

丁芳, 吕树立, 田壮博. 减氮增密对夏芝麻光合特性、产量及氮肥吸收利用的影响[J]. 山西农业科学, 2026, 54(1):154-161.
DING F, LÜ S L, TIAN Z B. Effects of reducing nitrogen and increasing density on photosynthetic characteristics, yield, and nitrogen fertilizer absorption and utilization of summer sesame[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2026, 54(1):154-161.
doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2026.01.17

减氮增密对夏芝麻光合特性、产量及氮肥吸收利用的影响

丁 芳, 吕树立, 田壮博

(商丘市农林科学院, 河南 商丘 476000)

摘 要:针对夏芝麻前茬作物小麦土壤氮素残留量过高的问题,研究减氮增密对夏芝麻光合特性、产量及氮素利用效率的影响,以期为冬小麦、夏芝麻轮作制度中芝麻生产提供科学依据,以商芝196号为试验材料,设置不施氮肥+常规种植密度18万株/hm²(T1)、常规施氮(氮肥用量150 kg/hm²)+常规种植密度18万株/hm²(T2)、较常规施氮减量30%(105 kg/hm²)+种植密度21万株/hm²(T3)、较常规施氮减量30%(105 kg/hm²)+种植密度24万株/hm²(T4)共4个处理,测定芝麻光合特性、叶面积指数、产量氮素积累与分配。结果表明,与T2处理相比,T3、T4处理株高显著降低,2 a间平均降幅分别为6.22%、5.04%,始蒴高度显著低于T2处理,2 a间平均降幅分别为17.90%、13.71%;与T2、T4处理相比,T3处理主茎果轴长2 a平均增幅分别为8.82%、6.24%。减氮增密提高了籽粒氮含量,其中,T3处理籽粒氮含量最高,较T2、T4处理2 a间平均增幅分别为9.02%、3.02%。T3处理较T2处理的芝麻氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率均显著增加,较T2处理分别提高15.70%、2.32 kg/kg。T3处理较T2、T4处理SPAD分别平均增加了7.99%、12.25%,T3处理较T2处理产量2 a平均增加了8.54%。综上所述,小麦氮肥高投入地区进行芝麻种植时应考虑采用减氮增密模式,即施氮105 kg/hm²、种植密度21万株/hm²有利于实现夏芝麻的高产高效和节氮栽培。

关键词:夏芝麻;减氮增密;种植密度;光合速率;产量;氮肥利用率

中图分类号:S565.3

文献标识码:A

文章编号:1002-2481(2026)01-0154-08

Effects of Reducing Nitrogen and Increasing Density on Photosynthetic Characteristics, Yield, and Nitrogen Fertilizer Absorption and Utilization of Summer Sesame

DING Fang, LÜ Shuli, TIAN Zhuangbo

(Shangqiu Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shangqiu 476000, China)

Abstract: In response to the problem of high nitrogen residue in the soil of wheat, the previous crop of summer sesame, aiming to investigate the effects of reducing nitrogen and increasing density on the photosynthetic characteristics, yield, and nitrogen use efficiency of summer sesame, in order to provide scientific basis for sesame production in the winter wheat and summer sesame rotation system, in this study, using Shangzhi196 as the experimental material, a total of four treatments were set up, including no nitrogen fertilizer+conventional planting density of 180 000 plants/ha(T1), conventional nitrogen application(nitrogen fertilizer application rate of 150 kg/ha)+conventional planting density of 180 000 plants/ha(T2), and 30% of reduction in nitrogen application compared to conventional application(105 kg/ha)+planting density of 210 000 plants/ha(T3), and 30% of reduction in nitrogen application compared to conventional application(105 kg/ha)+planting density of 240 000 plants/ha(T4). The photosynthetic characteristics, leaf area index, nitrogen accumulation and distribution in yield of sesame were measured and analyzed. The results showed that compared with T2 treatment, T3 and T4 treatments significantly reduced plant height, with an average decrease of 6.22% and 5.04% over two years. The initial capsule height was significantly lower than that of T2 treatment, with an average decrease of 17.90% and 13.71% over two years. The

收稿日期:2024-12-25

基金项目:河南省科技攻关项目(232302110371);河南省农科系统协同创新合力发展工程项目(2022XTCX02);商丘市科技攻关项目(2024001)

作者简介:丁 芳,助理研究员,硕士,主要从事芝麻育种与栽培研究,E-mail:214681636@qq.com

通信作者:吕树立,副研究员,主要从事芝麻育种与栽培研究,E-mail:lvshuli666666@163.com

average increase in the capsule axis length in main stem of T3 treatment compared with T2 and T4 treatments for two years was 8.82% and 6.24%, respectively. Reducing nitrogen and increasing density increased grain nitrogen content, with T3 treatment having the highest grain nitrogen content, with an average increase of 9.02% and 3.02% compared with T2 and T4 treatments over two years. Compared with T2 treatment, T3 treatments significantly increased the nitrogen fertilizer absorption and utilization efficiency, as well as nitrogen fertilizer agronomic utilization efficiency of sesame, increasing by 15.70% and 2.32 kg/kg respectively. The SPAD value of T3 treatment increased by an average of 7.99% and 12.25% compared with T2 and T4 treatments, respectively, and the final yield of T3 treatment averagely increased by 8.54% compared with T2 treatment over two years. In summary, when planting sesame in areas with high nitrogen fertilizer input for wheat, the reducing nitrogen and increasing density mode should be adopted, that is to say, the mode of applying 105 kg/ha of nitrogen and a density of 210 000 plants/ha was conducive to achieving high-yield, high-efficiency, and nitrogen saving cultivation of summer sesame.

