

外源 SLs 和纳米 K_2MoO_4 对干旱胁迫下油菜种子萌发的影响

庞星月 万林 李素 王宇航 刘晨 肖晓璐 李心昊 马霓

(中国农业科学院油料作物研究所/农业农村部油料作物生物学与遗传育种重点实验室, 430062, 湖北武汉)

摘要 干旱胁迫是油菜种子萌发和生长发育的主要限制因子之一。以甘蓝型油菜品种 Q2 (抗旱型) 和秦优 8 号 (干旱敏感型) 为试验材料, 研究干旱对油菜种子萌发的影响, 探讨外源生长调节物质独脚金内酯 (SLs) 和纳米材料 ($n-K_2MoO_4$) 对干旱胁迫下油菜种子萌发的生理调控作用。结果表明, 干旱胁迫显著抑制种子萌发, SLs 和 $n-K_2MoO_4$ 均可显著提高发芽率, 增加幼苗干重和子叶叶绿素含量, 提高超氧化物歧化酶、过氧化物酶活性及可溶性糖、脯氨酸含量, 降低丙二醛含量。0.10 $\mu\text{mol/L}$ GR24+0.24 mmol/L K_2MoO_4 对干旱胁迫下种子萌发和氧化损伤的缓解效应较好。外源 SLs 和 $n-K_2MoO_4$ 通过提高油菜种子萌发期的保护酶活性和渗透调节物质含量来提高抗旱性。本研究表明植物激素和纳米材料在农业生产中具有应用价值。

关键词 独脚金内酯; 纳米材料; 干旱胁迫; 种子萌发; 生理机制

油菜是我国第一大油料作物, 年种植面积达 600 万 hm^2 以上, 其中长江流域约占 85%^[1], 近年来以直播种植方式为主^[2]。然而南方秋冬季节干旱频繁, 油菜播种后容易出现出苗慢、出苗不齐、冬前弱苗和死苗等现象, 难以实现壮苗齐苗, 导致油菜籽产量和种植效益下降, 影响了农民的种植积极性, 产生大量的冬闲田^[3-4]。因此, 解决干旱胁迫下油菜种子萌发和出苗困难等问题, 对扩大油菜种植面积、减少冬闲田、提高我国食用油供给能力具有重要意义。

独脚金内酯 (SLs) 是一组类胡萝卜素衍生的倍半萜激素, 可诱导寄生性杂草的种子萌发^[5], 在调控植物对生物和非生物胁迫的反应中发挥着重要作用^[6]。Van 等^[7]研究证明, 在拟南芥中, SLs 是植物对非生物胁迫 (如盐和干旱胁迫) 的正向调节因子。在盐胁迫条件下, 外源 SLs 可以增加油菜叶片抗氧化酶活性, 降低活性氧含量, 促进油菜幼苗生长^[8]。并且 SLs 能显著提高干旱胁迫下谷子发芽率和抗旱指数^[9]。万林等^[10]研究发现, 0.18 $\mu\text{mol/L}$ SLs 处理能加快干旱条件下油菜叶绿素合成, 提高叶片抗氧化能力, 有效增强油菜苗期抗旱性。

纳米材料具有独特的物理及化学特性^[11], 与传统化学药剂相比, 更安全高效且不易产生抗性, 被广泛应用于纳米农药、种子包衣剂和纳米肥料等农业生产中^[12]。姜余梅等^[13]发现, 适当浓度的碳纳米管可以促进水稻种子发芽和根系生长, 可提高根

系活力。外施富勒烯对油菜种子萌发有显著促进作用^[14]。纳米钼酸钾 ($n-K_2MoO_4$) 作为一种新型纳米材料, 近年来, 在金属防锈颜料、化学催化、抗菌材料、电极电池材料、荧光材料、阻燃抑烟剂及闪烁探测等方面已有良好应用^[15], 本团队前期研究认为 $n-K_2MoO_4$ 可以增加油菜对菌核病的抗性, 提高产量, 且与农药混合配施能提高药效 (未发表)。因此, 为促进 2 种物质在油菜生产上的应用, 本研究采用添加外源 SLs 和 $n-K_2MoO_4$ 处理, 比较干旱胁迫下油菜种子萌发过程中形态和生理指标的变化规律, 探讨调控种子萌发和抗旱性的生理机制, 为油菜栽培技术和产品研发转化奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料是甘蓝型油菜品种 Q2 (抗旱型) 和秦优 8 号 (干旱敏感型), 分别由中国农业科学院油料作物研究所和咸阳市农业科学院提供。SLs 类似物 GR24 (纯度 $\geq 98\%$) 购于上海翊圣生物有限公司。

1.2 试验方法

挑选大小一致、形态饱满的种子, 用 75% 酒精消毒 10s, 5% 次氯酸钠消毒 5min, 蒸馏水漂洗数次, 用滤纸吸干水分。将消毒后的种子置于铺有 3 层滤纸、直径为 90mm 的玻璃培养皿内。每皿 60 粒种子, 每个处理 3 个培养皿, 3 次重复, 加入 6mL

