

萘乙酸钠与吲哚丁酸钾对大豆苗期低温胁迫的缓解作用

杨昊^{1,2} 谷文文^{1,2} 方淑梅^{2,3} 姜海鹏^{1,2} 梁喜龙^{1,2} 王庆燕^{1,2}

(¹黑龙江八一农垦大学农学院, 163319, 黑龙江大庆; ²黑龙江省植物生长调节剂工程技术研究中心, 163319, 黑龙江大庆; ³黑龙江八一农垦大学生命科技学院, 163319, 黑龙江大庆)

摘要 为明确生长素对大豆苗期低温胁迫的缓解作用, 以垦农 18 为供试品种, 以萘乙酸钠 (NAA-Na) 与吲哚丁酸钾 (IBA-K) 及其复配种子包衣处理, 从形态表型、抗氧化和渗透调节等角度, 探究 NAA-Na 与 IBA-K 对苗期低温胁迫的缓解作用。结果表明, NAA-Na 和 IBA-K 包衣处理可降低活性氧的积累和超氧阴离子 (O_2^-) 产生速率, 使得过氧化氢 (H_2O_2) 以及丙二醛积累显著降低; 大豆幼苗的渗透调节能力提高, 可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸增加; 超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶等抗氧化酶活性增强, 并促进抗坏血酸-谷胱甘肽 (AsA-GSH) 循环, 进而缓解低温胁迫对大豆幼苗的损伤, 使大豆幼苗地上及根部干物质积累增加, 减轻了低温胁迫对大豆产量造成的影响, 使大豆株荚数、株粒数、百粒重与单株粒重显著提高。

关键词 大豆; 低温胁迫; 生长素类调节剂; 活性氧; 化控技术

大豆 (*Glycine max*) 是粮油饲兼用作物, 在国计民生中扮演着重要角色^[1]。黑龙江是我国春大豆产区之一, 属高纬度地区, 春季昼夜温差变化大, 低温冷害频发, 成为制约大豆生产的重要环境因素之一。作为喜温作物, 大豆对温度变化敏感, 低温冷害在整个生育阶段都会对大豆造成伤害, 出苗期和幼苗期则更为严重^[2]。研究^[3-5]表明大豆在苗期遭遇低温, 会造成出苗不齐, 生长缓慢, 叶片黄化, 豆苗弱, 生育期延后, 干物质积累变慢, 最终导致减产。

低温 (low temperature, LT) 是高等植物遭遇的最具危害性的环境胁迫之一。根据温度可将低温胁迫分为低温冷害 ($<20\text{ }^\circ\text{C}$) 和冻害 ($<0\text{ }^\circ\text{C}$)^[6]。冷害会对植物的生长发育产生不利影响, 致使气孔关闭, 光合作用和蒸腾作用减弱, 进而使植物根系对水分和营养物质的吸收能力降低, 地上与地下部分干物质积累受到限制, 导致植株生长迟缓^[7-8]。植物对低温胁迫的响应以及耐冷性的建立是一个复杂的过程, 在未达到冻害的低温下, 植物会通过一系列生理生化变化提升耐冷能力。植物感知到低温信号后, 会通过积累渗透物质来缓解低温引发的渗透胁迫, 上调各种抗氧化酶活性以抵御低温导致的氧化胁迫, 还会通过复杂的信号级联反应诱导与低温胁迫响应相关基因的表达, 从而使植物能够耐受

寒冷乃至冰冻的温度^[9], 而这些交错的信号级联离不开植物激素的调控。

生长素 (auxin, IAA) 作为一种重要的植物内源激素, 不仅参与植物的生长发育, 在植物抗逆中也发挥着重要调控作用。外源施用 IAA 对缓解作物重金属^[10]和盐胁迫^[11]均有较好的作用, 同时, IAA 对低温胁迫的缓解作用也在多种作物中获得证明。IAA 的积累可显著增强油菜抗寒性^[12], 也可通过调节 IAA 含量来缓解桃果实的寒害症状^[13]。生长素类似物褪黑素 (melatonin, MT) 被证明在缓解大豆^[14]和番茄^[15]低温胁迫伤害起着重要作用; 采用 IAA 或 MT 对马铃薯的根系进行短期处理, 能够激活马铃薯对低温后期影响的保护反应^[16]。萘乙酸钠 (NAA-Na) 与吲哚丁酸钾 (IBA-K) 是 2 类生长素的盐类衍生物, 对植物根部具有显著的促生效果, 且可提高植物根系抗逆性, 目前多用于乔木扦插和生根等方面。

本研究以黑龙江地区主栽高油大豆品种垦农 18 为试验材料, 于大豆子叶期进行低温胁迫, 从形态建成、抗氧化能力、渗透调节及产量等方面, 探究 NAA-Na 与 IBA-K 单剂及其复配包衣处理对大豆低温胁迫的缓解效应。为强化大豆耐低温研究提供理论基础, 并为保障黑龙江地区的大豆苗期安全生产提供理论依据。

作者简介: 杨昊, 主要从事作物化学调控研究, E-mail: 1186839452@qq.com

梁喜龙为通信作者, 主要从事化学调控与作物高产及抗逆研究, E-mail: xilongliang@126.com

基金项目: 黑龙江八一农垦大学“三横三纵”支持计划 (2018 年度平台支持计划); 黑龙江省自然科学基金联合引导项目 (LH2024C078); 黑龙江省自然科学基金重点项目 (ZD2017003); 国家自然科学基金面上项目 (31571613)

