

刘新宇,卓红,区禧贤,等. 油菜苗期氮素形态、分配及氮素生产力对不同氮水平的响应[J]. 江苏农业科学,2025,53(13):278-284.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.13.035

油菜苗期氮素形态、分配及氮素生产力 对不同氮水平的响应

刘新宇,卓红,区禧贤,覃瑶,陈映汐,韩永亮
(湖南农业大学资源学院,湖南长沙 410128)

摘要:为探究不同供氮(N)水平对甘蓝型油菜苗期氮素形态、分配及氮素生产力的影响,以湖南省普遍种植的甘蓝型油菜品种沔油 958(FY958)和沔油 730(FY730)作为试验材料,采用沙培,设置 3 个 N 水平处理(N10,氮含量 10 mol/L;N3,氮含量 3 mol/L;N1,氮含量 1 mol/L)。在油菜苗期取样测定其生物量、全氮含量、 NH_4^+ 含量、 NO_3^- 含量、游离氨基酸含量、叶绿素含量、净光合速率及叶绿素荧光动力学参数。结果表明,油菜氮含量和氮素积累量随氮水平的上升而上升,氮水平上升提高了油菜氮素在叶中的分配比例,降低了在根中的分配比例。油菜的 NH_4^+ 和 NO_3^- 含量占比随氮水平增加而降低。氮素吸收效率、氮素生产力均随氮水平的上升而下降。较 N1 处理,N10 处理的 FY958 和 FY730 的根氮素生产力分别显著降低 40.08%、35.10%,茎氮素生产力分别显著降低 25.47%、30.10%,叶氮素生产力分别显著降低 53.01%、52.24%。氮水平下降显著降低了油菜叶绿素含量和净光合速率。油菜的 F_v/F_o 、 F_v/F_m 、 q_p 、 Φ_{PSII} 均随氮水平增加而增加,但 NPQ 随氮水平增加而降低。综上所述,相较于 N10 处理,N1 处理的油菜氮素在叶中的分配比例降低,在根中的分配占比增加, NH_4^+ 和 NO_3^- 含量占比显著增加,氮素吸收效率及氮素生产力显著增加。

关键词:低氮;氮素生产力;光合速率;叶绿素荧光;油菜

中图分类号:S634.306 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)13-0278-07

油菜是我国的主要油料作物,种植面积超过亿亩($1\text{ hm}^2=15$ 亩),产油量占国产油料作物产油量 50% 以上,是我国第一大植物油油源^[1]。氮素是制约油菜产量的重要因子^[2]。土壤氮含量不足会严重阻碍油菜的正常生长发育^[3],生产上通常施用大量氮肥以保证油菜的生产需要,但油菜的氮肥利用

效率较低,平均仅为 30% 左右^[4]。较低的氮肥利用率一方面造成资源浪费,降低油菜的经济效益^[5],另一方面会对环境造成严重影响,例如土壤肥力过剩、肥料对农作物的促生作用减弱以及单位面积土壤中的氮肥残余量上升等^[6],因此,提高油菜氮肥利用效率,提升氮素生产力,对于油菜产业可持续发展具有重要意义。

光合作用是植物生长发育及生产力的基础^[7]。叶绿素是植物进行光合作用的关键色素^[8],能够吸收光能并传递给其他分子,从而驱动光合反应。叶绿素的含量直接影响植物的光合效率和初级生产力^[9]。氮素是叶绿素不可缺少的组成成分,也是光

收稿日期:2024-07-11

基金项目:湖南省教育厅重点项目(编号:23A0163)。

作者简介:刘新宇(2000—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,主要从事油菜氮高效研究。E-mail:482351051@qq.com。

通信作者:韩永亮,博士,副教授,主要从事植物营养与施肥研究。
E-mail:xiaohliang@163.com。

[43] Tekaya M, Dahmen S, Ben Mansour M, et al. Foliar application of fertilizers and biostimulant has a strong impact on the olive (*Olea europaea*) rhizosphere microbial community profile and the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Rhizosphere, 2021, 19:100402.

[44] Fu Y L, Zhu Y, Dong H, et al. Mechanisms of the effects of humic acid on antibiotic resistance genes and microbial communities in Cd-contaminated soils[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 160:62-69.

[45] Elena A, Diane L, Eva B, et al. The root application of a purified leonardite humic acid modifies the transcriptional regulation of the main physiological root responses to Fe deficiency in Fe-sufficient cucumber plants[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2009, 47(3):215-223.

[46] 江厚龙,彭奎,张艳,等. 重庆烤烟化学成分与感官品质典型相关分析[J]. 中国烟草科学,2019,40(2):80-86.

[47] 吴殿信,袁志永,闫克玉,等. 烤烟各等级烟叶质量指数的确定[J]. 烟草科技,2001,34(12):9-15.

