

泰山灵芝与蛹虫草胞外粗多糖对小麦种子萌发的影响

李奕葶 陈芸 张菁 高青云 班立桐

(天津农学院农学与资源环境学院, 300384, 天津)

摘要 以灵芝和蛹虫草发酵液为原料, 通过乙醇沉淀法提取胞外多糖, 得到灵芝胞外粗多糖 (GCEP) 和蛹虫草胞外粗多糖 (CCEP) 组分。设置不同浓度梯度 (0.0~3.0 g/L) 的多糖组分浸泡小麦种子, 测定发芽势、发芽率和幼苗生物量, 以筛选最适浸种浓度, 并在最适浓度下通过不同处理条件, 探讨 2 种胞外多糖对小麦种子萌发与早期幼苗生长的影响。结果表明, 在正常环境下, GCEP 和 CCEP 组分均能显著促进小麦种子萌发和幼苗生长。GCEP 组分在 0.4 g/L 浓度下效果最佳, 与对照相比, 发芽势和发芽率分别提高 24.45% 和 25.32%, 幼苗茎长、根长和地上部干重分别增长 13.66%、25.18% 和 22.43%; CCEP 组分在相同浓度下对根长和地上部干重的促进效果更明显, 与对照相比, 分别提高 25.91% 和 20.24%。在盐胁迫 (150 mmol/L NaCl) 条件下, GCEP 和 CCEP 组分可通过调节抗氧化酶活性促进小麦生长, 在一定程度上缓解盐胁迫对小麦种子萌发的抑制作用。

关键词 灵芝; 蛹虫草; 胞外粗多糖; 小麦; 种子萌发; 盐胁迫; 抗氧化酶活性

小麦 (*Triticum aestivum* L.) 为禾本科、一年或越年生草本植物, 是我国主要的粮食作物之一^[1]。目前, 农业生产中化肥与农药的过量施用以及不合理的灌溉方式, 引发了一系列严重的环境与农业问题, 包括土壤污染加剧、农作物抗逆性降低以及农产品品质下降等^[2-3]。在此背景下, 寻求绿色可持续的农业投入品以减少化学肥料依赖, 已成为实现农业可持续发展的关键战略方向。植物生长诱导剂是一类能够通过调节植物生理代谢、信号传导或环境互作等方式, 诱导植物产生生长促进、抗逆增强和品质提升等积极生理响应的物质或制剂^[4]。植物生长诱导剂种类繁多, 主要源于天然产物中提取的一些生理活性物质, 包含多糖类、氨基酸、腐殖酸和微生物代谢产物等, 其中多糖类物质已被证明在种子萌发核心调控过程及有效促进植物生长发育方面发挥着不可或缺的作用^[5-8]。

灵芝 (*Ganoderma lucidum*) 也被称作单芝、密纹薄芝或老木菌等, 是灵芝科灵芝属真菌。灵芝多糖 (*Ganoderma lucidum* polysaccharides) 是灵芝菌丝体的次生代谢产物, 存在于灵芝属真菌的菌丝体和子实体中。高分子灵芝多糖可以增强人体的免疫系统, 具有发挥扶正固本功效的主要有效成分^[9], 是灵芝治疗各种疾病的主要成分。研究^[10-11]发现, 灵芝多糖还能够调节作物生长、激活植株

的防御反应、诱导小麦植株抗纹枯病以及防治番茄黄化曲叶病毒病^[11]。

蛹虫草 (*Cordyceps militaris*) 属麦角菌科 (Clavicipitaceae) 药用真菌, 民间亦称之为北虫草或北冬虫夏草。蛹虫草多糖 (*Cordyceps militaris* polysaccharides) 是蛹虫草中含量较高的活性物质之一, 占比 4%~10%, 是其抗氧化活性的主要来源, 具有提高免疫力^[12]、抗肿瘤、抗疲劳和保护神经的作用^[13], 还具有抗番茄白粉病以及晚疫病的效果^[14]。

本试验通过探究泰山灵芝和蛹虫草发酵液中的胞外粗多糖对不同环境下小麦种子萌发和早期幼苗生长的影响, 以确定 2 种胞外多糖促进小麦生长的最佳施用浓度与施用方法。研究结果可为小麦的大规模种植提供理论依据, 同时也为食用菌胞外多糖在小麦种植中的科学应用与推广提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

泰山灵芝和蛹虫草菌种均保存于天津农学院食用菌创新实验室, 供试冬小麦品种为郑麦 1860, 产自河南省商丘市, 参试次氯酸钠 (NaClO) 购于天津市风船化学试剂科技有限公司。

作者简介: 李奕葶, 主要从事天然产物提取与利用、食用菌栽培研究, E-mail: liyitingyoyo@163.com

班立桐为通信作者, 主要从事食用菌栽培研究, E-mail: banlitong@126.com

基金项目: 天津市科技计划项目 (23ZYCGSN00870, 24ZYCGSN00070); 甘肃省 2024 年中央引导地方科技发展资金项目 (24ZYQH006)

收稿日期: 2025-07-24; 修回日期: 2025-08-05; 网络出版日期: 2026-02-02

1.2 试验方法

1.2.1 灵芝和蛹虫草的液体发酵 平板培养：用 200 g 马铃薯、20 g 葡萄糖和 20 g 琼脂配制 1 L PDA 培养基，分装于平板中备用。将活化好的母种转接至试管斜面中，25 °C 恒温培养。液体发酵：按 KH₂PO₄ 0.10%、MgSO₄·7 H₂O 0.05%、(NH₄)₂SO₄ 0.20%、蛋白胨 0.30%、蔗糖 5.00%、pH 5.0 的配方配制液体培养基，随后将其分装至 250 mL 的锥形瓶中，每瓶约 100 mL^[15]。用 0.5 cm 打孔器取平板培养基中的菌种，每瓶接种量在 3~4 块。接种完成后，将锥形瓶放入 25 °C、200 转/min 摇床振荡培养 5~7 d。