收稿日期: 2025-01-16; 修回日期: 2025-04-18; 网络出版日期: 2025-05-29

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验于 2023–2024 年在黑龙江八一农垦大学农学院 (45°46' N, 124°19' E) 温室及盆栽场进行。供试品种为垦农 18 (黑龙江八一农垦大学选育), 试验前取籽粒表面无伤、大小均匀的种子备用。供试药剂为 NAA-Na (有效成分 ≥98%, 河南新立源农业科技有限公司) 和 IBA-K (有效成分 ≥98%, 河南新雨化工科技有限公司); 室内盆栽试验所用土壤为草炭土, 盆栽场桶栽试验所用土壤为黑钙土。草炭土基本理化性质为有机质 2.85%、碱解氮 147.74 mg/kg、有效磷 196.45 mg/kg、速效钾 650.94 mg/kg、pH 6.63; 黑钙土基本理化性质为碱解氮 190.44 mg/kg、有效磷 96.50 mg/kg、速效钾 386.55 mg/kg、有机质 2.06%、pH 7.17。

1.2 试验设计

1.2.1 浓度选择 试验采用包衣处理 (调节剂溶液与成膜剂聚乙烯醇以体积比 3:7 的比例均匀混合制成包衣剂, 包衣剂为种子自重的 2%), 分别从 5 个 NAA-Na 浓度 (0、2、5、10 和 15 mg/L) 和 5 个 IBA-K 浓度 (0、40、80、100 和 120 mg/L) 中筛选出单剂最适浓度, 筛选出 NAA-Na 和 IBA-K 的最适浓度分别为 10 和 40 mg/L。根据单剂试验结果, 再次选择 5、10 和 15 mg/L NAA-Na 和 20、40 和 80 mg/L IBA-K 两两组合, 初步确定最适复配浓度, NAA-Na 和 IBA-K 分别为 10 与 80 mg/L。

1.2.2 盆栽种植与低温处理试验 大豆种子经 75% 的乙醇消毒、无菌水冲洗干净, 稍微风干后进行包衣 (表 1), 避光晾干, 然后在以 $V_{\text{草炭土}}:V_{\text{蛭石}}=2:1$ 为栽培基质的塑料盆中种植 (每处理 34 盆), 每盆均匀播种 8 粒 (浇透水, 隔天播种), 覆土 3 cm, 于温室培养 (昼/夜: 16 h/8 h, 23~28 °C/18~23 °C, 光照强度 18 000 lx) 至子叶期, 转移至气候箱 (昼/夜: 16 h/8 h, 8 °C/4 °C, 光照强度 6000 lx) 中低温处理 5 d 后进行移栽, 一部分幼苗转移至温室复温 2 d 定苗, 每盆保苗 4 株, 于复温培养 5、10、15、20 及 25 d 后取完全展开第一片复叶测定生理指标, 并于 20 及 25 d 时取样测定形态指标; 另一部分幼苗直接移栽入大桶 (上口径 30 cm, 下口径 27 cm, 高 37 cm), 每桶保苗 4 株, 置于桶栽场培养至成熟期用于产量分析, 期间管理同大田。所有

试验指标测定均重复 3 次。

表 1 NAA-Na 与 IBA-K 单剂与复配处理应用
Table 1 Application of NAA-Na and IBA-K single dose and combination treatment

处理 Treatment	低温处理时期 Low temperature treatment period	控温+调节剂 Temperature control+regulator
LT	子叶期	低温处理 5 d+清水
CK	子叶期	常温处理+清水
N	子叶期	低温处理 5 d+10 mg/L NAA-Na
K	子叶期	低温处理 5 d+40 mg/L IBA-K
N+K	子叶期	低温处理 5 d+10 mg/L NAA-Na+80 mg/L IBA-K

1.3 测定项目与方法

1.3.1 形态指标 各处理选取 10 株代表性植株, 用清水洗净, 将地上部和根部分开, 分别测量株高、茎粗、叶和茎鲜重; 105 °C 杀青 30 min, 80 °C 烘干至恒重, 测定叶茎干重和根干重。使用 EPSON V700 PHOTO 扫描仪扫描根部, 用 WinRhizo PRO 2016 根系分析软件测定总根长、根表面积、根体积、根尖数及根平均直径。

1.3.2 产量构成因素 待成熟期各处理每盆取 10 株, 共 100 株长势均匀大豆考种, 测定株荚数、株粒数、单株粒重与百粒重。

1.3.3 生理指标 采用硫代巴比妥酸 (TBA) 法测定丙二醛 (MDA) 含量^[17], 采用羟胺法测定超氧阴离子 (O_2^-) 产生速率^[18]; 采用氮蓝四唑 (NBT) 比色法测定超氧化物歧化酶 (SOD) 活性^[19]; 采用愈创木酚比色法测定过氧化物酶 (POD) 活性^[20]; 参照 Fu 等^[21]的方法测定过氧化氢酶 (CAT) 活性; 采用蒽酮比色法测定可溶性糖 (SS) 含量^[22], 采用考马斯亮 G-250 染色法测定可溶性蛋白 (SD) 含量^[23], 采用磺基水杨酸法测定游离脯氨酸 (Pro) 含量^[24]; 采用二联吡啶法^[25]测定总抗坏血酸 (AsA+DHA) 含量; 使用上海优选生物技术有限公司的试剂盒 (YX-W-A400) 测定过氧化氢 (H_2O_2) 含量; 使用苏州格锐思生物技术有限公司的试剂盒 (G0206W, G0207W) 测定总谷胱甘肽 (GSH+GSSG) 含量。

1.4 数据处理

采用 IBM SPSS Statistics 25.0 软件对数据进行单因素方差分析, 采用 Duncan's 新复极差法进行差异显著性检验, 采用 Microsoft Excel 2019 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 萘乙酸钠与吲哚丁酸钾处理对低温胁迫下苗期大豆形态指标的影响

低温胁迫导致大豆生物量积累缓慢。如表 2 所示, 低温显著抑制大豆地上部分生长, 复温 20 与 25 d 时, LT 处理大豆株高、茎粗、叶鲜重、茎鲜

重和地上干重均显著低于 CK 处理, 而此时 N、K 及 N+K 处理各地上部分生物量均显著高于 LT 处理, 其中, N+K 处理缓解效果在复温 20 d 时最好, 其株高、茎粗、茎鲜重及地上干重相较于 LT 处理显著提高, 较为接近 CK 处理; K 处理的缓解效果略弱于 N+K 处理。随着复温时长增加至 25 d, N、K 与 N+K 处理地上各形态指标仍均高于 LT 处理且