合器官构建的关键因子,直接或间接地影响光合作用。氮素缺乏或过量都会导致叶绿素含量、酶含量和酶活性的下降,并进一步导致植物光合同化物的减少^[10]。叶绿素荧光动力学技术是一种利用叶绿素荧光参数反映光合作用过程中色素系统对光能的吸收、传递、耗散和分配的方法,可以快速准确地分析逆境胁迫对光合系统Ⅱ(PSⅡ)的影响和损伤,是植物逆境生理学研究的重要手段^[11]。Chaerle 等的研究表明,叶绿素荧光动力学指标能够灵敏地反映植物的胁迫状态,从而确定植物的最佳营养需求量和养分供应策略^[12]。本试验旨在探索不同氮素水平对油菜苗期氮素形态和分配、光合作用和叶绿素荧光特性的影响,为优化油菜的氮素管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究以湖南本地种植甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.)品种沔油 958(以下简称 FY958)和沔油 730(以下简称 FY730)为供试材料。

1.2 试验设计

本试验于 2023 年 10 月在湖南农业大学第八教学楼进行,共设置 3 个氮水平处理,即: N1 (NO_3^- : 1 mmol/L)、N3 (NO_3^- : 3 mmol/L) 和 N10 (NO_3^- : 10 mmol/L),每个处理重复 3 次。油菜采用沙培,于相对湿度 50%、光照 16 h/暗循环 8 h、温度 20 ℃ 的温室中培养。生长基质为用水和稀盐酸清洗干净的珍珠岩沙粒(无营养液成分),培养容器为 30 cm×30 cm 塑料钵,每钵 1 株。N10 营养液含有 5 mmol/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、5 mmol/L KCl、1 mmol/L MgSO_4 、1 mmol/L KH_2PO_4 、0.05 mmol/L $\text{Fe}(\text{Na})-\text{EDTA}$ 和 0.01 mmol/L 微量元素(H_3BO_3 、 MnSO_4 、 ZnSO_4 、 NaMoO_4 、 CuSO_4)。N1 的 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 浓度为 0.5 mmol/L, N3 的 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 浓度为 1.5 mmol/L,其余养分完全一致,营养液每隔 4 d 更换 1 次。

1.3 测定指标和方法

油菜生长 28 d 后,测定油菜顶部第 2 张叶的净光合速率及叶绿素荧光参数,取植物根、茎、叶烘干后测定全氮含量,取油菜顶部第 2 张叶鲜样测定不同形态氮含量及叶绿素含量。

1.3.1 全氮含量测定 采用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 消煮-蒸馏定氮法^[13]测定植株全氮含量。

1.3.2 不同形态氮含量测定 采用水杨酸-硫酸

比色法^[14]测定硝态氮含量;苯酚-次氯酸钠比色法^[15]测定铵态氮含量;茚三酮法^[16]测定游离氨基酸总量。

1.3.3 叶绿素含量及净光合速率测定 采用丙酮提取比色法^[17]测定叶绿素含量。使用便携式光合仪(Li-6400, Li-Cor, 美国)测定叶片净光合速率。

1.3.4 叶绿素荧光参数测定 参考 Demming-Adams 等的方法^[18],使用叶绿素荧光仪(PAM-2500 Waltz, 德国)测定叶绿素荧光参数。

1.3.5 氮素吸收与利用 氮素吸收效率=植物吸氮量/施氮量×100%;

氮素生理利用效率=总干物重/植物总吸氮量;

根中氮素生产力=根干物重/根中氮积累量;

茎中氮素生产力=茎干物重/茎中氮积累量;

叶中氮素生产力=叶干物重/叶中氮积累量。

1.3.6 数据整理与分析 数据整理和绘图使用 Excel 2020、R(4.3.2) 和 Adobe Illustrator 2022 软件,图表中的数值表示为“平均值±标准差”,使用 SPSS 26 进行统计分析:采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同处理间的差异显著性($\alpha=0.05$)。

