

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.20271

西辽河平原矮秆蓖麻杂交种抗氧化酶活性、产量与油分含量对氮肥水平的响应

徐寿军^{1, 2, 3, 4}, 王磊¹, 德木其格¹, 王金波¹, 齐海祥¹, 朱国立^{1, 2, 3, 4, 5}

(1. 内蒙古民族大学农学院, 内蒙古 通辽 028043; 2. 内蒙古自治区高校蓖麻产业工程技术研究中心, 内蒙古 通辽 028043; 3. 内蒙古自治区蓖麻育种重点实验室, 内蒙古 通辽 028043; 4. 内蒙古自治区蓖麻产业协同创新培育中心, 内蒙古 通辽 028043; 5. 内蒙古通辽市农业科学院, 内蒙古 通辽 028015)

摘要: 采用大田随机区组试验设计, 以矮秆蓖麻杂交种通蓖 11 号为试材, 以高秆杂交种通蓖 9 号为对照, 在 N 0、60、120、180 kg/hm² 4 个氮肥用量处理下, 探讨灌浆期间叶片抗氧化酶活性、产量和油分含量对氮肥水平的响应。结果表明, 在 0 ~ 120 kg/hm² 施氮水平范围内, 随着氮肥水平的提高, 2 品种的超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性不断增强, 丙二醛 (MDA) 含量则持续下降。当施氮水平提高到 180 kg/hm² 时, SOD、POD、CAT 活性不再升高, 反而下降, MDA 含量则略有上升。在各个氮肥水平和灌浆阶段通蓖 11 号 SOD、POD、CAT 活性均高于通蓖 9 号, MDA 含量均低于通蓖 9 号; 在低氮水平处理下, 2 品种间大部分差异不显著; 在高氮水平处理下, 大部分差异显著。随着灌浆进程, SOD、POD 活性呈单峰曲线变化, 但通蓖 11 号的峰值较通蓖 9 号有所延迟。CAT 活性呈下降趋势, MDA 含量呈上升趋势。各处理籽粒产量、油分含量与抗氧化酶活性趋势相同。相关分析结果表明, 籽粒产量和油分含量与 SOD、POD、CAT 活性呈正相关关系, 与 MDA 含量呈负相关关系。灌浆前期, 花后 10 d 通蓖 9 号 SOD、POD 和 CAT 活性与籽粒重的相关关系达显著或极显著水平, 通蓖 11 号则达显著水平。花后 20 d 通蓖 9 号 SOD、POD 和 CAT 活性与籽粒重的相关关系未达显著水平, 通蓖 11 号则达显著水平。灌浆中期, 通蓖 11 号 SOD、POD 活性与油分含量呈显著正相关关系, 而通蓖 9 号油分含量仅与 POD 活性呈显著正相关关系, 与 SOD 和 CAT 相关关系未达显著水平。说明适量施用氮肥可以提高蓖麻主茎叶片抗氧化酶活性, 降低 MDA 含量, 但通蓖 11 号保护酶活性对氮肥的生理响应更积极, 具有更强的改善细胞中活性氧产生与清除之间的平衡能力, 这是其籽粒产量和油分含量高于通蓖 9 号的生理原因。120 kg/hm² 氮肥用量是通蓖 11 号在西辽河平原取得优质高产的最佳施肥水平。

关键词: 蓖麻; 抗氧化酶; 氮; 相关

蓖麻 (*Ricinus communis* L.) 属于大戟科 (Euphorbiaceae) 蓖麻属 (*Ricinus*), 在我国淮河以北为一年生草本植物^[1], 分布广, 抗干旱, 耐瘠薄, 是一种重要的油料作物。氮是作物生长发育所必需的大量矿质营养元素之一, 是其体内叶绿素、酶及多种物质的重要组成成分^[2-5], 对作物生

长发育、产量和品质形成有较大影响。施氮能够促进蓖麻的生长, 随氮肥水平的提高, 蓖麻的株高、茎粗、一级穗数、二级穗数总体上呈现增多的趋势, 穗长、种仁数及百粒重则先升后降, 呈单峰曲线变化^[6], 较高的施氮量增加了蓖麻主茎真叶数、叶面积指数、每株穗数和每穗粒数^[7]; 适宜的氮肥用量有利于茎和叶片中储存的营养物质向花序等对产量有影响的器官转运, 促进果穗形成和籽粒灌浆, 从而促进产量的提高^[8]。在蓖麻生长最旺盛的花果期, 随施氮量的增加, 蓖麻不同器官的氮素累积量均表现出增加的趋势^[6]; 随着施氮量的增加, 蓖麻籽粒中粗脂肪含量呈先上升后下降趋势^[9], 说明适宜施氮可促进蓖麻油分积累。

收稿日期: 2020-05-12; 录用日期: 2020-06-20

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目 [2017MS (LH) 0307]; 通辽市与内蒙古民族大学科技合作项目 (SXZX2017004); 内蒙古自治区蓖麻育种重点实验室开放基金项目 (MDK2016033); 内蒙古民族大学研究生项目 (NMDSS1760); 内蒙古自治区草原英才创新团队——蓖麻分子育种研究创新团队支持项目 (2017)。

作者简介: 徐寿军 (1969-), 男, 内蒙古赤峰人, 教授, 博士, 从事作物栽培生理研究。E-mail: shoujun-xu@163.com。

西辽河平原是我国蓖麻主产区之一,素有“蓖麻之乡”的美誉。自我国第一个矮秆蓖麻杂交种通蓖 11 号在此地育成以来,矮秆蓖麻杂交种已成为西辽河平原蓖麻生产的主栽品种。与植株高大、晚熟、易倒伏、多次收获、单产水平低的高秆蓖麻杂交种相比,矮秆蓖麻杂交种具有更强的节水、抗旱、抗倒伏能力,通过合理密植可以取得良好的肥水反应及高的收获指数^[10]。矮秆蓖麻主茎、一级分枝果穗的粒重对籽粒产量贡献大^[11],尤其适合在少雨、多风、无霜期较短的西辽河平原种植。目前,关于矮秆蓖麻杂交种研究,主要集中在以下几方面:一是种植方式和密度对其产量、品质的影响^[12-13];二是产量、品质与农艺性状的相关分析^[14-15];三是其杂种优势和遗传参数分析^[16-17]。关于氮素对矮秆蓖麻产量与品质的影响及其生理基础,鲜见报道。本文以我国第一个育成的矮秆蓖麻品种通蓖 11 号为试材,以高秆蓖麻杂交种通蓖 9 号为对照,探析矮秆蓖麻杂交种抗氧化酶活性、产量和品质对不同氮肥水平的响应及其相关性,为西辽河平原矮秆蓖麻杂交种高产优质栽培提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2018 和 2019 年在通辽市科尔沁区农牧业高新技术园区(43°36' N, 122°22' E)进行,试验地年平均气温为 6.1℃, ≥ 10℃活动积温为 3160℃,日照时数为 3113 h,年平均降水量 350 mm。为了避免重茬,2 年的试验分别在不同地块进行,试验地耕层土壤状况见表 1。

表 1 耕层土壤状况

年份	有机质 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
2018	17.16	47.52	29.17	134.05
2019	17.89	48.23	29.50	130.01

