

灵芝胞外粗多糖对常温与高温环境下 白灵菇菌丝生长的影响

孙慧娴, 张菁, 高青云, 郭昱秀, 孙宁, 班立桐, 李奕葶

(天津农学院农学与资源环境学院 天津 300384)

摘要:为缩短白灵菇生长周期同时缓解高温对白灵菇菌丝生长带来的负面效应,以泰山赤芝为试材,采用液体发酵法(70%、85%、100%乙醇浓度沉淀)制备灵芝胞外粗多糖,简称为70% GLP、85% GLP、100% GLP,分别测定上述胞外多糖组分对白灵菇菌丝生长速度、高温胁迫后菌丝恢复速度、过氧化氢含量、丙二醛含量及胞内外酶活性的影响。结果表明,不同组分灵芝粗多糖中的总糖含量依次为100% GLP>70% GLP>85% GLP。3.0 mg·mL⁻¹ 85% GLP对白灵菇菌丝生长的促进作用最明显,生长速度最快,可达7.13 mm·d⁻¹,且能显著提升白灵菇菌丝胞内外酶活性;添加灵芝胞外粗多糖可促进高温胁迫后白灵菇菌丝恢复,其中85% GLP组分在长时间胁迫后恢复效果最优,12 h恢复速度最快,达到5.54 mm·d⁻¹,同时能减少白灵菇菌丝中丙二醛和过氧化氢的积累,提升其抗逆性,从而减轻高温的负面效应。综上,灵芝胞外粗多糖可以促进白灵菇菌丝生长,且显著提升胞内外酶活性,同时缓解高温胁迫后菌丝内过氧化氢和丙二醛的积累。本研究结果为白灵菇产业高效稳定发展奠定了基础。

关键词:灵芝胞外多糖;白灵菇;菌丝生长;高温胁迫

中图分类号:S646.1'4 文献标志码:A 文章编号:1673-2871(2026)04-127-07

Effects of *Ganoderma lucidum* crude exopolysaccharide on the mycelial growth of *Pleurotus tuoliensis* under normal and high temperature

SUN Huixian, ZHANG Jing, GAO Qingyun, GUO Yuxiu, SUN Ning, BAN Litong, LI Yiting

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

Abstract: To shorten the growth cycle of *Pleurotus tuoliensis* while mitigating the adverse effects of high temperature on its mycelial growth. In this study, *Ganoderma lucidum* was used as the test material. Crude extracellular polysaccharides of *G. lucidum* (GLP) were prepared via liquid fermentation and precipitation with ethanol at concentrations of 70%, 85%, and 100%, abbreviated as 70% GLP, 85% GLP, and 100% GLP, respectively. The effects of these extracellular polysaccharide fractions on mycelial growth rate, recovery rate after high-temperature stress, hydrogen peroxide (H₂O₂) content, malondialdehyde (MDA) content, and intracellular and extracellular enzyme activity of *P. tuoliensis* were determined. The results showed that the total sugar content among the different fractions of crude *G. lucidum* polysaccharides followed the order: 100% GLP>70% GLP>85% GLP. The results showed that the total sugar content in the different crude GLP fractions was in the order of 100% GLP>70% GLP>85% GLP. The 85% GLP fraction at 3.0 mg·mL⁻¹ exhibited the most significant promoting effect on the mycelial growth of *P. tuoliensis*, with the fastest growth rate reaching 7.13 mm·d⁻¹, and significantly enhanced the intracellular and extracellular enzyme activity of the mycelia. The addition of crude GLP promoted the recovery of *P. tuoliensis* mycelia after high-temperature stress. Among them, the 85% GLP fraction showed the optimal recovery effect after prolonged stress, with the fastest recovery rate of 5.54 mm·d⁻¹ at 12 h. Meanwhile, it reduced the accumulation of MDA and H₂O₂ in *P. tuoliensis* mycelia, improved its stress resistance, and thereby mitigated the negative effects of high temperature. In conclusion, crude extracellular polysaccharides from *G. lucidum* can promote

收稿日期:2025-08-05;修回日期:2025-11-19

基金项目:天津市科技计划项目(23ZYCGSN00870, 24ZYCGSN00070, 24ZYCGSN00270);甘肃省2024年中央引导地方科技发展资金项目(24ZYQH006);甘肃省科技计划项目(24CXNH019);天津市蔬菜现代农业产业技术体系创新团队(ITTVRS2024016)

作者简介:孙慧娴,女,在读本科生,研究方向为生物技术。E-mail:1762074752@qq.com

通信作者:李奕葶,女,讲师,主要从事菌类作物研究。E-mail:liyitingyoyo@163.com

班立桐,男,教授,主要从事食用菌栽培研究。E-mail:banlitong@126.com

the mycelial growth of *P. tuoliensis*, significantly enhance intracellular and extracellular enzyme activities, and alleviate the accumulation of H_2O_2 and MDA in mycelia under high-temperature stress. The results of this study lay a foundation for the efficient and stable development of the *P. tuoliensis* industry.