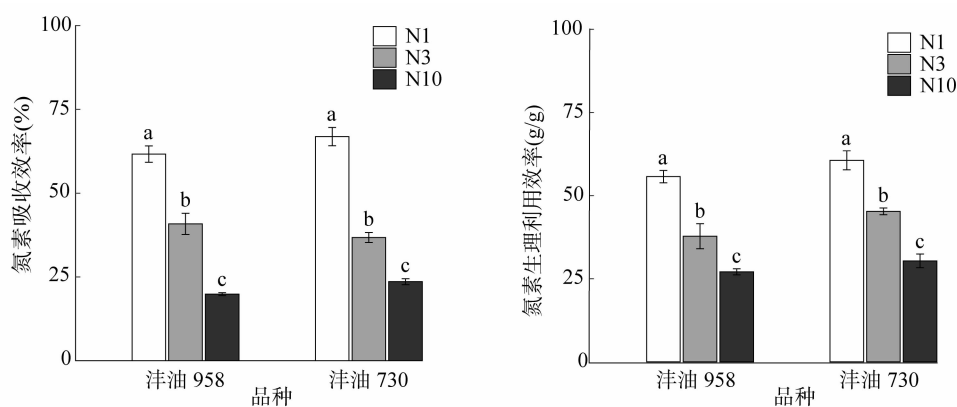
2 结果与分析

2.1 不同氮水平对油菜氮素利用的影响

由图 1 可知, FY958 和 FY730 在不同氮水平下,其氮素吸收效率和氮素生理利用效率呈现出相似的变化趋势。N1 处理的氮素吸收效率较 N3 处理分别显著提高 50.96%、81.82%,较 N10 处理分别显著提高 210.20%、183.45%; N1 处理的氮素生理利用效率较 N3 处理分别显著提高 47.42%、33.95%,较 N10 处理分别显著提高 105.68%、99.57%。以上结果说明,氮素减量处理能显著提高油菜苗期氮素吸收效率及氮素生理利用效率。

2.2 不同氮水平对油菜氮素分配及氮素生产力的影响

由图 2-a 可知,随着氮水平降低,油菜根、茎、叶中的氮积累量均呈下降趋势。与 N10 处理相比, N3 和 N1 处理的 FY958 根中氮积累量降低 35.61% 和 46.26%, FY730 根中氮积累量降低 21.89% 和 36.75%; FY958 茎中氮积累量降低 20.54% 和 50.00%, FY730 茎中氮积累量降低 40.08% 和 68.18%; FY958 叶中氮积累量降低 39.48% ~ 73.33%, FY730 叶中氮积累量降低 57.29% 和 75.60%。



图柱上方不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下图同
图1 不同氮水平对甘蓝型油菜苗期氮素利用效率的影响

由图 2-b 可知,随着氮水平的增加,油菜氮素在叶中的分配比例增加,在根中的分配比例降低。较 N1 处理,N3 和 N10 处理的 FY958 和 FY730 在叶中的分配比例分别增加 14.17% ~ 16.38%、6.16% ~ 16.40%,在根中的分配比例分别下降 39.52% ~ 42.25%、25.26% ~ 55.19%。

由图 2-c、图 2-d、图 2-e 可知,随着氮水平的增加,FY958 和 FY730 根、茎、叶中氮素生产力均

显示出下降趋势。较 N1 处理,N3 处理的根中氮素生产力分别显著降低 21.69%、18.45%,N10 处理分别显著降低 40.08%、35.10%;N3 处理的茎中氮素生产力分别降低 4.23%、3.77%,N10 处理分别降低 25.47%、30.10%;N3 处理的叶中氮素生产力分别显著降低 34.34%、28.91%,N10 处理分别显著降低 53.01%、52.24%。