1.2.2 粗多糖样品的制备 将灵芝与蛹虫草发酵液用抽滤机进行真空抽滤后得到滤液，再将滤液旋蒸处理，旋蒸结束后，将得到的溶液用 100%乙醇沉淀，并放入 4 °C 冰箱中保存，静置 12 h 后将其取出再次离心，去除上清液，保留离心管内沉淀，用冷冻干燥机冷冻干燥，即得到灵芝胞外粗多糖（*Ganoderma lucidum* crude exopolysaccharides，GCEP）与蛹虫草胞外粗多糖（*Cordyceps militaris* crude exopolysaccharides，CCEP）组分^[16]。

1.2.3 选种 选取颗粒饱满、大小均匀、重量相近、无破损且无明显腐败迹象的小麦种子置于烧杯中，使用水浮法筛选，去除浮起的小麦种子，将未浮起的种子捞起置于装有 10% NaClO 溶液的烧杯中，浸泡 20 min 进行消毒，再用蒸馏水冲洗去除种子表面残留的 NaClO，随后将消毒好的种子放在干净的纱布上备用^[17]。

1.2.4 粗多糖浸种浓度的筛选 配制小麦浸泡液，用 GCEP 和 CCEP 组分配制浓度梯度为 0.0（对照）、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 g/L 的多糖组分溶液备用。试验共设置 11 个处理，每个处理设置 3 组重复。将消毒后的种子以 25 粒为 1 组，3 组共 75 粒小麦种子分别于不同浓度的 GCEP 和 CCEP 溶液中浸泡 18 h。采用培养皿发芽法^[18]，将浸泡后的小麦种子用镊子小心放入铺有 2 层滤纸、直径为 9 cm 的培养皿中，然后每组加入 10 mL 蒸馏水，使用湿润的干净纱布覆盖小麦种子，培养期间每 12 h 对种子补水 1 次（1 次约 4 mL，滤纸浸湿即可），待小麦种子萌芽至长度约为 0.5 cm 时，将纱布移去。使用保鲜膜密封培养皿并扎孔，每 12 h 对种子补水 1 次（补水至水位线没过小麦幼苗根部）。

1.2.5 盐胁迫下粗多糖浸种与补施 设置 2 组对照 CK1 和 CK2。根据浸种浓度筛选试验结果，配制 4 组最佳多糖组分浓度（0.4 g/L）的小麦种子浸泡液于小烧杯中备用。处理方法如表 1 所示，盐胁迫条件为 150 mmol/L NaCl^[19]，T3、T4、T7 和 T8 处理每 12 h 补施 1 次 0.4 g/L 的 GCEP 和 CCEP 溶液。将消毒后的种子以 25 粒为 1 组，3 组共 75 粒小麦种子浸入小麦浸泡液中，浸泡 18 h，浸泡液应没过小麦种子，并确保无小麦种子浮起。6 个处理设置 3 组重复。

表 1 试验处理方法	
Table 1 Experimental treatment methods	
处理 Treatment	处理方法 Treatment method
CK1	蒸馏水浸种
CK2	蒸馏水浸种+盐胁迫
T1	GCEP 浸种
T2	GCEP 浸种+盐胁迫
T3	GCEP 浸种+GCEP 补施
T4	GCEP 浸种+GCEP 补施+盐胁迫
T5	CCEP 浸种
T6	CCEP 浸种+盐胁迫
T7	CCEP 浸种+CCEP 补施
T8	CCEP 浸种+CCEP 补施+盐胁迫

1.3 测定指标与方法

1.3.1 萌发指标 在培养过程中，将同浓度下露白的小麦种子计数，在计数前确认发芽标准，避免人为因素导致试验误差。于第 3 天计算发芽势，第 7 天统计发芽率^[20]。发芽势（%）=（各处理 3 d 发芽种子粒数/供试种子粒数）×100，发芽率（%）=（各处理 7 d 发芽种子粒数/供试种子粒数）×100。

1.3.2 生长指标 种子培养 10 d 完成后，每个浓度随机选取 10 株无明显霉变和畸形的小麦幼苗按顺序排列整齐进行拍照。随后将小麦幼苗以 1 组为单位，测量地上部分长度、地下部分长度和叶面宽度，取平均值为本组小麦幼苗的茎长、根长和叶宽。

每组随机选取相同数量的小麦幼苗，对其地上部分进行称重，并取平均值作为本组小麦幼苗的地上部鲜重。随后分别放入烘干箱中 60 °C 烘干，每隔 2 h 对其称重，待其重量恒定，称重取平均值为本组小麦幼苗的地上部干重^[21]，并计算绝对含水量：绝对含水量（%）=（地上部鲜重-地上部干重）/地上部鲜重×100。