Key words: *Ganoderma lucidum* exopolysaccharide; *Pleurotus tuoliensis*; Mycelial growth; High-temperature stress

白灵菇(*Pleurotus tuoliensis*)别称天山白灵芝,属伞菌纲伞菌目侧耳科^[1],子实体通体洁白,肉质细嫩且风味独特,是一种食用性较高的食用菌。白灵菇富含蛋白质、碳水化合物、脂肪及纤维素,并含18种氨基酸及磷、铁、钙等矿物元素,具有极高的营养价值和经济价值^[2-3]。已有文献证实,白灵菇具有抗辐射、抗肿瘤、增强免疫力等多种生理活性^[4]。赤芝是灵芝的主要品种,主要分布在中国的吉林、山东、安徽、福建等地,赤芝的营养成分多而复杂,含有多糖、蛋白质、三萜、多肽等多种活性成分。其中,多糖是其主要的功效物质^[5]。

在生长特性方面,白灵菇菌丝生长需要相当长的后熟阶段,个别菌株甚至在80 d以上,生产安排上极不方便,大大延长了生产周期,降低了生产及经济效益^[6]。在温度要求上,白灵菇菌丝生长最适温度为25℃左右,但农业栽培条件下,发菌阶段正值7月底至8月底的高温期,常遭遇35℃自然高温伤害,发生烧菌现象,导致减产^[7]。菌丝生长周期长和高温等问题均对白灵菇的规模化生产和经济效益提升带来了挑战。菌丝的培养是获得子实体高产优质的基础,而人们往往在实际培养过程中容易忽视菌丝体的培养环境^[8],因此如何通过外源添加物优化菌丝生长环境、提高菌丝活力成为食用菌研究的重要方向之一。

液态发酵来源的灵芝胞内外多糖除了具有免疫调节活性外,还具有显著的抗炎活性、修复愈伤活性等功效^[9]。但目前关于多糖类物质对食用菌菌丝生长的直接调控作用及其机制的研究仍较为有限。因此,笔者将泰山赤芝胞外粗多糖(简称GLP)添加至PDA培养基,根据菌丝生长速度与菌丝特性筛选灵芝胞外粗多糖的最适添加浓度,并在最适添加浓度条件下测定白灵菇菌丝胞内酶与胞外酶活性。为进一步探讨灵芝胞外粗多糖对白灵菇菌丝耐热性的影响,将白灵菇菌丝于37℃条件下胁迫6~12 h,根据菌丝生长速度以及菌丝生长特性等指标,研究灵芝胞外粗多糖缓解高温胁迫对白灵菇菌丝损伤的影响,以期为解决白灵菇菌丝生长周期长、耐热性较弱等生产难题提供理论依据与实践参考,为白灵菇产业高效稳定发展提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于2024年12月至2025年5月在天津农学院菌物科学与工程实验室完成。供试的泰山赤芝菌种与白灵菇TN01菌种均来源于天津农学院食用菌研发中心。

1.2 灵芝胞外粗多糖制备及成分测定

1.2.1 灵芝液体发酵 斜面培养:用200 g马铃薯、20 g葡萄糖、20 g琼脂配制1 L PDA培养基,分装于试管和平板中备用。将活化好的灵芝母种转接至试管斜面中,25℃恒温培养。

平板培养:待菌丝生长到合适阶段后转移到平板培养基中继续扩大培养。使用0.5 cm打孔器打孔。

深层液体发酵培养:根据姚良同等^[10]设计的泰山灵芝菌丝体积累多糖最适培养基成分比例配制液体培养基。培养基配方:KH₂PO₄ 0.1%, MgSO₄·7H₂O 0.05%, (NH₄)₂SO₄ 0.2%, 蛋白胨 0.3%, 蔗糖 5%, pH 5.0。将配制好的液体培养基分装至250 mL的锥形瓶中,每瓶约100 mL培养基。每瓶接种量3块。将接种完成的培养基放入25℃、200 r·min⁻¹振荡培养7 d。

1.2.2 灵芝胞外粗多糖制备与总糖含量测定 采用分级醇沉的方法^[11]将70%、85%、100%等3种不同浓度的乙醇按照体积比4:1对发酵液进行醇沉,冷冻干燥后得到3种不同的灵芝胞外粗多糖,编号为100% GLP、85% GLP、70% GLP,分别称质量并采用苯酚硫酸法测定3组胞外粗多糖的总糖含量^[12]。

1.3 白灵菇菌丝生长试验

1.3.1 菌种活化 用200 g马铃薯、葡萄糖和琼脂各20 g的比例配制1 L PDA培养基。将配好的培养基分装备用。将白灵菇TN01活化,转接试管斜面。转接后的白灵菇菌丝生长至合适阶段时再次转接至平板。待菌丝长满平板时选取菌丝生长较优的培养基进行打孔接种。

