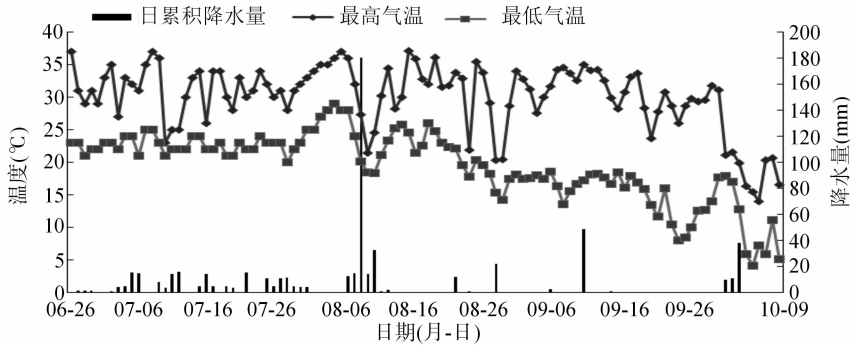


图1 赤豆全生育期内主要气象要素

1.2 试验设计

试验选用赤豆品种保红 947、微生物菌剂(由山东泉林嘉有现代农业股份有限公司生产,主要菌种为枯草芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌和胶冻样类芽孢杆菌)和有机肥(表 1)为供试材料。设置 7 个处理,分别为常规施肥(CK)、微生物菌剂配施[常规施肥下增施 112.5 kg/hm²(J1)、262.5 kg/hm²(J2)、412.5 kg/hm²(J3)]、有机肥配施[减施复合肥下增施 4 000 kg/hm²(F1)、8 000 kg/hm²(F2)、12 000 kg/hm²(F3)],常规施肥施用复合肥(N、P、K 含量均为 15%)750 kg/hm²,减施处理施用复合肥 450 kg/hm²作底肥,赤豆生育期内不再追肥。每个处理设置 3 次重复,共 12 个小区。小区面积为 48 m²,赤豆株距 15 cm、行距 45 cm,各小区周围预留出 40 cm 保护带。防虫、除草等栽培管理与当地习惯相同,全生育期统一管理。

表 1 有机肥的基本性质

有机质含量 (%)	N 含量 (%)	P ₂ O ₅ 含量 (%)	K ₂ O 含量 (%)
14.50	0.49	0.18	0.09

1.3 测定内容及方法

分别在苗期、分枝期、开花期、结荚期和成熟期选取长势相同且具有代表性的 3~5 株赤豆植株,测量其叶面积指数、叶绿素相对含量和根系形态指标,在结荚期测定赤豆光合指标,在成熟期测产。

叶面积指数(LAI)测定:使用精度为 1 mm 的刻度尺测量赤豆完全展开叶叶片的最大长度和最大宽度,取叶面积系数 0.63^[16],计算公式如下:

$$LAI = (L \times A \times 0.63 \times NPPA) / PFA$$

式中:L 为作物完全展开叶的长度;A 为作物完全展开叶的宽度;NPPA 为单位面积株数;PFA 为单位土地面积。

测定叶绿素相对含量(SPAD 值):使用 SPAD - 502 PLUS(日本美能达公司)叶绿素仪避开叶脉,测量赤豆叶片叶绿素相对含量。

测定光合指标:选择天气晴朗的上午,在 09:00—11:30 间使用便携式光合作用仪(北京雅欣理仪科技有限公司,Yaxin - 1102G),每个小区随机选择 3 张叶片,在开放气路自然光照下测定叶片的净光合速率、蒸腾速率、光合速率、气孔导度及胞间 CO_2 浓度等指标。

测定根系形态指标:将植株根部尽量完整取出,清水冲洗植株根系并使用 EPSON Expression 10000 XL 进行扫描,使用 WinRHIZO 根系分析软件进行分析,分别得到赤豆总根长、根表面积、根平均直径和根体积。