Keywords: summer sesame; reducing nitrogen and increasing density; planting density; photosynthetic rate; yield; nitrogen fertilizer utilization efficiency

芝麻是我国重要的特色油料作物,具有丰富的营养价值和较高的美容、保健功效^[1],并且因其对水肥的需求量低、耐贫瘠等特点,在我国豫南、皖西北等地区广泛种植^[2]。氮肥是芝麻产量和品质形成的一个重要限制因素^[3]。近年来,由于黄淮海地区小麦化肥施用量较大,造成小麦收获后土壤氮素残留较高,在此基础上,常规施肥种植芝麻极易造成田间氮肥过量,芝麻营养生长过旺、氮肥利用效率低下,最终影响芝麻的产量和品质。已有研究表明,过量施用氮肥,导致幼苗旺长、影响作物籽粒灌浆、增加病虫害风险;同时造成严重的氮污染^[4]。目前,农业氮污染源头控制的主要方式之一是减氮,适量减施氮肥可有效提高玉米^[5]、水稻^[6]、高粱^[7]等作物的光合作用,增加叶绿素含量及氮肥吸收效率。土壤中的氮素含量决定了作物的最终产量^[8],单纯减氮有可能导致作物减产,合理的种植密度可改善群体质量,发挥高产潜能,减氮基础上增加种植密度是提高作物产量及氮素利用率最有效的方式之一^[9]。李超等^[10]研究表明,减氮20%、增密30%处理下,水稻氮素吸收率得到有效提升,产量无显著差异。何成贵等^[11]研究认为,将水稻种植密度提高30%、施氮量降低10%~20%,不仅能实现水稻增产4.07%~6.37%,氮肥吸收率也可提高6%左右。魏延邦等^[12]研究认为,氮肥减量至80 kg/hm²与种植密度24万株/hm²配合处理能够有效改善密植条件下黄苋的光合特性和干物质积累。

由此可见,减氮增密在实现节本增效、减轻环境污染等方面已达成共识^[13]。目前,有关芝麻的研究多集中于氮肥用量或种植密度等单一因素对芝麻生产的影响方面,关于减氮增密对芝麻产量及

品质的影响鲜见报道。因此,本研究以商芝196为试材,探讨减氮增密对芝麻农艺性状、光合生理、产量及氮素吸收效率的影响,以期为芝麻的高产节肥栽培提供理论参考。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

2022年、2023年连续2 a在河南省商丘市农林科学院双八试验基地进行大田试验。前茬作物为小麦,氮肥施用量为300 kg/hm²,供试土壤为典型的黏质黄潮土,土壤pH值为7.18,有机质含量1.22%,硝态氮含量47.88 mg/kg,铵态氮含量104.6 mg/kg,速效磷含量21.6 mg/kg,速效钾含量117.4 mg/kg。

1.2 试验材料

供试芝麻为当地主栽芝麻品种商芝196,由商丘市农林科学院提供。

1.3 试验设计

采用随机区组试验,设4个施肥密度处理(表1),每个处理重复3次,共12个小区,每小区为10行区,行长5 m,行距0.4 m,小区面积20 m²。为防止串水串肥,小区间以田埂覆膜隔离。

表1 试验设计

Tab.1 Experimental design

处理 Treatment	氮肥用量/(kg/hm ²) Nitrogen fertilizer application amount	种植密度/(万株/hm ²) Planting density
T1(CK)	0(不施肥)	18
T2	150(常规施肥)	18
T3	105(减氮30%)	21
T4	105(减氮30%)	24

6月10日播种,长至3对真叶时定苗,按试验

设计密度留苗。供试氮肥为尿素(含 N 46.4%) 90 kg/hm²,磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)65 kg/hm²,钾肥为氯化钾(含 K₂O 60%)45 kg/hm²,全部混匀后作为底肥一次性施入,整个生育期不再追肥,其他管理同常规大田一致。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 农艺性状及产量性状测定 在成熟期时,用 5 点取样法每小区选取长势一致的植株 10 株,分别用直尺测定株高、始蒴高度、主茎果轴长,并统计单株蒴数。在芝麻主茎距离地面 5~10 cm 的部位用游标卡尺测量茎粗。按照高桐梅等^[2]的方法,每株选取 5 个中位蒴果,调查每蒴粒数并统计。将植株按照茎、叶、蒴果皮、籽粒分类装袋,于 105 ℃烘箱杀青 30 min,80 ℃烘干至恒质量,并分类记录。采用凯氏定氮法测定籽粒、植株含氮量及全氮含量^[14]。每小区选取长势一致的 3 行单独收获,并计算产量。