1.3.2 PDA与灵芝粗多糖-PDA培养基的制备 分别取100% GLP、85% GLP、70% GLP 3种多糖按表1灵芝粗多糖培养基配方配制灵芝粗多糖-PDA培

表1 灵芝粗多糖培养基配方
Table 1 Formulation of GLP fermentation medium
(g·L⁻¹)

编号 No.	ρ (马铃薯) Potato content	ρ (葡萄糖) Dextrose content	ρ (琼脂) Agar content	ρ (粗多糖) Crude polysaccharide content
CK	200	20	20	0.00
1	200	20	20	0.05
2	200	20	20	0.10
3	200	20	20	0.15
4	200	20	20	0.20
5	200	20	20	0.25

培养基。然后放入 120 °C、20 min 高压灭菌,倒平板,以备后续使用。

1.3.3 白灵菇菌丝体生长观测试验 挑选 1.3.1 中长势较好的白灵菇菌丝平板,用 1 cm 打孔器打孔,分别接种至 1.3.2 中的培养基中,观察菌丝长势。

1.3.4 高温胁迫菌丝生长观测试验 挑选 1.3.1 中长势较好的白灵菇菌丝平板并接种至 100% GLP、85% GLP、70% GLP 不同浓度的灵芝多糖-PDA 培养基与对照组培养基中央,每组设置 3 组 37 °C 高温胁迫。试验组(70% GLP、85% GLP、100% GLP)和对照组(PDA)以 2 h 为梯度依次递增高温胁迫 6~12 h,高温胁迫完成后于 25 °C 恢复培养 48 h,并设置空白对照组(CK)。观察菌丝形态,对比各组菌丝生长情况,并计算菌丝恢复后的生长速度^[13]。

1.4 活性物质测定

参照张熙凯等^[14]的方法稍作改动测定纤维素酶活性,采用 DNS 法测定样品木聚糖酶活性,采用 ABTS 法测定样品漆酶活性,采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性^[15]。采用北京索莱宝科技有限公司提供的试剂盒分别测定样品过氧化氢酶(CAT)活性、过氧化氢含量、丙二醛(MDA)含量。

1.5 数据分析

采用 Excel 2010 软件进行数据统计分析,采用 SPSS 26.0 对数据进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同组分乙醇对灵芝胞外粗多糖得率与总糖含量的影响

结果如表 2 所示,70% GLP、85% GLP、100% GLP 处理的灵芝胞外粗多糖组分得率分别为 3.70、2.39 与 24.90 g·L⁻¹。3 个组分中,100%浓度乙醇醇沉所得的多糖得率最高,是 85% GLP 的 10.4 倍,是 70% GLP 的 6.7 倍。其中 100% GLP 总糖含量最

高,为 954.37 mg·g⁻¹,85% GLP 总糖含量最低,为 715.61 mg·g⁻¹,二者差异显著,70% GLP 的总糖含量处于两者之间,且与 100% GLP 和 85% GLP 差异不显著。

表2 灵芝胞外粗多糖得率

Table 2 Yield of crude *G. lucidum* exopolysaccharides

组分 Fraction	得率 Yield/(g·L ⁻¹)	w(总糖) Total sugar content/(mg·g ⁻¹)
70% GLP	3.70	830.86±6.30 ab
85% GLP	2.39	715.61±18.27 b
100% GLP	24.90	954.37±17.83 a

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

2.2 灵芝胞外粗多糖对白灵菇菌丝生长的影响

2.2.1 灵芝胞外粗多糖对菌丝生长速度及生物学特性的影响 由表 3 可知,70% GLP 组分的多糖添加浓度(ρ ,后同)为 0.5 mg·mL⁻¹时菌丝生长速度最快,为 6.68 mm·d⁻¹,较 CK 显著提高了 25.09%。100% GLP 组分多糖 3.0 mg·mL⁻¹添加浓度时,菌丝生长速度较 CK 显著提高 23.03%,但在添加浓度为 0.5 mg·mL⁻¹时对菌丝的生长速度具有轻微的抑制作用。85% GLP 组分在 1.5、2.5 和 3.0 mg·mL⁻¹浓度时菌丝生长速度与 CK 均呈显著差异,其中在 3.0 mg·mL⁻¹浓度时生长速度最快,达 7.13 mm·d⁻¹,较 CK 显著提高 33.52%。通过不同浓度不同组分对菌丝生长作用的影响,发现 85% GLP 在浓度为 3.0 mg·mL⁻¹时对菌丝生长的促进作用最佳。因此,后续选取 3.0 mg·mL⁻¹85% GLP 进行酶活性测定试验。

表3 不同浓度 GLP 对白灵菇菌丝生长速度的影响

Table 3 Effects of various concentrations of GLP on mycelial growth speed of *P. tuoliensis* (mm·d⁻¹)