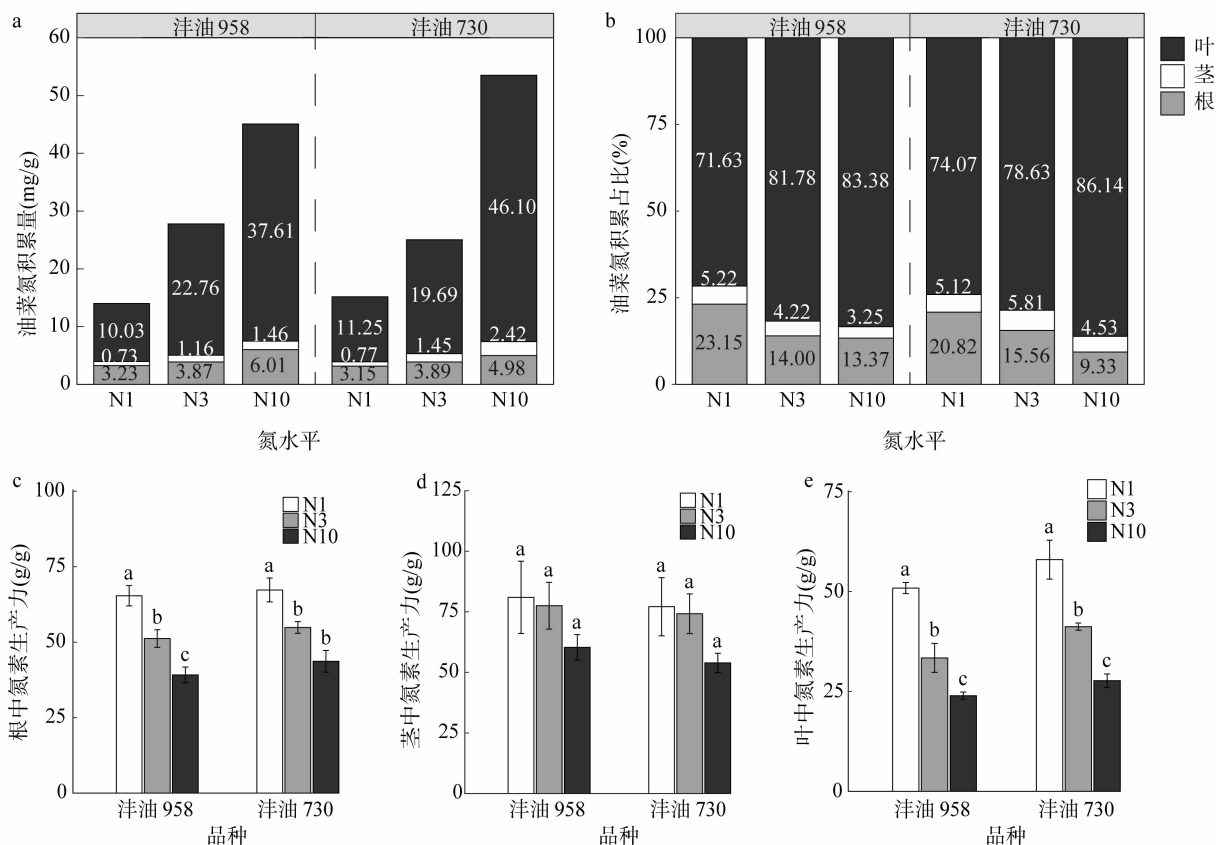


图2 不同氮水平下甘蓝型油菜苗期根、茎和叶中的氮积累及根、茎和叶氮素生产力

2.3 不同氮水平对油菜氮素形态的影响

由图 3-a 至图 3-d 可知,随着氮水平降低,油菜铵态氮、硝态氮、游离氨基酸及有机氮含量均呈现下降趋势。较 N10 处理,N3 与 N1 处理的 FY958 硝态氮含量显著降低 35.56% 及 35.92%,FY730 硝态氮含量显著降低 14.28% 及 40.42%;FY958 有机氮含量显著降低 27.04% 及 53.26%,FY730 有机氮含量显著降低 33.59% 及 52.16%。较 N10 处理,N3 处理的 FY958 铵态氮含量显著降低 10.29%,N1 处理显著下降 14.35%;N3 处理的 FY730 铵态氮含量降低 12.31%,N1 处理显著降低 19.13%。较 N10 处理,N3 与 N1 处理的 FY958 游离氨基酸含量降低 10.55% 及 44.37%,FY730 游离氨基酸含量显

著降低 39.84% 及 61.28%。

在 FY958 中,较 N1 处理,N3 处理铵态氮占比显著降低 31.20%,N10 处理显著降低 45.30%;N3 处理硝态氮占比显著降低 33.43%,N10 处理显著降低 26.80%;N3 处理游离氨基酸占比增加 5.88%,N10 处理降低 13.73%;N3 处理有机氮占比显著增加 0.41%,N10 处理显著增加 0.37%。

在 FY730 中,较 N1 处理,N3 处理铵态氮占比显著降低 23.20%,N10 处理显著降低 40.87%;N3 处理的硝态氮占比增加 2.56%,N10 处理显著降低 19.90%;N3 处理游离氨基酸占比增加 10.91%,N10 处理游离氨基酸占比增加 23.64%;N3 处理有机氮占比降低 0.06%,N10 处理增加 0.40%。