1.4.2 光合特性测定 于盛花期每小区取长势一致的芝麻植株 5 株,选取植株最上部的完全展开的 3 片叶,采用手持式 SPAD-502 叶绿素测定仪(日本 Minolta 公司生产)测定叶绿素含量(SPAD)。每株至少测 5 个位点,取平均值。采用英国 ADC 公司 LCpro+ 全自动便携式光合分析仪测定净光

合速率(Pn)。用直尺分别测量叶片的长和宽,用公式(1)计算叶面积指数(LAI)。

$$\text{LAI} = \text{叶长} \times \text{最大叶宽} \times \text{矫正系数} / \text{单位面积} \quad (1)$$

1.4.3 氮素吸收效率测定 氮肥吸收利用率(Nitrogen recovery efficiency, NRE)是指每施用 1 kg 氮所增加的籽粒产量,NRE、氮肥收获指数(NHI)、氮肥农学利用率(Nitrogen agronomic efficiency, NAE)通过计算获得^[16]。

$$\text{NRE} = (\text{施氮区植株氮积累量} - \text{不施氮区植株氮积累量}) / \text{施氮量} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{NHI} = \text{作物收获时籽粒氮积累量} / \text{地上部植株氮积累量} \quad (3)$$

$$\text{NAE} = (\text{施氮区籽粒产量} - \text{空白对照区籽粒产量}) / \text{氮肥施用量} \quad (4)$$

1.5 数据分析

采用 Excel 2019 整理数据,采用 SPSS 19.0 进行方差分析和显著性多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同氮密处理对芝麻农艺性状的影响

2022、2023 年不同处理对芝麻农艺性状的影响如表 2 所示。

表 2 2022、2023 年不同处理对芝麻农艺性状的影响

Tab.2 Effects of different treatments on sesame agronomic traits in 2022–2023

年份 Year	处理 Treatment	株高/cm Plant height	始蒴高度/cm Initial capsule height	主茎果轴长/cm Capsule axis length in main stem	茎粗/mm Stem diameter
2022	T1(CK)	160.33±2.74c	53.32±2.02d	90.48±0.47c	9.68±0.22c
	T2	189.24±1.02a	74.52±1.41a	114.82±0.36a	13.86±0.12a
	T3	178.31±2.33b	58.21±2.05bc	112.26±3.11a	14.22±0.14a
	T4	180.02±1.42b	62.22±0.98b	102.54±1.22b	13.04±0.14b
2023	T1(CK)	162.42±1.24c	56.36±1.08c	88.04±0.74c	10.02±0.77c
	T2	188.64±1.74a	72.33±1.48a	110.83±0.40a	14.31±0.16a
	T3	176.06±1.84b	62.36±0.95b	108.02±2.14a	13.68±0.10ab
	T4	178.82±3.02b	64.47±0.86b	104.80±0.44b	13.54±0.092b
年份 Year(Y)		ns	ns	ns	ns
处理 Treatment(T)		**	**	**	**
年份×处理(Y×T)		ns	ns	ns	ns

注:同列不同小写字母表示各处理在 0.05 水平上差异显著;**表示各因素间差异极显著($P < 0.01$),ns 表示差异不显著。下表同。

Note: The different lowercase letters in the same column indicated significant differences among treatments at the 0.05 level. ** indicated extremely significant differences among factors ($P < 0.01$), ns indicated no significant differences. The same as below.