ρ /(mg·mL ⁻¹)	100% GLP	85% GLP	70% GLP
CK(0)	5.34±0.14 bc	5.34±0.14 c	5.34±0.14 b
0.5	5.18±0.62 c	5.61±0.28 bc	6.68±0.22 a
1.0	6.16±0.23 ab	5.78±0.29 bc	5.62±0.32 b
1.5	6.21±0.38 ab	6.12±0.29 b	5.38±0.51 b
2.0	6.33±0.22 ab	5.74±0.06 bc	6.05±0.31 a
2.5	6.18±0.11 ab	6.82±0.10 a	5.80±0.28 b
3.0	6.57±0.20 a	7.13±0.20 a	5.36±0.11 b

由表 4 与图 1 可知,3 种粗多糖对白灵菇菌丝的长势、色泽、密度以及满皿时间都有一定的影响。表 4 中添加了 0.5 和 2.0 mg·mL⁻¹ 70% GLP、2.5 和 3.0 mg·mL⁻¹ 85% GLP 以及 3.0 mg·mL⁻¹ 100% GLP 的白灵菇菌丝满皿时间可缩短为 7 d

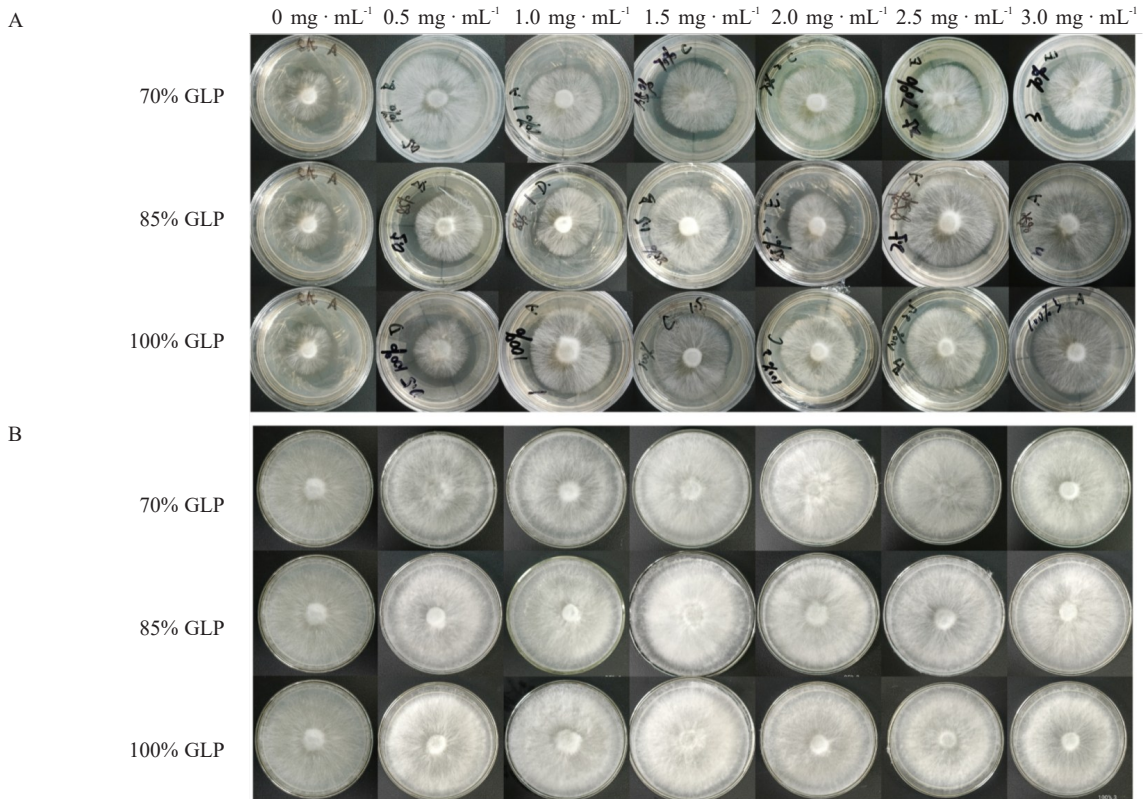
表4 不同浓度GLP处理的白灵菇菌丝生长状态

Table 4 Mycelial growth status of *P. tuoliensis* under various concentrations of GLP

