



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

《天津科技大学学报》网络首发论文

题目： 外源 β -葡聚糖对干旱胁迫下小白菜生长发育和品质产量的影响
作者： 曲丽君, 田桂英, 李萍, 张悦强, 包万军, 唐娜
DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20250049
收稿日期: 2025-03-14
网络首发日期: 2026-01-29
引用格式: 曲丽君, 田桂英, 李萍, 张悦强, 包万军, 唐娜. 外源 β -葡聚糖对干旱胁迫下小白菜生长发育和品质产量的影响[J/OL]. 天津科技大学学报.
<https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20250049>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20250049

外源 β -葡聚糖对干旱胁迫下小白菜生长发育和品质产量的影响

曲丽君^{1,2}, 田桂英¹, 李萍², 张悦强², 包万军², 唐娜¹

(1. 天津科技大学化工与材料学院, 天津 300457; 2. 天津天隆江大生物科技有限公司, 天津 300457)

摘要: 以“绿快2号”小白菜品种为试材, 采用盆栽方式, 设置轻度、中度、重度干旱3个土壤水分状态, 以正常供水为对照, 设置清水及3个 β -葡聚糖质量浓度梯度对其进行灌根处理, 测定各处理对小白菜生长及品质的影响, 以期为小白菜的提质增产和农业节水抗旱提供参考依据。结果表明: 在轻度干旱胁迫条件下, 浇灌0.1 g/L β -葡聚糖可显著增加小白菜的株高, 促进叶绿素合成, 增强叶片的净光合速率, 使小白菜增产6.30%, 显著增加可溶性糖(增加15.89%)及维生素C(增加5.83%)含量($P < 0.05$), 降低可溶性蛋白和硝酸盐含量。 β -葡聚糖可显著减缓轻度干旱胁迫对小白菜造成的负面影响, 增强抗旱能力, 有效促进其生长发育, 提高产量和品质。

关键词: 水分胁迫; 小白菜; β -葡聚糖; 生长发育; 产量; 品质

中图分类号: S634.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(0000)00-0000-00

Effects of Exogenous β -Glucan on Growth, Development, Quality and Yield of *Brassica chinensis* L. under Drought Stress

QU Lijun^{1,2}, TIAN Guiying¹, LI Ping², ZHANG Yueqiang², BAO Wanjun², TANG Na¹

(1. College of Chemical Engineering and Materials Science, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. Tianjin Tianlong Jiangda Biotechnology Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

Abstract: The *Brassica chinensis* LLükuai 2[#] is utilized as test samples, to establishing three soil moisture conditions (mild-, moderate-, and severe drought stress) with normal water supply as the control. Root irrigation treatments included pure water and three β -glucan concentration gradients. The effects of these treatments on Lükuai 2[#] were analyzed to provide references for yield improvement, quality enhancement, and agricultural water-saving. These results showed that under mild drought stress, irrigation with 0.1 g/L β -glucan significantly increased plant height with the promoted chlorophyll synthesis and net photosynthetic rate, thus increasing yield by 6.30%. Also, soluble sugar and vitamin C contents increased by 15.89% and 5.83% ($P < 0.05$), respectively, while soluble protein and nitrate contents inversely decreased. Therefore, β -glucan alleviated negative impacts of mild drought stress on *Brassica chinensis* L., enhancing drought resistance and its yield and quality.

Key words: water stress; *Brassica chinensis* L.; β -glucan; growth and development; yield; quality

干旱是制约全球农业可持续发展的主要非生物胁迫因子之一, 严重威胁着国家粮食安全^[1]。随着我

国国民经济的快速发展, 水资源短缺问题愈发凸显, 农田缺水情况不断加剧, 导致农作物大幅减产^[2-3]。

收稿日期: 2025-03-14; 修回日期: 2025-06-08

作者简介: 曲丽君(1985—), 女, 黑龙江伊春人, 高级农艺师, 博士研究生; 通信作者: 唐娜, 教授, tjtangna@tust.edu.cn

因此,降低水分胁迫对农作物产量和品质的不良影响,具有十分重要的现实意义。

小白菜 (*Brassica chinensis* L.) 作为中国本土的不结球白菜品种,富含多种矿物质和维生素^[4],其生长周期短,产量高,是全国各地叶菜类蔬菜主栽品种之一^[5]。然而,小白菜浅根系特性和高水分需求使其对干旱异常敏感,轻度水分胁迫即可导致产量下降 20%~30%^[6]。目前通过外源物质调控提高作物抗旱性已成为研究热点,其中多糖类物质因其独特的生理调节功能备受关注。多糖在维持土壤水分^[7]、增强农作物耐旱性^[8-9]等方面具有明显效果,外源添加能优化土壤质量^[10],提升作物的逆境适应性^[11],在适当胁迫条件下促进农作物的生长发育^[12-13]。 β -葡聚糖作为典型的生物活性多糖,在促进植物根系发育^[14]、调控能量代谢^[15]、参与胁迫响应和启动抗旱机制方面发挥重要作用^[16]。但是,现有相关研究较少,且主要集中在粮食作物,对蔬菜尤其是小白菜的系统研究鲜见报道, β -葡聚糖在小白菜抗旱中的具体机制尚未明确。因此,本研究通过室内盆栽实验,系统研究不同浓度的 β -葡聚糖在梯度干旱胁迫下对小白菜生长发育和品质产量的影响,旨在为开发新型植物抗旱诱导剂提供理论依据,同时为蔬菜节水栽培技术革新提供实践参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试小白菜 (*Brassica chinensis* L.) 品种为中国农业科学院研发的“绿快 2 号”,该品种耐高温能力优于普通绿叶品种,但耐旱和耐涝性一般。供试 β -葡聚糖为实验室专有菌株发酵获得的胞外 β -葡聚糖, β -葡聚糖含量 $\geq 90\%$ 。种植花盆为上口径 120 mm、下口径 90 mm、高 110 mm 的双色花盆。供试肥料为复合肥,购自天津天丰泽田生物科技有限公司。供试土壤为基质土,购自山东陈晨生物科技有限公司,过筛风干后备用。