从表 2 可以看出,年份及年份和处理间的交互效应对芝麻株高、始蒴高度、主茎果轴长和茎粗的

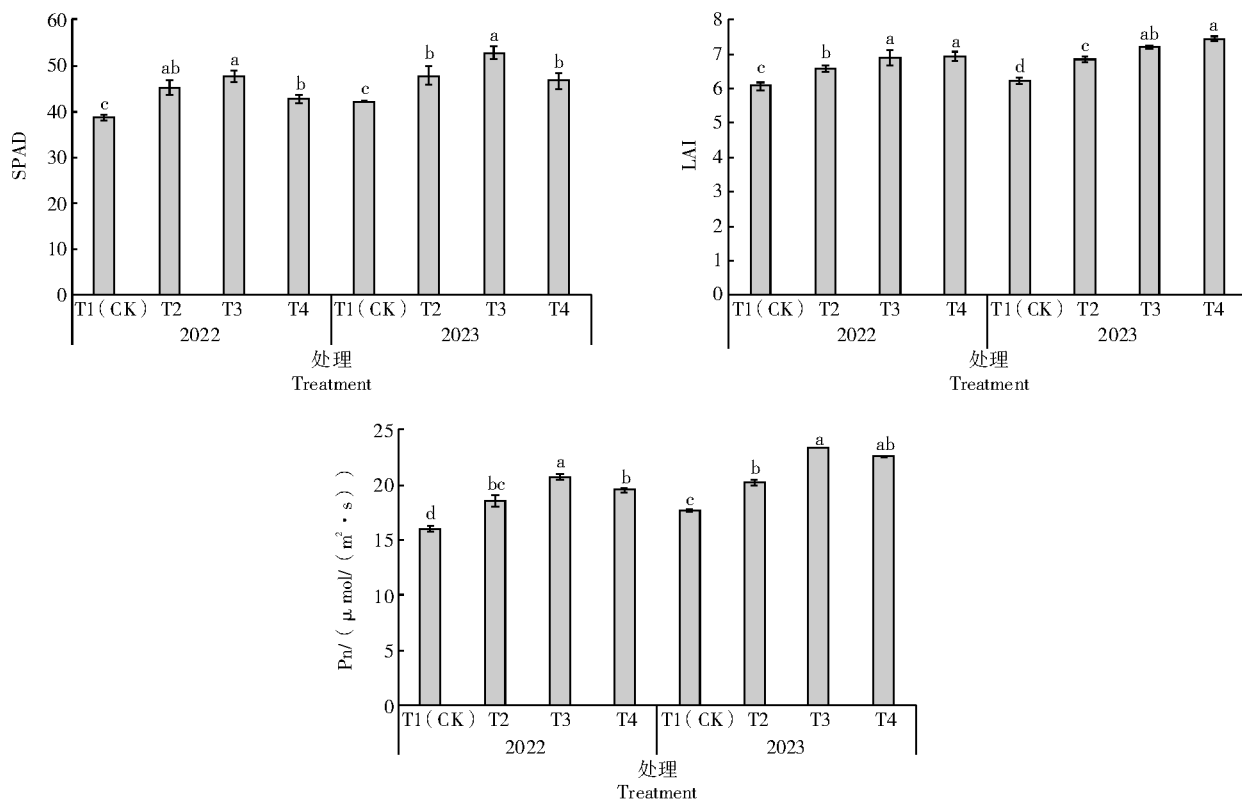
影响不显著,不同处理对各农艺性状的影响均达显著水平。处理 T2、T3、T4 的株高、始蒴高度、主

茎果轴长、茎粗均显著高于T1处理($P<0.05$),且2 a间表现基本一致。T3、T4处理株高显著低于T2处理($P<0.05$),2 a间平均降幅为6.22%、5.04%,始蒴高度显著低于T2处理($P<0.05$),2 a间平均降幅为17.90%、13.71%。T4处理主茎果轴长较T2、T3处理2 a间平均降幅为8.82%、6.24%。T4处理茎粗显著低于T2、T3处理($P<0.05$),2 a间平均降幅为5.64%和4.73%。

2.2 不同氮密处理对芝麻盛花中期光合性能的影响

从图1可以看出,不同处理、年份对叶绿素含量、叶面积指数、光合效率影响均达极显著水平,

年份和处理间的交互作用未达显著水平。不同年份间叶绿素含量均在T3处理时达到最大值,且显著高于其他处理($P<0.05$),2 a间T3处理较T2、T4处理SPAD平均增加了7.99%、12.25%;叶面积指数均在T4处理时达到最大值,表明此时植株叶片之间交错程度最大;Pn在T3处理时达到最大值,2 a间平均Pn较T2、T4处理升高了13.62%、4.76%,表明随着密度的增加,叶面积指数增加但有效光合作用面积并没有增加。说明适宜的冠层结构可以获得较高的Pn,从而增加光合作用。



不同小写字母表示各处理在0.05水平差异显著($P<0.05$)。下图同

Different lowercase letters indicated significant differences among treatments at the 0.05 level($P<0.05$). The same as below

图1 不同氮密处理对芝麻盛花期光合作用的影响

Fig.1 Effects of different nitrogen density treatments on photosynthesis during the peak flowering period of sesame

2.3 不同氮密处理对芝麻产量及其构成因素的影响

从表3可以看出,不同处理对单株蒴数、单蒴粒数、千粒质量和产量影响极显著,年份对单株蒴数、千粒质量无显著影响,但对单蒴粒数和产量影响达极显著水平,年份与处理间的交互作用未达显著水平。相较于CK,施氮处理明显提高了芝麻

的产量,T3、T4处理芝麻产量均高于T2处理,2 a平均增产幅度分别为8.54%和2.56%。造成产量差异的主要原因是T3、T4处理的单株蒴数均高于T2处理,2 a平均增幅分别为4.47%和6.66%。其中,T4处理的增幅达显著水平($P<0.05$),尽管T4处理下单株蒴数较T3处理平均增加2.95%,但其单蒴粒数、千粒质量均低于T3处理,降幅分别

为 4.99%、8.46%，导致其产量低于 T3 处理。

表 3 2022、2023 年不同处理对芝麻产量及其构成因素的影响

Tab.3 Effects of different treatments on sesame yield and yield composition factors in 2022, 2023