处理 Treat- ment	w/ (mg·g ⁻¹)	菌丝长势 Mycelial vigor	菌丝色泽 Mycelial color	菌丝密度 Mycelial density	满皿时间 Time of full colonization/d	处理 Treat- ment	w/ (mg·g ⁻¹)	菌丝长势 Mycelial vigor	菌丝色泽 Mycelial color	菌丝密度 Mycelial density	满皿时间 Time of full colonization/d
70% GLP	0.5	+++	洁白 Pure white	浓密 Dense	7	100% GLP	0.5	+	浓白 Opaque white	浓密 Dense	9
	1.0	++	洁白 Pure white	较密 Moderately dense	8		1.0	++	浓白 Opaque white	浓密 Dense	8
	1.5	++	浓白 Opaque white	较密 Moderately dense	8		1.5	++	浓白 Opaque white	浓密 Dense	8
	2.0	+++	浓白 Opaque white	浓密 Dense	7		2.0	++	洁白 Pure white	较密 Moderately dense	8
	2.5	+	洁白 Pure white	较密 Moderately dense	9		2.5	++	洁白 Pure white	较密 Moderately dense	8
	3.0	+	洁白 Pure white	浓密 Dense	9		3.0	+++	洁白 Pure white	较密 Moderately dense	7
85% GLP	0.5	+	洁白 Pure white	较密 Moderately dense	9	CK	0	+	洁白 Pure white	较稀疏 Moderately sparse	9
	1.0	++	洁白 Pure white	较密 Moderately dense	8						
	1.5	+++	浓白 Opaque white	浓密 Dense	8						
	2.0	++	浓白 Opaque white	浓密 Dense	8						
	2.5	+++	浓白 Opaque white	浓密 Dense	7						
	3.0	+++	浓白 Opaque white	浓密 Dense	7						

注: +表示长势一般, ++表示长势较旺盛, +++表示长势旺盛。

Note: + indicates fair vigor, ++ indicates strong vigor, and +++ indicates robust vigor.



注:A为接种第6天的菌丝生长情况;B为接种第10天的菌丝生长情况。

Note: A. Mycelial growth status after incubation for 6 d; B. Mycelial growth status after incubation for 10 d.

图1 白灵菇菌丝生长情况

Fig. 1 Growth status of *P. tuoliensis* mycelial

(CK 满皿时间为 9 d),这一结果与菌丝生长速度的观测结果一致。图 1-B 呈现了接种 10 d 后的菌丝生长状态,从图中可直观观察到:添加 3 种 GLP 组分的白灵菇菌丝较 CK 更为浓密,色泽也更为洁白。以上结果表明,GLP 不仅能促进白灵菇菌丝生长,还可明显改善其形态学特征。

2.2.2 灵芝胞外粗多糖对白灵菇胞外酶与胞内酶活性的影响 根据白灵菇菌丝生长促进试验结果,选取 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 85% GLP 进行酶活性测定试验。由表 5 可知,添加 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 85% GLP 灵芝粗多糖的白灵菇菌丝的纤维素酶、木聚糖酶、漆酶活性分别为 102.13 、 113.61 与 $122.17 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$,较 CK

分别显著提高了 46.11%、32.34%、40.96%。添加粗多糖的白灵菇菌丝酶活性显著高于未添加粗多糖的对照,从而推测灵芝粗多糖可以促进白灵菇对纤维素酶、木聚糖酶、漆酶的利用,通过提高其酶活性促进菌丝生长。

$3.0 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 85% GLP 对白灵菇胞内酶活性的检测结果显示(表 5),添加了灵芝粗多糖培养基中的白灵菇菌丝的过氧化氢酶活性为 $1.82 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$,过氧化物酶活性为 $12.90 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$,较 CK 分别显著提高了 91.58%、83.76%。由此说明,85% GLP 可以有效促进白灵菇细胞内抗氧化酶活性,以抵御环境胁迫造成的细胞损伤。

表 5 菌丝胞内酶及胞外酶活性

Table 5 Intracellular and extracellular enzyme activity of mycelia

处理 Treatment	纤维素酶活性/ Cellulase activity/ ($\text{U} \cdot \text{mg}^{-1}$)	木聚糖酶活性/ Xylanase activity/ ($\text{U} \cdot \text{mg}^{-1}$)	漆酶活性/ Laccase activity/ ($\text{U} \cdot \text{mg}^{-1}$)	过氧化氢酶活性/ Catalase activity/ ($\text{U} \cdot \text{mg}^{-1}$)	过氧化物酶活性/ Peroxidase activity/ ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$)
85% GLP	$102.13 \pm 9.17 \text{ a}$	$113.61 \pm 2.50 \text{ a}$	$122.17 \pm 7.13 \text{ a}$	$1.82 \pm 0.63 \text{ a}$	$12.90 \pm 3.13 \text{ a}$
CK	$69.90 \pm 6.10 \text{ b}$	$85.85 \pm 8.61 \text{ b}$	$86.67 \pm 11.96 \text{ b}$	$0.95 \pm 0.08 \text{ b}$	$7.02 \pm 1.75 \text{ b}$