1.2 实验设计

盆栽实验在实验室内进行,每日采用全光谱 LED 灯补光 14~16 h,室内温度控制在 22~28 °C。在播种前 1 周将底肥均匀撒入双色花盆内,使肥料平铺于距盆口 4 cm 处,其上覆土,每盆施肥 4 g(900 kg·hm⁻²),以保证小白菜的正常营养供应。

挑选饱满、无损、发育良好的小白菜种子,用

0.1%双氧水消毒后自来水浸泡、催芽。2024 年 7 月 2 日种植,播种深度为 1 cm,每穴 1 粒,每盆 4 穴,2 叶期进行间苗,留苗 1 株/盆。从播种日起到小白菜生长至第 15 天期间,保持正常供水(土壤相对含水率 75%~80%)。待小白菜长至第 15 天时干旱处理。模拟轻度干旱(T,土壤相对含水率 65%~70%)、中度干旱(Z,土壤相对含水率 55%~60%)、重度干旱(H,土壤相对含水率 45%~50%) 3 种土壤水分状态,并以正常供水(CK,土壤相对含水率 75%~80%)为对照。每种干旱处理下,设置 3 个浓度 β -葡聚糖溶液灌溉(0.01、0.1、1 g/L)和清水灌溉对照,具体实验设计方案见表 1。

表 1 水分管理方案

Tab. 1 Water management scheme

处理	土壤相对含水率	灌溉水类型
CK	75%~80%	清水
T0	65%~70%	清水
T1		0.01 g/L β -葡聚糖
T2		0.1 g/L β -葡聚糖
T3		1 g/L β -葡聚糖
Z0	55%~60%	清水
Z1		0.01 g/L β -葡聚糖
Z2		0.1 g/L β -葡聚糖
Z3		1 g/L β -葡聚糖
H0	45%~50%	清水
H1		0.01 g/L β -葡聚糖
H2		0.1 g/L β -葡聚糖
H3		1g/L β -葡聚糖

实验过程中采用称重法进行水分调控,每隔 1 日测定花盆质量,相邻两次称重差值即为补灌水量^[17],以此维持各处理组土壤相对含水率在目标范围内。

为精准控制各处理土壤相对含水率,按照式(1)计算补灌水量 (Δm)。

$$\Delta m = m_M \times w_{FC} \times (w_{target} - w_{current}) \quad (1)$$

式中: m_M 为烘干土质量, g; w_{FC} 为田间持水量, %,

按照式(2)计算: w_{target} 和 $w_{current}$ 分别表示目标土壤

相对含水率和当前土壤相对含水率,土壤相对含水率(w)按照式(3)计算。

$$w_{FC} = \frac{m_{sat} - m_M}{m_M} \times 100\% \quad (2)$$

$$w = \frac{m - m_M}{m_M \cdot w_{FC}} \times 100\% \quad (3)$$

其中: m_{sat} 为饱和含水状态土壤质量, g; m 为当前土壤质量, g。

1.3 测定方法

干旱处理后, 每 5 d 测定 1 次各处理小白菜的株高、生物量、叶片的叶绿素相对含量 (soil and plant analyzer development, SPAD) 和叶片净光合速率, 收获时测定各处理小白菜的可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、维生素 C 含量、硝酸盐含量及产量。

株高: 用直尺或卷尺测定小白菜茎部到顶端的距离, 每次处理后选择 5 株测定, 取平均值。

叶片净光合速率: 采用 CIRAS-2 型便携式光合作用测定仪于晴天上午 11 点测定, 每株选择 3 片完全展开的功能叶, 将叶片平整置于叶室, 待读数稳定后, 记录叶片净光合速率 (Pn), 取 3 片功能叶平均值, 每个处理组选择 5 株。