表 2 NAA-Na 与 IBA-K 包衣处理对低温胁迫下大豆地上部形态的影响

Table 2 Effects of NAA-Na and IBA-K coating treatments on aboveground morphology of soybean under low temperature stress

复温天数 Rewarming days (d)	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diameter (cm)	叶鲜重 Leaf fresh weight (g)	茎鲜重 Stem fresh weight (g)	地上干重 Aboveground dry weight (g)
20	CK	24.40±0.67a	2.95±0.07a	2.48±0.20a	2.67±0.12a	0.74±0.04a
	LT	19.14±0.41c	2.04±0.61c	1.58±0.22c	1.56±0.16c	0.51±0.04b
	N	21.63±0.38b	2.60±0.08b	2.24±0.09ab	2.45±0.14ab	0.65±0.02a
	K	22.57±0.32ab	2.78±0.09ab	2.39±0.10a	2.17±0.11b	0.68±0.04a
	N+K	23.23±1.48ab	2.79±0.16ab	2.48±0.12ab	2.25±0.20ab	0.68±0.05a
25	CK	27.13±0.52a	3.11±0.12a	2.65±0.03a	2.81±0.06a	0.93±0.06a
	LT	23.20±0.71c	2.43±0.08b	2.00±0.13b	2.02±0.19b	0.66±0.03b
	N	25.33±1.48abc	2.89±0.02a	2.56±0.06a	2.72±0.08a	0.78±0.05ab
	K	24.23±0.37bc	2.85±0.15a	2.57±0.07a	2.63±0.05a	0.79±0.03ab
	N+K	26.93±0.59ab	2.89±0.09a	2.58±0.03a	2.68±0.08a	0.82±0.04a

不同小写字母代表同一复温天数不同处理下差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments for the same rewarming days ($P < 0.05$). The same below.

均接近 CK 处理, 但各处理间差异小。

低温胁迫对大豆根系生长的抑制程度大于地上部分。从表 3 中可以看出, LT 处理总根长、根表面积、根体积、平均直径、根尖数及根干重均显著低于 CK 处理, 且于复温 25 d 时差异仍显著, 说明复温 25 d 时, 低温对根系生长抑制仍未完全恢复。

各包衣处理复温 20 d 时, N+K 处理缓解效果最好, 其总根长、根表面积、根体积、平均根直径

和根尖数相较于 LT 处理均显著提高; K 处理略弱于 N+K 处理。在复温 25 d 时, N、K 和 N+K 处理总根长、根表面积与根尖数较于 LT 处理均有所增加; K 与 N+K 处理对根体积与根干重的促进效果好于 N 处理。至复温 25 d 时, 各包衣处理根系生物量均高于 LT 处理, 但与 CK 处理相比仍差异显著, 即复温 25 d 时各处理根系形态均未恢复至常温对照水平。

表 3 NAA-Na 与 IBA-K 包衣处理对低温胁迫下大豆根部形态的影响

Table 3 Effects of NAA-Na and IBA-K coating treatments on root morphology of soybean under low temperature stress

复温天数 Rewarming days (d)	处理 Treatment	总根长 Total root length (cm)	根表面积 Root surface area (cm ²)	根体积 Root volume (cm ³)	平均根直径 Mean root diameter (mm)	根尖数 Root tip number	根干重 Root dry weight (g)
20	CK	1149±65a	204±13a	4.21±0.30a	0.65±0.01b	794±41a	0.127±0.004a
	LT	655±35c	106±3c	1.73±0.08c	0.61±0.02c	539±28b	0.052±0.003b
	N	706±80bc	117±9bc	2.08±0.11bc	0.64±0.01bc	704±77a	0.056±0.004b
	K	853±63b	131±11bc	2.33±0.27bc	0.67±0.01b	704±38a	0.060±0.006ab
	N+K	855±54b	138±10b	2.41±0.17b	0.74±0.01a	713±36a	0.077±0.004ab
25	CK	1604±106a	269±17a	5.59±0.58a	0.82±0.04a	1109±60a	0.273±0.023a
	LT	697±64d	139±4c	2.43±0.14c	0.62±0.01b	705±67c	0.128±0.007c
	N	969±50c	174±8b	2.71±0.29bc	0.65±0.01b	898±63b	0.148±0.008bc
	K	1242±87b	175±8b	3.57±0.24b	0.67±0.02b	993±69ab	0.161±0.008bc
	N+K	1280±46b	177±12b	3.32±0.19bc	0.69±0.01b	1044±62ab	0.176±0.003b

2.2 萘乙酸钠与吲哚丁酸钾处理对低温胁迫下苗期大豆产量构成因素的影响

低温导致大豆植株生物量及干物质积累量减

少, 且具有持续性, 苗期经历过低温的大豆产量构成因素显著下降。如表 4 所示, LT 与 CK 处理相比, 株荚数、株粒数、单株粒重与百粒重下降。N、

K 及 N+K 处理可增加生物量与干物质积累量，缓解对产量构成因素的影响。其中，N+K 处理单株粒重增加最为明显，较 LT 处理显著增加 45.5%，N 处理单株粒重较 LT 处理显著增加 34.1%；K 处理株荚数、单株粒重、株粒数和百粒重较 LT 处理均显著增加。

表 4 NAA-Na 与 IBA-K 处理对大豆产量构成因素的影响
Table 4 Effect of NAA-Na and IBA-K treatments on yield components of soybean