2.3 高温胁迫条件下灵芝胞外粗多糖对白灵菇菌丝恢复生长速度的影响

根据菌丝生长促进试验的筛选结果,分别选取 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 70% GLP、 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 85% GLP 和 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 100% GLP 等 3 个最优浓度组,进一步探讨不同 GLP 组分对白灵菇菌丝高温胁迫的缓解效果。试验结果如表 6 所示,添加了 3 种 GLP 的培养基菌丝的恢复速度在不同胁迫时间条件下均优于相同胁迫时间的 PDA 组(处理对照组),而且随着胁迫时间的延长,GLP 对菌丝恢复的促进效果基本呈逐渐增强的趋势。经 12 h 胁迫处理后,70% GLP、85% GLP 与 100% GLP 的菌丝恢复生长速度均为各自组内不同胁迫时间中的最大值,分别为 4.82 、 5.54 和 $5.22 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$;而同期处理对照组(PDA 组)在 12 h 胁迫后的菌丝恢复生长速度仅为 $4.18 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,表明添加 GLP 可有效加快高温胁迫后白灵菇菌丝的恢复生长进程,明显缓解高温胁迫对菌丝造成的损伤,且 85% GLP 对长时间高温胁迫后白灵菇菌丝生长的恢复作用要优于其他 2 种 GLP。

2.4 灵芝胞外粗多糖对白灵菇菌丝高温胁迫后过氧化氢及丙二醛含量的影响

由于 85% GLP 缓解白灵菇高温胁迫的效果较为显著,因此进一步探讨 85% GLP 对白灵菇高温胁迫 12 h 后细胞内过氧化氢及丙二醛积累情

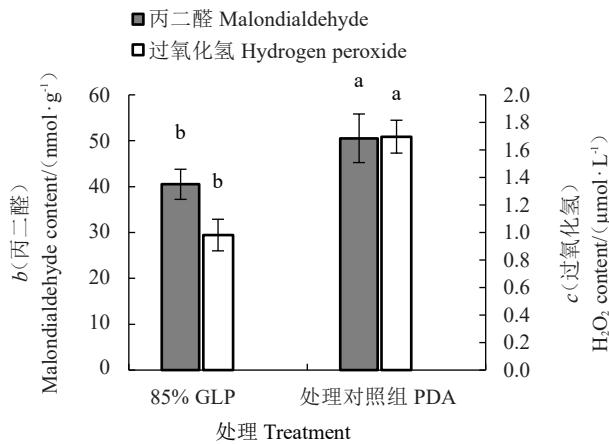
表 6 高温胁迫后不同 GLP 对白灵菇菌丝恢复生长速度的影响

Table 6 Effects of GLP on the recovery growth rate of *P. tuoliensis* mycelia under high temperature stress

($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)

处理 Treatment	胁迫时间 Stress time/h	恢复后速度 Recovery rate
70% GLP	6	$4.28 \pm 0.45 \text{ bcd}$
	8	$4.34 \pm 0.15 \text{ bcd}$
	10	$4.73 \pm 0.48 \text{ bcd}$
	12	$4.82 \pm 0.37 \text{ bcd}$
85% GLP	6	$4.28 \pm 0.13 \text{ bcd}$
	8	$4.29 \pm 0.21 \text{ bcd}$
	10	$5.13 \pm 0.38 \text{ bcd}$
	12	$5.54 \pm 0.52 \text{ b}$
100% GLP	6	$4.38 \pm 0.31 \text{ bcd}$
	8	$4.27 \pm 0.16 \text{ bcd}$
	10	$5.18 \pm 0.27 \text{ bc}$
	12	$5.22 \pm 0.47 \text{ bc}$
处理对照组 PDA	6	$4.08 \pm 0.49 \text{ bcd}$
	8	$3.79 \pm 0.25 \text{ d}$
	10	$4.03 \pm 0.24 \text{ cd}$
	12	$4.18 \pm 0.14 \text{ bcd}$
空白对照组 CK	0	$5.78 \pm 0.31 \text{ a}$

况的影响。由图 2 可知,添加了 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 85% GLP 后,可以显著减少高温胁迫后白灵菇细胞内的过氧化氢与丙二醛含量。85% GLP 组分菌丝中的



注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Different small letters indicate significant difference at 0.05 level.

图2 高温胁迫后菌丝中丙二醛和过氧化氢含量
Fig. 2 MDA and H₂O₂ content of mycelial under high temperature stress

过氧化氢含量为 0.98 μmol·L⁻¹,较 PDA 组(处理对照组)显著下降了 42.35%。PDA 组的 MDA 含量为 50.53 nmol·g⁻¹,而 85% GLP 组的菌丝 MDA 含量为 40.23 nmol·g⁻¹,显著下降了 20.38%。以上结果说明,85% GLP 组分可通过显著降低高温胁迫后白灵菇菌丝细胞内过氧化氢与丙二醛含量,有效减少氧化应激诱导的过氧化物在细胞内的过量积累,进而减轻氧化损伤对细胞结构与功能的破坏,发挥对菌丝细胞的保护效应。