1.3.3 生理指标 采用过氧化氢酶（CAT）试剂盒（北京索莱宝科技有限公司）测定 CAT 活性，采用愈创木酚法^[22-23]测定过氧化物酶（POD）活性，

愈创木酚采购于北京索莱宝科技有限公司。

1.4 数据处理

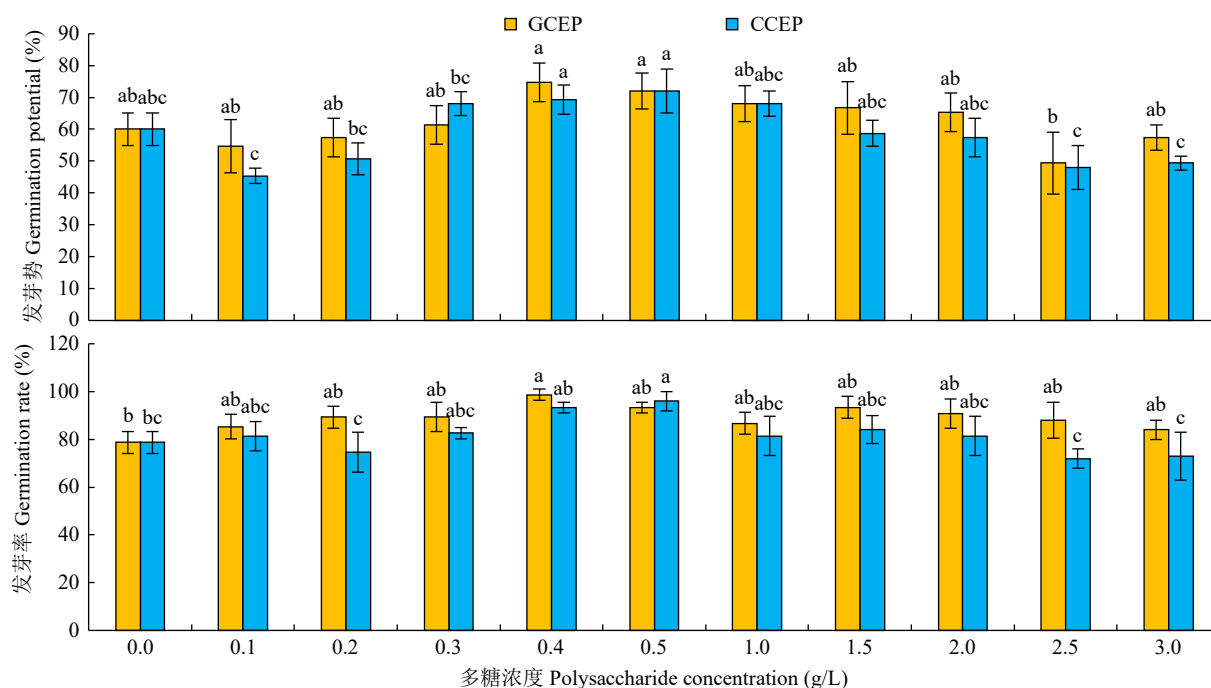
采用 Excel 2010 和 SPSS 26.0 软件进行数据统计与分析, 采用单因素方差分析法 (analysis of variance, ANOVA) 进行显著性分析 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 GCEP 与 CCEP 最适浸种浓度的筛选

2.1.1 不同浓度 GCEP 和 CCEP 组分对小麦种子萌发指标的影响 不同浓度 GCEP 和 CCEP 组分对正

常环境下小麦种子发芽势和发芽率的影响如图 1 所示, GCEP 组分在 0.3~2.0 g/L 时具有促进小麦种子萌发的趋势, 而在 2.5~3.0 g/L 时又具有抑制小麦种子发芽势的作用。GCEP 组分浓度为 0.4 g/L 时, 小麦种子的发芽势较高 (74.67%), 较对照提升了 24.45%。CCEP 组分在 0.1~0.2 g/L 时显著抑制发芽势, 0.3~1.0 g/L 时表现为促进发芽势, 随后增大浓度则表现为抑制作用。当 CCEP 组分浓度为 0.5 g/L 时, 小麦种子的发芽势水平较高 (72.10%), 0.4 g/L 浓度次之, 发芽势为 69.33%。



不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著, 下同。

Different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$ level, the same below.

图 1 GCEP 与 CCEP 组分对小麦种子发芽势与发芽率的影响

Fig.1 Effects of GCEP and CCEP components on wheat seed germination potential and germination rate

但结合发芽率数据来看, GCEP 组分各个浓度均对小麦萌发有促进作用, 说明 GCEP 组分对种子萌发的影响在不同阶段可能存在差异。在 0.4 g/L 浓度时, GCEP 组分对发芽率的促进作用达到峰值 (98.67%), 且具有显著性差异。但随着 GCEP 组分浓度的上升, 小麦种子发芽率呈现先上升后下降的趋势, 与对照相比不具有显著差异。CCEP 组分在低浓度与高浓度时均抑制小麦种子萌发, 在 0.3~0.5 g/L 时具有促进小麦种子萌发的效果, 其中 0.5 g/L 促进效果最好, 发芽率为 96.24%, 且与对照相比具有显著性差异。0.4 g/L 浓度次之, 发芽率为 93.33%。当 CCEP 组分浓度上升到 1.0~3.0 g/L 时, 发芽率呈现先下降后上升再下降的趋势, 但与

对照相比不具有显著性差异。

2.1.2 不同浓度 GCEP 与 CCEP 组分对小麦早期幼苗生长指标的影响 如表 2 和图 2 所示, 利用 GCEP 组分浸种后, 在 0.4 和 0.5 g/L 浓度下小麦幼苗的茎长与对照相比均有显著性差异, 分别提高了 13.66% 和 13.48%; 在 0.4 g/L 浓度下, 根长与对照相比具有显著性差异, 提高了 25.18%; 在 0.4 和 0.5 g/L 浓度下, 叶宽与对照相比具有显著性差异, 分别提高了 13.35% 和 8.64%; 地上部鲜重和地上部干重在各个浓度下与对照相比均无显著性差异, 但大部分浓度均表现出促进效果; 含水量在各个浓度下与对照均无显著性差异。

利用 CCEP 组分浸种后, 在 0.1~1.0 g/L 浓度下

表 2 GCEP 和 CCEP 组分在不同浓度下对小麦早期幼苗生长指标的影响
Table 2 Effects of GCEP and CCEP components at different concentrations on early growth indicators of wheat seedlings