年份	处理 Treatment	单株蒴数/个 Capsules per plant	单蒴粒数 Grains per capsule	千粒质量/g 1000-grain weight	产量/(kg/hm ²) Yield
2022	T1(CK)	74.80±2.36c	70.66±0.42b	2.96±0.150b	1 436.42±60.32c
	T2	102.74±3.45b	86.12±0.36a	3.10±0.032b	1 790.44±19.80b
	T3	108.17±2.66a	90.84±2.01a	3.30±0.014a	1 933.72±19.37a
	T4	108.82±2.97a	85.26±2.06a	3.02±0.065b	1 824.36±10.48ab
2023	T1(CK)	72.40±1.42b	68.58±2.10b	2.92±0.064c	1 520.77±19.88c
	T2	102.86±2.33a	80.44±2.41a	3.16±0.120b	1 819.32±22.14b
	T3	106.62±2.01a	82.02±2.02a	3.32±0.084a	1 984.25±20.52a
	T4	110.47±2.27a	78.97±3.45a	3.04±0.069bc	1 877.64±43.24b
年份 Year(Y)		ns	**	ns	**
处理 Treatment(T)		**	**	**	**
年份×处理(Y×T)		ns	ns	ns	ns

2.4 不同氮密处理对芝麻氮素积累的影响

从图 2 可以看出,不同处理对籽粒氮、秸秆氮、总氮含量有显著影响,不同年份间数据趋于一致,年份对各指标影响不显著,表明氮素积累量年份间差别不大。年份和处理间的交互作用未达显著水平。T3 处理籽粒氮含量显著高于 T2、

T4 处理 ($P<0.05$), 2 a 间平均增幅为 9.02%、3.02%, T3 处理秸秆氮含量较 T2、T4 处理显著降低 ($P<0.05$), 2 a 间平均降幅为 16.23%、8.65%。总氮量大小依次为 T2>T4>T3>T1, 2 a 间趋势一致。T3 处理总氮含量较 T2、T4 处理平均降幅为 5.88%、3.46%。

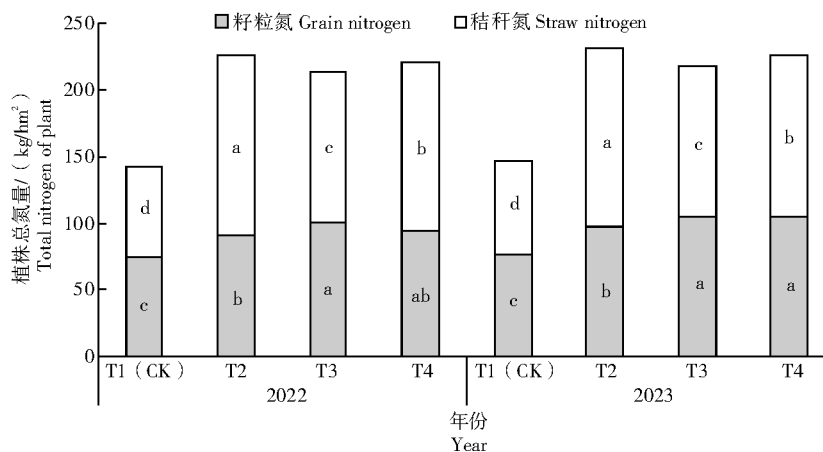


图 2 不同处理对芝麻氮素积累的影响

Fig.2 Effects of different treatments on nitrogen accumulation in sesame

2.5 不同氮密处理对芝麻氮素利用的影响

不同处理对芝麻氮肥吸收利用率、氮肥收获指数、氮肥农学利用率影响显著,而不同年份仅氮肥农学利用率差异显著,年份与处理间的交互作用均未达显著水平(表 4)。随氮肥用量的增加,氮肥收获指数逐渐降低。与 T2 处理相比, T3、T4 处理芝麻氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率、氮肥收

获指数均显著增加 ($P<0.05$), 其中, 2 a 平均氮肥吸收利用率分别提高 15.70%、9.54%, 氮肥收获指数分别提高 0.07、0.04, 氮肥农学利用率分别提高 2.32、0.74 kg/kg。T1 处理的氮肥收获指数最高, 2 a 分别达到 0.49、0.52。T3 处理 2 a 平均氮肥吸收利用率和氮肥农学利用率最高, 分别为 52.53% 和 4.70 kg/kg, 较 T4 处理分别增加了 5.63%、50.64%。

表 4 不同处理对芝麻氮肥利用效率的影响

Tab.4 Effects of different treatments on nitrogen fertilizer utilization efficiency

年份 Year	处理 Treatment	N投入量 Nitrogen input	氮肥吸收利用率/% Nitrogen fertilizer absorption and utilization efficiency	氮肥收获指数 Nitrogen fertilizer harvest index	氮肥农学利用率/(kg/kg) Nitrogen fertilizer agro- nomic utilization efficiency
2022	T1(CK)			0.49	
	T2	150	42.16	0.40	2.45
	T3	105	51.04	0.47	4.74
	T4	105	47.35	0.43	3.14
2023	T1(CK)			0.52	
	T2	150	48.64	0.42	2.30
	T3	105	54.02	0.48	4.66
	T4	105	52.10	0.46	3.09
年份 Year(Y)			ns	*	ns
处理 Treatment(T)			**	**	**
年份×处理(Y×T)			*	*	*