测产:每个小区选取 3 个 1 m^2 样方,将赤豆脱粒烘干(105°C 杀青 30 min,随后在 65°C 下烘至恒重),再按 13% 的含水率折算出理论产量,并随机选取长势相同且具有代表性的 10~15 株,测量单株荚数、单荚粒数和百粒重。

1.4 数据处理

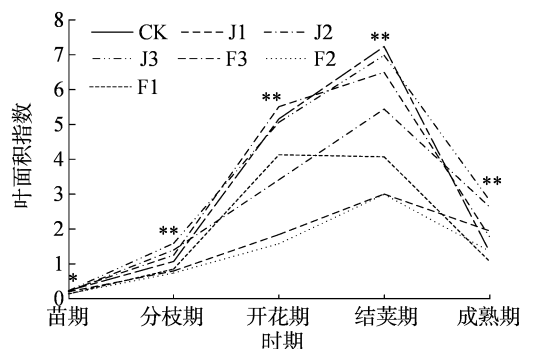
采用 Microsoft Excel 2010 进行数据分析和图表绘制,采用 SPSS 26.0 软件进行数据统计分析。使用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析时,若方差检验齐性,使用 Duncan's 法进行两两比较;方差检验不齐则使用不等方差假设项下的 Tamhane's T2 进行两两比较,显著性检验均在 $\alpha = 0.05$ 下进行。

2 结果与分析

2.1 肥料不同配施方式对赤豆叶面积指数的影响

肥料不同配施方法对赤豆叶面积指数影响显著(图 2),整个生育期叶面积指数呈现先增加后减少的趋势,除 F1 处理叶面积指数在结荚期开始回落,其他处理叶面积指数均在结荚期达到峰值。分枝期到开花期各处理叶面积指数增速最快,增长率达 113.75%~385.46%。全生育期各处理间差异显著,结荚期 F2 处理叶面积指数最大,为 7.23,CK 和 J1 处理的叶面积指数最小,为 3.00。成熟期赤豆叶片脱落,叶面积指数大幅降低,各处理较结荚期降幅分别为 54.35%、35.12%、51.43%、59.42%、72.45%、81.18% 和 73.51%,表明少量微生物菌剂配施能够延缓叶片衰落,过量微生物菌剂配施和配施有机肥则加速叶片脱落。除 F2 处理叶面积指数在结荚期大于 F3 处理,其他配施处理叶

面积指数均随肥料施加量的增加而增大,J3 处理对叶面积指数的作用与 F2、F3 处理相似,J1 处理的叶面积指数与 CK 相似,表明微生物菌剂和有机肥均能够促进赤豆叶片生长,不同肥料能够通过合理配施达到相似效果,但少量微生物菌剂配施的作用不大,过量有机肥配施效果减弱。