作者简介: 庞星月, 主要从事作物栽培与生理研究, E-mail: pangxingyue58@qq.com

马霓为通信作者, 主要从事油菜生理与栽培技术研究, E-mail: mani@caas.cn

基金项目: 农业农村部油料作物生物学与遗传育种重点实验室开放课题基金 (KF2020006); 国家自然科学基金 (31971855); 中国农业科学院科技创新工程 (CAASASTIP-2016-OCRI)

收稿日期: 2021-04-22; 修回日期: 2021-07-10; 网络出版日期: 2022-05-27

处理液。用聚乙二醇 6000 (PEG) 模拟干旱胁迫, 根据 SLs、n-K₂MoO₄ 和 SLs+n-K₂MoO₄ 各 4 个浓度梯度的预试验结果, 分别设置处理液为蒸馏水 (CK1), 15% PEG (CK2), 0.10μmol/L GR24+15% PEG (T1), 0.24mmol/L n-K₂MoO₄+15% PEG (T2), 0.10μmol/L GR24+0.24mmol/L n-K₂MoO₄+15% PEG (T3), SLs 和 n-K₂MoO₄ 溶于 15% PEG 溶液中。将培养皿放到人工气候箱 (三洋 MLR-350) 中, 在光照/黑暗 25℃ 16h/20℃ 8h、湿度 70% 条件下发芽。每 2d 更换底部滤纸, 加入各处理液 5mL。试验重复多次, 7d 后取样测定幼苗农艺性状和生理指标。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 发芽率、发芽指数和活力指数 每天观察并统计供试材料发芽情况, 以胚根长度不小于种子直径一半作为发芽标准。以幼茎直立, 子叶平展, 子叶由淡黄转为绿色为出苗标准。各指标计算方法^[14]如下: 发芽率 (germination rate, GR, %) = 发芽数/供试种子数×100; 平均发芽时间 (mean germination time, MT) = $\sum(n_i \times d_i/n)$, 式中, n_i 为第 i 天发芽种子数, d_i 为开始播种天数, n 为发芽的种子总数; 发芽指数 (germination index, GI) = $(n_1/1) + (n_2/2) + \dots + (n_i/i)$, 式中, n_1, n_2, \dots, n_i 为第 1, 2, ..., i 天发芽数量; 活力指数 (vigour index, VI) = 发芽率×(根长+胚芽长)。

1.3.2 胚根长、侧根数及干重 发芽 7d 后取长势一致的 10 棵幼苗, 分别测定苗高、胚根长和侧根数。测量完后将子叶和胚根放入烘箱中, 105℃ 杀青 30min, 80℃ 烘干至恒重, 称地上和地下干重。所有性状取 10 个幼苗的平均值。

1.3.3 叶绿素含量 采用分光光度法测定幼苗叶片叶绿素含量, 叶绿素 a (Chl a)、叶绿素 b (Chl b) 和类胡萝卜素分别在 665、649 和 470nm 有最大吸收峰。取 0.2g 叶片, 用 95% 乙醇提取油菜叶片叶绿素, 根据分光光度计测定的吸光值, 计算叶绿素含量^[16]。

1.3.4 生理指标 幼苗叶片超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化物酶 (POD) 活性及丙二醛 (MDA)、过氧化氢 (H₂O₂)、超氧阴离子 (O₂⁻·)、脯氨酸 (Pro) 和可溶性糖 (SS) 含量均由北京索莱宝科技有限公司的相应试剂盒测定, 每个指标重复 3 次。SOD、POD 和 MDA 测定试剂盒所用提取液为同一种, 可同时测定。以上测量指标所用样品质量分别为 0.1g, 测定步骤严格按照试剂盒说明书操作。

1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2007 录入数据和计算, 利用 SigmaPlot 10.0 软件绘图, SPSS 17.0 软件进行数据的单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和相关性分析 (pearson correlation coefficient), 采用 LSD 法测验 $\alpha < 0.05$ 水平上的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫和生长调节物质对油菜种子萌发性状的影响

由表 1 可知, 与 CK1 处理相比, 干旱胁迫 (CK2) 显著降低了秦优 8 号种子 GR, 使 2 个品种的种子发芽时间增加。CK2 处理 Q2 和秦优 8 号的 GR、GI、VI 与对照 (CK1) 比均有所降低。CK2 处理下, Q2 种子 GR、GI、VI 和出苗率分别比 CK1 处

表 1 干旱和 SLs、n-K₂MoO₄ 对于旱胁迫下油菜种子萌发性状的影响
Table 1 Effects of drought and SLs、n-K₂MoO₄ on the germination traits of rapeseed under drought stress