组分 Component	浓度 Concentration (g/L)	茎长 Stem length (cm)	根长 Root length (cm)	叶宽 Leaf width (mm)	地上部鲜重 Aboveground fresh weight (mg)	地上部干重 Aboveground dry weight (mg)	含水量 Moisture content (%)
GCEP	0.0	10.76±0.84b	12.23±1.94bc	3.82±0.36c	85.00±6.92a	12.17±0.86a	85.68±0.14a
	0.1	11.90±0.04ab	13.75±1.05abc	4.01±0.23abc	96.67±5.13a	14.23±1.44a	85.27±0.66a
	0.2	12.13±0.24a	13.87±0.73abc	4.11±0.12abc	95.33±0.58a	13.53±0.92a	85.81±0.88a
	0.3	12.15±0.13a	14.64±1.16a	4.14±0.32abc	87.44±1.72a	12.03±0.91a	86.24±0.75a
	0.4	12.23±0.13a	15.31±0.97a	4.33±0.11a	101.03±4.63a	14.90±1.21a	85.25±0.50a
	0.5	12.21±0.55a	14.16±0.44ab	4.15±0.50ab	95.33±5.86a	13.40±1.06a	85.94±0.23a
	1.0	11.51±0.33ab	13.38±0.89abc	4.03±0.28abc	89.00±7.55a	12.77±1.63a	85.65±0.56a
	1.5	11.68±0.35ab	12.76±0.91abc	3.96±0.36bc	96.67±7.02a	13.60±0.72a	85.93±0.26a
	2.0	11.00±0.40ab	11.32±1.69bc	3.98±1.37bc	82.33±9.14a	12.30±3.25a	85.06±2.06a
	2.5	11.05±0.10ab	11.32±0.98bc	4.01±0.88abc	89.00±7.00a	12.80±2.92a	85.62±1.99a
CCEP	0.0	10.51±0.23c	12.93±1.42b	3.96±0.28b	88.00±4.86ab	12.75±1.22b	85.51±0.55a
	0.1	11.66±0.32b	14.70±0.55ab	4.03±0.79b	98.00±7.32a	13.57±1.37ab	86.15±0.34a
	0.2	11.68±0.24b	15.05±1.25ab	4.13±0.52ab	101.33±2.97a	14.00±1.91ab	86.18±1.43a
	0.3	11.71±0.54b	16.16±0.24a	4.04±1.01ab	87.67±1.50ab	13.17±1.74ab	84.98±1.70ab
	0.4	12.91±0.21a	16.28±1.80a	4.21±0.72a	107.00±6.56a	15.33±1.17a	85.67±0.20a
	0.5	11.64±0.40b	13.62±1.05b	4.08±0.67ab	99.33±6.51a	14.97±0.76ab	84.93±0.21ab
	1.0	11.61±0.47b	14.07±1.64ab	4.04±0.39ab	100.33±1.02a	14.10±2.05ab	85.95±1.88a
	1.5	11.34±0.25bc	13.93±0.30ab	3.99±0.46b	90.00±2.65ab	13.47±0.49ab	85.03±0.10ab
	2.0	11.14±0.31bc	13.52±1.38b	4.06±0.36ab	85.33±2.23ab	13.03±1.17ab	84.73±0.95ab
	2.5	10.35±0.15bc	14.07±1.37ab	4.12±0.72ab	96.67±4.04a	14.20±0.26ab	85.31±0.33a
	3.0	10.44±0.39bc	13.58±1.06b	3.39±0.96b	64.90±4.55abc	12.85±1.43b	80.20±0.76ab

不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著，下同。
Different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$ level, the same below.

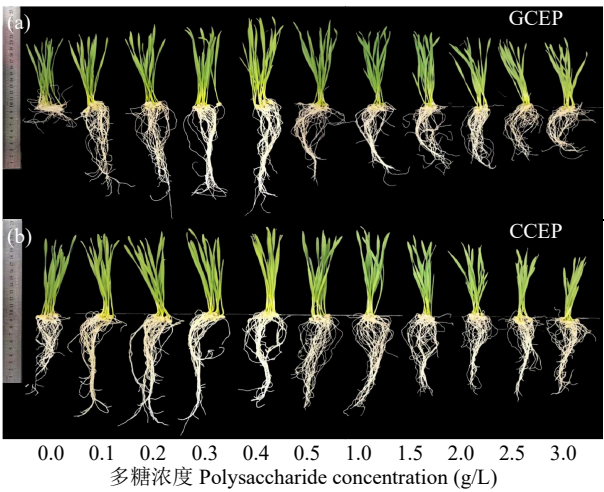


图 2 GCEP 与 CCEP 组分不同浓度条件下小麦早期幼苗的生长情况
Fig.2 Growth of wheat seedlings under different concentrations of GCEP and CCEP components

小麦幼苗的茎长与对照相比均具有显著性差异，分别提高了 10.94%、11.13%、11.42%、22.84%、10.75% 和 10.47%，其中 0.4 g/L 浓度促进效果较为明显；在 0.3~0.4 g/L 浓度下，根长与对照相比均具有显著性差异，分别提高了 24.98%和 25.91%；在 0.4 g/L 浓度下，叶宽与对照相比具有显著性差异，提高了

6.31%；地上部鲜重在各个浓度下与对照相比均无显著性差异，但大部分浓度均表现出促进效果。在 0.4 g/L 浓度下，地上部干重与对照相比具有显著性差异，提高了 20.24%；含水量在各个浓度下与对照相比均无显著差异。

综合小麦萌发指标与各项生长指标，2 种食用菌胞外粗多糖组分在浓度为 0.4 g/L 时对小麦种子生长具有最显著的促进作用，后续试验选取此浓度进一步探讨 2 种食用菌胞外粗多糖组分在不同处理方法以及盐胁迫条件下对小麦种子萌发的影响。

2.2 GCEP 与 CCEP 组分在不同处理方法下对小麦种子萌发的影响

2.2.1 不同处理对小麦种子萌发指标的影响 如图 3~4 所示，无盐胁迫条件下，T7 处理表现最优，发芽势和发芽率分别较 CK1 提高 44.90%和 10.29%；T3 处理次之，较 CK1 提高 38.78%和 8.82%。进一步分析处理方式的影响发现，正常环境下，补施处理对小麦种子萌发的提升效果普遍优于单独浸种处理，其中 T7 较 T5 处理发芽势提高 13.40%，T3 较 T1 处理发芽势提高 8.17%。以上结果说明在非盐胁迫下，CCEP 组分对小麦种子发芽势与发芽率

的促进效果要优于 GCEP 组分。

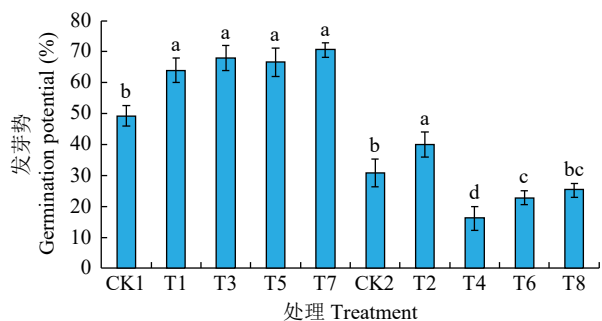


图 3 不同处理对小麦种子发芽势的影响
Fig.3 Effects of different treatments on the germination potential of wheat seeds