*、**表示差异显著($P < 0.05$)、极显著($P < 0.01$), ns 表示差异性不显著($P > 0.05$)。图 4 同

图2 肥料不同配施方法对赤豆叶面积指数的影响

2.2 肥料不同配施方法对赤豆光合特性的影响

2.2.1 肥料不同配施方法对赤豆 SPAD 值的影响

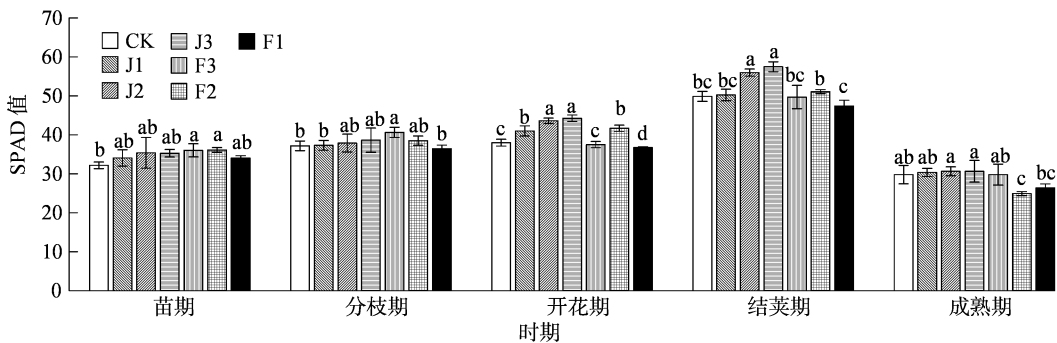
不同处理下赤豆叶片 SPAD 值变化趋势基本一致,表现为先增加后降低(图 3),至结荚期达到最大值,成熟期则达到最小值。发育前期,除 F2、F3 处理外,各配施处理较 CK 无显著差异。开花期和结荚期,J3 处理的赤豆叶片 SPAD 值均大于其他处理,SPAD 值随微生物菌剂施加量的增加而增加。与对照相比,开花期 J1、J2、J3、F2 处理的 SPAD 值分别显著增加 7.89%、14.79%、16.47% 和 9.74%,结荚期各处理 SPAD 值分别增加 0.72%、12.23%、15.24% 和 2.45%。在成熟期,赤豆叶片枯黄,SPAD 值迅速降低,各处理较结荚期降幅分别为 40.26%、39.57%、45.23%、46.68%、40.04%、51.21% 和 44.30%,F1、F2 处理赤豆 SPAD 值明显小于 CK,其他处理 SPAD 值再次持平。由此可知,较有机肥配施方式,合理的微生物菌剂配施更能有效增加赤豆 SPAD 值。

2.2.2 肥料不同配施方法对赤豆光合指标的影响

结荚期是赤豆光合作用最旺盛的时期。如表 2 所示,赤豆的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)随肥料施加量的增加呈先增加后减少的趋势。微生物菌剂配施处理中 J3 处理的各光合指标达到最大,较 CK 分别增长 25.57%、33.15%、19.81% 和 21.45%;有机肥配施处理中 F2 处理的各光合指标达到最大,较 CK 分别

增长 22.36%、33.15%、16.09% 和 14.83%。表明肥料配施有利于增强赤豆的光合作用,微生物菌剂

配施效果略优于有机肥,但到一定肥料施加量(J2、F3)后二者作用减弱,可能还受其他因素的影响。



柱上不同小写字母表示同一时期同一测定项目不同处理在 0.05 水平上差异显著

图3 肥料不同配施方法对赤豆 SPAD 值的影响

表 2 肥料不同配施方法对赤豆光合指标的影响

处理	P_n [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	T_r [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	G_s [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	C_i ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)
CK	6.53 ± 0.46c	3.71 ± 0.12e	142.17 ± 5.94e	318.83 ± 12.35e
J1	6.78 ± 0.18bc	4.46 ± 0.15c	150.90 ± 3.44cd	332.33 ± 9.47d
J2	8.06 ± 0.32a	4.76 ± 0.10ab	163.83 ± 4.94ab	370.67 ± 10.86b
J3	8.20 ± 0.39a	4.94 ± 0.18a	170.33 ± 6.80a	387.23 ± 10.41a
F1	6.61 ± 0.20c	4.05 ± 0.14d	148.70 ± 2.26de	328.10 ± 8.49de
F2	7.99 ± 0.34a	4.94 ± 0.18a	165.04 ± 2.17ab	366.10 ± 4.31b
F3	7.19 ± 0.16b	4.50 ± 0.17bc	157.58 ± 3.89bc	346.10 ± 5.43c