品种 Variety	处理 Treatment	GR (%)	GI	MT	VI	出苗率 Rate of emergence (%)
Q2	CK1	100.00±0.00a	58.82±1.15a	1.10±0.09e	515.82±35.92b	97.78±3.85a
	CK2	98.89±0.96a	30.88±0.70f	3.30±0.11b	51.46±7.43f	35.56±10.18d
	T1	100.00±0.00a	53.18±1.60bc	1.48±0.13de	686.09±13.22a	73.33±2.89b
	T2	100.00±0.00a	36.80±0.19e	2.73±0.05c	257.13±10.51d	62.22±11.10bc
	T3	100.00±0.00a	51.25±1.25cd	1.61±0.11d	189.78±4.88e	76.11±10.72b
秦优 8 号 Qinyou 8	CK1	100.00±0.00a	55.40±2.92ab	1.32±0.21de	454.05±43.46c	96.67±4.41a
	CK2	40.67±16.17b	8.06±1.84g	6.64±0.85a	16.55±5.95f	16.67±6.67e
	T1	98.89±1.93a	39.77±0.49e	2.58±0.05c	456.9±45.99c	34.44±2.55d
	T2	98.61±0.00a	31.38±3.98f	3.04±0.13bc	147.65±1.84e	44.44±12.95 d
	T3	98.89±1.93a	49.39±1.40d	1.72±0.17d	186.54±57.76e	49.44±13.98cd

同列不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平, 下同

Different letters in a column indicate significant difference among treatments at the 5% level, the same below

理降低了 1.11%、47.50%、90.02%和 63.63%；秦优 8 号相应指标分别降低了 59.33%、85.45%、96.36%和 82.76%。干旱胁迫（CK2）下，Q2 的 GR、GI、VI 和出苗率均显著高于秦优 8 号。

外源 SLs 和 n-K₂MoO₄ 处理后种子 GR、GI 和 VI 明显高于 CK2 处理（表 1），其中 T3 处理促进种子出苗效果最好，Q2 种子 GR、GI、VI 和出苗率比 CK2 处理分别提高 1.12%、65.97%、268.79%和 114.03%；秦优 8 号的 T3 处理比 CK2 处理分别

提高 143.15%、512.78%、1027.13%和 196.58%。

2.2 干旱胁迫和生长调节物质对油菜幼苗农艺性状的影响

由表 2 可知，PEG 胁迫使 Q2 和秦优 8 号的干重、主根长、侧根数和侧根长与 CK1 处理相比均有降低。Q2 种子幼苗干重、主根长、侧根长和侧根数分别比 CK1 处理（正常条件）降低了 17.57%、81.08%、84.20%和 75.00%；秦优 8 号相应指标分别降低了 20.65%、71.05%、92.36%和 85.71%，差

表 2 干旱和 SLs、n-K₂MoO₄ 对干旱胁迫下油菜幼苗农艺性状的影响
Table 2 Effects of drought and SLs、n-K₂MoO₄ on the agronomic traits of rape seedlings under drought stress

品种 Variety	处理 Treatment	干重 (mg/株) Dry weight (mg/plant)	主根长 (cm/株) Main root length (cm/plant)	侧根长 (cm/株) Lateral root length (cm/plant)	侧根数 Root hair number
Q2	CK1	30.90±1.59cd	7.40±0.72c	7.09±1.41a	8.00±1.31b
	CK2	25.47±5.18ef	1.40±0.18g	1.12±0.40ef	2.00±0.36c
	T1	37.46±2.75a	12.24±0.43a	3.17±0.85bc	10.00±2.31a
	T2	36.93±1.53a	6.15±0.47d	2.12±1.49cde	3.00±1.22c
	T3	35.57±1.40ab	2.96±0.07ef	1.27±0.21def	4.00±0.58c
秦优 8 号 Qinyou 8	CK1	26.97±0.90de	7.08±0.50cd	4.19±0.26b	7.00±1.67b
	CK2	21.40±1.82f	2.05±0.41fg	0.32±0.07f	1.00±0.23c
	T1	27.30±1.70de	10.87±0.77b	3.59±0.76bc	11.00±0.67a
	T2	32.33±1.60bc	3.63±0.45e	2.40±0.40cd	3.00±0.50c
	T3	31.10±3.30cd	3.22±1.37e	1.23±0.35def	3.00±0.58c

异均达到显著水平（ $P<0.05$ ）。

T1、T2 和 T3 处理下 2 个品种的种子主根长、侧根数及幼苗生长势均与 CK2（干旱胁迫）有显著性差异。T1 处理下，Q2 的干重、主根长、侧根长和侧根数分别比 CK2 处理提高了 47.07%、774.29%、183.04%和 400.00%；秦优 8 号相应指标分别比 CK2 处理提高了 27.57%、430.24%、1021.88%和 1000.00%，差异均达到显著水平（ $P<0.05$ ）。

2.3 干旱胁迫和生长调节物质对幼苗叶片叶绿素含量的影响

由表 3 可知，大部分干旱处理显著降低了油菜叶片的叶绿素含量。Q2 的 Chl a、Chl b、Chl a+b 和 Chl a/Chl b 的降低率分别为 19.15%、12.73%、17.03%和 7.39%；秦优 8 号分别为 19.32%、16.62%、18.33%和 3.51%。干旱胁迫下，外源 SLs 和 n-K₂MoO₄ 显著降低了叶绿素含量的降低幅度，其中 T2 处理

表 3 干旱和 SLs、n-K₂MoO₄ 对干旱胁迫下油菜叶片叶绿素含量的影响
Table 3 Effects of drought and SLs、n-K₂MoO₄ on chlorophyll content of rape seedlings under drought stress mg/g FW