1.2 试验材料

供试的蓖麻品种为通蓖 9 号和通蓖 11 号,由内蒙古通辽市农业科学院提供。其中通蓖 9 号为高秆杂交种,通蓖 11 号为矮秆杂交种。

1.3 试验设计

试验设 N 0、60、120、180 kg/hm² 共 4 个氮肥用量处理(依次标注为 N0、N60、N120、N180)。

肥料分 2 次施入,基肥在播种时施入,追肥在现蕾前施入,基追比为 7:3。施磷(P₂O₅) 30 kg/hm²,施钾(K₂O) 60 kg/hm²,磷、钾肥作为基肥一次性施用。试验采用随机区组设计,3 次重复,小区面积 60 m²,行距 65 cm,株距 60 cm。每年 5 月 1 日播种。田间管理同当地大田。

1.4 测定项目及方法

从第一片复叶出现开始,选择长势相同的蓖麻进行标记。从开花期开始,每小区每隔 10 d 取标记植株主茎穗下叶片放于液氮中速冻,然后迅速转移到 -80℃超低温冰箱中保存,待测抗氧化酶活性和丙二醛含量;每小区每隔 10 d 随机取 3 株标记植株主茎穗籽粒,在 105℃下杀青 0.5 h,80℃下烘干至恒重,称重后待测油分含量。主茎穗成熟后,每小区随机抽取 5 株,测主茎穗籽粒产量。

超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用氮蓝四唑法^[18],过氧化物酶(POD)活性的测定采用愈创木酚法^[19],过氧化氢酶(CAT)活性的测定采用紫外吸收法^[20],丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸法^[19],油分含量采用经优化后的索式提取法测定^[20]。

1.5 数据处理

利用 Excel 2007 和 DPS 16.5 数据处理系统进行相关数据处理。

2 结果与分析

2.1 不同蓖麻品种叶片保护酶活性对氮肥水平的响应

2.1.1 SOD 活性对氮肥水平的响应

SOD 是植物体内清除活性氧自由基的关键酶,能催化生物体内分子氧活化的第一中间产物——超氧自由基(O₂⁻)发生歧化反应,生成 O₂ 和 H₂O₂,其活性大小是植株衰老和抗性的良好指标^[21]。不同品种蓖麻灌浆期间 SOD 活性对氮肥水平的响应见表 2。

表 2 显示,随着氮肥水平升高,各灌浆时期 2 品种 SOD 活性变化趋势基本一致,即在 0 ~ 120 kg/hm² 施氮范围内,叶片 SOD 活性不断增强,当施氮水平再提高,达到 180 kg/hm² 时,SOD 活性不再升高,反而下降。在各灌浆阶段,0 与 60 kg/hm² 水平间 SOD 活性差异大部分不显著,120 与 180 kg/hm² 水平间差异大部分显著,但低氮(0 和 60 kg/hm²)与 120 kg/hm² 处理间差异均达显著水平,与 180 kg/hm² 处理间大部分亦达显著水平。2 品种间相比,

表 2 灌浆期间不同品种蓖麻 SOD 活性对氮肥水平的响应

(U/g FW)

年份	品种	处理	花后 10 d	花后 20 d	花后 30 d	花后 40 d	花后 50 d
2018	通蓖 9 号	N0	325.53 ± 32.04d	344.49 ± 28.26d	335.30 ± 31.55e	312.24 ± 28.67g	289.51 ± 12.22d
		N60	361.86 ± 20.44cd	387.41 ± 35.45d	350.15 ± 40.30e	339.27 ± 25.96fg	303.33 ± 17.91d
		N120	469.52 ± 20.17b	549.50 ± 47.11ab	630.13 ± 56.51ab	559.49 ± 31.40e	396.88 ± 27.31b
		N180	404.99 ± 23.90c	468.54 ± 21.12c	541.96 ± 32.88bc	459.26 ± 30.68d	370.55 ± 19.27bc
	通蓖 11 号	N0	335.01 ± 27.80d	383.44 ± 31.52d	434.50 ± 99.16de	374.72 ± 21.31ef	327.62 ± 23.02cd
		N60	387.77 ± 20.21c	456.94 ± 30.07c	508.94 ± 44.94cd	427.64 ± 32.21cde	363.71 ± 19.20bc
		N120	514.98 ± 23.03a	605.62 ± 40.88a	702.98 ± 48.61a	717.28 ± 40.27a	532.26 ± 31.74a
		N180	461.74 ± 17.60b	538.56 ± 29.64b	626.98 ± 47.39ab	647.70 ± 36.47b	496.82 ± 35.02a
2019	通蓖 9 号	N0	331.66 ± 14.13e	361.23 ± 15.12d	345.51 ± 35.20e	307.41 ± 18.98e	278.82 ± 18.64f
		N60	358.64 ± 27.33de	399.35 ± 23.63d	362.83 ± 31.17e	333.51 ± 29.47e	318.85 ± 25.58ef
		N120	471.14 ± 10.34b	555.43 ± 25.08b	640.52 ± 50.06b	568.70 ± 38.06b	415.21 ± 35.69c
		N180	404.82 ± 24.04c	470.58 ± 24.68c	548.42 ± 34.40c	461.07 ± 32.68c	387.91 ± 22.46cd
	通蓖 11 号	N0	362.73 ± 8.54de	393.95 ± 20.26d	429.55 ± 26.85d	358.15 ± 30.92de	313.15 ± 27.38ef
		N60	392.92 ± 23.41cd	463.43 ± 32.89c	489.82 ± 29.48cd	406.81 ± 34.79cd	358.48 ± 28.29de
		N120	539.32 ± 27.07a	627.15 ± 36.70a	716.20 ± 55.08a	738.46 ± 44.03a	559.91 ± 41.90a
		N180	468.85 ± 19.67b	538.68 ± 26.11b	619.63 ± 39.81b	628.66 ± 36.82b	508.65 ± 32.61b

注：同列数字后不同字母分别表示差异达 0.05 显著水平。显著性测验采用 Duncan 法，系在 2 个品种同一年份间进行。下同。

通蓖 11 号在各灌浆阶段和各施氮处理的 SOD 活性均高于通蓖 9 号，但在低氮水平处理下，差异大部分不显著，在高氮处理（120 和 180 kg/hm²）下，尤其是花后 40 d 以后，差异显著，说明矮秆蓖麻杂交种灌浆中后期主茎叶片 SOD 活性在高氮水平下显著高于高秆杂交种。

随着灌浆进程，2 品种 SOD 活性均呈单峰曲线变化趋势，但对不同氮肥水平的反应差异不同。在低氮水平下，通蓖 9 号的峰值在花后 20 d 出现，通蓖 11 号的峰值在花后 30 d 出现。在高氮水平下，通蓖 9 号的峰值在花后 30 d 出现，而通蓖 11 号的峰值在花后 40 d 才出现，说明矮秆蓖麻杂交种主茎叶片 SOD 活性维持上升趋势要强于高秆杂交种，且在高氮水平下，其峰值出现的时间更晚，花后 40 d 才开始下降，表现出较强的抗氧化能力。