注:同一列数据后不同小写字母表示同一测定项目不同处理间在 0.05 水平上差异显著,表 3 同。

2.3 肥料不同配施方法对赤豆根系形态的影响

从图 4 可以看出,赤豆根系形态指标随生育期的前进而增长,肥料配施对赤豆分枝期的总根长、根表面积、根体积和开花期的根平均直径均影响极显著,全生育期赤豆根系形态指标随微生物菌剂施加量的增加而增大,发育前期赤豆根系形态指标随有机肥施加量的增大而增大,后期随施加量的增大先增大后减小。分枝期到开花期,赤豆总根长、根表面积和根平均直径增长速率最快,而后生长速度逐渐降低。CK 的根体积在分枝期到开花期增长率最大,为 247.48%,其他处理在苗期到分枝期增长率最大,为 224.00% ~ 342.47%,表明肥料配施有利于促进赤豆根系生长,提早赤豆发育阶段,为赤豆籽粒发育奠定基础。全生育期各处理较 CK 对赤豆总根长的平均增幅分别为 8.09%、22.26%、40.28%、6.38%、21.46% 和 15.48%;根表面积的平均增幅分别为 26.95%、46.24%、57.24%、14.03%、44.76% 和 35.74%;根平均直径的平均增幅分别为 9.11%、24.01%、35.40%、6.54%、19.28% 和 12.33%;对根体积的平均增幅分别为

35.25%、77.02%、116.52%、24.41%、74.75% 和 59.84%。综合来看,微生物菌剂配施对赤豆根系形态指标的影响比有机肥配施更大。

2.4 肥料不同配施方法对赤豆产量的影响

由表 3 可知,相较于 CK,肥料配施可显著提高赤豆的单株荚数。随着微生物菌剂施加量的增大,单荚粒数依次减小,百粒重和产量呈增长趋势,但对百粒重的影响不显著。有机肥配施对赤豆产量及构成要素的影响表现为先增加后减少,单荚粒数均小于 CK 但差异不显著,F1、F3 处理百粒重小于 CK。F1 处理的产量较 CK 降低 10.65%,其他各处理较 CK 分别提高 3.14%、15.03%、18.21%、14.85% 和 4.42%。表明少量肥料配施和过量有机肥配施(J1、F1、F3)不能有效提升赤豆的产量,过量微生物菌剂配施(J3)也不能进一步增大赤豆产量及其构成要素,科学适量的选择配施方案才能经济有效地增加赤豆的产量。