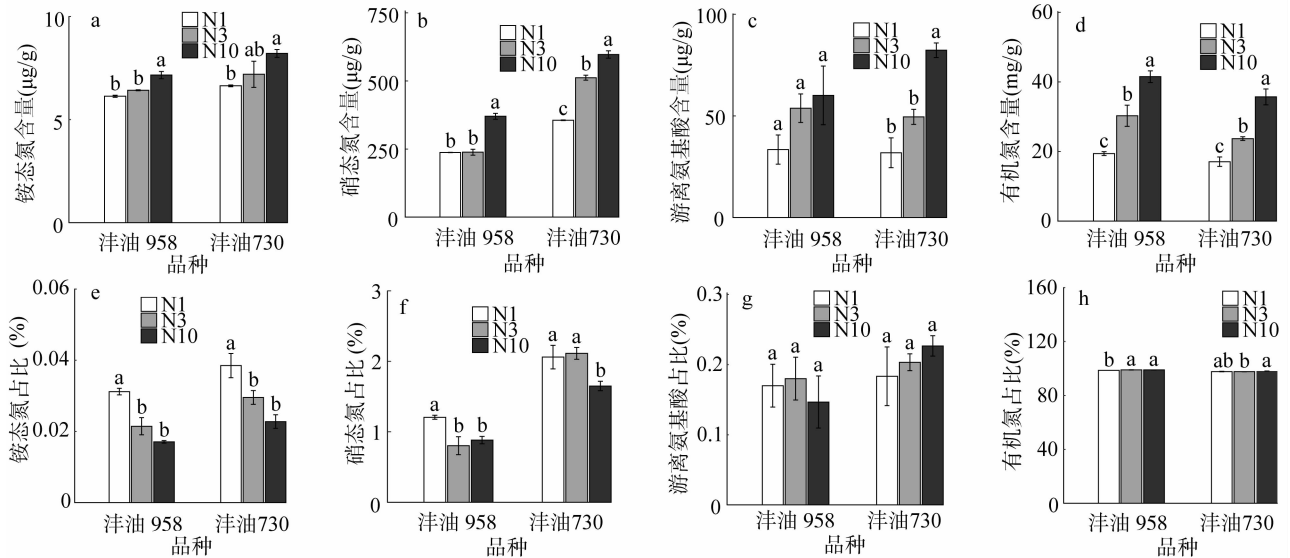


图3 不同氮水平对甘蓝型油菜苗期不同形态氮含量及占比的影响

2.4 不同氮水平对油菜叶绿素含量和净光合速率的影响

由图 4 可知,随着氮水平增加,油菜叶绿素含量和净光合速率均呈上升趋势。对于 FY958,与 N1 处理相比,N3 与 N10 处理的叶绿素含量显著提高

31.04% 及 103.14%;净光合速率显著提高 27.10% 及 66.50%。

对于 FY730,与 N1 处理相比,N3 与 N10 处理的叶绿素含量显著提高 49.68% 及 99.29%;净光合速率显著提高 29.60% 及 58.08%。

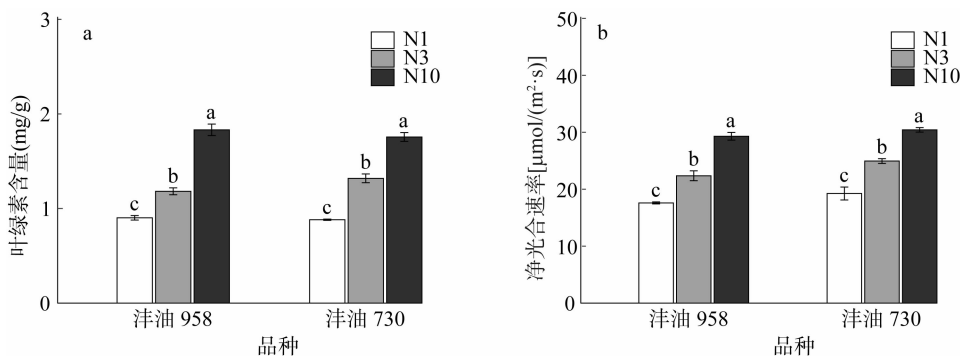


图4 不同氮水平对甘蓝型油菜苗期光合作用的影响

2.5 不同氮水平对油菜叶绿素荧光的影响

由表 1 可知,随着氮水平增加,油菜的 Φ_{PSII} 、 q_P 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 均逐渐提高,而 NPQ 逐渐降低。对于 FY958,较 N1 处理,N3 处理的 Φ_{PSII} 、 q_P 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 分别显著提高 36.00%、36.73%、8.51%、17.78%,NPQ 显著下降 29.31%;N10 处理的 Φ_{PSII} 、 q_P 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 分别显著提高 48.00%、38.78%、

19.15%、28.89%,NPQ 显著下降 46.02%。

对于 FY730,较 N1 处理,N3 处理的 Φ_{PSII} 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 分别提高 22.22%、6.25%、6.86%,NPQ 下降 20.37%, q_P 显著提高 25.49%;N10 处理的 Φ_{PSII} 、 q_P 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 分别显著提高 37.04%、35.29%、18.75%、16.67%,NPQ 显著下降 51.85%。

表 1 不同氮水平对甘蓝型油菜苗期叶绿素荧光的影响

品种	处理	潜在活性 (F_v/F_o)	原初光能转换效率 (F_v/F_m)	光化学淬灭系数 (q_P)	实际光化学效率 (Φ_{PSII})	非光化学淬灭系数 (NPQ)
沔油 958	N1	0.90 ± 0.014 9c	0.47 ± 0.004 1c	0.49 ± 0.050 2b	0.25 ± 0.028 9b	0.58 ± 0.004 3a
	N3	1.06 ± 0.012 7b	0.51 ± 0.003 0b	0.67 ± 0.009 6a	0.34 ± 0.006 8a	0.41 ± 0.041 0b
	N10	1.16 ± 0.043 1a	0.56 ± 0.005 8a	0.68 ± 0.006 8a	0.37 ± 0.002 4a	0.31 ± 0.023 5b
沔油 730	N1	1.02 ± 0.036 3b	0.48 ± 0.020 0b	0.51 ± 0.032 5b	0.27 ± 0.027 9b	0.54 ± 0.030 9a
	N3	1.09 ± 0.034 4ab	0.51 ± 0.014 5ab	0.64 ± 0.014 7a	0.33 ± 0.016 8ab	0.43 ± 0.063 5a
	N10	1.19 ± 0.035 4a	0.57 ± 0.014 2a	0.69 ± 0.005 7a	0.37 ± 0.010 3a	0.26 ± 0.015 3b