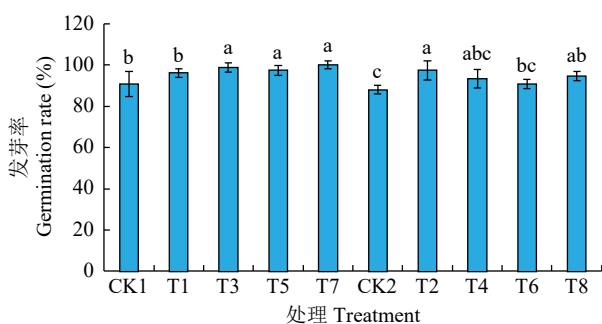


图 4 不同处理对小麦种子发芽率的影响
Fig.4 Effects of different treatments on the germination rate of wheat seeds

在盐胁迫条件下，只有 T2 处理在发芽势上呈现促进效果，T4、T6 和 T8 处理的发芽势均低于 CK2。盐胁迫显著降低了发芽率（CK2 降至 88.00%），但多糖组分处理表现出良好的缓解效果，其中 T2 处理小麦种子的发芽率相较于 CK2 显著提高了 10.61%。T4、T6 和 T8 处理与 CK2 相比分别提高了 6.06%、3.03%和 7.57%。说明在盐胁迫条件下，GCEP 组分对小麦发芽率的促进效果优于 CCEP 组分。

2.2.2 不同处理对小麦早期幼苗生物量的影响 如表 3 与图 5 所示，在无盐胁迫环境下，与 CK1 相比，T1 处理下的小麦幼苗的茎长、根长、叶宽、地上部鲜重和地上部干重分别提高了 7.96%、28.53%、4.84%、24.69%和 18.69%；在 T3 处理下，小麦幼苗的茎长、叶宽、地上部鲜重和地上部干重相较 CK1 分别提高了 1.74%、2.80%、8.12%和 9.30%，但对根长有抑制效果；在 T5 处理下，与 CK1 相比，小麦幼苗的茎长、根长、叶宽、地上部鲜重和地上部干重分别提高了 6.22%、23.88%、2.29%、33.02%和 24.38%；T7 处理下小麦幼苗的茎长、叶宽、地上部鲜重和地上部干重相较 CK1 分别提高了 10.89%、5.09%、16.57%和 2.01%，但

表 3 不同处理对小麦早期幼苗生物量的影响
Table 3 Effects of different treatments on early seedling biomass of wheat

处理 Treatment	茎长 Stem length (cm)	根长 Root length (cm)	叶宽 Leaf width (mm)	地上部鲜重 Aboveground fresh weight (mg)	地上部干重 Aboveground dry weight (mg)	含水量 Moisture content (%)
CK1	10.93±0.73b	11.39±3.14bc	3.93±0.15b	85.88±3.11c	12.47±0.86d	85.47±0.22b
T1	11.80±0.66a	14.64±0.25a	4.12±0.41a	107.08±3.82ab	14.80±0.58ab	86.17±0.04ab
T3	11.12±0.18ab	10.00±0.47c	4.04±0.87ab	92.85±1.99ab	13.63±0.05bc	85.32±0.25b
T5	11.61±0.55ab	14.11±0.93ab	4.02±0.16ab	114.24±15.76a	15.51±1.12a	86.43±0.78ab
T7	12.12±0.46a	11.09±0.98c	4.13±0.27a	100.11±3.84abc	12.72±0.25cd	87.29±0.23a
CK2	9.72±0.17c	6.33±0.38a	3.56±1.10b	76.27±0.11b	11.84±0.23c	84.59±0.28bc
T2	11.91±0.31a	7.97±1.78a	4.01±0.09a	99.78±0.12a	15.25±0.57a	84.72±0.56bc
T4	10.34±0.6bc	6.07±0.72a	3.93±0.10a	80.86±0.09b	12.26±1.12bc	84.84±1.37bc
T6	11.35±1.35ab	8.25±2.98a	4.07±0.23a	96.91±0.14a	13.61±1.52ab	85.91±1.50b
T8	11.84±0.23a	7.97±0.49a	3.96±0.22a	107.92±0.18a	13.19±1.27ab	86.18±0.44ab

对根长有抑制作用，T7 下小麦幼苗的茎长大于 T5。

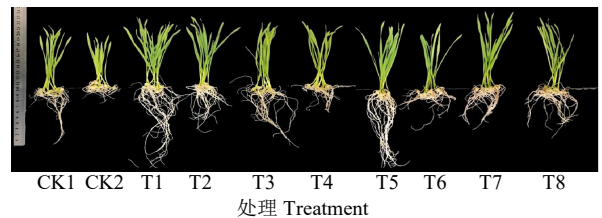


图 5 不同处理下小麦早期幼苗的生长情况
Fig.5 Growth of early stage wheat seedlings under different treatments

综合来看，非盐胁迫下 2 种多糖组分对于小麦生物量的提高均有促进作用，且浸种处理优于浸种加补施处理。

在盐胁迫环境下，T2 处理下的小麦幼苗的茎长、根长、叶宽、地上部鲜重和地上部干重相较于 CK2 均呈促进作用，分别增加了 22.53%、25.91%、12.64%、30.83%和 28.80%。而 T4 处理除了根长小于 CK2，其他指标均优于 CK2。T6 处理下的小麦幼苗的茎长、根长、叶宽、地上部鲜重、地上部干

重和含水量相较 CK2 分别提高了 16.77%、30.33%、14.33%、27.06%、14.95%和 1.56%；T8 处理下小麦幼苗的茎长、鲜重和含水量与 T6 相比有些许提高。总体来看，在盐胁迫条件下 2 种多糖的浸种与浸种加补施处理均可有效提高小麦早期幼苗的生物量，可以缓解盐胁迫环境对小麦早期幼苗的负面影响。