叶片 SPAD: 叶片 SPAD 的测定与叶片净光合速率测定同步, 用 SPAD-502 叶绿素仪测定。

生物量: 将株高、叶片 SPAD 和叶片净光合速率指标测定结束后进行单株取样, 用电子分析天平称量小白菜鲜质量和干质量, 精确到 0.01g。

产量: 每个处理组选择 5 盆进行采收, 分别割取地上部分称量, 取平均值。

品质指标: 采用苯酚-硫酸法^[18]测定可溶性糖含量, 采用考马斯亮蓝 G-250 法^[19]测定可溶性蛋白含量, 采用碘量法测定^[20]维生素 C 含量, 采用盐酸萘乙二胺法测定^[21]硝酸盐含量; 每个处理组测定 3 次, 取平均值。

1.4 数据处理

采用 Excel 2013 软件进行数据整理, 采用 SPSS IBM2 软件统计分析, 不同小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$), D5、D10、D15、D20 分别表示干旱胁迫达到实验设定胁迫程度后 5、10、15、20 d。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下 β-葡聚糖对小白菜生长发育的影响

株高作为表征小白菜生长速率和植株健壮度的重要形态指标, 其动态变化可直观反映不同处理的抗旱效应。不同浓度 β-葡聚糖溶液对于旱胁迫下小白菜株高的影响见表 2。

由表 2 可知, β-葡聚糖处理浓度与干旱胁迫程度的交互作用显著影响植株生长。与 CK 组相比, T1、T2、Z2 组小白菜干旱胁迫后各时间的株高增加, 其中 T2 组增加显著; T0、T3、Z3、H0、H1、H2、H3 组小白菜干旱胁迫后各时间的株高均显著降低, 重度干旱 (H 系列) 条件下所有浓度处理均未能逆转胁迫导致的生长抑制, 株高降幅达 15.9%~18.6%。通过处理组间横向比较发现, 适宜浓度的 β-葡聚糖可产生剂量依赖性效应: 与 T0 组相比, T1 组和 T2 组小白菜的株高均显著增加, T3 组无显著降低; 与 Z0 组相比, Z1 组和 Z2 组均小白菜的株高显著增加, Z3 组在达到实验设定胁迫程度后 5~15 d 时株高降低, 20 d 显著降低; 与 H0 组相比, H1 组、H2 组、H3 组均无显著差异。

表 2 不同浓度 β-葡聚糖溶液对于旱胁迫下小白菜株高的影响

Tab. 2 Effects of different concentrations of β-glucan solution on plant height of *Brassica chinensis* L. under drought stresscm

组别	D5	D10	D15	D20
CK	10.3±0.5 ^b	15.6±1.0 ^{bc}	22.6±0.9 ^b	27.3±0.8 ^b
T0	9.9±0.4 ^c	14.9±0.9 ^c	21.8±0.8 ^c	26.1±0.8 ^c
T1	10.6±0.3 ^b	16.1±0.8 ^b	23.0±1.0 ^{ab}	28.7±0.8 ^{ab}
T2	13.3±0.5 ^a	18.2±0.5 ^a	23.9±0.5 ^a	29.6±0.4 ^a
T3	9.7±0.4 ^c	14.6±0.3 ^c	21.2±1.0 ^c	25.7±0.8 ^c
Z0	9.1±0.5 ^d	13.4±0.7 ^d	19.6±0.7 ^d	25.3±0.7 ^c
Z1	9.8±0.4 ^{bc}	15.0±0.5 ^c	21.8±0.5 ^c	27.1±0.9 ^b
Z2	11.3±1.0 ^b	16.2±1.2 ^b	22.9±0.9 ^{ab}	27.6±1.1 ^b
Z3	8.8±0.4 ^d	13.6±0.8 ^d	19.1±0.6 ^d	24.5±0.6 ^d
H0	8.5±0.5 ^{de}	12.4±1.1 ^e	18.2±0.6 ^e	23.9±0.5 ^d
H1	8.8±0.5 ^d	12.9±1.0 ^e	18.5±1.0 ^e	24.7±1.1 ^d
H2	8.9±0.8 ^d	13.1±1.1 ^{de}	18.6±1.1 ^e	25.1±0.8 ^{cd}
H3	8.3±0.6 ^e	12.5±0.6 ^e	18.1±0.2 ^e	23.4±1.0 ^d

结果表明, 外源 β-葡聚糖为 0.01 g/L 和 0.1 g/L 均可缓解轻度干旱和中度干旱胁迫对小白菜生长造成的抑制, 轻度干旱条件下用 0.1g/Lβ-葡聚糖灌溉效果最佳, 中度干旱条件次之, 提示该浓度在土壤水分条件相对良好时可能通过激活植物的水分调控机制,

提升水分利用效率发挥最大效益^[9],也可能与β-葡聚糖促进根系发育、增强细胞渗透调节能力^[22,23]等生理过程有关,但其具体作用途径仍需通过后续生理生化指标验证。

2.2 干旱胁迫下β-葡聚糖对小白菜叶片 SPAD 的影响

植物叶片 SPAD 是叶绿素含量的重要表征指标,反映光合系统的胁迫响应特征。不同质量浓度β-葡聚糖溶液对干旱胁迫下小白菜叶片 SPAD 的影响如图 1 所示。

由图 1 可知,不同时期小白菜叶片 SPAD 变化趋势基本一致。与 CK 组相比, T2 组小白菜叶片 SPAD 显著增加, T1 组叶片 SPAD 有所降低但无显著差异,除了 Z2 组外, Z 系列和 H 系列处理均使小白菜叶片