3 结论与讨论

3.1 减氮增密对芝麻农艺性状的影响

确定氮肥用量是芝麻科学施肥的重要内容,既要考虑不同品种对营养元素的吸收特性,又要考虑土壤养分供给情况^[17]。有研究指出,氮肥过量或者不足都会对植株农艺性状产生影响^[18]。在本试验中,施氮处理下株高、茎粗、主茎果轴长、始蒴高度均显著高于不施氮处理,减氮处理下株高、始蒴高度显著低于常规氮处理,T4处理主茎果轴长明显低于T2、T3处理。可能是因为T4处理群体密度过大,个体从土壤中获得养分相对较少,主茎果轴因得不到充足的光合产物供应而无法正常地延伸,导致果轴长变短,这与王晶等^[19]的研究结果一致。当氮肥用量相同,密度提高至24万株/hm²时,茎粗呈下降趋势,可能是因为密度过大时群体内遮蔽严重,个体生长受限,也可能是因为密度过大加剧了植株对光照、水分和养分的竞争,导致个体养分不足,茎秆细胞的分裂和膨大受到限制,使茎粗降低,进而还可能影响植株的抗倒伏能力。

3.2 减氮增密对芝麻盛花中期光合性能的影响

光合作用强弱与作物干物质质量和产量息息相关。已有研究表明,氮肥施加过量会导致小麦花后光合能力下降,不利于产量形成^[20]。氮肥不足时水稻叶面积指数下降,群体生长率降低^[21]。合理的密度可以延长叶片光同化的时间,延缓衰老^[22]。本研究结果表明,不施加氮肥时,叶绿素含量、叶面积指数均为最低,减氮30%水平下种植密度为

21万株/hm²时,叶绿素含量最高,Pn最大,减氮30%、密度为24万株/hm²时,叶面积指数最大,Pn、SPAD反而降低,可能是因为密度过大时,虽然LAI增加了,但是田间通风、透光等条件变差,削弱了中下部叶片的光合作用,个体营养竞争大,容易导致叶片早衰,从而使光合生产效率降低。

3.3 减氮增密对芝麻产量及其构成因素的影响

土壤中氮素含量决定作物的最终产量^[23],而单位面积内单株蒴数、单蒴粒数、千粒质量是影响芝麻产量的主要因素^[24-25]。适量施用氮肥对作物生长和产量形成有重要作用。已有研究表明,减氮20%同时增加移栽密度能显著提升寒地水稻产量与氮素吸收利用效率^[9]。黄娟等^[7]研究认为,氮肥施用量减少20%同时增加密度为12.75万株/hm²,有利于实现高粱的高产和节氮栽培。本研究结果表明,与常规施肥相比,T3处理将氮肥用量减少30%,同时将种植密度提高到21万株/hm²,芝麻产量显著提高。其原因在于常规种植氮肥施加过量,芝麻成蒴时间延长,碳水化合物留在营养器官中不能及时向籽粒转移^[2],导致植株贪青晚熟,氮素并没有被充分吸收与利用,芝麻单株蒴数、单蒴粒数和千粒质量下降,从而导致籽粒产量下降^[26]。T4处理将种植密度提高到24万株/hm²,此时芝麻群体密度过大,群内遮阴严重,光照和通风不良,严重影响植株个体的生长发育^[27],导致单蒴粒数和千粒质量均有所下降,产量无明显提升。可见,芝麻生产过程中,需要协同调控其种植密度与氮肥施用量,使个体和群体均衡发展,促进芝麻高产。

3.4 减氮增密对芝麻氮素积累和氮肥利用率的影响

芝麻产量的形成就是物质生产与再分配的过程^[9]。已有研究表明,当肥料投入过量或不平衡时,会导致土壤养分失衡、土壤板结、肥料利用率低且产量下降^[28]。养分利用率是衡量施肥是否科学的直接指标之一。适宜的种植密度不仅可以提高产量还能提高氮素的利用效率^[29]。在本研究中,不同处理对芝麻氮肥吸收利用率、氮肥收获指数、氮肥农学利用率影响显著,但年际间影响不显著,表明氮肥吸收利用效率年际间差别不大,而且变化趋势一致。与 T2 处理相比,T3、T4 处理氮肥吸收利用效率均明显提高,说明氮肥施用过量是导致传统施肥模式氮肥效率低下的原因之一,当氮肥过量时,营养器官中的氮素不能及时向籽粒转移,营养物质在“源”中滞留,导致植株贪青晚熟,干物质没能较好地积累和转运,籽粒氮含量降低,而植株氮含量升高,氮肥吸收效率下降^[26]。同时 T3 与 T4 处理相比,T3 处理氮素利用的各项指标均高于 T4 处理,说明栽培密度过大也是导致氮素利用效率下降的原因之一,种植密度过大,群内通风透光不良,植株下部叶片光合能力减弱,导致氮素积累减少。而适宜的群体结构通过增加养分积累和籽粒产量促进了肥料利用效率的提升。这与伏桐等^[30]的研究结果一致。