处理 Treatment	株荚数 Number of pods per plant	株粒数 Number of seeds per plant	百粒重 100-seed weight (g)	单株粒重 Seed weight per plant (g)
CK	56.93±3.63ab	142.87±9.73ab	15.70±0.18a	22.51±1.53a
LT	46.27±4.59b	122.53±12.47b	13.66±0.12b	16.74±1.70b
N	55.93±3.56ab	142.00±8.91ab	15.81±0.28a	22.45±1.41a
K	63.47±5.49a	160.20±13.81a	14.50±0.39b	23.23±2.00a
N+K	59.87±3.34a	154.73±7.85ab	15.75±0.36a	24.36±1.24a

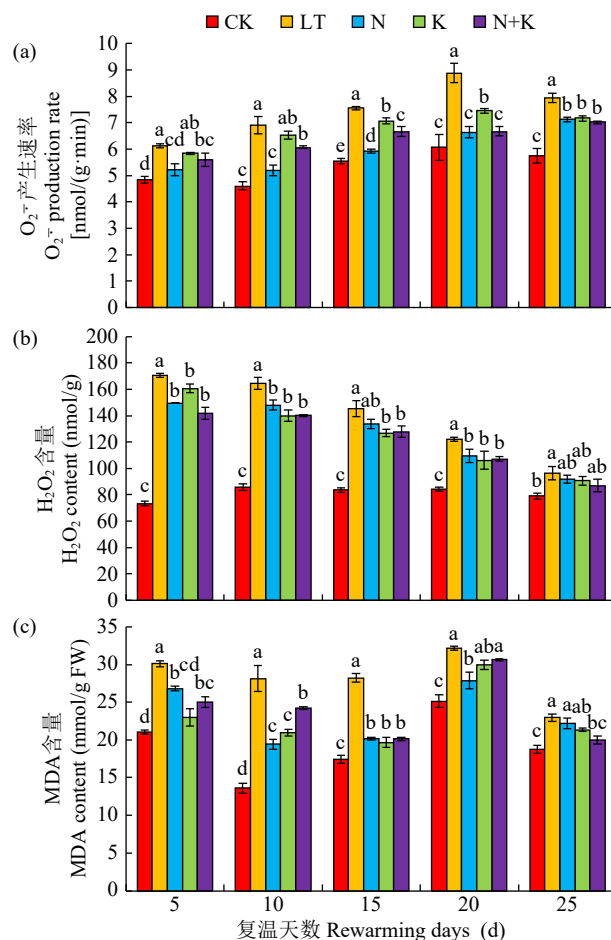
2.3 萘乙酸钠与吲哚丁酸钾处理对低温胁迫下苗期大豆膜脂过氧化作用的影响

如图 1 所示，复温后 5~25 d，LT 处理较 CK 处理 O_2^- 产生速率及 H_2O_2 含量均显著提高。N、K 以及 N+K 处理可降低 ROS 累积，但各处理降幅与达到最大降幅时间不同。复温后 5~25 d，N 与 N+K 处理 O_2^- 产生速率较 LT 处理均降低；K 处理 O_2^- 产生速率的影响略高于 N 与 N+K 处理，仅在复温后 15~25 d 显著低于 LT。N、K 及 N+K 处理对低温下大豆 H_2O_2 含量的降低集中发生在复温 10~20 d，N、K、N+K 处理在此期间相较于 LT 处理均有所降低。

膜脂过氧化作用的主要分解产物 MDA 含量可反映低温胁迫对植物的损伤程度。复温后 5~25 d，LT 处理 MDA 含量比 CK 处理显著提高 21.4%~106.8%。N、K 及 N+K 处理均可显著降低 MDA 含量，且在复温后 5~15 d 时降幅较大。其中，N+K 处理 MDA 含量较 LT 处理显著降低 12.2%~28.7%；K 处理较 LT 显著降低 23.6%~30.4%；N 处理较 LT 处理显著降低 11.0%~30.9%。随着复温时间延长至 25 d，N+K 处理缓解作用最好且最接近 CK 处理。

2.4 萘乙酸钠与吲哚丁酸钾处理对低温胁迫下苗期大豆抗氧化酶活性的影响

在低温胁迫下，抗氧化酶 SOD、POD 与 CAT 活性上调将有助于体内环境稳定。如图 2 所示，复温后 5~25 d，LT 处理的 SOD、POD 与 CAT 活性比 CK 处理均显著提高。N、K 及 N+K 处理可以提



不同小写字母代表同一复温天数不同处理下差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments for the same rewarming days ($P < 0.05$). The same below.

图 1 NAA-Na 与 IBA-K 包衣处理对低温胁迫下苗期大豆 O_2^- 产生速率、 H_2O_2 及 MDA 含量的影响
Fig.1 Effects of NAA-Na and IBA-K coating treatment on O_2^- production rate, H_2O_2 and MDA contents of soybean seedling under low temperature stress

高低温下这 3 种氧化酶活性，但各处理主要作用时间与增幅均不同。其中，N+K 处理的 SOD 活性在复温后 10~20 d 较 LT 处理显著提高，且呈先增后减的趋势。N 处理在复温后 5 d 和 20~25 d 效果较为明显，较 LT 处理均显著提高。N 与 K 处理对 POD 与 CAT 活性的提高作用更为明显。复温后 5~25 d，N 处理与 K 处理的 POD 与 CAT 活性比 LT 处理均显著提高。N+K 处理在复温后 5 d 时 CAT 活性增幅最大，但随复温时间延长至 25 d，效果减弱。