2.2.3 不同处理对小麦早期幼苗 CAT 与 POD 活性的影响 如图 6 所示，在无盐胁迫条件下，T1 处理使 CAT 活性达到 143.20 U/g，较 CK1 显著提高 58.58%；T3 处理与 CK1 基本持平，但与 T1 相比，CAT 活性大幅度降低，可能因补施方式吸收效率较低；T5 处理使 CAT 活性提升至 146.20 U/g，增幅达 61.90%；T7 处理相较于 CK1 呈现轻微促进作用，但是明显低于 T5 处理的促进效果。结果说明在非盐胁迫下，CCEP 组分提升 CAT 活性的能力较好，且浸种处理优于浸种加补施处理。

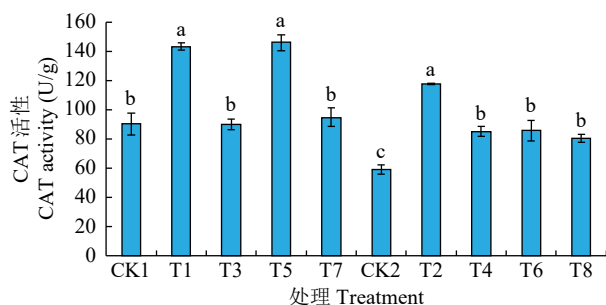


图 6 不同处理对小麦早期幼苗 CAT 活性的影响

Fig.6 Effects of different treatments on CAT activity in early stage wheat seedlings

在盐胁迫条件下，T2 处理仍保持极高 CAT 活性，与 CK2 相比提升了 98.64%，说明 GCEP 组分能有效缓解盐胁迫伤害；T4 处理虽然高于 CK2，提升了 43.91%，但增幅明显低于 T2 处理；T6 与 T8 处理与 CK2 相比分别提升了 44.93%与 35.81%。结果说明在盐胁迫条件下 GCEP 组分提高小麦 CAT 活性的能力较强，且浸种处理优于浸种加补施处理。

如图 7 所示，在无盐胁迫条件下，CK1 的 POD 活性达到 61.50 U/g，T1 处理使 POD 活性达到 86.93 U/g，提升幅度达 41.35%，T3 处理轻微促进，仅提升 8.56%，T5 处理浸种仅提高 5.53%。T7 处理轻微抑制。结果说明在非盐胁迫下，GCEP 组分提升小麦 POD 活性效果优于 CCEP 组分，且浸种处理优于浸种加补施处理。

在盐胁迫条件下，与 CK2 相比，T2 和 T4 处理的提升幅度分别为 31.26%和 18.39%；而 T6 和

T8 处理仅轻微提高，增幅分别为 7.03%和 7.91%，接近 CK2。这一结果说明在盐胁迫条件下 GCEP 组分更能有效激活小麦的抗氧化防御系统，且在单独浸种方式下效果最佳。

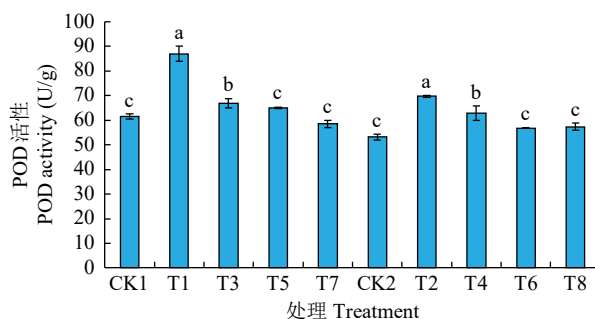


图 7 不同处理对小麦早期幼苗 POD 活性的影响

Fig.7 Effects of different treatments on POD activity in early stage wheat seedlings

3 讨论

多糖是自然界中含量丰富的物质类群之一，由生物体自身合成，一般是由 10 个以上单糖分子借助 α -和 β -糖苷键连接组成的天然高分子多聚物^[24]。食用菌多糖可以从子实体、菌丝体和发酵液中（胞外多糖）获得，且这 3 种来源的食用菌多糖均具有抗氧化、抗炎、抗癌与提高免疫力等良好的生理活性。区别于植物来源的多糖，食用菌多糖的生产具有生长周期短、产量高且过程安全可控的优势，已经作为功能性食品添加剂被应用于食品以及医药行业。除此之外，近年来的研究^[25-27]显示，食用菌多糖还具有植物免疫诱导剂的功效，不仅可以诱导植物产生系统获得性抗性，还可以促进植物的生长发育。本研究结果表明，GCEP 和 CCEP 组分在正常环境下对小麦种子的萌发和早期幼苗生长具有显著促进作用。GCEP 组分在 0.4 g/L 浓度时表现最佳，发芽势和发芽率分别提高 24.45%和 25.32%，而 CCEP 组分在相同浓度下对根长和地上部干重的促进效果更为突出，分别提高 27.19%和 25.41%。张中霄等^[10]采用不同比例的灵芝多糖对济麦 22、山农 23 和鲁原 502 进行拌种处理后发现，3 种小麦的发芽势、发芽率、株高及根系活力等指标均有提升，且存在种间差异性，同时灵芝多糖对 3 种小麦纹枯病的防治率在 22.40%~33.70%，具有一定的防御效果。本研究仅选用了 1 种小麦基因型作为研究对象，而不同基因型的小麦在种子萌发机制和生理代谢途径等方面的固有特性，可能导致其对多糖的吸收、利用及响应程度存在差别，因此在后续研究