3 讨论与结论

食用菌多糖是一类从食药菌中分离出的高分子聚合物,通常由 10 个以上的单糖通过糖苷键连接而成^[16]。目前,柱层析和膜过滤是多糖分离纯化的常用技术,但是两种方法成本较高且处理量较小,不适合用于较大规模生产^[17]。分级醇沉作为初步纯化多糖的方法,可以将不同分子质量大小的多糖有效分离,且乙醇体积分数越高,多糖分子质量越小^[18]。多糖的分子质量不同,其生物活性也存在一定差异。现有研究证实,大分子质量多糖因溶液黏度较高,水溶性较差^[19],不仅不利于自身的吸收利用^[20],还会降低其生物活性^[21]。而低分子质量多糖有较多的游离氨基和羟基,更利于发挥活性作用^[22-23]。结合本研究的试验结果可知,在 70% GLP、85% GLP 和 100% GLP 等 3 个多糖组分中,85% GLP 的生物活性最强,在促进白灵菇菌丝生长及缓解其高温胁迫

方面效果最为显著。值得注意的是,尽管 85% GLP 的分子质量大于 70% GLP,但其生物活性却优于 70% GLP。这一结果表明,分子质量并非决定多糖生物活性的唯一因素,其活性还可能与多糖的单糖组成、官能团结构、空间构型等其他因素相关^[24-25]。

灵芝多糖已被证实具有抗氧化^[26]、抗衰老^[27]、提高机体免疫力^[28]、促进植物生长以及调节植物防御反应^[29-30]等多种生物活性,但灵芝多糖在促进食用菌生长发育以及抗逆方面的研究甚少。而作为植物生长激素的吲哚乙酸、萘乙酸以及赤霉素等植物生长调节剂已经被广泛用于食用菌栽培。Guo 等^[31]研究表明,适当浓度的吲哚乙酸、吲哚丁酸和萘乙酸能促进桑黄菌丝的生长,萘乙酸浓度为 5.0 mg·L⁻¹时最适合菌丝生长。李福后等^[32]利用植物激素添加到杏鲍菇的培养基中,结果显示,赤霉素与萘乙酸有助于杏鲍菇菌丝生长,且 50 mg·L⁻¹赤霉素有利于多酚氧化酶和漆酶活性提高。在本试验中,3.0 mg·L⁻¹ 85% GLP 促进白灵菇菌丝生长的速度与对照组(CK)相比显著提高了 33.52%,纤维素酶、木聚糖酶与漆酶活性较 CK 分别显著提高了 46.11%、32.34% 与 40.96%,过氧化氢酶与过氧化物酶活性也较 CK 分别显著提高了 91.58%与 83.76%。而且添加灵芝胞外粗多糖可以有效提高白灵菇菌丝的耐热性,当白灵菇菌丝在 37 °C 下胁迫 12 h 时,与处理对照组相比,3 种灵芝胞外粗多糖均可以提高白灵菇菌丝恢复后的生长速度。其中 85% GLP 还可以显著降低白灵菇菌丝内过氧化氢与丙二醛含量,缓解高温胁迫导致的白灵菇菌丝氧化应激损伤。以上结果表明,灵芝胞外粗多糖不仅能有效促进白灵菇菌丝生长,激活胞外酶活性,还可通过提升抗氧化酶系统活性,降低高温胁迫后过氧化物的积累量,从而缓解白灵菇菌丝的氧化应激损伤,并促进其恢复生长。与植物激素相比,食用菌多糖作为植物生长诱导剂具有对环境友好(可被微生物降解)、协同增效(促生与抗逆)、来源广泛(子实体、菌丝体与液体发酵)等优点,更贴合当前绿色农业发展的理念和有机生产的核心需求,且生产过程可控并易于规模化推广。

综上所述,85% GLP 在浓度为 3.0 mg·mL⁻¹时,其对白灵菇菌丝生长的促进作用最好。在培养基中加入灵芝胞外粗多糖后,可以促进白灵菇菌丝生长并提高其胞外酶与胞内抗氧化酶活性,且 85% GLP 可以显著降低菌丝丙二醛和过氧化氢含量,从