2.1.2 POD 活性对氮肥水平的响应

POD 是细胞防御活性氧毒害酶系统的成员之一，能催化 H₂O₂ 氧化其他底物以清除 H₂O₂^[22]。不同品种蓖麻灌浆期间 POD 活性对氮肥水平的响应见表 3。

表 3 显示，随着氮肥水平升高，各灌浆时期 2 品种 POD 活性变化趋势同 SOD 一致，呈单峰曲线，在 120 kg/hm² 达到峰值。在各灌浆阶段，0 与 60

kg/hm² 水平间相比，2 品种 POD 活性差异大部分未达显著水平，120 和 180 kg/hm² 水平间比较，通蓖 9 号 POD 活性差异大部分未达到显著水平，而通蓖 11 号 POD 活性差异同样大部分未达显著水平。2 品种间相比，通蓖 11 号在各灌浆阶段和各施氮处理的 POD 活性均高于通蓖 9 号，但在 0 kg/hm² 水平处理下，差异不显著，在 60、120 和 180 kg/hm² 水平下，2 品种间大部分差异显著，说明施用氮肥后，通蓖 11 号 POD 活性显著高于通蓖 9 号。

随着灌浆进程，2 品种 POD 活性均呈先上升后下降的变化趋势，但不同氮肥水平出现峰值的时间不同。在 0 kg/hm² 水平下，通蓖 9 号的峰值在花后 20 d 即出现，通蓖 11 号的峰值在花后 30 d 出现。在施氮处理下，通蓖 9 号的峰值在花后 30 d 出现，而通蓖 11 号的峰值在花后 40 d 出现，说明施氮处理对通蓖 11 号主茎叶片 POD 活性的影响要大于通蓖 9 号。

2.1.3 CAT 活性对氮肥水平的响应

CAT 能够催化 H₂O₂ 分解为 H₂O 与 O₂，使得 H₂O₂ 不至于与 O₂ 在铁螯合作用下反应生成非常有害的 ·HO，是植物体内主要的保护酶之一^[21]。不同品种蓖麻灌浆期间 CAT 活性对氮肥水平的响应见表 4。

表 3 灌浆期间不同品种蓖麻 POD 活性对氮肥水平的响应

(U/g FW)

年份	品种	处理	花后 10 d	花后 20 d	花后 30 d	花后 40 d	花后 50 d
2018	通蓖 9 号	N0	657.75 ± 48.51e	742.52 ± 46.00e	707.51 ± 45.58e	682.78 ± 60.89f	603.71 ± 47.86e
		N60	703.07 ± 26.95de	739.90 ± 40.97e	840.11 ± 48.44cd	789.43 ± 33.58ef	756.09 ± 34.96cd
		N120	795.40 ± 55.44bc	857.25 ± 33.06bcd	997.99 ± 77.52ab	930.27 ± 43.95cd	872.24 ± 66.77ab
		N180	744.02 ± 45.31cd	771.85 ± 61.90de	905.08 ± 36.08bcd	833.17 ± 28.49de	799.37 ± 21.94bc
	通蓖 11 号	N0	705.20 ± 23.69de	801.83 ± 49.62cde	831.73 ± 36.15d	754.29 ± 48.93ef	678.56 ± 34.64de
		N60	819.36 ± 30.66bc	888.41 ± 78.16bc	919.25 ± 66.86bcd	981.18 ± 81.88bc	876.70 ± 56.81ab
		N120	915.15 ± 48.11a	989.68 ± 68.79a	1088.76 ± 122.71a	1116.32 ± 90.90a	916.34 ± 61.55a
		N180	867.86 ± 38.60ab	906.70 ± 19.44ab	962.61 ± 30.72bc	1054.76 ± 103.61ab	902.85 ± 44.55a
2019	通蓖 9 号	N0	676.31 ± 19.15c	726.63 ± 27.91c	715.51 ± 40.70e	699.08 ± 66.37e	625.10 ± 49.33e
		N60	691.36 ± 38.41c	734.06 ± 44.27c	822.14 ± 49.22cde	776.02 ± 28.40de	739.86 ± 58.14cd
		N120	772.20 ± 44.91b	838.34 ± 43.41b	989.55 ± 71.18ab	913.57 ± 45.82bc	875.31 ± 41.64ab
		N180	721.64 ± 35.21bc	767.64 ± 28.31bc	932.04 ± 48.07abc	818.29 ± 28.57cd	821.33 ± 38.63bc
	通蓖 11 号	N0	723.43 ± 27.06bc	769.24 ± 51.02bc	804.91 ± 36.50de	742.58 ± 54.76de	689.39 ± 66.81de
		N60	787.15 ± 37.00b	825.06 ± 46.39b	901.34 ± 76.44bcd	964.77 ± 59.01b	859.58 ± 38.15ab
		N120	910.74 ± 66.43a	976.38 ± 26.93a	1043.08 ± 79.97a	1091.54 ± 67.22a	933.74 ± 64.11a
		N180	864.76 ± 44.32a	918.75 ± 50.57a	959.33 ± 51.36ab	1009.33 ± 88.04ab	879.87 ± 53.21ab

表 4 灌浆期间不同品种蓖麻 CAT 活性对氮肥水平的响应

(U/g FW)

年份	品种	处理	花后 10 d	花后 20 d	花后 30 d	花后 40 d	花后 50 d
2018	通蓖 9 号	N0	119.52 ± 14.90e	108.16 ± 8.49f	92.79 ± 7.53d	89.18 ± 8.05c	65.39 ± 8.37d
		N60	139.28 ± 12.88cde	114.41 ± 9.78e	101.11 ± 11.25cd	100.35 ± 8.86bc	73.95 ± 7.54bcd
		N120	161.44 ± 12.69abc	141.62 ± 9.06b	127.30 ± 7.27ab	114.55 ± 11.05b	106.90 ± 10.08a
		N180	143.44 ± 12.95bcde	134.49 ± 7.87c	110.54 ± 11.63bc	108.59 ± 8.30b	81.00 ± 10.26bcd
	通蓖 11 号	N0	134.46 ± 12.66de	110.54 ± 10.71ef	92.56 ± 9.37d	105.75 ± 10.23b	77.48 ± 11.14cd
		N60	151.24 ± 10.84bcd	124.82 ± 10.90d	102.57 ± 8.07cd	109.42 ± 10.04b	85.13 ± 8.85bc
		N120	184.19 ± 8.52a	160.83 ± 9.95a	137.45 ± 8.03a	143.93 ± 9.58a	108.92 ± 9.21a
		N180	167.56 ± 12.50ab	134.56 ± 13.88c	121.22 ± 8.36ab	138.13 ± 9.18a	97.31 ± 9.77ab
2019	通蓖 9 号	N0	124.76 ± 10.81d	104.86 ± 8.66e	90.68 ± 7.44d	86.81 ± 7.30e	62.17 ± 9.29e
		N60	134.29 ± 11.24bcd	121.48 ± 8.04d	100.21 ± 6.38cd	93.75 ± 6.87d	70.73 ± 8.98d
		N120	170.55 ± 10.96a	150.62 ± 12.42b	130.13 ± 7.13b	131.22 ± 9.68a	104.53 ± 9.66b
		N180	149.67 ± 15.33b	127.21 ± 12.49cd	112.24 ± 5.86c	114.44 ± 8.04b	84.61 ± 10.20c
	通蓖 11 号	N0	125.93 ± 7.61cd	107.95 ± 8.26de	101.39 ± 7.33cd	93.64 ± 5.41d	72.20 ± 9.58d
		N60	143.74 ± 10.15bc	122.64 ± 11.24d	109.29 ± 8.64c	102.71 ± 8.45c	82.38 ± 9.77c
		N120	185.95 ± 9.07a	163.27 ± 8.41a	149.55 ± 11.28a	129.76 ± 8.84a	115.74 ± 9.08a
		N180	172.84 ± 10.47a	136.06 ± 11.43c	130.22 ± 15.66b	114.25 ± 9.93b	98.56 ± 16.87b