2.5 萘乙酸钠与吲哚丁酸钾处理对低温胁迫下苗期大豆 AsA-GSH 循环的影响

AsA-GSH 循环是植物体内参与抗氧化的主要循环之一，低温胁迫下，大豆植株中的总抗坏血酸

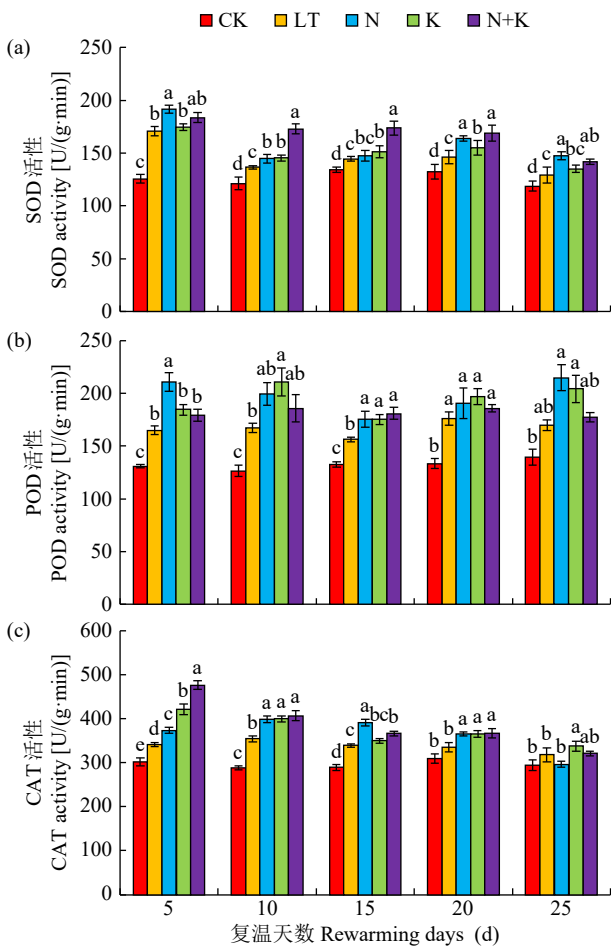


图2 NAA-Na 与 IBA-K 包衣处理对低温胁迫下苗期大豆 SOD、POD、CAT 活性的影响

Fig.2 Effects of NAA-Na and IBA-K coating treatments on SOD, POD and CAT activities of soybean seedling under low temperature stress

(AsA+DHA) 与总谷胱甘肽 (GSH+GSSG) 将参与 ROS 清除, 共同缓解氧化损伤。如图 3 所示, 复温后 5~25 d, LT 处理 AsA+DHA 较 CK 处理显著降低 7.3%~14.3%, AsA/DHA 较 CK 处理显著降低 16.9%~64.7%, GSH/GSSG 显著降低 14.2%~18.5%。N、K 以及 N+K 处理可以提高低温下 AsA+DHA、GSH+GSSG、AsA/DHA 以及 GSH/GSSG 含量, 促进 AsA-GSH 正向循环。其中, N+K 处理对总抗坏血酸含量影响大于其他处理, 复温后 5~25 d, AsA+DHA、AsA/DHA、GSH+GSSG 及 GSH/GSSG 较 LT 处理均显著提高。

2.6 萘乙酸钠与吲哚丁酸钾包衣对低温胁迫下苗期大豆渗透调节物质含量的影响

渗透调节物质 SS、SP 和 Pro 可改变溶质浓度, 维持细胞质形态, 避免失水导致细胞死亡。如图 4 所示, 复温后 5~25 d, LT 处理 SS、SP 及 Pro 含量

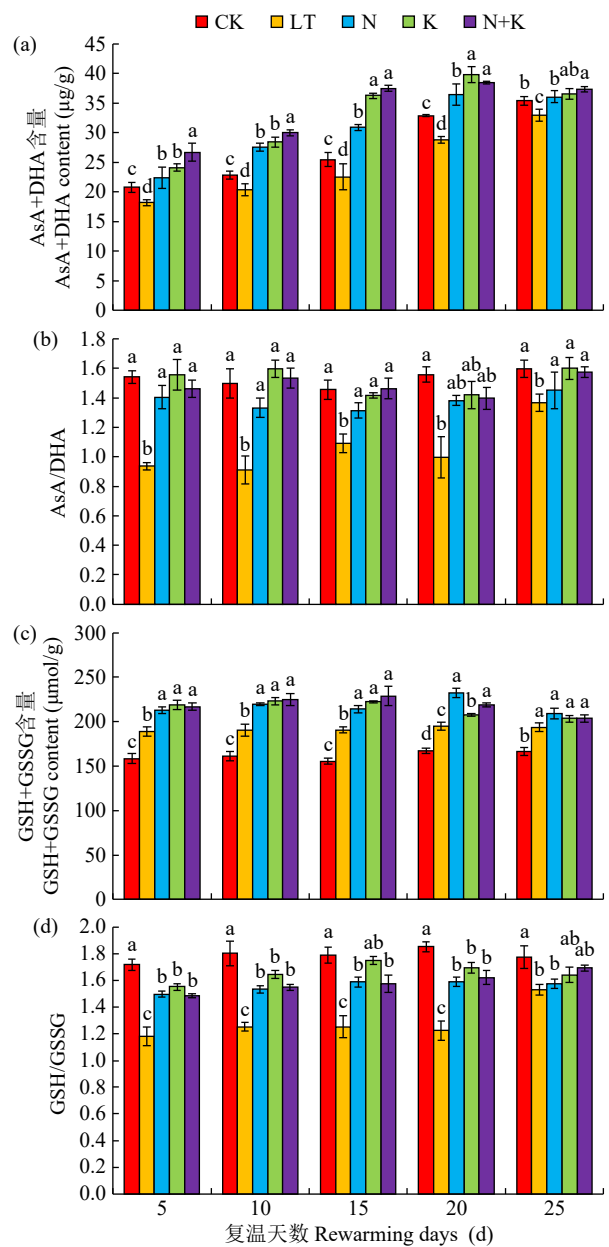


图3 NAA-Na 与 IBA-K 包衣处理对低温胁迫下苗期大豆 AsA-GSH 循环的影响

Fig.3 Effects of NAA-Na and IBA-K coating treatments on AsA-GSH cycle of soybean seedling under low temperature stress