3 讨论

在前人的研究中,大多将小麦、玉米、水稻等主

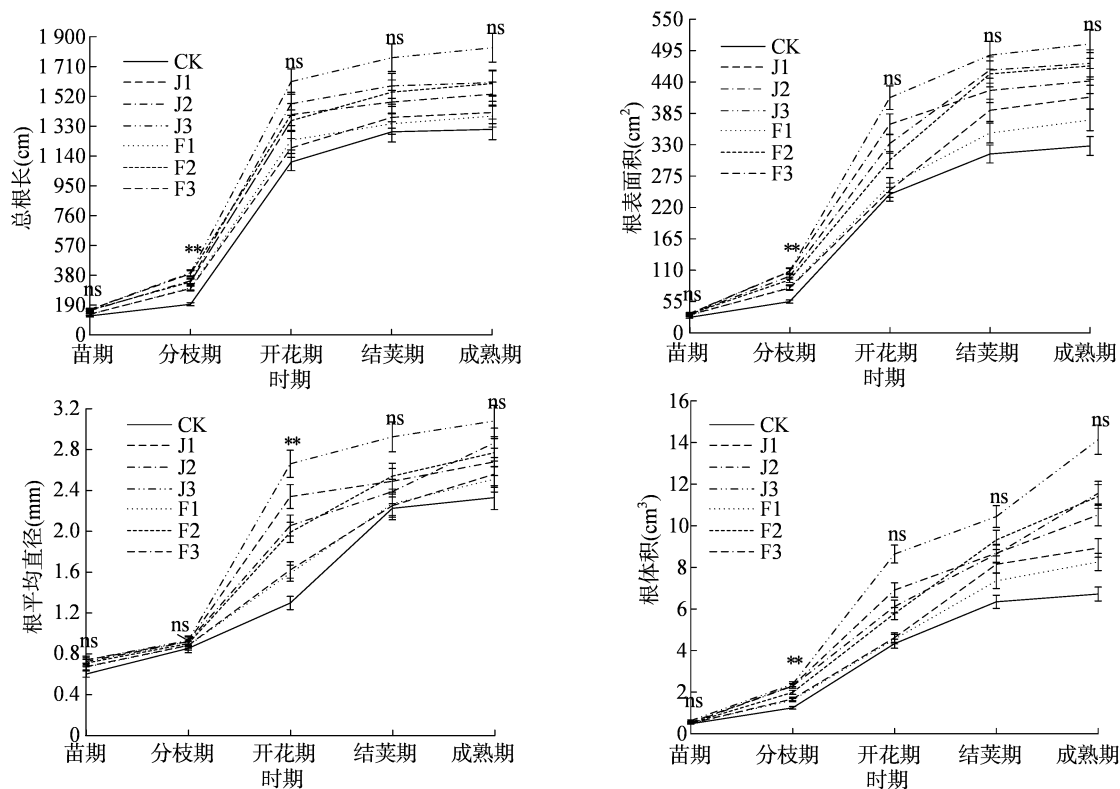


图4 肥料不同配施方法赤豆根系形态特征

表 3 肥料不同配施方法对赤豆产量及其构成要素的影响

处理	单株荚数 (个)	单荚粒数 (粒)	百粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)
CK	15.20 ± 1.15c	6.8 ± 0.5a	14.50 ± 0.64ab	2 278.75 ± 112.03b
J1	17.00 ± 2.00bc	6.2 ± 0.6abc	14.72 ± 0.38ab	2 350.32 ± 44.69b
J2	20.08 ± 2.79a	5.8 ± 0.6bc	14.89 ± 0.54ab	2 621.25 ± 107.52a
J3	21.00 ± 1.33a	5.6 ± 0.2c	15.03 ± 0.37a	2 693.77 ± 60.36a
F1	18.40 ± 0.19ab	6.2 ± 0.9abc	13.50 ± 0.18c	2 036.14 ± 51.30c
F2	20.60 ± 0.19a	6.6 ± 0.4a	14.56 ± 0.16ab	2 617.20 ± 145.48a
F3	19.73 ± 0.33ab	6.4 ± 0.8ab	14.25 ± 0.20b	2 379.36 ± 80.48b

要的粮食作物作为研究对象,对杂豆的研究又以大豆、绿豆、花生等居多,与赤豆相关的文献资料仍需要更多研究人员填充。作为种植易、价值高、产量较低的优良作物,如何有效促进赤豆生长、提高赤豆产量是值得深入探究的问题。已有的研究表明,微生物菌剂和有机肥比化学肥料更加环保、安全^[17-19],同时能够改善土壤条件,促进作物生长,提高作物光合作用,从而提高作物产量^[12,20-23]。

叶面积指数、SPAD 值会影响作物的光合作用,净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度是对作物光合作用强弱的直观体现。微生物菌剂配施能够促进赤豆叶片生长和 SPAD 值增加^[11,24-25],有机肥配施能有效增加赤豆叶面积^[20]。

本试验中,赤豆叶面积指数和 SPAD 值均与微生物菌剂施加量呈正相关,与有机肥施加量基本呈“抛物线”形关系,少量菌剂配施、少量和过量有机肥配施对赤豆叶面积和 SPAD 值影响均不显著。这可能是由于微生物菌剂能通过影响作物体内激素浓度和酶活性促进作物生长^[26],有机肥能增加土壤养分和微生物含量^[27],同样影响作物的养分吸收,少量和过量肥料导致作物体内激素浓度不够或过剩,从而影响赤豆叶面积指数和 SPAD 值。增大叶面积指数和 SPAD 值能够增强作物的光合作用从而提高作物产量^[28],但枝叶密度过大造成叶片相互遮挡,叶面积指数过大也会降低作物的光合作用和产量^[29]。本研究表明,2 种肥料各自的不同梯度对 2 种光合

指标的影响趋势相同,有机肥配施对赤豆光合作用的影响稍弱于微生物菌剂配施,不同肥料的不同配施方法可能产生相似的作用,J2、J3 和 F2 处理是增强赤豆光合作用最强的处理。