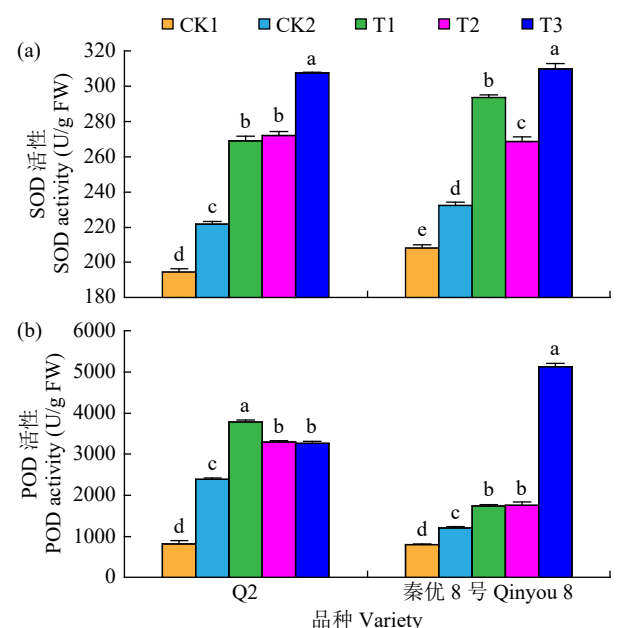
处理 Treatment	Chl a		Chl b		Chl a+b		Chl a/Chl b	
	Q2	秦优 8 号 Qinyou 8	Q2	秦优 8 号 Qinyou 8	Q2	秦优 8 号 Qinyou 8	Q2	秦优 8 号 Qinyou 8
CK1	8.93±0.32bc	6.78±0.66e	4.40±0.19abc	3.97±0.36bce	13.33±0.49bc	10.75±1.02d	2.03±0.04bc	1.71±0.01d
CK2	7.22±0.31e	5.47±0.37f	3.84±0.19cef	3.31±0.24f	11.06±0.37d	8.78±0.60e	1.88±0.12d	1.65±0.03e
T1	8.28±0.12cd	6.89±0.60e	4.27±0.19abc	4.10±0.29bce	12.55±0.31c	10.98±0.39d	1.94±0.06c	1.69±0.27d
T2	10.04±0.59a	7.96±0.29d	4.73±0.20a	4.77±0.88a	14.77±0.79a	12.72±0.59c	2.12±0.05a	1.71±0.35c
T3	9.45±0.42ab	5.93±0.32f	4.53±0.14ab	3.58±0.08ef	13.98±0.57ab	9.52±0.40e	2.08±0.03ab	1.65±0.06e

的作用更明显，Q2 的 Chl a、Chl b、Chl a+b 和 Chl a/Chl b 分别增加了 39.06%、23.18%、33.54%和 12.77%；秦优 8 号分别为 45.52%、44.11%、44.87%和 3.64%，差异均达到显著水平（ $P<0.05$ ）。

2.4 干旱胁迫和生长调节物质对油菜幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

如图 1 所示，干旱胁迫提高了 SOD 和 POD 活性，与 CK1 处理相比，Q2 幼苗叶片 SOD 和 POD

活性分别提高了 14.03% 和 193.33%，秦优 8 号分别提高了 11.53% 和 51.29%。在 15%PEG 中加入 SLs、 $n-K_2MoO_4$ 的处理能显著提高这 2 种酶的活性，T1 处理与 CK2 处理相比，Q2 幼苗叶片 SOD 和 POD 活性分别增加了 21.44% 和 58.00%；秦优 8 号 SOD 和 POD 活性分别增加了 26.50% 和 44.23%。T2 与 CK2 处理相比，Q2 中 SOD 和 POD 活性分别增加了 22.81% 和 37.69%；秦优 8 号中 SOD 和 POD 活性分别增加了 15.72% 和 45.63%。T3 与 CK2 处理相比，Q2 中 SOD 和 POD 活性分别增加了 38.78% 和 36.69%；秦优 8 号中 SOD 和 POD 活性分别增加了 33.52% 和 324.04%。



不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平，下同
Different letters mean significant difference among treatments at the 5% level, the same below

图 1 干旱和 SLs、 $n-K_2MoO_4$ 处理对油菜叶片 SOD 和 POD 活性的影响
Fig.1 Effects of drought and SLs, $n-K_2MoO_4$ on the SOD and POD activities of oilseed rape leaves

2.5 干旱胁迫和生长调节物质对油菜幼苗叶片活性氧含量的影响

由图 2 可知，15% PEG 显著提高了油菜子叶中的活性氧含量，与对照处理相比，Q2 子叶中 O_2^- 、 H_2O_2 和 MDA 含量分别上升了 91.62%、49.86% 和 517.42%，秦优 8 号分别上升了 192.18%、48.56% 和 559.62%。在 15% PEG 中加入 SLs、 $n-K_2MoO_4$ 的处理显著降低了 O_2^- 的含量，T1 与 CK2 处理相比，Q2 的 O_2^- 、 H_2O_2 和 MDA 含量分别减少了 37.73%、16.10% 和 23.10%；秦优 8 号中三者含量