SPAD 显著降低。与 T0 组相比, T1 组和 T2 组 SPAD 增加显著, T3 组无显著差异;与 Z0 组相比, Z2 组小白菜叶片 SPAD 显著增加, Z1 组和 Z3 组无显著差异;与 H0 组相比, H2 组小白菜叶片 SPAD 显著增加, H1 和 H3 组无显著差异。

结果表明,轻度干旱胁迫下,用 0.01g/L 和 0.1g/L 外源β-葡聚糖处理,通过激活叶绿体保护机制,可以有效维持叶绿素稳定性,且施加 0.1g/L 的β-葡聚糖效果最好;在轻度、中度、重度干旱胁迫条件下,用 0.1 g/L 外源β-葡聚糖处理,均对小白菜生长有积极影响,表明该质量浓度可能是β-葡聚糖增强小白菜抗旱性的最优选择,其机理可能与维持类囊体膜完整性及调控活性氧代谢^[24]相关。

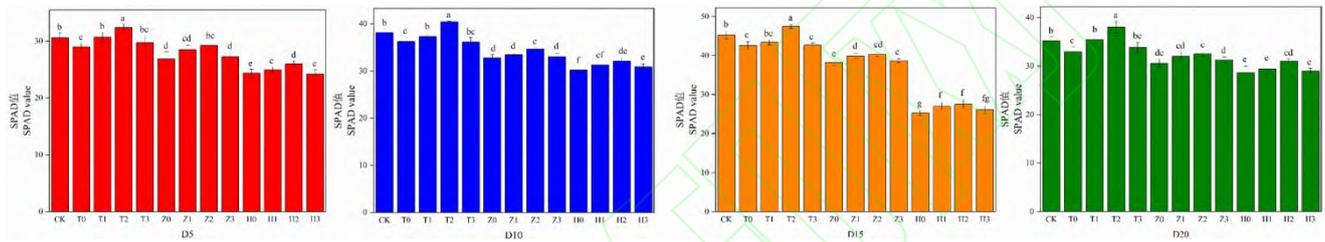


图 1 不同质量浓度β-葡聚糖溶液对干旱胁迫下小白菜叶片 SPAD 的影响

Fig.1 Effects of different concentrations of β-glucan solution on SPAD in leaves of Brassica chinensis L. under drought stress

2.3 干旱胁迫下β-葡聚糖对小白菜净光合速率的影响

净光合速率(Pn)是反映植物对逆境胁迫的响应以及鉴定植物抗逆能力的有效生理指标,直接反映了单位叶面积的碳同化能力。不同质量浓度β-葡聚糖溶液对干旱胁迫下小白菜叶片净光合速率的影响如图 2 所示。

从图 2 中可以明显看出:随着干旱胁迫的加剧,小白菜叶片净光合速率呈降低趋势;相同干旱胁迫条件下,随着β-葡聚糖浓度的增加,小白菜叶片净光合速率呈现先升高后降低的趋势。与 CK 组相比, T2 组小白菜叶片净光合速率显著增加,其他 11 个处理组小白菜叶片净光合速率均降低,且 Z 系列和 H 系列处理均显著降低。与 T0 组相比, T1 组和 T3 组小

白菜叶片净光合速率增加,但组间无显著差异, T2 组增加显著;与 Z0 组相比, Z1 组和 Z3 组小白菜叶片净光合速率增加,但组间无显著差异, Z2 组则显著增加;与 H0 组相比, H1 组和 H3 组小白菜叶片净光合速率增加,但组间无显著差异, H2 组显著增加。

结果表明,外源β-葡聚糖在 0.01~1g/L 范围内均可缓解干旱胁迫对光合系统的损伤,其中 0.1 g/L 的修复效果最为突出;在轻度干旱胁迫条件下,0.1 g/Lβ-葡聚糖有利于提高小白菜净光合速率。这种浓度依赖性保护效应可能与β-葡聚糖通过影响电子传递^[25]、增强 Rubisco 酶活性以及通过调节气孔导度优化 CO₂ 同化效率密切相关^[26]。

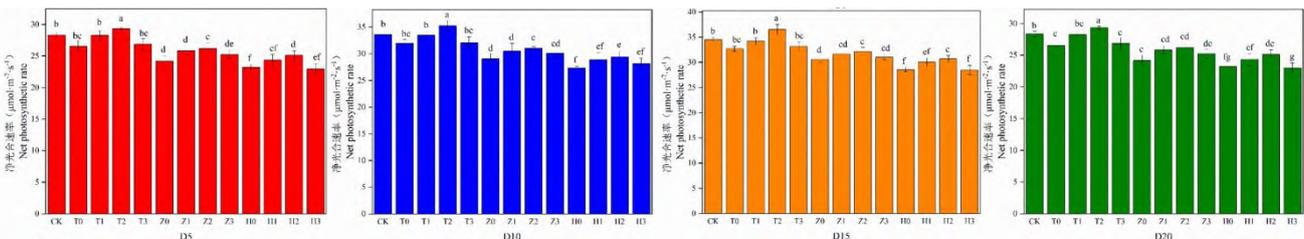


图 2 不同质量浓度β-葡聚糖溶液对干旱胁迫下小白菜叶片净光合速率的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of β-glucan solution on the net photosynthetic rate of Brassica chinensis L. under drought stress