表4显示,随着氮肥水平升高,各灌浆时期2品种CAT活性呈单峰曲线,在120 kg/hm²达到峰值。花后20 d不同氮肥水平间CAT活性差异基本显著,其他灌浆阶段,0与60 kg/hm²水平间、120与180 kg/hm²水平间差异大部分不显著,但低氮与高氮处理间差异基本达显著水平。2品种间相比,通蓖11号在各灌浆阶段和各施氮处理的CAT活性均高于通蓖9号,但在花后10 d和花后

30 d,2品种在同一氮肥水平间CAT活性差异基本不显著。随着灌浆进程,2品种CAT活性均呈下降趋势。

2.1.4 MDA含量对氮肥水平的响应

MDA是膜脂过氧化作用的主要产物之一,具有很强的细胞毒性,对膜和细胞中的许多生物功能分子均有很强的破坏作用^[23]。不同品种蓖麻灌浆期间MDA含量对氮肥水平的响应见表5。

表5 灌浆期间不同品种蓖麻MDA含量对氮肥水平的响应 (μmol/g)

年份	品种	处理	花后10 d	花后20 d	花后30 d	花后40 d	花后50 d
2018	通蓖9号	N0	13.74 ± 1.13a	16.26 ± 1.43a	20.37 ± 1.97a	25.37 ± 2.36a	34.59 ± 2.99a
		N60	11.34 ± 2.03b	13.18 ± 1.31b	18.29 ± 1.80ab	22.62 ± 2.35ab	29.21 ± 2.32bc
		N120	7.79 ± 0.99cde	8.67 ± 1.17e	12.15 ± 1.56de	16.21 ± 1.56de	22.74 ± 2.25de
		N180	9.33 ± 1.07bcd	10.72 ± 1.13d	15.36 ± 1.55c	18.34 ± 1.90cd	26.68 ± 2.04cd
	通蓖11号	N0	9.91 ± 1.39bc	12.43 ± 1.21c	15.69 ± 1.17bc	21.36 ± 1.94bc	32.33 ± 3.36ab
		N60	8.40 ± 0.83cde	10.46 ± 1.19d	13.77 ± 1.36cd	18.03 ± 1.78cd	26.24 ± 2.63cd
		N120	6.23 ± 0.85de	7.71 ± 0.78f	9.72 ± 0.87e	13.20 ± 0.98e	20.15 ± 1.66e
		N180	7.12 ± 1.07e	8.98 ± 1.05e	11.77 ± 1.31de	15.66 ± 1.08de	23.76 ± 2.26de
2019	通蓖9号	N0	13.63 ± 1.03a	16.43 ± 1.35a	19.60 ± 1.69a	22.51 ± 1.95a	32.98 ± 3.03a
		N60	12.18 ± 1.20ab	15.72 ± 1.50ab	17.86 ± 1.66ab	20.74 ± 1.74ab	29.42 ± 1.92ab
		N120	10.73 ± 0.75bc	11.56 ± 1.38cd	13.57 ± 1.22cd	16.65 ± 1.85cd	23.48 ± 2.25c
		N180	11.68 ± 1.25ab	13.45 ± 1.32bc	15.72 ± 1.47bc	18.89 ± 2.15bc	26.44 ± 2.23bc
	通蓖11号	N0	10.66 ± 0.95bc	12.84 ± 1.31cd	15.56 ± 1.48bc	18.56 ± 1.94bc	30.50 ± 2.79ab
		N60	9.03 ± 1.46cd	11.20 ± 1.52cd	13.42 ± 1.52cd	17.59 ± 2.01bcd	27.17 ± 2.37bc
		N120	7.53 ± 0.68d	8.52 ± 0.85e	10.49 ± 0.89e	14.31 ± 1.21d	22.62 ± 1.73c
		N180	8.17 ± 1.31d	10.38 ± 1.07de	12.37 ± 1.06de	15.56 ± 1.3cd	24.37 ± 2.19c

表5显示,在0~120 kg/hm²施氮水平范围内,随着施氮量的增加,各灌浆时期2品种MDA含量不断降低,施氮水平再升高,MDA含量又略有上升,说明适量的氮素可以降低蓖麻叶片MDA含量。各氮素水平间相比,0与60 kg/hm²、60与120 kg/hm²、120与180 kg/hm²间差异大部分不显著,低氮与高氮处理间大部分差异显著。2品种间比较,在同一氮素水平下通蓖11号MDA含量均低于通蓖9号,且差异大部分达到显著水平,说明通蓖11号蓖麻细胞膜脂过氧化水平低于通蓖9号,有利于延迟叶片衰老。

随着灌浆进程,各处理MDA含量均呈上升趋势,说明灌浆后期,随着保护酶活性降低,叶片细胞膜质过氧化水平不断升高,叶片逐渐衰老。

2.2 不同品种籽粒重对氮肥水平的响应

不同品种蓖麻灌浆期间籽粒重对氮肥水平的响应见表6。

表6显示,2品种各灌浆时期籽粒重均随着氮肥水平升高呈单峰曲线,在120 kg/hm²水平时籽粒重最高,与其他水平的差异大部分达到显著水平。2品种间相比,通蓖11号在各灌浆阶段和各施氮处理的籽粒重均高于通蓖9号,差异大部分达到显著水平。

2.3 不同品种油分含量对氮肥水平的响应

不同品种蓖麻灌浆期间油分含量对氮肥水平的响应见表7。

表7显示,2品种各灌浆时期油分含量随着氮肥水平升高而升高,在120 kg/hm²水平时达到峰值,超过120 kg/hm²水平又下降,但两者对氮水平的反应有差异:通蓖9号油分含量在低氮处理间差

表 6 灌浆期间不同品种蓖麻主茎籽粒重对氮肥水平的响应

(kg/hm²)