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

3 讨论

作物的氮素利用率取决于氮素吸收效率和氮素利用效率,本研究分别描述了从土壤中获取氮的能力和利用吸收的氮生产可收获器官的能力^[19]。氮肥的吸收与利用是合理施肥的重要衡量指标,有研究发现,减氮施肥能明显提高作物的氮素吸收效率和氮素利用率^[20]。本研究表明,随着施氮量降低,氮素吸收效率及氮素生理利用效率均呈现上升趋势,说明减氮能够显著增加油菜的氮素利用。

当施氮量在一定范围内,植株氮素积累量随施氮量增加而显著增加,但超过一定范围后,积累量将不再显著增加^[21]。张智等研究发现,氮肥减施显著降低油菜对氮素的吸收量^[22]。本研究结果显示,随着氮水平的降低,油菜氮素积累量呈明显下降趋势,说明氮素减施会造成作物氮素积累量减少,这与苏伟等的研究结果^[23]一致。植物根、茎、叶间氮素的分配对整株生长至关重要。在土壤氮素缺乏时,植物会优先将氮素分配到根系,以促进根系生长,从而获取更多的营养物质^[24]。本研究发现,降低氮水平会降低油菜根、茎、叶中的氮积累,但同时也导致氮分配至根中的比例增加,这与 Tolley 等的研究结果^[25]相似。氮素生产力描述了植物吸收氮所能产生生物量的能力。本研究发现,随着氮水平降低,油菜各部位的氮素生产力均显著上升。在低氮下,植物展现了利用有限资源产生更多生物量的

潜能。

硝态氮是植物吸收氮素的主要形式之一,进入植物体内后,在硝酸还原酶(NR)和亚硝酸还原酶(NiR)的作用下被还原为 NH_4^+ ,然后进入 GS - GOGAT 循环转变为有机态氮被植物所利用^[26]。植物硝态氮主要贮存在液泡中^[27],在氮胁迫下,液泡中硝态氮会迅速进入细胞质被同化,此时液泡中硝态氮含量下降。一旦外界环境中的氮素供应恢复正常,液泡中的硝态氮含量会重新补充^[28-29]。在本研究中,随着氮水平逐渐降低,油菜硝态氮含量呈下降趋势,与余佳玲等的研究结果^[30]一致。大量铵累积会使植物发生毒害,铵态氮的快速同化有利于植物生长。黄海涛等研究发现,缺氮条件下,油菜整体的铵态氮含量均低于全氮处理^[31]。在本研究中,随着氮水平逐渐降低,油菜苗期铵态氮含量呈下降趋势。氮素被根系吸收后,其同化作用的首个产物是游离氨基酸。游离氨基酸不仅是氮代谢的关键节点,也是蛋白质合成与降解过程中的核心中间产物,对于维持各项生理功能至关重要。本研究表明,随着氮水平逐渐升高,游离氨基酸含量呈上升趋势,在茶叶、烟草上也有相似结果^[32]。在植物体内,蛋白质中的氮含量占主导地位,而无机氮和氨基酸等小分子的氮含量相对较低,本研究结果同样表明无机氮和氨基酸占比较低。氮代谢是植物体内最基本的代谢过程之一,对于植物的生长发育、产量提高以及逆境应对具有重要意义^[33]。本研

究表明,相比低氮处理(N1),高氮(N10)下无机氮含量占比有明显下降,且有机氮含量占比上升,说明低氮下氮代谢受阻可能是影响植物生长发育的重要因素。

增强光合作用对提高作物产量^[34-35]以满足全球不断增长的粮食需求至关重要^[36]。叶绿素是光合作用的光敏催化剂,与光合作用密切相关,是植物适应和利用环境因子的重要指标^[37],通常与植物光合速率呈正相关关系^[38]。叶绿素含量和净光合速率可以反映植物的光合能力和效率。施氮是调节叶绿素含量和光合速率的重要手段之一,可以促进叶绿素的合成和光合作用^[39]。本研究发现,随着氮水平的提高,油菜叶绿素含量和净光合速率均有显著的提升,与刘涛等的研究结果^[40]相似,而曾希柏等发现,随着施氮量增大,植物叶绿素含量和净光合速率均出现先上升后下降趋势^[41],说明在一定氮素范围内,氮水平与叶绿素含量和净光合速率之间存在明显的正相关关系,然而一旦超过某一范围,过多的施氮反而会抑制光合作用。