分别减少了 56.14%、21.04% 和 62.89%。T2 与 CK2 处理相比，Q2 中 O_2^- 、 H_2O_2 和 MDA 含量分别减少了 34.49%、21.06% 和 31.92%；秦优 8 号中三者含量分别减少了 46.20%、10.37% 和 49.69%。T3 与 CK2 处理相比，Q2 中 O_2^- 、 H_2O_2 和 MDA 含量分别减少了 40.81%、14.82% 和 74.11%；秦优 8 号中三者含量分别减少了 54.01%、23.52% 和 75.22%。

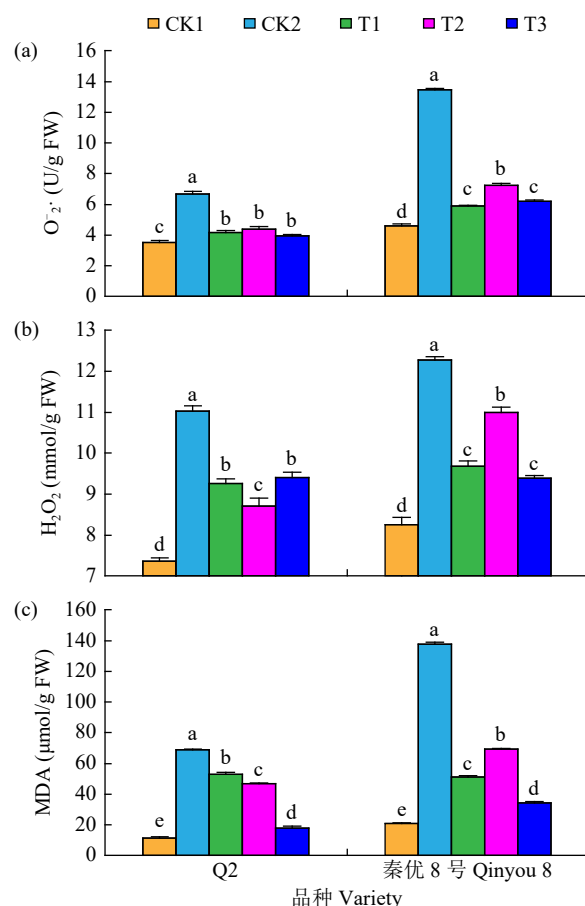


图 2 干旱和 SLs、 $n-K_2MoO_4$ 处理对油菜叶片活性氧含量的影响
Fig.2 Effects of drought and SLs, $n-K_2MoO_4$ on the active oxygen contents of oilseed rape leaves

2.6 干旱胁迫和生长调节物质对油菜幼苗叶片渗透调节物质含量的影响

与正常处理相比，渗透胁迫提高了叶片中 SS 和 Pro 含量（图 3），Q2 分别增加了 79.34% 和 674.31%；秦优 8 号分别增加了 10.34% 和 348.05%。SLs、 $n-K_2MoO_4$ 处理提高 SS 和 Pro 含量，T1 与 CK2 处理相比，Q2 叶片中 SS 和 Pro 含量分别提高了 20.64% 和 57.93%；秦优 8 号叶片中 SS 和 Pro 含量分别提高了 42.67% 和 197.81%。T2 与 CK2 处理相比，Q2 叶片中 SS 和 Pro 含量分别提高了 38.07%

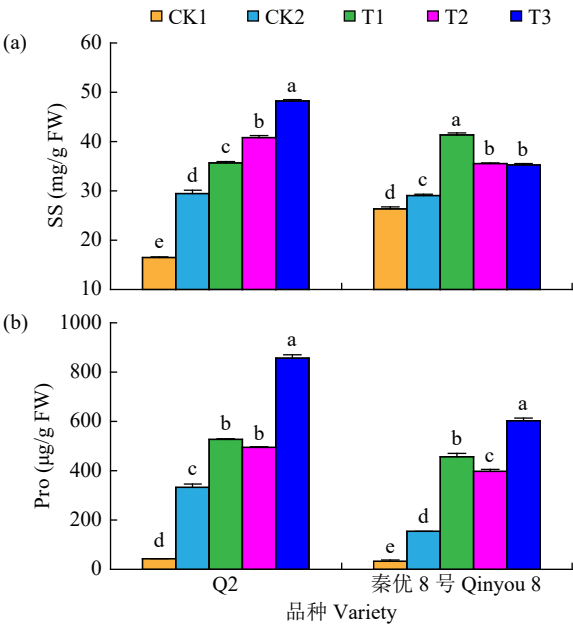


图 3 干旱和 SLs、n-K₂MoO₄ 处理对油菜叶片 SS 和 Pro 含量的影响

Fig.3 Effects of drought and SLs, n-K₂MoO₄ on soluble sugar and proline contents of rape leaves

和 48.28%；秦优 8 号叶片中 SS 和 Pro 含量分别提高了 22.62% 和 158.73%。T3 与 CK2 处理相比，Q2 叶片中 SS 和 Pro 含量分别提高了 63.35% 和 157.03%；秦优 8 号叶片中 SS 和 Pro 含量分别提高了 21.75% 和 292.15%。