年份	品种	处理	花后 10 d	花后 20 d	花后 30 d	花后 40 d	花后 50 d
2018	通蓖 9 号	N0	35.14 ± 3.01e	176.81 ± 15.15c	349.82 ± 21.75cd	573.63 ± 55.87d	694.83 ± 62.83f
		N60	41.40 ± 2.43cde	192.08 ± 12.47abc	370.72 ± 28.77c	624.73 ± 60.71cd	758.84 ± 53.40e
		N120	52.34 ± 3.00b	215.01 ± 8.65a	432.55 ± 22.25b	797.31 ± 69.56ab	916.61 ± 80.41c
		N180	49.04 ± 8.69bc	183.44 ± 10.00bc	320.72 ± 15.16d	693.40 ± 41.08bcd	799.71 ± 65.62de
	通蓖 11 号	N0	39.30 ± 3.48de	177.38 ± 16.25c	363.98 ± 22.22c	707.50 ± 47.79bc	803.87 ± 82.86d
		N60	49.04 ± 2.80bc	208.24 ± 14.08ab	460.59 ± 15.81ab	851.81 ± 53.63a	1029.05 ± 89.22b
		N120	67.44 ± 4.59a	214.11 ± 15.71a	493.62 ± 36.99a	846.44 ± 82.04a	1110.66 ± 89.47a
		N180	45.80 ± 2.46bcd	188.81 ± 13.59bc	370.22 ± 36.86c	689.63 ± 71.03bcd	946.25 ± 71.95c
2019	通蓖 9 号	N0	31.37 ± 2.67e	165.81 ± 10.62c	335.82 ± 21.03cde	546.73 ± 45.88d	680.13 ± 62.32d
		N60	39.20 ± 2.98d	170.41 ± 11.05c	344.72 ± 24.30cde	603.73 ± 47.56cd	771.44 ± 75.20cd
		N120	50.64 ± 3.00bc	181.51 ± 14.41bc	359.12 ± 25.00cd	837.44 ± 45.40a	984.32 ± 81.35b
		N180	40.10 ± 2.65d	162.24 ± 7.39c	324.45 ± 21.60de	729.54 ± 54.14b	847.11 ± 63.23c
	通蓖 11 号	N0	43.54 ± 3.25d	166.27 ± 10.16c	311.88 ± 18.04e	651.20 ± 44.64bc	831.31 ± 66.39c
		N60	55.40 ± 3.76b	195.18 ± 18.39ab	424.05 ± 19.16b	813.04 ± 52.45a	984.08 ± 80.21b
		N120	64.24 ± 4.45a	213.81 ± 19.29a	483.72 ± 43.84a	832.44 ± 71.38a	1143.86 ± 115.51a
		N180	49.07 ± 3.46c	176.78 ± 6.81bc	369.39 ± 16.22c	675.43 ± 68.89bc	965.75 ± 120.41b

表 7 灌浆期间不同品种蓖麻主茎籽粒油分含量对氮肥水平的响应

(%)

年份	品种	处理	花后 10 d	花后 20 d	花后 30 d	花后 40 d	花后 50 d
2018	通蓖 9 号	N0	4.11 ± 0.46e	8.90 ± 0.70c	32.48 ± 2.82a	37.65 ± 3.42c	43.67 ± 4.34b
		N60	4.91 ± 0.38bcd	10.55 ± 1.15c	33.75 ± 3.58a	38.22 ± 3.15c	44.89 ± 4.43b
		N120	5.39 ± 0.37abc	13.18 ± 1.02a	34.85 ± 3.58a	42.51 ± 3.51ab	51.95 ± 5.84a
		N180	4.53 ± 0.34de	12.45 ± 1.07b	33.44 ± 2.77a	41.07 ± 3.64bc	50.17 ± 4.18a
	通蓖 11 号	N0	4.85 ± 0.39cd	12.21 ± 1.28b	33.37 ± 2.88a	42.60 ± 5.47ab	50.25 ± 4.01a
		N60	5.02 ± 0.50bcd	13.38 ± 1.05ab	34.67 ± 3.69a	43.60 ± 6.02ab	53.86 ± 6.20a
		N120	6.10 ± 0.30a	14.66 ± 1.15a	35.79 ± 3.47a	45.04 ± 5.81a	53.74 ± 5.21a
		N180	5.63 ± 0.21ab	13.43 ± 1.07a	34.35 ± 2.67a	43.51 ± 5.94ab	51.47 ± 4.18a
2019	通蓖 9 号	N0	4.32 ± 0.16d	8.45 ± 0.08d	33.48 ± 2.91a	37.14 ± 3.25c	43.11 ± 4.19b
		N60	4.84 ± 0.55bcd	10.12 ± 1.54d	34.79 ± 3.70a	38.69 ± 3.90c	44.57 ± 4.01b
		N120	5.44 ± 0.28bc	14.54 ± 1.05ab	35.92 ± 3.69a	43.37 ± 3.58ab	53.55 ± 5.03a
		N180	4.77 ± 0.21cd	12.31 ± 2.30bc	34.47 ± 2.86a	41.90 ± 3.72b	51.90 ± 4.04a
	通蓖 11 号	N0	5.12 ± 0.43bc	11.95 ± 1.01c	34.05 ± 2.94a	42.79 ± 3.34ab	51.07 ± 4.41a
		N60	5.41 ± 0.73bc	13.66 ± 1.03abc	35.38 ± 3.76a	43.77 ± 3.76ab	53.07 ± 5.64a
		N120	6.62 ± 0.46a	15.04 ± 1.51a	36.52 ± 3.54a	45.23 ± 3.52a	54.78 ± 5.32a
		N180	5.55 ± 0.19b	14.16 ± 1.18abc	35.05 ± 2.73a	43.69 ± 3.80ab	52.57 ± 4.09a

异基本不显著,高氮处理间差异亦基本不显著,但低氮处理与高氮处理间差异大部分达到显著水平。通蓖 11 号在灌浆前期油分含量对氮肥水平的反应差异与通蓖 9 号相似,但灌浆中后期则不同氮肥水平间差异不显著。通蓖 11 号在各灌浆阶段和各施氮处理的油分含量均高于通蓖 9 号,在灌浆前期除 120 kg/hm² 水平以外,2 品种间差异大部分达显著水平。在灌浆中后期,2 品种在低氮水平间油分含量差异显著,高氮水平间差异不显著。

2.4 蓖麻抗氧化酶活性与产量和油分含量的相关性

2 个品种不同灌浆阶段叶片抗氧化酶活性与籽粒重的相关系数见表 8,结果显示二者间均呈正相关关系。花后 10 d 2 品种籽粒重与 SOD、POD 和 CAT 活性的相关关系均达显著或极显著水平;花后

20 d 通蓖 9 号籽粒重与 SOD、POD 和 CAT 活性的相关关系未达显著水平,通蓖 11 号则达显著相关水平;花后 30 d 通蓖 9 号籽粒重与 SOD、POD 和 CAT 活性的相关关系均未达显著水平,通蓖 11 号籽粒重与 SOD、CAT 活性相关关系均未达显著水平,与 POD 活性相关关系则达显著水平;花后 40 d 通蓖 9 号籽粒重与 SOD、POD 和 CAT 活性的相关关系均达极显著水平,通蓖 11 号则未达显著水平;灌浆末期二者则大部分达到显著或极显著水平。

2 品种各灌浆阶段 MDA 含量与籽粒重均呈负相关关系。通蓖 9 号 MDA 含量除花后 30 d 外,其他时期均与籽粒重呈显著或极显著负相关关系。通蓖 11 号 MDA 含量除花后 40 d 外,其他时期均与籽粒重呈显著或极显著负相关关系。