叶绿素荧光可快速检测完整植株在胁迫下光合作用的真实行为,可用来评价光合机构的功能^[42-43],当环境条件改变时,叶绿素荧光参数的变化在一定程度上可以反映环境因子对植物的影响,作为逆境条件下植物抗逆响应的指标^[44-45]。 F_v/F_o 表示PSⅡ潜在活性,低氮水平下,油菜 F_v/F_o 下降,反映出有活性的PSⅡ反应中心数量减少,捕获及转化所需光能的能力降低; F_v/F_m 表示植物原初光化学效率,低氮水平下,油菜 F_v/F_m 下降,说明缺氮使植物体内发生光抑制,光合结构遭到一定程度的破坏; q_p 表征PSⅡ天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额,低氮水平下,油菜 q_p 下降,证明从PSⅡ氧化侧向PSⅡ反应中心的电子流动受到抑制; $\Phi_{PSⅡ}$ 反映了植物当前的实际光合效率^[46],低氮水平下,油菜 $\Phi_{PSⅡ}$ 下降,说明叶片通过光合作用促进光合产物的合成受到抑制;NPQ是植物处于逆境胁迫时为防止光合机构受到损伤而形成的自我保护机制^[47],低氮水平下,NPQ增加,说明不能用于传递的过度光能以热量形式消散,同时,低氮激发了油菜幼苗对PSⅡ的保护机制,以期减少低氮对光合系统的损害,保证油菜幼苗的正常生长。

4 结论

低氮水平提高了油菜的氮素吸收效率和氮素

生理利用效率,油菜氮素生产力显著提高。低氮水平提高了氮素在根的分配,降低了在叶的分配,此外,还增加了叶片中无机氮的分配比例。但低氮水平降低了油菜叶绿素含量和净光合速率,并对叶绿素荧光系统造成损害。

参考文献:

- [1]殷艳,尹亮,张学昆,等.我国油菜产业高质量发展现状和对策[J].中国农业科技导报,2021,23(8):1-7.
- [2]Sinclair T R, Rufty T W. Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics[J]. Global Food Security, 2012, 1(2): 94-98.
- [3]Dubey R S, Srivastava R K, Pessarakli M. Physiological mechanisms of nitrogen absorption and assimilation in plants under stressful conditions[M]//Handbook of plant and crop physiology. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2021: 579-616.
- [4]鲁剑巍,任涛,丛日环,等.我国油菜施肥现状及施肥技术研究展望[J].中国油料作物学报,2018,40(5):712-720.
- [5]郭子琪,王慧,韩上,等.氮肥用量对直播油菜产量及氮素吸收利用的影响[J].中国土壤与肥料,2020(5):40-44.
- [6]陈宝明.施氮对植物生长、硝态氮累积及土壤硝态氮残留的影响[J].生态环境,2006,15(3):630-632.
- [7]杜久军,左力辉,梁海永,等.5种榆树光合特性对比[J].分子植物育种,2018,16(7):2348-2357.
- [8]Fromme P, Melkozernov A, Jordan P, et al. Structure and function of photosystem I: interaction with its soluble electron carriers and external antenna systems[J]. FEBS Letters, 2003, 555(1): 40-44.
- [9]王阳阳,江盼盼,李翊华.几种不同叶面喷肥对月季生理生长、产量及品质的影响[J].绿色科技,2020,22(17):87-89.
- [10]吴楚,王政权,范志强,等.不同氮浓度和形态比例对水曲柳幼苗叶绿素合成、光合作用以及生物量分配的影响(英文)[J].植物生态学报,2003,27(6):771-779.
- [11]张会慧,张秀丽,王娟,等.利用快相叶绿素荧光参数综合评价3种丁香耐盐性[J].南京林业大学学报(自然科学版),2013,37(5):13-19.
- [12]Chaerle L, Leinonen I, Jones H G, et al. Monitoring and screening plant populations with combined thermal and chlorophyll fluorescence imaging[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(4): 773-784.
- [13]鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [14]李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [15]Weatherburn M W. Phenol-hypochlorite reaction for determination of ammonia[J]. Analytical Chemistry, 1967, 39(8): 971-974.
- [16]何照范.粮油籽粒品质及其分析技术[M].北京:农业出版社,1985.
- [17]高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [18]Demmig-Adams B, Adams W W. Xanthophyll cycle and light