2.7 干旱胁迫下种子萌发相关指标与幼苗生理指标相关性分析

由表 4 可知，种子萌发相关指标中 GR、GI、VI 与 DW 之间存在极显著或显著正相关，与平均发芽时间为极显著负相关 ($P<0.01$)。种子萌发相关指标 (GR、GI 和 VI) 与 MDA、H₂O₂ 和 O₂⁻ 之间存在极显著负相关 ($P<0.01$)。Pro 和 SS 含量与 DW、SOD、POD 活性为显著或极显著正相关，但和 LRL 为极显著负相关 ($P<0.01$)。

3 讨论

种子萌发是植物生长过程中的起始阶段，也是

表 4 种子萌发相关指标与幼苗生理指标的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between seed germination parameters and physiological indexes in seedlings

指标 Index	GR	GI	VI	MT	DW	LRL	MRL	Chl	SOD	POD	MDA	H ₂ O ₂	O ₂ ⁻	Pro	SS
GR	1														
GI	0.731**	1													
VI	0.462*	0.683**	1												
MT	-0.836**	-0.965**	-0.626**	1											
DW	0.591**	0.428*	0.455*	-0.514**	1										
LRL	0.067	0.438*	0.650**	-0.303	-0.066	1									
MRL	0.211	0.357	0.878**	-0.330	0.227	0.561**	1								
Chl	0.543**	0.334	0.339	-0.389	0.727**	0.115	0.183	1							
SOD	0.201	-0.027	-0.124	-0.064	0.470*	-0.585**	-0.177	0.108	1						
POD	0.287	0.154	-0.056	-0.198	0.519**	-0.489**	-0.154	0.080	0.744**	1					
MDA	-0.817**	-0.925**	-0.530**	0.939**	-0.511**	-0.361	-0.169	-0.506**	-0.089	-0.169	1				
H ₂ O ₂	-0.629**	-0.862**	-0.720**	0.844**	-0.478**	-0.658**	-0.417*	-0.486**	0.126	-0.027	0.883**	1			
O ₂ ⁻	-0.889**	-0.890**	-0.645**	0.935**	-0.672**	-0.322	-0.358	-0.670**	-0.105	-0.232	0.927**	0.852**	1		
Pro	0.308	0.062	-0.136	-0.146	0.576**	-0.596**	-0.234	0.320	0.909**	0.789**	-0.188	0.081	-0.260	1	
SS	0.181	-0.130	-0.185	0.040	0.453*	-0.647**	-0.165	0.280	0.887**	0.562**	-0.023	0.195	-0.115	0.891**	1

DW、LRL、MRL、Chl 分别表示干重、侧根总长、主根长、叶绿素含量。“***”表示极显著相关 ($P<0.01$)，“**”表示显著相关 ($P<0.05$)。DW, LRL, MRL and Chl indicate dry weight, lateral root length, main root length, and chlorophyll content, respectively. “***” indicates extremely significant correlation at the 0.01 probability level, “**” indicates significant correlation at the 0.05 probability level

保证出苗的前提^[17]。而干旱会常造成油菜种子发芽延缓、生长缓慢和干物质积累减少^[18-19]。作物萌发期干旱常用高渗溶液模拟，如聚乙二醇、甘露醇和蔗糖等，15%浓度以上的 PEG 能显著抑制作物种子发芽率、发芽指数及幼苗生物量^[20]。胡承伟等^[21]发现，14% PEG 渗透胁迫明显抑制油菜根鲜重和侧根数目。这些与本研究结果一致。另外，本研究发现干旱胁迫严重影响根长生长，而且抗旱性品种

Q2 在干旱胁迫下具有较高的 GR、GI 和 VI。

MDA 是膜脂过氧化的主要产物之一^[22]，可作为植物细胞膜损伤程度的指标^[23]。干旱胁迫在细胞水平上显著加速 ROS 的生成^[24-26]，ROS 的自由基主要包括 O₂⁻、过羟基自由基 (HO₂) 和烷氧自由基 (RO)，而 H₂O₂ 和单线态氧 (O₂) 则以非自由基的分子形式存在^[27-28]。本萌发试验结果表明，干旱胁迫下，与正常供水相比，Q2 子叶中 MDA 和

O_2^- 含量上升幅度低于秦优 8 号, 说明抗旱油菜品种受干旱伤害较轻。SOD 是超氧化物主要清除剂, 产生 H_2O_2 , 由 POD 通过酚类化合物或抗氧化剂分解 H_2O_2 ^[28-29], 从而提高植物抗旱能力。本研究在干旱处理后, 2 个油菜品种 SOD 和 POD 活性显著上升。Pro 和 SS 通过降低细胞渗透势来维持细胞膨压, 防止细胞脱水, 减轻逆境对细胞的伤害^[30]。本研究结果表明干旱处理后抗旱品种 Q2 的 Pro 和 SS 含量较高。