根系是作物吸收养分、水分的重要器官,发达的根系为作物健康强壮的生长提供有力支持^[30-32]。微生物和养分能够直接影响作物根系,促进作物生长^[30,33]。微生物菌剂和有机肥配施能显著增加作物的总根长、根表面积、根体积和根平均直径,这与前人的研究结果^[34-40]一致。本研究还发现,赤豆根系主要在分枝期到开花期快速生长,除总根长外,赤豆的其他根系形态指标均表现为 J3 > F3 > J2 > F2 > J1 > F1 > CK,此时也是赤豆叶面积指数和 SPAD 值开始快速增长的时期。2 种肥料配施方法对比,赤豆的根系生长和光合作用对微生物菌剂配施的响应更大,赤豆叶片的生长对有机肥配施的响应更大。结合前文可知,少量菌剂配施(J1)不能显著促进赤豆生长与光合作用;少量有机肥配施(F1)仅能促进赤豆叶面积增长,但由于养分不足,赤豆叶片提前凋落,不利于赤豆籽粒养分积累;过量菌剂配施(J3)对赤豆生长的促进作用最大,但较 J2 均无显著增长;过量有机肥配施(F3)由于养分过多使赤豆生长指标和光合特性较 F2 处理下降;中等用量的肥料配施(J2、F2)是显著提高赤豆光合作用、促进赤豆生长的最佳配施方案。

作物的产量与其叶片、根系的生长状况以及光合作用强弱息息相关,增大叶面积、增强光合作用有利于作物干物质的合成;增加根系,有利于作物养分、水分的吸收。本试验表明,肥料配施主要在分枝期到开花期促进根系生长,为赤豆养分、水分吸收提供有力基础,充足的养分与微生物诱导促进开花期、结荚期叶片生长,增加叶片 SPAD 值,为赤豆光合作用提供足够的器官和场所,从而增加赤豆产量。已有的研究发现,适宜的肥料配施能够显著增加作物单株荚数、百粒重和产量^[41-44]。本研究中,除 F1 处理百粒重和产量较 CK 减少了 6.90% 和 10.65%,F3 处理百粒重较 CK 减少了 1.72%,其他处理单株荚数、百粒重和产量较对照分别增加了 11.84% ~ 38.16%、0.41% ~ 3.66% 和 3.14% ~ 18.21%。各处理单荚粒数则降低了 2.94% ~ 17.65%,单荚粒数的减少可能是由于肥料配施减少了赤豆花粉数量或降低了花粉活力。J3 处理下赤豆产量增长最大,但 J2、J3 和 F2 处理间产量差异不

显著。J3 处理的产量增长不显著和 F3 处理的产量减少可能是由于根系在分枝期开始产生显著差异,此时根系吸收的养分作用于植株的枝叶,过量肥料配施处理下赤豆枝叶过于密集,不利于赤豆光合作用,同时枝叶疯长降低了为籽粒分配的养分比例,最终造成增产减少^[45]。因此,经济合理的最佳配施方案为 J2、F2 处理。

4 结论

肥料配施可以显著促进赤豆生长,增强赤豆光合作用,提高赤豆产量。本试验表明,J3 处理(常规施肥下增施微生物菌剂 412.5 kg/hm²)下,赤豆产量最高,达 2 693.77 kg/hm²,较 CK 增长 18.21%;J2、F2 处理(常规施肥下增施微生物菌剂 262.5 kg/hm²;减施复合肥下增施有机肥 8 000 kg/hm²)下,赤豆生长状态最优,产量分别达 2 621.25 kg/hm² 和 2 617.20 kg/hm²,分别较 CK 增长 15.03% 和 14.85%。综合考虑赤豆生长、产量等指标,J2、F2 处理是赤豆增产的最优配施方法。

参考文献:

- [1] 王一杰,邸 菲,辛 岭. 我国粮食主产区粮食生产现状、存在问题及政策建议[J]. 农业现代化研究,2018,39(1):37-47.
- [2] Sher A, Sarwar B, Sattar A, et al. Exogenous application of zinc sulphate at heading stage of wheat improves the yield and grain zinc biofortification[J]. Agronomy,2022,12(3):734.
- [3] Gao Y B, Liu C, Wang J P, et al. Modified TAL expression in rice plant regulates yield components and grain quality in a N - rate dependent manner[J]. Field Crops Research,2024,306:109219.
- [4] Anu, Shweta, Singh K, et al. Enhancing crop growth, yield and economics of spring baby corn through different spacing and irrigation regimes[J]. International Journal of Plant & Soil Science,2023,35(23):215-221.
- [5] Nissa S U, Dar Z A, Habib M, et al. Influence of organic and inorganic nutrient sources on the yield and uptake of major nutrients in soybean[J]. International Journal of Plant & Soil Science,2023,35(21):1120-1128.
- [6] 朱 睿,刘宏权,柴春岭,等. 水肥互作对膜下滴灌绿豆干物质积累与产量的影响[J]. 河北农业大学学报,2023,46(2):96-102.
- [7] 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]. Journal of Advanced Research,2024,64:1-13.
- [8] 张书豪,王玉洁,黄培元,等. 化肥减量配施羊粪有机肥对烤烟生长、产质量及土壤养分的影响[J]. 山东农业科学,2024,56(4):72-80.