2.4 干旱胁迫下 β -葡聚糖对小白菜生物量的影响

植物生物量作为表征碳同化与物质分配平衡的关键参数,其积累过程对水分胁迫具有高度敏感性。不同质量浓度 β -葡聚糖溶液对于旱胁迫下小白菜地上部鲜质量和干质量的影响如图3和图4所示。

由图3和图4可知,植株鲜质量与干质量作为生物量的双重表征指标,呈现高度一致的响应模式。随着土壤含水量梯度下降,两种质量参数均呈现阶梯式衰减,反映水分可利用性对光合产物积累的基础调控作用。相同干旱程度下,小白菜的鲜质量与干质量随着 β -葡聚糖质量浓度的增加,呈现先增加后减少的趋势,表现出明显的浓度窗口效应。低质量浓度时(0.01g/L),鲜质量和干质量同步提升,细胞膨压维

持与有机物积累协同增强;阈值质量浓度(0.1g/L)时,达到最大生物量增益,鲜质量增幅较干质量更为显著;高质量浓度(1g/L)时,出现反馈抑制,干物质分配优先性下降。

与CK组相比,T2组小白菜干旱胁迫后各取样点的鲜质量和干质量增加,但无显著差异;其他11个处理组均降低小白菜干旱胁迫后各取样点的鲜质量和干质量,除T1组无显著降低外,其他处理组均显著降低。由此可见,T2组表现出特殊的补偿效应,提示 β -葡聚糖可能通过调节细胞渗透平衡缓解干旱损伤,适度水分胁迫配合最佳 β -葡聚糖质量浓度可优化植物的碳分配策略。

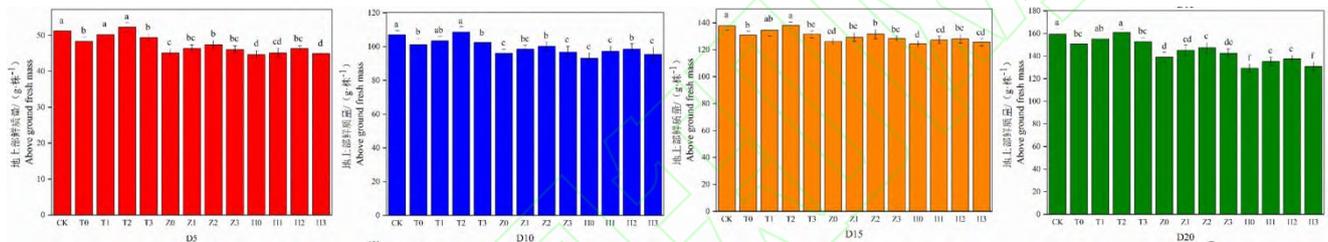


图3 不同质量浓度 β -葡聚糖溶液对于旱胁迫下小白菜地上部鲜质量的影响

Fig.3 Effects of different concentrations of β -glucan solution on the fresh weight of above ground of *Brassica chinensis* L. under drought stress

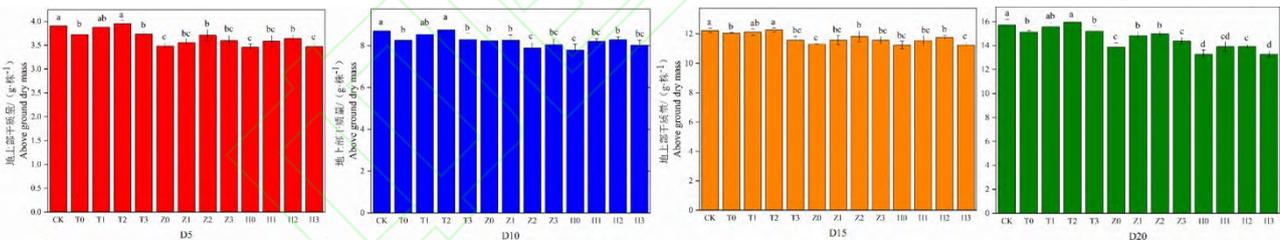


图4 不同质量浓度 β -葡聚糖溶液对于旱胁迫下小白菜地上部干质量的影响

Fig.4 Effects of different concentrations of β -glucan solution on the dry weight of above ground of *Brassica chinensis* L. under drought stress

2.5 干旱胁迫下 β -葡聚糖对小白菜产量和营养指标的影响

不同质量浓度 β -葡聚糖溶液对于旱胁迫下小白菜产量和品质的影响见表3。由表3可知,干旱胁迫对小白菜产量产生显著抑制作用。与正常供水(CK)相比,轻度(T0)、中度(Z0)和重度(H0)干旱处理分别使产量降低5.25%、8.19%和14.37%,表明干旱强度与产量损失呈正相关。外源 β -葡聚糖处理有效缓解了干旱胁迫的负面影响,其效应具有浓度依赖