综上,与传统种植模式相比,适当减氮增密提高了芝麻产量和氮肥利用效率,有利于芝麻产量的提高。当氮肥为 105 kg/hm²、种植密度为 21 万株/hm² 时,可显著增加芝麻单蒴粒数和千粒质量,显著提高芝麻产量和氮肥利用效率,本研究结果可为黄淮海地区冬小麦—夏芝麻轮作制度中芝麻生产提供科学依据。

参考文献:

- [1] 吕树立,丁芳,田壮博. 喷施调环酸钙对不同密度芝麻机收农艺性状、产量及品质的影响[J]. 河南农业科学, 2025, 54(2): 58-65.
LÜ S L, DING F, TIAN Z B. Effects of spraying prohexadione calcium on mechanical harvesting agronomic characters, yield and quality of sesame under different densities[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2025, 54(2): 58-65.
- [2] 高桐梅,李丰,苏小雨,等. 减施氮肥对芝麻农艺性状、光合特性及产量的影响[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(6): 176-188.
GAO T M, LI F, SU X Y, et al. Effect of nitrogen reduction on agronomic trait, photosynthetic characteristics and yield of sesame[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24(6): 176-188.
- [3] 余常兵,谢立华,李银水,等. 氮钾肥施用技术对芝麻养分积累、产量和品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(3): 469-472.
YU C B, XIE L H, LI Y S, et al. Effect of N and K fertilizer application techniques on nutrient accumulation, yield and quality of sesame[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012, 51(3): 469-472.
- [4] 易媛,刘立伟,刘静,等. 徐麦 35 高产高效增密减氮途径及其碳氮代谢调控机制[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(7): 857-865.
YI Y, LIU L W, LIU J, et al. Methods of high yield and high efficiency by density increase and nitrogen reduction in xumai 35 and its regulation mechanism of carbon and nitrogen metabolism[J]. Journal of Triticeae Crops, 2021, 41(7): 857-865.
- [5] VILAKAZI B S, ZENGNI R, MAFONGOYA P, et al. Seasonal effluxes of greenhouse gases under different tillage and N fertilizer management in a dryland maize mono-crop[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(4): 2873-2883.
- [6] FENG B H, CHEN S, CHU G, et al. Effects of crop rotation systems on microbial structure under low N application in rice field[J]. Journal of Plant Nutrition, 2020, 43(4): 500-511.
- [7] 黄娟,周瑜,张亚勤,等. 减氮增密对杂交糯高粱籽粒产量和干物质生产的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(S1): 154-160.
HUANG J, ZHOU Y, ZHANG Y Q, et al. Effects of nitrogen reduction and densification on grain yield and dry matter production of hybrid waxy sorghum[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2022, 37(S1): 154-160.
- [8] 彭伟国,刘玉春,康猛,等. 氮肥后移对滴灌夏玉米氮素利用和产量的影响[J]. 河北农业大学学报, 2025, 48(2): 126-136.
PENG W G, LIU Y C, KANG M, et al. Effect of postponing nitrogen application on nitrogen use and yield of summer maize under drip irrigation[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2025, 48(2): 126-136.
- [9] 尹彩侠,刘志全,孔丽丽,等. 减氮增密提高寒地水稻产量与氮素吸收利用[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1124-1132.
YIN C X, LIU Z Q, KONG L L, et al. Reducing nitrogen and increasing rice transplanting density in a cold region of China can improve rice yield, nitrogen absorption, and nitrogen utilization[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(6): 1124-1132.
- [10] 李超,肖小平,唐海明,等. 减氮增密对机插双季稻生物学特性及周年产量的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(12): 2451-2459.
LI C, XIAO X P, TANG H M, et al. Biological characteristics and annual yield of double machine-transplanted rice under nitrogen-reduction and density-increase measures[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(12): 2451-2459.
- [11] 何成贵,资月娥,陈路华,等. 增密减氮对高原粳稻产量及其氮肥利用效率的影响[J]. 中国稻米, 2018, 24(4): 117-120.
HE C G, ZI Y E, CHEN L H, et al. Effects of increased transplanting density with reduced nitrogen fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of Plateau Japonica rice[J]. China Rice, 2018, 24(4): 117-120.
- [12] 魏廷邦,魏玉杰,杨振华,等. 种植密度及氮肥对绿洲区蒙古黄芪有效成分和产量的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(8): 1664-1675.
WEI T B, WEI Y J, YANG Z H, et al. Effects of planting