中将会扩大小麦基因型的选取范围,进一步验证本研究结论的普适性。

本研究在筛选出 2 种胞外多糖促进小麦种子萌发和早期幼苗生物量增加的最适浓度后,进一步探讨了 2 种胞外多糖对小麦种子耐盐性的影响。盐胁迫对植物的抑制作用主要表现为渗透胁迫,植物在盐胁迫下根系对 K^+ 吸收减弱, Na^+ 离子吸收增加,导致细胞内外出现了渗透压,植物对水分、营养离子和矿物离子的吸收和运输受阻,从而导致植物生长矮小^[28]。相关研究^[29]指出,在盐碱土壤中添加微生物胞外多糖可以限制 Na^+ 流动,抑制植物根系对 Na^+ 和 Cl^- 的吸收,提高机体内脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白的积累,增强其对盐离子渗透胁迫的耐受性。除了渗透胁迫之外,盐胁迫还会使细胞内活性氧累积,促使细胞启动抗氧化防御系统,增强超氧化物歧化酶、CAT 和 POD 等抗氧化酶活性以清除大量的活性氧,缓解细胞受到的氧化应激损伤^[30]。结合本试验研究结果,在 150 mmol/L NaCl 盐胁迫条件下,GCEP 与 CCEP 组分均表现出优异的盐胁迫缓解效果,与对照相比,2 种胞外多糖组分均能显著促进小麦种子萌发,并有效增加早期幼苗生物量,这直接证实了多糖类物质可通过缓解盐胁迫引发的渗透胁迫发挥保护作用;抗氧化酶活性测定结果显示,2 种胞外多糖还能显著提高小麦体内 CAT 和 POD 活性。这一结果揭示,食用菌多糖可通过激活小麦细胞的抗氧化防御系统,增强其对盐胁迫所致细胞应激反应的抵御能力,从而减轻盐害损伤。

目前,与利用食用菌多糖浸种小麦相比,利用植物激素浸种小麦的研究^[31-34]较为广泛。与植物激素相比,食用菌多糖作为植物生长诱导剂具有多方面的优势。首先,食用菌多糖是天然生物大分子,具有可生物降解的特性,对环境无残留污染,其环境友好性更贴合当前绿色农业发展理念和有机生产的核心需求。其次,植物激素的作用较为专一,主要通过调控植物细胞分裂、伸长或分化等单一生理通路实现生长促进;而食用菌多糖在推动植物生长的同时,还能通过调节植物生理代谢、增强抗氧化防御系统和优化微环境等多重途径提升植物对盐害及干旱等逆境的抵抗能力,实现“促生长”与“抗逆性”的协同增效。最后,食用菌多糖的来源极为广泛,可通过子实体提取、菌丝体分离及液体发酵等多种成熟技术获取,其中液体发酵法在高效性、稳定性与经济性上表现尤为突出。一方面,该

方法能精准调控发酵过程中各项参数,既能在较短时间(数天至 2 周左右)批量收获多糖,又能确保多糖品质稳定可控,兼具高效性与稳定性;另一方面,其所用原料成本低廉,仅需通过扩大发酵罐规模即可便捷实现量产。这些优势赋予了液体发酵法显著的实用价值,使其更适合在实际农业生产中大规模推广应用。本研究为食用菌多糖在小麦生产中的实践应用提供了扎实的数据支撑与理论参考。未来可结合田间试验进一步验证多糖组分的实际应用效果,为绿色农业技术开发提供更全面的理论依据。

4 结论

GCEP 和 CCEP 组分在正常条件下均能显著促进小麦种子萌发和早期幼苗生长。其中,浓度筛选试验中,GCEP 组分 0.4 g/L 处理效果最为均衡,发芽势和发芽率分别较对照提升 24.45%和 25.32%,幼苗茎长、根长及地上部干重分别增长 13.66%、25.18%和 22.43%。而 CCEP 组分 0.4 g/L 对根系发育的促进更显著,根长和地上部干重较对照提升幅度达 25.91%和 20.24%。在非盐胁迫条件下,GCEP 和 CCEP 组分浸种与浸种加补施处理均可有效促进小麦种子萌发与早期幼苗生长。而盐胁迫条件下,GCEP 组分浸种处理与其他处理相比,表现出更强的抗逆性:发芽势较 CK2 提升 10.23%,CAT 活性增幅达 98.64%,显著缓解氧化损伤。CCEP 组分浸种加补施处理与其他处理相比,对茎长和地上部鲜重的促进更优,分别较 CK2 提升 21.81%和 41.50%。

参考文献

- [1] 孙娟,王新栋,郝彦敏,等. 引发处理对低发芽力小麦种子萌发和生理特性的影响. 作物杂志. (2025-05-08)[2025-07-24]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1808.S.20250508.1019.004>.
- [2] 孙志旭,尤迪,于双成,等. 肥料利用率低的原因及提高对策. 现代农业科技, 2022(10): 146-148, 155.
- [3] 王慧杰,高杰. 山西省化肥施用现状及分析. 种子科技, 2024, 42(18): 155-157.
- [4] Qiu D W, Dong Y J, Zhang Y, et al. Plant immunity inducer development and application. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2017, 30(5): 355-360.
- [5] 张国运. 香菇多糖对植物根生长及其基因表达的影响. 天津: 天津科技大学, 2015.
- [6] 牛小义. 新型生物杀菌剂真菌多糖在烟草病害防治中的研究和应用. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [7] 肖文斐,倪深,阮松林,等. 九种食用菌子实体多糖对水稻幼苗生长的影响. 食用菌学报, 2020, 27(1): 69-74.
- [8] 肖文斐,柴伟国,袁劫人,等. 基于蛋白质组解析大蒜盖菇多糖促进猕猴桃生长及抗高温的分子机制. 核农学报, 2022, 36(1): 94-104.
- [9] 张静,梁好,赵丹丹,等. 灵芝多糖提取技术研究进展. 食品安全导刊, 2024(22): 158-160.
- [10] 张中霄,王红艳,王开运,等. 灵芝多糖拌种对小麦抗纹枯病