性。在轻度干旱条件下,0.1 g/L(T2组)处理使产量较CK组显著提高6.30%,较T0组提升12.19%;中度干旱时, 1×10^{-4} g/L(Z2组)处理较Z0组增产7.08%;而重度干旱下, 1×10^{-4} g/L(H2组)处理较H0组增产6.55%。值得注意的是,高浓度处理(T3组)在轻度干旱中未表现出增效作用,所以可能存在最适浓度阈值。

干旱胁迫显著改变了小白菜的营养品质指标。随着干旱强度增加,可溶性糖(增幅4.64%~17.22%)、

可溶性蛋白（增幅 4.49%~16.56%）和硝酸盐（积累量增加 0.74%~7.50%）含量呈逐渐上升趋势，而维生素 C 含量下降（5.97%~23.75%），这与植物渗透调节响应和次生代谢激活密切相关。 β -葡聚糖处理有效改善了这一品质劣化趋势。各干旱梯度下的最佳处理（T2 组、Z2 组、H2 组）分别使可溶性糖含量较对应干旱对照提高 10.76%、6.02%和 7.34%，同时较 CK 组增加 15.89%~25.83%。T2 组在维持渗透调节能力的同时，使维生素 C 含量较 CK 组提高 5.83%，较 T0 组提升 2.28%。T2 组、Z2 组和 H2 组硝酸盐含量较对应干旱对照组降低 5.8%、8.18%和 3.91%，H2 组与 CK 组相比虽然略有上升（3.29%），但是增幅

较低。可溶性蛋白呈现差异化响应，与 CK 组相比，T2 组显著降低 5.99%，而 Z2 组和 H2 组分别提高 3.44%和 5.42%，可能与不同干旱强度下氮代谢途径的调控差异有关。

综上所述，轻度干旱条件下，0.1 g/L β -葡聚糖灌溉可有效提升小白菜产量和品质，这种增效机制可能源于 β -葡聚糖通过增强细胞壁韧性维持膨压，同时调控抗氧化酶系统缓解氧化损伤^[24,8]。中度和重度干旱条件下，0.1~0.01 g/L β -葡聚糖灌溉虽然能改善产量和品质，但是其促生效应未能有效缓解干旱胁迫对植株生长的抑制作用，而质量浓度超过 0.1 g/L 后，抑制产量和维生素 C 含量的上升。

表 3 不同质量浓度 β -葡聚糖溶液对干旱胁迫下小白菜产量和品质的影响

Tab. 3 Effects of different concentrations of β -glucan solution on yield and nutrients of *Brassica chinensis* L. under drought stress

组别	产量/(g/株)	可溶性糖含量/%	可溶性蛋白含量/(mg/g)	维生素 C 含量/(mg/100 g)	硝酸盐含量/(mg/kg)
CK	174.41±4.11 ^b	1.51±0.01 ^d	11.35±0.13 ^c	7.20±0.17 ^b	1214±27.32 ^b
T0	165.25±4.54 ^c	1.58±0.01 ^d	11.86±0.14 ^{bc}	7.45±0.13 ^{ab}	1223±28.22 ^b
T1	180.23±2.54 ^{ab}	1.66±0.02 ^c	11.21±0.02 ^c	7.54±0.20 ^{ab}	1186±27.15 ^c
T2	185.39±4.01 ^a	1.75±0.01 ^{bc}	10.67±0.38 ^d	7.62±0.03 ^a	1152±26.03 ^c
T3	165.27±3.12 ^c	1.76±0.02 ^b	10.86±0.03 ^d	7.60±0.04 ^a	1162±26.23 ^c
Z0	160.12±4.34 ^c	1.66±0.02 ^c	12.47±0.11 ^b	6.77±0.11 ^c	1283±21.33 ^a
Z1	168.24±3.53 ^c	1.69±0.02 ^c	12.05±0.21 ^b	6.79±0.23 ^c	1203±28.12 ^b
Z2	171.45±3.34 ^b	1.76±0.01 ^b	11.74±0.15 ^c	6.81±0.13 ^c	1178±25.22 ^c
Z3	162.78±2.66 ^c	1.85±0.02 ^a	11.89±0.07 ^{bc}	6.81±0.02 ^c	1296±25.54 ^a
H0	149.34±3.23 ^c	1.77±0.01 ^b	13.23±0.10 ^a	5.49±0.13 ^d	1305±22.21 ^a
H1	157.25±4.86 ^d	1.81±0.02 ^b	13.02±0.13 ^a	5.51±0.15 ^d	1212±25.45 ^b
H2	159.12±2.68 ^d	1.90±0.02 ^a	12.43±0.05 ^b	5.53±0.13 ^d	1254±30.16 ^{ab}
H3	152.09±3.15 ^{de}	1.98±0.03 ^a	12.78±0.07 ^{ab}	5.51±0.14 ^d	1247±26.66 ^{ab}