表 8 不同灌浆阶段叶片抗氧化酶活性与籽粒重的相关系数

品种	指标	花后 10 d	花后 20 d	花后 30 d	花后 40 d	花后 50 d
通蓖 9 号	SOD	0.9159**	0.4887	0.3162	0.9851**	0.9465**
	POD	0.9414**	0.6630	0.3962	0.9502**	0.9299**
	CAT	0.8687*	0.4468	0.3614	0.9738**	0.9670**
	MDA	-0.9275**	-0.7636*	-0.4858	-0.9024**	-0.9407**
通蓖 11 号	SOD	0.8025*	0.6837*	0.6312	0.2682	0.7443*
	POD	0.7774*	0.7580*	0.7872*	0.5746	0.8942**
	CAT	0.7527*	0.7642*	0.6385	0.3427	0.8466**
	MDA	-0.7077*	-0.7841*	-0.7133*	-0.3737	-0.8784**

注: * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$ 。下同。

2 个品种不同灌浆阶段叶片抗氧化酶活性与籽粒油分含量的相关系数见表 9,结果显示二者间均呈正相关关系。灌浆前期 SOD、POD 和 CAT 活性与 2 品种籽粒油分含量的相关关系均达极显著水平;花后 30 d 通蓖 11 号籽粒油分含量与 SOD、POD 活性呈显著正相关,与 CAT 呈正相关但未达显著水平,通蓖 9 号籽粒油分含量仅与 POD 活性呈显著正相关,与 SOD、CAT 呈正相关但未达显著

水平;灌浆末期 2 品种抗氧化酶活性与籽粒油分含量相关系数大部分达到显著或极显著水平。

2 品种各灌浆阶段 MDA 含量与油分含量均呈负相关关系。通蓖 9 号 MDA 含量除花后 10 d 外,其他时期均与籽粒油分含量呈显著或极显著负相关关系。通蓖 11 号 MDA 含量各时期均与籽粒油分含量呈显著或极显著负相关关系。

表 9 不同灌浆阶段叶片抗氧化酶活性与籽粒油分含量的相关系数

品种	指标	花后 10 d	花后 20 d	花后 30 d	花后 40 d	花后 50 d
通蓖 9 号	SOD	0.8670**	0.9650**	0.6726	0.9786**	0.9912**
	POD	0.8431**	0.8621**	0.7716*	0.9212**	0.9082**
	CAT	0.9141**	0.9746**	0.4106	0.9595**	0.9103**
	MDA	-0.6996	-0.8497*	-0.7376*	-0.9252**	-0.9157**
通蓖 11 号	SOD	0.9491**	0.9448**	0.7807*	0.8236*	0.5658
	POD	0.8484**	0.9214**	0.8166*	0.8637**	0.8073*
	CAT	0.8646**	0.9414**	0.5011	0.7160*	0.6903
	MDA	-0.7216*	-0.8757**	-0.8244*	-0.8756**	-0.7320*

3 讨论

生物体衰老过程是活性氧代谢失调与累积的过程, 氧自由基伤害直接影响到植物衰老进程, 而 SOD、POD 等保护酶在植物体内协同作用, 能够清除过量的活性氧, 维持活性氧的代谢平衡, 保护膜结构, 从而延缓衰老^[24-26]。氮素是植物保护酶的重要组成部分, 氮素水平显著影响作物的保护酶活性, 但因试验地点、设计、作物品种等差异, 其影响效果有所不同, 总体上分为两类: 一类是增施氮肥可以提高作物的保护酶活性, 另一类是适量增施氮肥能够提高作物保护酶活性, 过量则抑制其活性。有研究表明, 增施氮肥能显著提高油菜 SOD、POD、CAT 活性^[27]; 花生 SOD 和 CAT 活性均随施氮量的增加而增加, 并且叶片活性氧清除能力增强, 植株衰老延缓^[28]。随着氮素施用水平的增加, 棉花叶片的 SOD、CAT 与 POD 活性增强^[29], 玉米叶片 SOD、POD、CAT 活性均显著升高^[30]。增施氮素能够提升抗氧化酶活性, 减轻膜脂过氧化物的损伤, 有利于高粱抗氧化酶系统能力的提升^[31]。也有研究表明, 适量增施氮素具有维持小麦植株上位叶较高细胞保护酶活性、抑制细胞膜脂过氧化、延缓叶片衰老和促进籽粒灌浆的作用^[32]。施氮水平的变化对大豆叶片 SOD、POD、CAT 等保护性酶活性有不同程度的影响, 表现为低氮促进、高氮抑制的先升高后降低的变化趋势^[33]。本研究结果显示, 适量的氮素用量可以增强蓖麻叶片 SOD、POD、CAT 活性, 提高籽粒产量和油分含量, 过量则抑制其活性, 且籽粒产量和油分含量相应降低。主茎穗和一级果穗对矮秆蓖麻的产量影响较大, 北方地区生育期短, 适量增施氮肥, 延缓主茎叶片衰老, 延长主茎穗灌浆时间, 增加主茎穗的籽粒产量, 是西辽河平原矮秆蓖麻优质高产的重要途径。在 0 ~ 120 kg/hm² 施氮水平范围内, 随着氮肥施用量的增加, 蓖麻主茎叶片 SOD、POD、CAT 活性增加, MDA 含量下降, 说明适量的氮素营养水平首先增强了蓖麻叶片 SOD 将活性氧 O₂⁻ 快速歧化为 H₂O₂ 和 O₂ 的能力, 同时也增强了 POD 和 CAT 清除 H₂O₂ 的能力, 3 种酶协同发挥作用, 构成一个完整的抗氧化链条, 减少了细胞内过氧化物的积累, MDA 含量降低, 延缓了蓖麻主茎叶片衰老, 籽粒产量和油分含量达到最大值。当氮肥施用量超过 120 kg/hm², 达到 180 kg/hm² 时, SOD、POD、CAT 活性下

降, 协同效应减弱, 清除 O₂⁻ 和 H₂O₂ 的能力下降, MDA 含量上升, 促进了叶片衰老, 产量和品质随之下降。

同一作物不同品种保护酶活性对氮素营养水平的生理响应不同, 最终导致产量和品质的差异。张瑞朋等^[34]研究表明, 不同氮素光合利用率品种大豆叶片保护酶活性对氮素的反应有明显差异, 氮光合高效品种在中氮水平时 SOD、POD、CAT 等保护酶活性达到峰值, MDA 含量达到最低; 而氮光合低效品种则在高氮水平时保护酶活性最高, MDA 含量最低。金磊等^[35]研究表明, 随着氮素的增加, 氮高效水稻品种抗氧化酶活性高于氮低效品种, 产量也高于氮低效品种。匡艺等^[36]指出, 氮高效小黑麦基因型的 SOD、POD、CAT 活性随生育期表现出在同一供氮条件下强于氮低效基因型的趋势, 而 MDA 含量显著低于氮低效基因型小黑麦, 生物量显著高于氮低效品种。在相同施氮水平下, 超高产玉米品种 SOD、POD、CAT 活性均高于普通高产玉米品种^[37]。本研究表明, 在相同氮素水平下, 各灌浆阶段通蓖 11 号的保护酶活性均高于通蓖 9 号, MDA 含量则反之。在各氮素水平下, 随灌浆进程, 通蓖 11 号的 SOD、POD、CAT 活性均表现出强于通蓖 9 号的趋势: SOD、POD 活性最大值出现的时间晚, 维持高峰的时间长。MDA 含量亦反之, 呈现通蓖 11 号弱于通蓖 9 号的趋势。说明与高秆蓖麻杂交种相比, 矮秆蓖麻杂交种主茎叶片保护酶活性对氮肥的生理响应更积极, 适量施氮可使其在生育后期仍能维持较高的保护酶活性, 提高了其改善细胞中活性氧产生与清除之间的平衡能力, 从而降低了活性氧的产生速率和累积量, 减轻了自由基对细胞造成的伤害, 减缓了叶片衰老, 增加了籽粒产量, 提高了油分含量。