- stress in nature; uniform response to excess direct sunlight among higher plant species[J]. *Planta*, 1996, 198(3): 460–470.
- [19] Shah A N, Javed T, Singhal R K, et al. Nitrogen use efficiency in cotton: challenges and opportunities against environmental constraints[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 970339.
- [20] 张芳芳, 胡跃, 刘士山, 等. 施氮量对成都平原直播油菜氮肥利用率和农田氮素表观平衡的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2022, 40(4): 558–564.
- [21] 段文学, 于振文, 张永丽, 等. 施氮量对旱地小麦氮素吸收转运和土壤硝态氮含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(15): 3040–3048.
- [22] 张智, 乔艳, 刘东海, 等. 氮肥减施对油菜产量、氮素吸收与利用的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(2): 140–145, 183.
- [23] 苏伟, 鲁剑巍, 李云春, 等. 氮肥运筹方式对油菜产量、氮肥利用率及氮素淋失的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2010, 32(4): 558–562.
- [24] 姜琳琳, 韩立思, 韩晓日, 等. 氮素对玉米幼苗生长、根系形态及氮素吸收利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 247–253.
- [25] Tolley S, Mohammadi M. Variation in root and shoot growth in response to reduced nitrogen[J]. *Plants*, 2020, 9(2): 144.
- [26] 吴巍, 赵军. 植物对氮素吸收利用的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(13): 75–78.
- [27] 黄彩变, 王朝辉, 李生秀. 植物液泡硝态氮累积的营养和生理学意义[J]. *土壤*, 2006, 38(6): 820–824.
- [28] Quesada A, Galvan A, Fernandez E. Identification of nitrate transporter genes in *Chlamydomonas reinhardtii* [J]. *The Plant Journal*, 1994, 5(3): 407–419.
- [29] Malagoli P, Lainé P, Le Deunff E, et al. Modeling nitrogen uptake in oilseed rape cv Capitol during a growth cycle using influx kinetics of root nitrate transport systems and field experimental data[J]. *Plant Physiology*, 2004, 134(1): 388–400.
- [30] 余佳玲, 陈历儒, 张振华, 等. 不同供氮水平下油菜品种硝态氮累积利用特征与氮效率差异[J]. *中国土壤与肥料*, 2014(3): 18–22.
- [31] 黄海涛, 荣湘民, 张振华, 等. 不同供氮水平下油菜植株硝态氮与铵态氮的分布差异[J]. *湖南农业科学*, 2019(1): 22–25.
- [32] Ruan J, Haerdter R, Gerendás J. Impact of nitrogen supply on carbon/nitrogen allocation; a case study on amino acids and catechins in green tea [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze] plants [J]. *Plant Biology*, 2010, 12(5): 724–734.
- [33] Nunes – Nesi A, Fernie A R, Stitt M. Metabolic and signaling aspects underpinning the regulation of plant carbon nitrogen interactions[J]. *Molecular Plant*, 2010, 3(6): 973–996.
- [34] Long S P, Marshall – Colon A, Zhu X G. Meeting the global food demand of the future by engineering crop photosynthesis and yield potential[J]. *Cell*, 2015, 161(1): 56–66.
- [35] Parry M A J, Reynolds M, Salvucci M E, et al. Raising yield potential of wheat. II. Increasing photosynthetic capacity and efficiency[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(2): 453–467.
- [36] Ray D K, Mueller N D, West P C, et al. Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050 [J]. *PLoS One*, 2013, 8(6): e66428.
- [37] 王建华, 任士福, 史宝胜, 等. 遮阴对连翘光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(7): 1811–1817.
- [38] Koizumi M, Kano H, Katsura N, et al. The effect of chlorophyll content on changes of photochemical reactions in intact kidney bean leaves[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1990, 13(1): 65–71.
- [39] 王佳佳, 张明如, 许焱, 等. 光强和氮素对苜蓿光响应及叶绿素荧光参数的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(6): 1199–1207.
- [40] 刘涛, 鲁剑巍, 任涛, 等. 适宜氮水平下冬油菜苗期不同叶位叶片光合氮分配特征[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(18): 3532–3541.
- [41] 曾希柏, 谢德体, 青长乐, 等. 氮肥施用量对茼蒿光合特性影响的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 1997, 3(4): 323–328.
- [42] 赵丽英, 邓西平, 山仑. 渗透胁迫对小麦幼苗叶绿素荧光参数的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(7): 1261–1264.
- [43] 曹正邓渊, 文双雅, 高志强. 甘蓝型油菜叶绿素荧光参数的高光谱预测[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(18): 185–190.
- [44] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence: a practical guide[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(345): 659–668.
- [45] Krause G. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics [J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1991, 42(1): 313–349.
- [46] Baker N R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59: 89–113.
- [47] Ploschuk E L, Bado L A, Salinas M, et al. Photosynthesis and fluorescence responses of *Jatropha curcas* to chilling and freezing stress during early vegetative stages [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, 102: 18–26.