SLs 可以促进种子萌发, 调控根系构型, 增加根毛长度, 促进次生生根^[31-32], 外施 SLs 可显著缓解上述干旱胁迫对植物造成的伤害。纳米材料因独特的物理和化学特性广泛应用于植物生产中, 可刺激植物生长, 改善植物的生长环境, 促进植物代谢^[33]。本研究中 SLs 和 $n-K_2MoO_4$ 分别处理以及 SLs+ $n-K_2MoO_4$ 处理显著缓解了干旱对敏感品种油菜种子萌发的抑制, 尤其是 SLs+ $n-K_2MoO_4$ 对油菜种子 GR 的促进作用最大。而本研究中 SLs+ $n-K_2MoO_4$ 互作对种子根长和侧根数的促进作用小于 SLs 和 $n-K_2MoO_4$ 各自处理, 其作用机制需要进一步研究。

Mojde 等^[32]发现, SLs 处理的植物对干旱胁迫有较强的耐受性, 具有较高的抗氧化酶活性和渗透调节物质。纳米材料可促进逆境胁迫下植物 SOD、POD 和 CAT 活性升高^[33]。本研究中, SLs、 $n-K_2MoO_4$ 处理后各油菜品种 MDA、 H_2O_2 、 O_2^- 含量都显著下降, 说明 SLs 和 $n-K_2MoO_4$ 对干旱造成的 MDA、 H_2O_2 和 O_2^- 含量升高具有抑制作用, SLs 和 $n-K_2MoO_4$ 可以缓解干旱对油菜幼苗伤害。另外, SLs 和 $n-K_2MoO_4$ 提高油菜幼苗 SOD、POD 活性和 SS、Pro 含量, 也从侧面说明油菜幼苗抗旱性有所增强。其中 $0.10\mu mol/L$ GR24+ $0.24mmol/L$ $n-K_2MoO_4$ 对 SOD 和 POD 活性的促进作用以及对 MDA 含量的抑制效果更加明显。

4 结论

抗旱品种 Q2 在干旱胁迫后种子 GR、GI、VI、出苗率、芽长及 SOD、POD 活性、SS、Pro 含量高于干旱敏感型品种秦优 8 号, MDA、 H_2O_2 、 O_2^- 含量低于秦优 8 号。SLs、 $n-K_2MoO_4$ 对干旱引起的种子出苗率低和幼苗生长慢等现象均有一定的缓解作用, SLs 主要促进种子根系生长和侧根分化, $n-K_2MoO_4$ 主要增加了叶片叶绿素含量, 而 SLs+ $n-K_2MoO_4$ 处理对干旱胁迫下种子萌发出苗和缓解

细胞氧化损伤的效应较好。

参考文献

- [1] 王汉中. 以新需求为导向的油菜产业发展战略. 中国油料作物学报, 2018, 40(5): 613-617.
- [2] 刘吉磊. 长江中下游地区油菜生产能力遥感估算及增产潜力分析. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [3] 张树杰, 王汉中. 我国油菜生产应对气候变化的对策和措施分析. 中国油料作物学报, 2012, 34(1): 114-122.
- [4] 张静. 干旱对油菜萌发出苗与生长的影响及抗旱机制研究. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [5] Akiyama K, Matsuzaki K, Hayashi H. Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi. Nature, 2005, 435(7043): 824-827.
- [6] Mostofa M G, Li W, Nguyen K H, et al. Strigolactones in plant adaptation to abiotic stresses: An emerging avenue of plant research. Plant Cell and Environment, 2018, 41(10): 2227-2243.
- [7] Van H C, Leyva M, Osakabe Y, et al. Positive regulatory role of strigolactone in plant responses to drought and salt stress. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(2): 851-865.
- [8] Ma N, Hu C, Wan L, et al. Strigolactones improve plant growth, photosynthesis, and alleviate oxidative stress under salinity in rapeseed (*Brassica napus* L.) by regulating gene expression. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1671.
- [9] 程鸿燕. 独脚金内酯对干旱胁迫下谷子生理生化及转录组响应模式的影响. 太原: 山西农业大学, 2019.
- [10] 万林, 李张开, 李素, 等. 外源独脚金内酯对油菜苗期干旱胁迫的缓解效应. 中国油料作物学报, 2020, 42(3): 461-471.
- [11] 尹勇, 刘灵. 三种纳米材料对水稻幼苗生长及根际土壤肥力的影响. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 736-743.
- [12] 路轲. 喷施不同纳米材料对水稻幼苗生长和磷吸收的影响. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- [13] 姜余梅, 刘强, 赵怡情, 等. 碳纳米管对水稻种子萌发和根系生长的影响. 湖北农业科学, 2014(5): 1010-1012.
- [14] Xiong J L, Li J, Wang H C, et al. Fullerenol improves seed germination, biomass accumulation, photosynthesis and antioxidant system in *Brassica napus* L. under water stress. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 129: 130-140.
- [15] 张坤. 钼酸锌纳米片的制备及其非线性光学特性研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [17] 尹美强, 王栋, 王金荣, 等. 外源一氧化氮对盐胁迫下高粱种子萌发及淀粉转化的影响. 中国农业科学, 2019, 52(22): 4119-4128.
- [18] Rivero R M, Shulaev V, Blumwald E. Cytokinin-dependent photorespiration and the protection of photosynthesis during water deficit. Plant Physiology, 2009, 150(3): 1530-1540.
- [19] Khan M N, Zhang J, Luo T, et al. Seed priming with melatonin coping drought stress in rapeseed by regulating reactive oxygen species detoxification: Antioxidant defense system, osmotic adjustment, stomatal traits and chloroplast ultrastructure perseveration. Industrial Crops and Products, 2019, 140(15): 111597.
- [20] 何久军, 赵淑玲, 王昱, 等. PEG-6000 胁迫对三种类型鲜食玉米种子萌发的影响. 种子, 2021, 40(2): 96-101, 105.
- [21] 胡承伟, 张学昆, 邹锡玲, 等. PEG 模拟干旱胁迫下甘蓝型油