- [9] 逢焕成, 李玉义, 严慧峻, 等. 微生物菌剂对盐碱土理化和生物性状影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(5): 951–955.
- [10] 王 聪, 马锐骛, 王 斌, 等. 不同种植和管理方式对油莎豆叶片性状及地上地下生物量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022, (10): 104–110.
- [11] 何飞燕, 杜全能, 杨 正, 等. 复合微生物菌剂对花生生长及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(14): 104–109.
- [12] 伍少福, 韩科峰, 吴良欢. 生物有机肥加专用肥对葡萄园土壤养分、微生物和产量的影响[J]. 园艺学报, 2024, 51(5): 1099–1112.
- [13] 洪坚平, 谢英荷, Neumann G, 等. 不同微生物菌剂对豌豆生长和磷、锌利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 327–330.
- [14] 吕慧丹, 黄玉波, 赵士诚. 养分专家系统结合微生物菌剂在大豆上的应用效果[J]. 中国土壤与肥料, 2023(5): 8–13.
- [15] 向书江, 余 烁, 熊子怡, 等. 化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(12): 6067–6077.
- [16] 蒋陵秋, 金文林. 小豆生长发育规律的研究: IV. 小豆叶面积矫正系数及其空间分布[J]. 北京农学院学报, 1988, 3(3): 1–7.
- [17] Титова Л В, Сергіснко В Г. The efficiency of the complex use of microbial formulations and fungicides for the diseases control and productivity increase of vegetable crops[J]. Microbiology & Biotechnology, 2018, 4(44): 30–41.
- [18] Rojas – Sánchez B, Guzmán – Guzmán P, Morales – Cedeño L R, et al. Bioencapsulation of microbial inoculants: mechanisms, formulation types and application techniques [J]. Applied Biosciences, 2022, 1(2): 198–220.
- [19] 丁文成, 何 萍, 周 卫. 我国新型肥料产业发展战略研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(2): 201–221.
- [20] 曹 巍, 高惠嫣, 王鑫鑫, 等. 不同配施肥措施对滨海盐碱地大豆生长和产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(22): 53–60.
- [21] Morais M C, Mucha Â, Ferreira H, et al. Comparative study of plant growth – promoting bacteria on the physiology, growth and fruit quality of strawberry [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(12): 5341–5349.
- [22] 李元芳. 微生物肥料及其在蔬菜上的应用[J]. 中国蔬菜, 2001(5): 5–7.
- [23] 严建辉. 施用复合微生物菌剂对几种农作物产量品质及土壤养分状况的影响[J]. 农学学报, 2018, 8(12): 35–39.
- [24] 鹿 鑫, 赵敦厚, 关法春, 等. 复合菌剂添加对盐碱地大豆生长发育及产量的影响[J]. 大豆科学, 2022, 41(5): 588–593.
- [25] 徐 婷, 柳延涛, 王海江. 不同改良剂对盐碱地花生生长特性和产量的影响[J]. 西南农业学报, 2023, 36(1): 62–74.
- [26] 邱 光, 张新风, 李建伟, 等. 解淀粉芽孢杆菌 B1619 对草莓保苗促生效果[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(4): 98–100.
- [27] 司海丽, 纪立东, 刘菊莲, 等. 有机肥施用量对玉米产量、土壤养分及生物活性的影响[J]. 西南农业学报, 2022, 35(4): 740–747.
- [28] 黄 超, 刘战东, 赵 彝, 等. 不同产量水平下夏玉米光合及耗水特性研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(12): 19–28.
- [29] 高 超, 陈 平, 杜 青, 等. 播期、密度对带状间作大豆茎叶生长及产量形成的影响[J]. 作物学报, 2023, 49(11): 3090–3099.
- [30] 丁兆军, 白 洋. 根系发育和微生物组研究现状及未来发展趋势[J]. 中国科学(生命科学), 2021, 51(10): 1447–1456.
- [31] Liu Y Y, Xu F J, Ding L P, et al. Microplastics reduce nitrogen uptake in peanut plants by damaging root cells and impairing soil nitrogen cycling [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 443: 130384.
- [32] Mohammed U, Davis J, Rossall S, et al. Phosphite treatment can improve root biomass and nutrition use efficiency in wheat [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 1017048.
- [33] 葛 君, 孟自力, 张志标, 等. 肥料配施对小麦根系、根际土壤微生物及秸秆养分积累的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(11): 214–219.
- [34] Rafique M, Ortas I, Ahmed I A M, et al. Potential impact of biochar types and microbial inoculants on growth of onion plant in differently textured and phosphorus limited soils[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 247: 672–680.
- [35] Calvo P, Watts D B, Kloepper J W, et al. Effect of microbial – based inoculants on nutrient concentrations and early root morphology of corn (*Zea mays*) [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2017, 180(1): 56–70.
- [36] 张雅楠, 张 昀, 燕香梅, 等. 氮肥减施配施菌剂对水稻生长及土壤有效养分的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(3): 655–661.
- [37] 贺善睦, 姚 拓, 雷 杨, 等. 微生物菌剂与化肥减量配施对猫尾草生长的影响[J]. 草业科学, 2024, 41(11): 2706–2714.
- [38] Bandyopadhyay K K, Misra A K, Ghosh P K, et al. Effect of integrated use of farmyard manure and chemical fertilizers on soil physical properties and productivity of soybean[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 110(1): 115–125.
- [39] 王 宁, 李继光, 姜翼来, 等. 作物根系形态对施肥措施的响应[J]. 中国农学通报, 2020, 36(3): 53–58.
- [40] 李其胜, 殷小冬, 董青君, 等. 生物炭和微生物菌剂添加对菇渣好氧堆肥过程及其养分变化的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(11): 212–218.
- [41] 郑国栋, 龚 岫, 黄炎霞, 等. 不同用量有机肥与菌剂组合对花生产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 花生学报, 2022, 51(2): 25–31, 48.
- [42] Sharma P, Bhatt A, Jyoti B. Effect of seed bio – priming with microbial inoculants on plant growth, yield and yield contributing characters in soybean [*Glycine max* (L.) merril] [J]. International Journal of Economic Plants, 2018, 5(2): 53–58.
- [43] 张春明, 张耀文. 品种与肥料对小豆产量及水肥利用的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(12): 7034–7035, 7124.
- [44] 崔永增, 韩江伟, 姚海坡, 等. 有机肥替代氮肥对冬小麦氮素吸收利用的影响[J]. 华北农学报, 2024, 39(1): 135–142.
- [45] 刘振兴, 周桂梅, 亚秀秀, 等. 不同种植密度对 3 个小豆品种植株形态及产量的影响[J]. 作物杂志, 2020(6): 137–142.