注：此表为小白菜播种后第 45 天收获后的数据。

3 讨论

前期研究表明，小白菜在生长过程中遭受胁迫后，会出现叶绿素分解、膜脂过氧化产物增加等现象，严重抑制了小白菜的生长，最终影响产量^[27]。本研究表明，随着干旱程度的加剧，小白菜株高、生物量、叶片 SPAD、净光合速率呈逐渐降低的趋势。轻度胁迫促进小白菜花青苷、叶绿素等光合特性参数^[28]。外源多糖可以缓解干旱胁迫对小白菜的影响，适宜浓度的多糖可以促进种子的萌发和幼苗的生长，从而提高小白菜的抗旱性能，促进幼苗的生长^[29]。此外，还有研究表明多糖可改善土壤环境，增加土壤微生物的数量

和多样性^[30]，促进植物的根系吸收能力和营养利用效率^[31]，提高植物抗氧化酶活力^[32]，提高植物的产量。本研究发现，在适度干旱条件下，0.1 g/L β -葡聚糖溶液灌根可提升叶片 SPAD 和净光合速率，从而大幅度提高小白菜的株高和生物量，实现增产 6.30%。而随着 β -葡聚糖水溶液浓度的提高，小白菜株高、生物量、叶片 SPAD、净光合速率、产量呈先升高后降低的趋势。这可能是由于小白菜根系受到高浓度多糖和干旱的双重胁迫，加剧了根系的渗透胁迫作用^[33]。

相关研究表明，叶面喷施海藻酸可以增加小麦叶面积和叶片数等形态指标，从而使品质得到提升^[34]，叶面喷施壳寡糖，可显著增强玉米的抗氧化能力，缓解干旱胁迫对玉米生长的抑制，增加其品质^[35]。在本

研究条件下,随着干旱程度的加剧,可溶性糖、可溶性蛋白和硝酸盐含量呈逐渐降低的趋势。随着 β -葡聚糖水溶液浓度的提高,小白菜维生素C含量、硝酸盐含量均呈先升高后降低的趋势,可溶性糖呈逐渐升高趋势,可溶性蛋白呈逐渐降低的趋势。与全生育期正常供水处理相比,用0.1 g/L β -葡聚糖水溶液灌根保持土壤轻度干旱条件下,促进可溶性糖(增加15.89%)和维生素C(增加5.83%)的积累,抑制可溶性蛋白(减少5.99%)和硝酸盐(减少55.11%)的形成。

以小白菜为研究对象, β -葡聚糖对干旱胁迫的缓解存在明确的作用阈值。当质量浓度超过0.1 g/L时,光合速率和生物量均显著降低,这可能与高浓度多糖引发的渗透压失衡^[36]和细胞代谢紊乱^[37]有关。这一发现补充了现有研究对多糖类物质施用浓度的认知边界,提示田间应用需建立精准的剂量响应模型。

综合生理指标与品质参数,保持土壤含水率为65%~70%的轻度干旱条件下,用0.1 g/L β -葡聚糖水溶液灌根,既能促进小白菜生长发育,又可提高叶片叶绿素含量,保障光合性能,进而实现小白菜高产、优质,可为节水栽培技术体系提供新型生物调节方案。

参考文献:

- [1] 翟必宇,王娟. 生物炭缓解作物干旱胁迫及其机理研究综述[J]. 节水灌溉, 2024, 49(3): 75-82.
- [2] 杨莎. 基于植被供水指数的锡林浩特市干旱监测分析[J]. 内蒙古草业, 2021, 37(3): 42-45.
- [3] 夏智宏,刘敏,秦鹏程,等. 2022年长江流域高温干旱过程及其影响评估[J]. 人民长江, 2023, 69(2): 21-28.
- [4] 宋莉萍,耿启华,汤利光,等. 十字花科蔬菜叶和茎维生素C含量的差异[J]. 湖南农业科学, 2022, 52(5): 63-67.
- [5] 陈壮. 小白菜热激转录因子BrHSFA7a耐热性功能分析[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023.
- [6] 王秀峰,李岩,刘世琦,等. 水分胁迫对小白菜生长及产量的影响[J]. 中国蔬菜, 2013(6): 58-63.
- [7] 李静. 一株多糖高产菌株的研究与应用[D]. 贵阳: 贵州大学, 2006.
- [8] SANDHYA V, ALI S K Z, GROVER M, et al. Drought-tolerant plant growth promoting *Bacillus* spp. effect on growth, osmolytes, and antioxidant status of maize under drought stress[J]. Journal of plant interaction, 2011, 6(1): 1-14.
- [9] NASEEM H, BANO A. Role of plant growth-promoting rhizobacteria and their exopolysaccharide in drought tolerance of maize[J]. Journal of plant interactions, 2014, 9(1): 689-701.
- [10] ROSSI F, POTRAFKA R M, PICHEL F G, et al. The role of the exopolysaccharides in enhancing hydraulic conductivity of biological soil crusts[J]. Soil biology and biochemistry, 2012, 44(46): 33-40.
- [11] KHAN N, BANO A. Exopolysaccharide producing rhizobacteria and their impact on growth and drought tolerance of wheat grown under rainfed conditions[J]. PLOS ONE, 2019, 14(9): e0222302.
- [12] 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[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(4): 1123-1134.
- [13] 刘亚磊. 葡聚糖类抗病诱导剂在水稻上的实验初报[J]. 现代农业, 2016, 42(6): 44-45.
- [14] PEREIRA R, SILVA V N, OLIVEIRA D F. β -Glucans from yeast enhance plant growth and nutrient uptake in soybean and maize under field conditions[J]. Frontiers in plant science, 2019, 10: 1234.
- [15] MORKUNAS, IWONA, LESZEK RATAJCZAK, ŁUKASZ MARCZAK. The role of carbohydrate signaling in plant responses to stress[J]. Journal of plant physiology, 2012, 169(13): 1363-1379.
- [16] LI Q, PAN Z, ZHANG Z, et al. β -Glucan content increase in Waxy-mutated barley is closely associated with positive stress responses and is regulated by ASR1[J]. Carbohydrate polymers, 2025, 347: 122536.
- [17] 陈小龙,卫剑,尹光庭,等. 土壤水分对冬烟旺长期光合作用的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 40(4): 739-746.
- [18] 王妍,胡胜,付文成,等. 一种快速测定可溶性糖的新方法: TBA法[J]. 井冈山大学学报, 2013, 34(3): 37-40.
- [19] 杨静华. 考马斯亮蓝法测定苦荞麦中可溶性蛋白的含量[J]. 山西医药杂志, 2018, 47(2): 206-207.
- [20] 徐朝阳. 2,6-二氯酚靛酚滴定法与碘量法测定蔬菜水果中维生素C方法的准确度比较[J]. 食品安全导刊, 2021, 15(25): 100-101.
- [21] 王晓丽,褚朝森,陆利霞,等. 蔬菜硝酸盐含量检测方法的比较[J]. 食品科技, 2010, 35(4): 273-276.
- [22] ARORA N, SUNITA K, MISHRA I, et al. Secondary metabolites from halotolerant plant growth promoting rhizobacteria for ameliorating salinity stress in plants[J]. Frontiers in microbiology, 2020, 11: 1-12.