较 CK 处理均显著提高。N、K 以及 N+K 各处理 SS、SP 及 Pro 含量均有提高, 但各处理增幅与作用时间不同。其中, N+K 处理在复温后 5~25 d, SS 含量较 LT 处理均显著提高 18.9%~41.2%, N 处理 SS 含量在复温后 5~15 d 显著高于 LT 处理 14.3%~35.6%; K 处理 SS 含量分别在复温后 5~15 d 显著高于 LT 处理 20.1%~36.4%。

N+K 处理 SP 含量增加集中发生在复温后 15~25 d, 较 LT 处理显著提高 9.2%~36.5%; N 与 K

处理的增幅较为均匀，复温后 10~25 d 均高于 LT 处理。各包衣处理在复温后 10 与 25 d, Pro 含量增加明显，其中 N+K 处理的作用略大于 N 与 K。

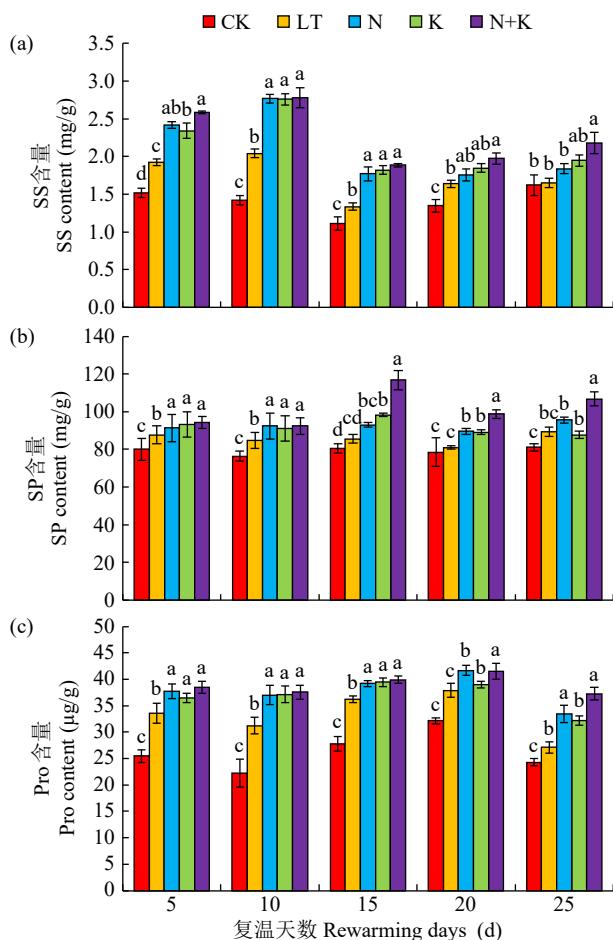


图 4 NAA-Na 与 IBA-K 包衣处理对低温胁迫下苗期大豆叶片 SS、SP 与 Pro 含量的影响

Fig.4 Effects of NAA-Na and IBA-K coating treatments on the contents of SS, SP and Pro in leaves of soybean seedling under low temperature stress

3 讨论

低温胁迫直接影响作物形态建成，尤其是根系生长发育受温度波动影响较大^[26]。前人研究表明低温会降低玉米根系增殖^[27]，造成主根变短^[28]；导致水稻^[29]根干重降低、根毛变短变少、表面积减少，吸收利用能力降低^[29]。NAA-Na 与 IBA-K 对多种植物根系均有显著的促生长效果^[30]，常作为生根粉使用。本试验结果表明，大豆苗期遭受低温胁迫后，根系发育严重受限，在复温后也难恢复至正常水平，影响后期生长甚至导致减产。NAA-Na 与 IBA-K 单剂及复配包衣处理均可有效缓解低温胁迫对大豆根系发育的影响，根部生物量显著增加；并且地

上部分茎粗与干物质积累量均增加，进而缓解低温对苗期大豆的生长抑制。低温对苗期大豆植株的伤害具有持续性，会导致减产，使用 NAA-Na、IBA-K 单剂及复配处理后，各产量构成因素均有提升，进而维护产量稳定。

低温胁迫会造成细胞内 ROS 积累增加^[31]，MDA 含量也随着冷胁迫程度的加深而增加。已有研究^[32]发现，H₂O₂ 参与番茄中海藻糖调节的耐低温性增加，同样在烟草^[33]和小麦^[34]中，低温胁迫将导致 H₂O₂ 和 O₂⁻ 产生速率显著提高。本试验结果表明，苗期大豆遭受低温胁迫后，O₂⁻ 产生速率、H₂O₂ 及 MDA 含量均逐渐增加。植物体内由低温胁迫产生的过量 ROS，可通过抗氧化酶与 AsA-GSH 循环及时清除。低温胁迫下的水稻^[35]、白屈菜^[36]以及菜用大豆^[37]中，植株抗氧化酶活性均有提高。而外施适宜浓度的 IAA 均可以显著提高低温下抗氧化酶活性并增强 AsA-GSH 循环^[38-39]。本试验结果表明，经过 NAA-Na 与 IBA-K 包衣处理的大豆苗期在低温胁迫后，SOD、POD 与 CAT 活性提高；总抗坏血酸与总谷胱甘肽含量增加，AsA-GSH 正向循环增强，加速了 ROS 清除效率，使 O₂⁻ 产生速率与 H₂O₂ 含量下降；MDA 积累减少，减轻 ROS 对膜脂的伤害，有利于保持细胞完整性，缓解低温带来的氧化胁迫伤害。

当作物遭遇低温胁迫时，渗透调节物质将在短时间内大量积累，提高渗透调节能力^[40]。在番茄^[41]、玉米^[42]和鹰嘴豆^[43]等植物中，低温胁迫将加速植物体内的多胺代谢与 Pro 累积；拟南芥^[44]和枇杷^[45]则会通过累积 SS 来减轻低温损伤。本试验结果表明，大豆苗期遭受低温胁迫，叶片中渗透调节物质含量均明显增加。NAA-Na 与 IBA-K 包衣处理可进一步提高低温胁迫下大豆 SS、SP 和 Pro 的含量。说明 NAA-Na 与 IBA-K 可增加低温下大豆叶片中渗透调节物质含量，保持细胞水势与渗透压稳态，进而维护膜的稳定性。本研究发现，NAA-Na 与 IBA-K 单剂与复配间效果存在差异，且主要表现在生理与作用时间等方面，推测此种差异可能是由 NAA-Na 与 IBA-K 作用机制不同与持效期不同共同导致的。