作物保护酶 SOD、POD、CAT 活性可对地上部生物量生产和品质形成产生影响, 但其作用大小与生育时期及品种关系密切。研究表明, 小黑麦 SOD 活性在拔节期与地上部生物量呈极显著正相关关系; POD 活性在苗期时与地上部生物量呈极显著负相关关系; CAT 则在分蘖期、拔节期和抽穗期与地上部生物量呈显著或极显著正相关关系; MDA 含量与各时期地上部生物量呈显著负相关关系^[36]。玉米孕穗期、齐穗期与乳熟期 3 个发育阶段 SOD、POD 和 CAT 活性都分别与产量呈极显著正相关关系^[38]。陆稻品种在苗期、灌浆期和成熟

期, 叶片 SOD、CAT 活性与脯氨酸、可溶性糖含量呈显著或极显著正相关关系, 而水稻品种相关性不显著, 表明陆稻品种叶片中较高的抗氧化酶活性是其抗旱能力较强的主要原因^[39]。番茄果实品质与叶片保护酶及叶绿素含量的相关性随生育期的不同而变化, 果实品质与叶片 SOD 活性总体呈正相关关系, 而与 POD 活性在结果前期呈负相关关系, 在结果盛期和末期总体呈正相关关系^[40]。本研究结果显示, 不同灌浆阶段, 2 个品种主茎叶片抗氧化酶活性与籽粒重均呈正相关关系, 与 MDA 含量呈负相关关系。灌浆中前期, 通蓖 9 号 SOD、POD、CAT 活性和 MDA 含量在花后 10 d 与籽粒重的相关关系达显著或极显著水平, 花后 20 d 氧化酶活性与籽粒重相关关系则未达显著水平。通蓖 11 号氧化酶活性和 MDA 含量与籽粒重相关关系在花后 10 和 20 d 均达显著水平, 表明矮秆蓖麻杂交种主茎叶片抗氧化系统的协同能力在灌浆中前期要优于高秆蓖麻杂交种, 这可能是其主穗产量较高的原因之一; 灌浆前期 SOD、POD 和 CAT 活性与 2 品种籽粒油分含量均达极显著水平, 花后 30 d 通蓖 11 号籽粒油分含量与 SOD、POD 活性呈显著正相关, 与 CAT 呈正相关但未达显著水平, 通蓖 9 号籽粒油分含量仅与 POD 活性呈显著正相关, 与 SOD、CAT 呈正相关但未达显著水平。花后 30 d 是籽粒油分积累的关键时期, 此期矮秆蓖麻杂交种 SOD、POD 活性与油分含量呈显著正相关, 说明二者可以较好地发挥协同作用, 及时清除 O_2^- 和 H_2O_2 , 促进油分形成。而高秆蓖麻杂交种在此期的油分含量仅与 POD 活性呈显著正相关, 说明 SOD 和 CAT 发挥的作用不强, 仅靠 POD 不能形成协调、高效、完整的抗氧化系统, 这可能是高秆蓖麻杂交种主穗油分含量低于矮秆蓖麻杂交种的生理原因之一。

4 结论

适量施用氮肥可以提高通蓖 9 号和通蓖 11 号主茎叶片抗氧化酶活性, 降低 MDA 含量, 但通蓖 11 号保护酶活性对氮肥的生理响应更积极, 具有更强的改善细胞中活性氧产生与清除之间的平衡能力, 这是其籽粒产量和油分含量高于通蓖 9 号的生理原因。120 kg/hm² 氮肥用量是通蓖 11 号在西辽河平原取得优质高产的最佳施肥水平。

参考文献:

- [1] 王树安. 作物栽培学各论[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995. 346.
- [2] Crawford N M, Glass D M A. Principles of terrestrial ecosystem ecology[M]. New York: Springer-Verlag, 2002. 197-223.
- [3] Nasholm T, Kielland K, Ganeteg U. Uptake of organic nitrogen by plants[J]. New Phytologist, 2009, 182 (1): 31-48.
- [4] Wang Y Y, Hsu P K, Tsay Y F. Uptake, allocation and signaling of nitrate[J]. Trends in Plant Science, 2012, 17: 458-467.
- [5] 闫士朋, 冯焕琴, 杨宏伟, 等. 氮肥不同施用量及基追比对藜麦根系生理及同化物分配的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019 (4): 105-115.
- [6] 王晴晴, 田长彦, 赵振勇, 等. 不同施氮量对蓖麻产量和生物及营养性状的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32 (3): 150-154.
- [7] 吴慧, 殷婕, 朱广龙, 等. 氮肥和氮磷钾配比对蓖麻生育特性、干物质积累和产量的影响[J]. 江西农业学报, 2019, 31 (3): 71-75.
- [8] 周桂生, 万树文, 董伟伟, 等. 施氮量对蓖麻花后干物质积累、产量和产量构成的影响[J]. 中国油料作物学报, 2009, 31 (1): 39-43.
- [9] 王磊, 德木其格, 王金波, 等. 氮肥水平对蓖麻器官粗脂肪含量的影响[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2019, 34 (3): 231-236.
- [10] 衣海会, 李凤山, 贾娟霞, 等. 蓖麻矮化育种研究现状及前景展望[J]. 安徽农学通报, 2008 (7): 66-67.
- [11] 赵婧辛, 朱国立, 何智彪, 等. 通辽地区主要蓖麻品种产量构成因素分析[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2014, 29 (4): 407-413.
- [12] 白月轻, 宁金席, 俞春莲, 等. 矮秆蓖麻品种不同种植密度下的产量构成因素及品质分析[J]. 浙江农业科学, 2015, 56 (6): 817-821.
- [13] 王森, 朱国立, 何智彪, 等. 不同种植方式对矮秆蓖麻田土壤温度、蓖麻产量的影响[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2017, 32 (4): 328-335.
- [14] 李金琴, 张智勇, 何智彪, 等. 矮秆蓖麻杂交种产量与主要农艺性状的相关及多元回归分析[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2010, 25 (1): 40-43.
- [15] 朱雪倩, 何智彪, 乔文杰, 等. 矮秆蓖麻杂交种籽粒性状、品质性状的相关及回归分析[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2019, 34 (1): 55-61.
- [16] 李卓然, 何智彪, 雷凤燕, 等. 矮秆蓖麻主要农艺性状杂种优势及其遗传参数分析[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2019, 34 (1): 62-71.
- [17] 朱国立, 何智彪, 王冬梅, 等. 矮秆蓖麻主要数量性状配合力及遗传力研究[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2012, 27 (4): 451-456.
- [18] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 163.