- 的诱导效应及生长发育影响. 中国农业科学, 2018, 51(1): 96-104.
- [11] 仇月, 王开运, 姜莉莉, 等. 灵芝多糖及香菇多糖对番茄黄化曲叶病毒病的防治效果. 蔬菜, 2021(6): 52-56.
- [12] 任思竹, 宋蕊, 尹啸天, 等. 蛹虫草活性成分及药用功效研究进展. 安徽农业科学, 2025, 53(13): 7-11, 19.
- [13] Chen C, Wang M L, Jin C, et al. *Cordyceps militaris* polysaccharide triggers apoptosis and G₀/G₁ cell arrest in cancer cells. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2015, 18(3): 433-438.
- [14] 卢丽娜, 任翔, 何鹏搏, 等. 蛹虫草胞外多糖诱导番茄抗白粉病和晚疫病的效果. 中国植保导刊, 2021, 41(11): 5-9, 14.
- [15] 姚良同, 林榕珊, 李娟, 等. 泰山赤灵芝液体培养条件优化及多糖含量测定. 食品科学, 2005, 26(1): 94-97.
- [16] 李奕亭, 王文振, 赵嘉伟, 等. 真姬菇菌丝体发酵藜麦产物中多糖的抗氧化和 α -淀粉酶抑制活性. 食品研究与开发, 2022, 43(2): 19-27.
- [17] 周源, 都娇娇, 马双龙, 等. 微塑料溶解性有机质对小麦种子萌发和幼苗生长的影响. 环境化学, 2025, 44(4): 1505-1516.
- [18] 魏爱丽, 张婷, 王捷, 等. 普通念珠藻多糖对小麦种子萌发及幼苗生理特性的影响. 天津农业科学, 2024, 30(11): 19-24, 29.
- [19] 王征宏, 王卓, 王非凡, 等. H₂O₂ 引发提高盐胁迫下小麦种子活力的生理机制. 江苏农业科学, 2025, 53(9): 56-61.
- [20] 赵靖怡, 王宏凯, 李先发, 等. 干旱胁迫下褪黑素对小麦种子萌发和幼苗生长及生理特性的影响. 江苏农业科学, 2025, 53(2): 75-80.
- [21] 李向阳, 汪娟梅, 郭启辉. 海藻酸钠寡糖浸种对小麦种子萌发及幼苗生长的影响. 陕西农业科学, 2023, 69(12): 12-16.
- [22] 吕春芳, 李海霞, 贾然然, 等. 植物过氧化物酶活性测定实验方法的改良. 轻工科技, 2024, 40(2): 15-18.
- [23] 张爱慧, 崔群香, 杨梦娴, 等. 聚乙二醇-6000 胁迫对茄子幼苗生长及酶活性的影响. 江苏农业科学, 2022, 50(17): 138-142.
- [24] 杜维根, 白磊阳, 姜雪峰. 天然多糖的分子结构与生物活性功能. 化学教育, 2025, 46(10): 1-9.
- [25] 吴林娜, 刘梅, 李兴红. 多糖的生物活性及其在蔬菜中的应用. 蔬菜, 2021(5): 32-38.
- [26] 宁玉波. 灵芝多糖的提取及对番茄抗灰霉病诱导效应的研究. 泰安: 山东农业大学, 2016.
- [27] 李鹏鹏. 香菇多糖诱导黄瓜抗霜霉病的作用及与氟醚菌酰胺混效作用的研究. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- [28] Javed A S, Jaffar T M, Shahzad M S, et al. Optimization of nitrogen regulates the ionic homeostasis, potassium efficiency, and proline content to improve the growth, yield, and quality of maize under salinity stress. *Environmental and Experimental Botany*, 2024, 226: 105836.
- [29] 周莹, 黄丽瑾, 赵永娟, 等. 花期荆芥在盐胁迫下离子吸收、分布和挥发油成分的变化. 中国中药杂志, 2018, 43(22): 4410-4418.
- [30] 魏宏宇, 李怡, 彭帅英, 等. 胞外多糖促进胁迫条件下农作物生长的研究与展望. 江苏农业学报, 2022, 38(4): 1123-1134.
- [31] 尚宏芹, 刘兴坦. 6-BA 浸种对 HgCl₂ 胁迫下小麦种子萌发和幼苗生长的影响. 麦类作物学报, 2015, 35(10): 1438-1444.
- [32] 张建, 范光发, 姜辉. 磷酸二氢钾、赤霉素浸种对小麦种子萌发的影响. 园艺与种苗, 2020, 40(5): 51-53.
- [33] Sarwar G, Fatima M, Danish S, et al. Enhancing wheat growth under chromium toxicity using gibberellic acid and microbial inoculants as modulating agents. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 8356.
- [34] 张笑, 赵纯钦, 黄静, 等. 外源脱落酸、水杨酸对小麦种子萌发及生理特性的影响. 应用与环境生物学报, 2014, 20(1): 139-143.

Effects of Crude Exopolysaccharides from Taishan *Ganoderma lucidum* and *Cordyceps militaris* on Wheat Seed Germination

Li Yiting, Chen Yun, Zhang Jing, Gao Qingyun, Ban Litong

(College of Agronomy and Resources Environment, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

Abstract In this study, fermentation broths of *Ganoderma lucidum* and *Cordyceps militaris* were used as raw materials to extract exopolysaccharides via ethanol precipitation, obtaining *Ganoderma lucidum* crude exopolysaccharides (GCEP) and *Cordyceps militaris* crude exopolysaccharides (CCEP) components. Wheat seeds were soaked with polysaccharide components at different concentrations (0.0-3.0 g/L) to determine the germination potential, germination rate, and seedling biomass for screening the optimal soaking concentration. Under the optimal concentration, the effects of the two exopolysaccharides on wheat seed germination and early seedling growth were further explored through different treatment conditions. The results indicated that in a normal environment, both GCEP and CCEP significantly promoted wheat seed germination and seedling growth. GCEP showed the best effect at a concentration of 0.4 g/L, compared with the control, germination potential and germination rate increased by 24.45% and 25.32%, respectively, and seedling shoot length, root length, and aboveground dry weight were increased by 13.66%, 25.18%, and 22.43%, respectively. At the same concentration, the CCEP component had more significant promoting effects on root length and aboveground dry weight, compared with the control, which increased by 25.91% and 20.24%, respectively. Under salt stress (150 mmol/L NaCl) conditions, GCEP and CCEP promoted wheat growth by regulating antioxidant enzyme activities, which could alleviate the inhibitory effect of salt stress on wheat seed germination to a certain extent.

Key words *Ganoderma lucidum*; *Cordyceps militaris*; Crude exopolysaccharides; Wheat; Seed germination; Salt stress; Antioxidant enzyme activity