- density and nitrogen fertilizer on the content of astragaloside and yields of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* in oasis area[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(8):1664-1675.
- [13] ZHENG H B, CHEN Y W, CHEN Q M, et al. High-density planting with lower nitrogen application increased early rice production in a double-season rice system[J]. Agronomy Journal, 2020, 112(1):205-214.
- [14] 孔丽丽, 侯云鹏, 尹彩侠, 等. 秸秆还田下寒地水稻实现高产高氮肥利用率的氮肥运筹模式[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(7):1282-1293.
- KONG L L, HOU Y P, YIN C X, et al. Nitrogen fertilizer management for high nitrogen utilization efficiency and rice yield under straw incorporation in a cold region[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(7):1282-1293.
- [15] 田媛, 李丰, 王东勇, 等. 矮壮素对改善芝麻机收农艺性状的作用及其对光合生理的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(5):128-133.
- TIAN Y, LI F, WANG D Y, et al. Influences of chlormequat on machine-harvesting agronomic traits and photosynthetic characteristics of sesame[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(5):128-133.
- [16] 侯云鹏, 刘志全, 尹彩侠, 等. 长期秸秆还田下基于东北水稻高产和钾素平衡的钾肥用量研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(11):2020-2031.
- HOU Y P, LIU Z Q, YIN C X, et al. Optimum amount of potassium fertilizer based on high yield and soil potassium balance under straw return in rice production region of Northeast China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(11):2020-2031.
- [17] 卫双玲, 李春明, 高桐梅, 等. 芝麻氮、磷、钾肥的效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3):644-649.
- WEI S L, LI C M, GAO T M, et al. Study on the effects of N, P, K fertilizer in sesame[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(3):644-649.
- [18] 李春明, 张海洋, 高桐梅, 等. 不同氮肥用量对夏芝麻冠层结构、产量及品质的影响[J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(5):862-867.
- LI C M, ZHANG H Y, GAO T M, et al. Effects of nitrogen application rate on canopy architecture, yield and quality of summer sesame[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2021, 55(5):862-867.
- [19] 王晶, 王天舒, 王丽, 等. 麦茬土壤残留氮对夏大豆根瘤、根系发育及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(23):4712-4724.
- WANG J, WANG T S, WANG L, et al. The effects of soil residual nitrogen from wheat season on summer soybean root nodules, root system and yield[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(23):4712-4724.
- [20] ZHANG Y Q, WANG J D, GONG S H, et al. Nitrogen fertilization effect on photosynthesis, grain yield and water use efficiency of winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179:277-287.
- [21] 徐文波, 李敏, 罗德强, 等. 减氮对机插杂交水稻产量及光合特性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(6):189-196.
- XU W B, LI M, LUO D Q, et al. Effect of nitrogen reduction on the yield and photosynthetic characteristics of mechanical transplanting hybrid indica rice[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(6):189-196.
- [22] 王艳秋, 邹剑秋, 张飞, 等. 不同糯性高粱光合物质积累特点及源库关系分析[J]. 西南农业学报, 2014, 27(6):2300-2304.
- WANG Y Q, ZOU J Q, ZHANG F, et al. Photosynthetic substances accumulation characteristics and source-repository relationship analysis of different waxy degree sorghum[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2014, 27(6):2300-2304.
- [23] ROY A, SINGH K P. Dynamics of microbial biomass and nitrogen supply during primary succession on blastfurnace slag dumps in dry tropics[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(3):365-372.
- [24] PAN S G, WEN X C, WANG Z M, et al. Benefits of mechanized deep placement of nitrogen fertilizer in direct-seeded rice in South China[J]. Field Crops Research, 2017, 203:139-149.
- [25] 李琛昊, 王川, 李国强, 等. 基于改进 YOLOv8-Track 的芝麻单株蒴果检测计数研究[J]. 河南农业科学, 2025, 54(4):155-166.
- LI C H, WANG C, LI G Q, et al. Detection and counting of sesame capsules per plant based on improved YOLOv8-Track model[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2025, 54(4):155-166.
- [26] 何佩云, 张余, 周良, 等. 干旱胁迫及氮肥调控对苦荞植株形态、生理特性及产量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(1):128-134.
- HE P Y, ZHANG Y, ZHOU L, et al. Effects of drought stress and nitrogen fertilizer regulation on morphology, physiological characteristics, and yield of *Fagopyrum tataricum*[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, 28(1):128-134.
- [27] 滕飞, 李传友, 陈惠哲, 等. 机插密度对杂交稻干物质积累及产量形成的影响[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(3):1-7.
- TENG F, LI C Y, CHEN H Z, et al. Effects of transplanting density on dry matter accumulation and yield formation of machine transplanted hybrid rice[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(3):1-7.
- [28] CAMERON K C, DI H J, MOIR J L. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review[J]. Annals of Applied Biology, 2013, 162(2):145-173.
- [29] 李丰, 高桐梅, 苏小雨, 等. 施氮量和种植密度对芝麻光合速率、产量和氮肥利用率的影响[J]. 作物杂志, 2022(2):215-221.
- LI F, GAO T M, SU X Y, et al. Effects of nitrogen rate and planting density on photosynthetic rate, yield, nitrogen use efficiency of sesame[J]. Crops, 2022(2):215-221.
- [30] 伏桐, 唐东南, 舒小伟, 等. 氮肥运筹处理对机插水稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2024, 51(5):749-758.
- FU T, TANG D N, SHU X W, et al. Effects of nitrogen fertilizer management practices on yield, nitrogen uptake and utilization of machine-transplanted rice[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2024, 51(5):749-758.