- [19] 赵海泉. 基础生物学实验指导—植物生理学分册[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008. 77.
- [20] 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.
- [21] Venkatesh K, Annie J G, Mukesh P, et al. Comparative analysis of Cs Cu /Zn SOD defense role by molecular characterization: Gene expression—enzyme activity protein level[J]. Gene, 2015, 564 (1): 53–62.
- [22] 王贺正, 张均, 吴金芝, 等. 不同氮素水平对小麦旗叶生理特性和产量的影响[J]. 草业学报, 2013, 22 (4): 69–75.
- [23] 朱维琴, 吴良欢, 陶勤南. 不同氮营养对干旱逆境下水稻生长及抗氧化性能的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12 (4): 506–510.
- [24] Liang Y C, Chen Q, Liu Q, et al. Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.) [J]. Journal of Plant Physiology, 2003, 160: 1157–1164.
- [25] Blokhina O. Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: a review[J]. Ann Bot, 2003, 91 (2): 179–194.
- [26] Stepien P, Klobus G. Antioxidant defense in the leaves of C3 and C4 plants under salinity stress[J]. Plant Physiology, 2005, 12 (5): 31–40.
- [27] 陈红琳, 陈尚洪, 郑盛华, 等. 增施氮素对苗期渍水胁迫冬油菜生理特性及产量的调控效应[J]. 土壤, 2017, 49 (3): 519–526.
- [28] 孙虎, 王月福, 王铭伦, 等. 施氮量对不同类型花生品种衰老特性和产量的影响[J]. 生态学报, 2010, 30 (10): 2671–2677.
- [29] 艾雪莹, 吴奇, 周宇飞, 等. 干旱—复水条件下氮素对高粱光合特性及抗氧化代谢的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37 (5): 99–105, 113.
- [30] 黄海, 吴春胜, 胡文河, 等. 氮素营养水平对大垄双行膜下滴灌玉米花粒期叶片衰老特性及产量的影响[J]. 南京农业大学学报, 2013, 36 (3): 1–7.
- [31] 刘瑞显, 郭文琦, 陈兵林, 等. 氮素对花铃期干旱及复水后棉花叶片保护酶活性和内源激素含量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34 (9): 1598–1607.
- [32] 刘志鹏, 陈曦, 杨梦雅, 等. 氮量及减灌对冬小麦旗叶生理参数和细胞保护酶活性的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38 (2): 175–182.
- [33] 董雅致, 徐克章, 李大勇, 等. 不同氮素光合效率大豆品种叶片保护酶活性对施氮水平的响应[J]. 吉林农业大学学报, 2015, 37 (4): 395–401, 423.
- [34] 张瑞朋, 佟斌, 傅连舜, 等. 氮素对不同来源大豆品种叶片保护酶的影响[J]. 大豆科学, 2009, 28 (5): 833–836, 841.
- [35] 金磊, 李霞, 魏晓东, 等. 不同氮效率粳稻生育后期产量形成的生理基础[J]. 华北农学报, 2013, 28 (5): 175–186.
- [36] 匡艺, 李廷轩, 余海英. 氮素对不同氮效率小黑麦基因型叶片保护酶活性和膜脂过氧化物的影响[J]. 草业学报, 2011, 20 (6): 93–100.
- [37] 刘宇, 韩林, 王思远, 等. 低氮胁迫对超高产玉米叶片保护酶活性的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2011, 33 (1): 5–8, 13.
- [38] 袁颖红, 樊后保, 黄欠如, 等. 长期不同施肥对水稻叶片光合特性和部分保护酶活性及产量的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2011, 38 (2): 299–304.
- [39] 吕家强, 吴磊, 陈展宇. 旱作条件下陆稻、水稻叶片渗透调节物质含量及抗氧化酶活性变化[J]. 辽东学院学报(自然科学版), 2017, 24 (2): 96–101.
- [40] 朱艳丽, 梁银丽, 郝旺林, 等. 番茄果实品质和叶片保护酶对水肥水平的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17 (1): 137–146.

Responses of antioxidant enzyme activities, yield, and oil content to nitrogen fertilizer in dwarf castor hybrids in the Xiliaohe Plain

XU Shou-jun^{1, 2, 3, 4}, WANG Lei¹, DE Mu-qi-ge¹, WANG Jin-bo¹, QI Hai-xiang¹, ZHU Guo-li^{1, 2, 3, 4, 5} (1. College of Agronomy, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao Inner Mongolia 028043; 2. Inner Mongolia Industrial Engineering Research Center of Universities for Castor, Tongliao Inner Mongolia 028043; 3. Inner Mongolia Key Laboratory of Castor Breeding, Tongliao Inner Mongolia 028043; 4. Inner Mongolia Collaborate Innovation Cultivate Center for Castor, Tongliao Inner Mongolia 028043; 5. Tongliao Academy of Agricultural Sciences, Inner Mongolia, Tongliao Inner Mongolia 028015)

Abstract: The response of leaf antioxidant enzyme activity, yield and oil content to nitrogen fertilizer level during grain filling was investigated by using field experiment with randomized block design, taking dwarf castor hybrid Tongbi 11 as test material and high-stalk hybrid Tongbi 9 as control under 4 nitrogen fertilizer treatments of N 0, 60, 120, 180 kg/hm². The results showed that the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) increased continuously and the content of malondialdehyde (MDA) decreased continuously with the increase of nitrogen application level in the range of 0 ~ 120 kg/hm². When nitrogen application level increased to 180 kg/hm², SOD, POD, CAT activities decreased, while MDA content slightly increased. The activities of SOD, POD and CAT of Tongbi 11 were higher than those of Tongbi 9 at various nitrogen fertilizer levels and filling stage, and the MDA content was lower than that of Tongbi 9. Under

low nitrogen level treatment, most of the differences between the two varieties were not significant, while under high nitrogen level treatment, most of the differences were significant. With the grouting progress, SOD and POD activities showed a single peak curve, but the peak value of Tongbi 11 was delayed compared with Tongbi 9. CAT activity decreased and MDA content increased. Grain yield, oil content and antioxidant enzyme activity of each treatment showed the same trend. Correlation analysis results showed that grain yield and oil content were positively correlated with SOD, POD and CAT activities, and negatively correlated with MDA content. In the early stage of filling, the correlation between SOD, POD and CAT activities of Tongbi 9 and grain weight reached significant or extremely significant level at 10 d after anthesis, while Tongbi 11 reached a significant level. The correlation between SOD, POD and CAT activities of Tongbi 9 and grain weight did not reach a significant level at 20 d after anthesis, but those of Tongbi 11 reached a significant level. In the middle stage of filling, the SOD and POD activities of Tongbi 11 were significantly positively correlated with oil content, while the oil content of Tongbi 9 was only significantly positively correlated with POD activity, and the correlation with SOD and CAT was not significant. The results showed that proper application of nitrogen fertilizer could improve antioxidant enzyme activity and reduce MDA content in castor main stem leaves. The protective enzyme activity of Tongbi 11 has a more positive physiological response to nitrogen fertilizer and has a stronger ability to improve the balance between production and removal of active oxygen in cells, which is the physiological reason why its grain yield and oil content are higher than those of Tongbi 9. The application rate of 120 kg/hm² nitrogen fertilizer is the best fertilization level for Tongbi 11 to obtain high quality and high yield in Xiliaohe plain.

Key words: castor; antioxidant enzymes; nitrogen; correlation