- 菜的根系特性与抗旱性. 中国油料作物学报, 2013, 35(1): 48-53.
- [22] 杨春杰, 张学昆, 邹崇顺, 等. PEG-6000 模拟干旱胁迫对不同甘蓝型油菜品种萌发和幼苗生长的影响. 中国油料作物学报, 2007(4): 425-430.
- [23] Meloni D A, Oliva M A, Martinez C A, et al. Photosynthesis and activity of superoxide dismutase, peroxidase and glutathione reductase in cotton under salt stress. Environmental and Experimental Botany, 2003, 49(1): 69-76.
- [24] Nath M, Bhatt D, Prasad R, et al. Reactive oxygen species generation-scavenging and signaling during plant-arbuscular mycorrhizal and piriformospora indica interaction under stress condition. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 1574.
- [25] Apel K, Hirt H. Reactive oxygen species: Metabolism, oxidative stress, and signal transduction. Annual Review of Plant Biology, 2004, 55: 373-99.
- [26] 肖爽, 韩雨辰, 号宇然, 等. 聚乙二醇引发对盐胁迫下棉种萌发及生理特性的影响. 核农学报, 2021, 35(1): 202-210.
- [27] Niu Y F, Chai R S, Jin G L, et al. Responses of root architecture development to low phosphorus availability: a review. Annals of Botany, 2013, 112(2): 391-408.
- [28] 吴佳妮, 杨天志, 连加, 等. 聚苯乙烯纳米塑: (PSNPs) 对大豆 (*Glycinemax*) 种子发芽和幼苗生长的影响. 环境科学学报, 2020, 40(12): 4581-4589.
- [29] Sun H, Tao J, Liu S, et al. Strigolactones are involved in phosphate- and nitrate-deficiency-induced root development and auxin transport in rice. Journal Experimental Botany, 2014, 65 (22): 6735-6746.
- [30] 陆长梅, 张超英, 温俊强, 等. 纳米材料促进大豆萌芽、生长的影响及其机理研究. 大豆科学, 2002(3): 168-171, 241.
- [31] 李畅, 苏家乐, 刘晓青, 等. 干旱胁迫对鹿角杜鹃种子萌发和幼苗生理特性的影响. 西北植物学报, 2015, 35(7): 1421-1427.
- [32] Mojde S, Zeinolabedin T S, Yahya E, et al. Physiological and antioxidant responses of winter wheat cultivars to strigolactone and salicylic acid in drought. Plant Physiology and Biochemistry, 2017, 119: 59-69.
- [33] 邹京南, 曹亮, 王梦雪, 等. 外源褪黑素对干旱胁迫下大豆结荚期光合及生理的影响. 生态学杂志, 2019, 38(9): 2709-2718.

Effects of Exogenous SLs and Nano-K₂MoO₄ on Seed Germination of *Brassica napus* L. under Drought Stress

Pang Xingyue, Wan Lin, Li Su, Wang Yuhang, Liu Chen, Xiao Xiaolu, Li Xinhao, Ma Ni

(Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Oil Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430062, Hubei, China)

Abstract Drought stress is one of the major abiotic constraints affecting rapeseed (*Brassica napus* L.) germination and growth. Using Q2 (drought-resistant) and Qinyou 8 (sensitive) as materials, the effects of drought on germination and the physiological mechanism of seed germination under drought treated by exogenous growth regulators strigolactones (SLs) and nanomaterials (n-K₂MoO₄) were explored. The findings demonstrated that drought stress significantly inhibited seed germination, SLs and n-K₂MoO₄ significantly increased germination rate, seedling dry weight, and cotyledon chlorophyll content, as well as superoxide dismutase and peroxidase activities and soluble sugar, proline, and decreased malondialdehyde contents. In comparison to other treatments, 0.10μmol/L GR24 with 0.24mmol/L n-K₂MoO₄ exhibited stronger mitigation effects on seed germination and oxidative damage. According to this study, exogenous SLs and n-K₂MoO₄ could increase the activities of protective enzymes and the levels of osmotic regulators during rapeseed germination, which improved the ability to withstand drought. The results indicate plant hormones and nanomaterials might be used in agriculture.

Key words Strigolactones; Nanomaterial; Drought stress; Seed germination; Physiological mechanism