- [23] ILYAS N, MUMTAZ K, AKHTAR N, et al. Exopolysaccharides producing bacteria for the amelioration of drought stress in wheat[J]. Sustainability, 2020, 12(21): 8876.
- [24] CHOUDHURY F K, RIVERO R M, BLUMWALD E, et al. Reactive oxygen species, abiotic stress and stress combination[J]. The plant journal, 2017, 90(5): 856-867.
- [25] XU Y, ROSSI F, COLICA G, et al. Use of cyanobacterial polysaccharides to promote shrub performances in desert soils: a potential approach for the restoration of desertified areas[J]. Biology and fertility of soils, 2013, 49: 143-152.
- [26] 陈建姣. 茶树对反复干旱胁迫的响应及其适应机制[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022.
- [27] 富春元, 张淑娟, 鱼昭君, 等. PEG 模拟干旱胁迫对叶缘裂刻小白菜生理特性的影响[J]. 西北农业学报, 2014, 23(5): 139-145.
- [28] 杨碧云, 钟凤林, 林义章. 干旱对紫色小白菜光合特性及营养品质的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(5): 912-921.
- [29] 李婧, 高小佳, 章孜亮. 海藻精对干旱胁迫下小白菜种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2021, 45(6): 36-42.
- [30] LI J, ZHANG Y, WANG L, et al. Effects of exopolysaccharides from *Bacillus amyloliquefaciens* on the diversity and abundance of soil microorganisms[J]. Plant, soil and environment, 2018, 428: 126765.
- [31] 吴秀娟, 赵永涛, 王芳, 等. 细菌胞外多糖对大豆根系生长及代谢物分泌的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2014, 39(3): 289-296.
- [32] LI Y, ZHANG Y, WANG Z, et al. Exopolysaccharides from *Bacillus cereus* enhance the growth and antioxidant enzyme activity of *Vicia faba* L[J]. Planta, 2018, 234: 658-665.
- [33] 唐茜, 王佳丽, 李文强. 胞外多糖对盐胁迫下荆芥种子萌发、幼苗生长及生理特性的影响[J]. 河南农业科学, 2024, 53(10): 96-105.
- [34] ZOU P, LU X, ZHAO H, et al. Polysaccharides derived from the brown algae *Lessonia nigrescens* enhance salt stress tolerance to wheat seedlings by enhancing the antioxidant system and modulating intracellular ion concentration[J]. Frontiers in plant science, 2019, 10: 48.
- [35] SUN J Y, DONG L P, WANG F J. Effects of chitosan oligosaccharide on chlorophyll content, water content and protective enzyme activities of maize under drought stress[J]. Journal of Henan agricultural sciences, 2014, 43: 3382425.
- [36] HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ H, GONZÁLEZ-MORALES S, BENAVIDES-MENDOZA A, et al. Effects of chitosan-PVA and Cu nanoparticles on the growth and antioxidant capacity of tomato under saline stress[J]. Molecules, 2018, 23(1): 178.
- [37] 练华山, 周艾玲, 梁乐, 等. 叶面喷施壳聚糖缓解低温处理对丝瓜幼苗的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2023, 38(2): 298-305.