而提升菌丝抗逆性,减轻高温造成的负面影响。

参考文献

- [1] ZHAO M R, ZHANG J X, CHEN Q, et al. The famous cultivated mushroom Bailinggu is a separate species of the *Pleurotus eryngii* species complex[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 33066.
- [2] 李淑芳, 张志军, 陈晓明. 白灵菇贮藏特性及保鲜技术研究进展[J]. 中国食用菌, 2007, 26(2): 7-9.
- [3] 曹瑶, 闻绍锋, 刘书畅, 等. 白灵菇研究进展综述[J]. 食药用菌, 2019, 27(3): 169-173.
- [4] 贾月梅, 马国需, 孙照翠, 等. 白灵菇的化学成分及其抗宫颈癌细胞活性研究[J]. 天然产物研究与开发, 2023, 35(12): 2088-2093.
- [5] 郭晓丹, 林义利, 张卫红, 等. 赤芝全成分及应用研究进展综述[J]. 中国化妆品, 2024(6): 90-95.
- [6] 曹德宾, 刘海燕, 别庆福. 白灵菇人为调控短育栽培技术[J]. 四川农业科技, 2008(9): 39.
- [7] 孟娟娟. 一氧化氮和海藻糖对白灵侧耳高温响应抗氧化途径的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [8] 赵占军, 张勇, 李毅, 等. 白灵菇生理生化研究进展[J]. 山西农业科学, 2012, 40(3): 292-294.
- [9] 段语嫣, 冯杰, 刘艳芳, 等. 灵芝液态发酵胞内外多糖结构特征及其活性研究进展[J]. 微生物学通报, 2023, 50(6): 2721-2737.
- [10] 姚良同, 林榕姗, 李娟, 等. 泰山赤灵芝液体培养条件优化及多糖含量测定[J]. 食品科学, 2005(1): 94-97.
- [11] 张静, 梁好, 赵丹丹, 等. 灵芝多糖提取技术研究进展[J]. 食品安全导刊, 2024(22): 158-160.
- [12] 张志军, 刘建华, 李淑芳, 等. 灵芝多糖含量的苯酚硫酸法检测研究[J]. 食品工业科技, 2006(2): 193-195.
- [13] 卢方, 马银鹏, 王雷, 等. 食用菌高温胁迫应答相关研究进展[J]. 北方园艺, 2025(6): 136-141.
- [14] 张熙凯, 陈兴喆, 霍心平, 等. 白灵菇菌糠栽培基质对杏鲍菇菌丝生长的影响[J]. 天津农业科学, 2023, 29(11): 45-49.
- [15] 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[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(17): 138-142.
- [16] 刘继攀, 李佳欢, 张紫华, 等. 分级醇沉对真姬菇多糖抗氧化活性的影响[J]. 食品科技, 2018, 43(1): 210-214.
- [17] DE JESUS L I, SMIDERLE F R, CORDEIRO L M C, et al. Simple and effective purification approach to dissociate mixed water-insoluble α - and β -D-glucans and its application on the medicinal mushroom *Fomitopsis betulina*[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 200: 353-360.
- [18] 邹玉莲, 甘陈灵, 李鹏. 灵芝多糖现代药理学研究进展[J]. 海峡药学, 2018, 30(8): 28-30.
- [19] 王文帅. 灵芝菌丝体多糖的结构表征及其改善血脂紊乱的相关机制探究[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2023.
- [20] LU J H, HE R J, SUN P L, et al. Molecular mechanisms of bioactive polysaccharides from *Ganoderma lucidum* (Lingzhi), a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 150: 765-774.
- [21] ZHANG Z S, WANG X M, ZHAO M X, et al. Free-radical degradation by $Fe^{2+}/Vc/H_2O_2$ and antioxidant activity of polysaccharide from *Tremella fuciformis*[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 112: 578-582.
- [22] LI X, PENG B, CHEUNG P C K, et al. Depolymerized non-digestible sulfated algal polysaccharides produced by hydrothermal treatment with enhanced bacterial fermentation characteristics[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 130: 107687.
- [23] ZHU B W, NI F, XIONG Q, et al. Marine oligosaccharides originated from seaweeds: Source, preparation, structure, physiological activity and applications[J]. Critical reviews in food science and nutrition, 2021, 61(1): 60-74.
- [24] ZHAO L Y, DONG Y H, CHENG T, et al. Extraction, purification, characterization and antitumor activity of polysaccharides from *Ganoderma lucidum*[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 80(3): 783-789.
- [25] 张桂凤, 刘闯, 刘光东, 等. 植物多糖的抗肿瘤机制及其构效关系研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 428-437.
- [26] XU Y, ZHANG X, YAN X H, et al. Characterization, hypolipidemic and antioxidant activities of degraded polysaccharides from *Ganoderma lucidum*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 135: 706-716.
- [27] WANG J, CAO B, ZHAO H P, et al. Emerging roles of *Ganoderma lucidum* in anti-aging[J]. Aging and Disease, 2017, 8(6): 691-707.
- [28] LIU Z G, ZHU T Y, HE J, et al. Adjuvant activity of *Ganoderma lucidum* polysaccharide liposomes on porcine circovirus type-II in mice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 141: 1158-1164.
- [29] 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[J]. 中国农业科学, 2018, 51(1): 96-104.
- [30] 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[J]. 蔬菜, 2021(6): 52-56.
- [31] GUO X, ZOU X, SUN M. Effects of phytohormones on mycelial growth and exopolysaccharide biosynthesis of medicinal mushroom *Pellinus linteus*[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2009, 32(5): 701-707.
- [32] 李福后, 王伟霞, 吉苗, 等. 植物激素对杏鲍菇菌丝体生长代谢的影响[J]. 北方园艺, 2018(13): 152-156.