4 结论

NAA-Na 与 IBA-K 单剂及其复配包衣处理均

在不同程度上增加 SS、SP 和 Pro 等渗透调节物质含量, 强化大豆植株渗透调节能力; 提高植株抗氧化酶活性 (SOD、POD 和 CAT), 增强 AsA-GSH 循环; 降低 O_2^- 产生速率, 减少 H_2O_2 累积, 降低 MDA 含量, 膜脂过氧化作用减轻, 缓解低温胁迫造成的细胞损伤, 有利于大豆茎叶与根系在复温后的快速恢复生长, 提高干物质积累, 进而降低苗期低温胁迫对产量的影响。综合来看, 10 mg/L NAA-Na 和 80 mg/L IBA-K 复配包衣处理优于其他单剂处理。

参考文献

- [1] 陈玲玲, 李战, 刘亭萱, 等. 基于 783 份大豆种质资源的叶柄夹角全基因组关联分析. 作物学报, 2022, 48(6): 1333-1345.
- [2] 李海楠, 朱丽杰, 李明倩, 等. 东北地区大豆冷害指标构建及变化特征. 应用气象学报, 2021, 32(4): 491-503.
- [3] 闫平, 季生太, 姜丽霞, 等. 黑龙江省大豆延迟型冷害指标构建及检验. 中国农业气象, 2024, 45(6): 619-628.
- [4] 王立为, 李明倩, 李海楠, 等. 低温胁迫及复温对大豆关键生育时期叶片生理特性的影响. 分子植物育种. (2023-03-01) [2025-01-16]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20230228.1531.015>.
- [5] 黄深富, 郑殿峰, 项洪涛. 花期和鼓粒期低温胁迫对大豆叶片生理特性及产量的影响. 大豆科学, 2024, 43(1): 64-72.
- [6] Ritonga F N, Chen S. Physiological and molecular mechanism involved in cold stress tolerance in plants. *Plants*, 2020, 9(5): 560.
- [7] Wu J X, Nadeem M, Galagedara L, et al. Effects of chilling stress on morphological, physiological, and biochemical attributes of silage corn genotypes during seedling establishment. *Plants*, 2022, 11(9): 1217.
- [8] Ding Y L, Shi Y T, Yang S S. Advances and challenges in uncovering cold tolerance regulatory mechanisms in plants. *New Phytologist*, 2019, 222(4): 1690-1704.
- [9] Gusain S, Joshi S, Joshi R. Sensing, signalling, and regulatory mechanism of cold-stress tolerance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2023, 197: 107646.
- [10] He Y, Zhang T, Sun Y, et al. Exogenous IAA alleviates arsenic toxicity to rice and reduces arsenic accumulation in rice grains. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2022, 41(2): 734-741.
- [11] Zhang M C, Lu X L, Ren T T, et al. Heterologous overexpression of *Apocynum venetum* flavonoids synthetase genes improves *Arabidopsis thaliana* salt tolerance by activating the IAA and JA biosynthesis pathways. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1123856.
- [12] Jankauskienė J, Mockevičiūtė R, Gavelienė V, et al. The application of auxin-like compounds promotes cold acclimation in the oilseed rape plant. *Life*, 2022, 12(8): 1283.
- [13] Zhou Q H, Bao Z Y, Yan Y, et al. IAA regulated levels of endogenous phytohormones in relation to chilling tolerance in cold-stored peaches after harvest. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 205: 112490.
- [14] 褚霏宇, 王欢, 贾景瑞, 等. 根施褪黑素对低温胁迫下大豆幼苗根系形态和生理的影响. 分子植物育种. (2023-12-21) [2025-05-29]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20231220.1404.006>.
- [15] Ding F, Ren L M, Fang X, et al. Jasmonate and melatonin act synergistically to potentiate cold tolerance in tomato plants. *Frontiers in plant science*, 2022, 12: 763284.
- [16] Golovatskaya I F, Kadyrbaev M K, Boyko E V. Protective role of melatonin and IAA in the regulation of resistance of potato regenerants to cold stress. *Potato Research*, 2024, 67(2): 421-449.
- [17] 王晶英, 敖红, 张杰, 等. 植物生理生化实验技术与原理. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2003.
- [18] Elstner E F, Heupel A. Inhibition of nitrite formation from hydroxylammoniumchloride: a simple assay for superoxide dismutase. *Analytical Biochemistry*, 1976, 70(2): 616-620.
- [19] 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.
- [20] 张志良. 植物生理学实验指导: 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [21] Fu J M, Huang B R. Involvement of antioxidants and lipid peroxidation in the adaptation of two cool-season grasses to localized drought stress. *Environmental and Experimental Botany*, 2001, 45(2): 105-114.
- [22] Shi H R, Wang B, Yang P J, et al. Differences in sugar accumulation and mobilization between sequential and non-sequential senescence wheat cultivars under natural and drought conditions. *PLoS ONE*, 2016, 11(11): e0166155.
- [23] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72(1/2): 248-254.
- [24] Bates L S, Waldren R P A, Teare I D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 1973, 39: 205-207.
- [25] Jiang M Y, Zhang J H. Effect of abscisic acid on active oxygen species, antioxidative defence system and oxidative damage in leaves of maize seedlings. *Plant and Cell Physiology*, 2001, 42(11): 1265-1273.
- [26] Zhou Y P, Sommer M L, Hochholdinger F. Cold response and tolerance in cereal roots. *Journal of Experimental Botany*, 2021, 72(21): 7474-7481.
- [27] Hussain H A, Men S, Hussain S, et al. Maize tolerance against drought and chilling stresses varied with root morphology and antioxidative defense system. *Plants*, 2020, 9(6): 720.
- [28] Hund A. Genetic variation in the gravitropic response of maize roots to low temperatures. *Plant Root*, 2010, 4: 22-30.
- [29] Rativa A G S, Junior A T A, Friedrich D S, et al. Cold tolerance in rice plants is partially controlled by root responses. *Journal of Plant Physiology*, 2020.
- [30] 刘美玲, 冯乃杰, 郑殿峰, 等. 不同土壤水分条件下吡啶丁酸钾对大豆根系形态建成及生理代谢的影响. 中国油料作物学报, 2022, 44(3): 621-631.
- [31] Koga-Ito C Y, Kostov K G, Miranda F S, et al. Cold atmospheric plasma as a therapeutic tool in medicine and dentistry. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2024, 44(3): 1393-1429.
- [32] Liu T, Ye X L, Li M, et al. H_2O_2 and NO are involved in trehalose-regulated oxidative stress tolerance in cold-stressed tomato plants. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, 171: 103961.
- [33] 张静, 李园园, 黄盈盈, 等. 低温胁迫下活性氧代谢与烟草花芽分化的研究. 作物杂志, 2015(4): 74-80.
- [34] 黄儒. 低温下外源 SA 对冬小麦东农冬麦 1 号抗氧化系统的影响. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
- [35] Hsu C H, Hsu Y T. Biochemical responses of rice roots to cold

- stress. *Botanical Studies*, 2019, 60: 1-12.
- [36] 任守政, 于艳双, 周大朴, 等. 冷驯化激活白屈菜抗氧化酶系统及耐寒性获得. *分子植物育种*. (2022-06-24)[2025-05-29]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20220623.1644.006>.
- [37] 陈凤琼, 陈秋森, 刘汉林, 等. 不同外源试剂对菜用大豆低温胁迫的调控效应. *大豆科学*, 2022, 41(2): 165-171.
- [38] Wei W, Tao J J, Yin C, et al. Melatonin regulates gene expressions through activating auxin synthesis and signaling pathways. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1057993.
- [39] 姜瑛, 张辉红, 魏畅, 等. 外源褪黑素对干旱胁迫下玉米幼苗根系发育及生理生化特性的影响. *草业学报*, 2023, 32(9): 143-159.
- [40] He X R, Long F Y, Li Y J, et al. Comparative transcriptome analysis revealing the potential mechanism of low-temperature stress in *Machilus microcarpa*. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 900870.
- [41] Ding F, Wang C, Xu N, et al. Jasmonic acid-regulated putrescine biosynthesis attenuates cold-induced oxidative stress in tomato plants. *Scientia Horticulturae*, 2021, 288: 110373.
- [42] Gao C H, Sheteiwy M S, Han J, et al. Polyamine biosynthetic pathways and their relation with the cold tolerance of maize (*Zea mays* L.) seedlings. *Plant Signaling & Behavior*, 2020, 15(11): 1807722.
- [43] Amini S, Maali-Amiri R, Kazemi-Shahandashti S S, et al. Effect of cold stress on polyamine metabolism and antioxidant responses in chickpea. *Journal of Plant Physiology*, 2021, 258: 153387.
- [44] Lin Q F, Wang J Y, Gong J X, et al. The *Arabidopsis thaliana* trehalose-6-phosphate phosphatase gene *AtTPPI* improve chilling tolerance through accumulating soluble sugar and JA. *Environmental and Experimental Botany*, 2023, 205: 105117.
- [45] Liu Y, Hou Y Y, Yi B H, et al. Exogenous phytoalexin α alleviates chilling injury of loquat fruit via regulating sugar, proline, polyamine and γ -aminobutyric acid metabolisms. *Food Chemistry*, 2024, 436: 137729.

Alleviating Effects of 1-Naphthalene Acid and Indole-3-Butyric Acid Potassium Salt on Low Temperature Stress at Soybean Seedling Stage

Yang Hao^{1,2}, Gu Wenwen^{1,2}, Fang Shumei^{2,3}, Jiang Haipeng^{1,2}, Liang Xilong^{1,2}, Wang Qingyan^{1,2}

¹College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, Heilongjiang, China;

²Engineering Research Center of Plant Growth Regulator of Heilongjiang Province, Daqing 163319, Heilongjiang, China;

³College of Life Science and Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, Heilongjiang, China)

Abstract To clarify the alleviating effect of auxin regulators on low-temperature stress at seedlings stage of soybean, the variety Kennong 18 was used as the test material, and seed coating with sodium naphthaleneacetic acid (NAA-Na), potassium indolebutyrate (IBA-K), and their mixture were adopted as the treatment. From the perspectives of morphological phenotype, antioxidant defense and osmotic regulation, the alleviating effect of NAA-Na and IBA-K on the growth and yield of soybean under low temperature stress was investigated. The results showed that the coating treatment with NAA-Na and IBA-K could reduce the accumulation of reactive oxygen species and the production rate of superoxide anion (O_2^-), and significantly decrease the accumulation of hydrogen peroxide (H_2O_2) and malondialdehyde. The osmotic regulation ability of soybean seedlings was enhanced, and the contents of soluble sugar, soluble protein, and proline increased. The activities of antioxidant enzymes such as superoxide dismutase, peroxidase, and catalase were enhanced, and the ascorbic acid-glutathione (AsA-GSH) cycle was promoted, thereby alleviating the damage of low-temperature stress to soybean seedlings. The dry matter accumulation in the aboveground and root parts of soybean seedlings increased. The adverse effects of low temperature stress on soybean yield were mitigated, and the number of pods per plant, the number of seeds per plant, 100-seed weight, and the seed weight per plant were significantly increased.

Key words Soybean; Cold stress; Auxin regulators; Active oxygen; Chemical control technology