

## 菜薹镉低积累“油蔬两用”油菜品种筛选及海藻糖对其镉积累和品质的影响

邹翔宇, 岳文丽, 贺原, 丁茂文, 李瑞, 董嘉, 朱宗河, 郑文寅, 张付贵, 周可金, 余燕

### 引用本文:

邹翔宇, 岳文丽, 贺原, 丁茂文, 李瑞, 董嘉, 朱宗河, 郑文寅, 张付贵, 周可金, 余燕. 菜薹镉低积累“油蔬两用”油菜品种筛选及海藻糖对其镉积累和品质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(4): 774-785.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0493>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 喷施不同形态锰肥对叶用油菜镉累积及亚细胞分布的影响

闫秀秀, 徐应明, 王林, 陶雪莹, 孙约兵, 梁学峰

*农业环境科学学报*. 2019, 38(8): 1872-1881 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0577>

#### 镉低积累青菜品种筛选及硫对镉胁迫下青菜镉含量和品质影响

杜小平, 康靖全, 吕金印

*农业环境科学学报*. 2018, 37(8): 1592-1601 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1661>

#### 海藻糖对镉胁迫下水稻幼苗生长的影响

李昉峻, 周其文, 漆新华, 宋正国

*农业环境科学学报*. 2019, 38(8): 1827-1834 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0114>

#### 石灰石砂砾负载铁膜及其强化除磷效果

施佳诚, 陈灿明, 高婷, 卫泽斌, 吴启堂

*农业环境科学学报*. 2020, 39(9): 1993-2000 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0284>

#### 绿肥作物对云南旱地土壤镉有效性的影响

王赞, 付利波, 梁海, 章子含, 杨伟, 何正海, 高嵩涓, 曹卫东

*农业环境科学学报*. 2021, 40(10): 2124-2133 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0457>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

邹翔宇, 岳文丽, 贺原, 等. 菜薹镉低积累“油蔬两用”油菜品种筛选及海藻糖对其镉积累和品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(4): 774–785.

ZOU X Y, YUE W L, HE Y, et al. Selection of bolt low-cadmium-accumulation rapeseed varieties and investigation of the effect of trehalose on their cadmium accumulation and quality[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(4): 774–785.



开放科学 OSID

# 菜薹镉低积累“油蔬两用”油菜品种筛选及海藻糖对其镉积累和品质的影响

邹翔宇, 岳文丽, 贺原, 丁茂文, 李瑞, 董嘉, 朱宗河, 郑文寅, 张付贵, 周可金, 余燕\*

(安徽农业大学农学院, 合肥 230036)

**摘要:**为完善镉(Cd)污染农田“油蔬两用”油菜安全生产栽培调控技术,本试验以22个甘蓝型“油蔬两用”油菜品种为材料,采用盆栽试验,根据Cd积累量和地上部干质量差异,筛选Cd低积累油菜品种。并进一步研究外源海藻糖喷施时期(苗期、薹期、苗期+薹期)和浓度(10、20、40、80 mmol·L<sup>-1</sup>)对Cd低积累品种油菜生长发育、薹Cd积累及品质的影响。结果表明: Cd胁迫下22个油菜品种各部位Cd积累量和地上部干质量差异显著,其中安农油1号(ANY-1)和同油杂2号(TYZ-2)具有高生物量和低Cd积累的特性,较适宜油蔬两用种植。与对照(CK)相比, Cd处理导致油菜生长受阻,菜薹产量及品质下降。外源喷施10~40 mmol·L<sup>-1</sup>海藻糖可不同程度缓解Cd对油菜的毒害作用,降低菜薹Cd积累,提高菜薹产量和品质,其中苗期喷施20 mmol·L<sup>-1</sup>海藻糖为最佳喷施时期和浓度。苗期喷施20 mmol·L<sup>-1</sup>海藻糖缓解了2个油菜品种Cd毒害,叶绿素含量(SPAD)、地上部鲜质量、根鲜质量、根颈粗较不喷施海藻糖处理相比分别显著提高了13.4%~16.1%、59.1%~63.3%、42.1%~103.6%和30.6%~37.8%,菜薹Cd含量显著降低了61.5%~70.6%,菜薹产量、可溶性蛋白含量和可溶性糖含量分别提高了28.4%~34.5%、41.9%~46.0%和62.6%~76.1%。综上所述, Cd污染土壤种植菜薹Cd低积累油菜品种ANY-1和TYZ-2,结合苗期喷施20 mmol·L<sup>-1</sup>海藻糖,可有效降低菜薹Cd积累,保障菜薹食用安全,提高菜薹产量和品质。

**关键词:**油菜薹; 镉积累; 海藻糖; 低积累品种; 品质

中图分类号: S565.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2024)04-0774-12 doi:10.11654/jaes.2023-0493

## Selection of bolt low-cadmium-accumulation rapeseed varieties and investigation of the effect of trehalose on their cadmium accumulation and quality

ZOU Xiangyu, YUE Wenli, HE Yuan, DING Maowen, LI Rui, DONG Jia, ZHU Zonghe, ZHENG Wenyin, ZHANG Fugui, ZHOU Kejin, YU Yan\*

(College of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

**Abstract:** To improve cultivation and regulation for the safe production of “oil-vegetable dual-usage” rapeseed (*Brassica napus*) in cadmium (Cd)-contaminated farmland, this study employed 22 varieties *B. napus* as the primary materials. Through pot experiments, this study aimed to identify rapeseed varieties with low Cd accumulation based on differences in Cd accumulation and aboveground dry weight. Furthermore, the effects of exogenous trehalose application at different stages (seedling stage, bolting stage, and seedling + bolting stage)

收稿日期: 2023-06-22 录用日期: 2023-10-16

作者简介: 邹翔宇(1998—), 男, 湖北松滋人, 硕士研究生, 从事作物逆境生理生态研究。E-mail: zxy334055517@163.com

\*通信作者: 余燕 E-mail: yuyan@ahau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(32201915); 高校优秀青年人才支持计划重点项目(gxyqZD2021096); 安徽省油料作物产业技术体系“十四五”计划项目; 安徽农业大学大学生创新创业训练计划(X202210364526)

**Project supported:** National Natural Science Foundation of China (32201915); The Key Project of the Outstanding Young Talents Support Program for Universities (gxyqZD2021096); The 14th Five-Year Plan Project of Anhui Oil Crop Industry Technology System; The Innovation and Entrepreneurship Training Program of Anhui Agricultural University (X202210364526)

and concentrations (10, 20, 40 mmol · L<sup>-1</sup>, and 80 mmol · L<sup>-1</sup>) on the growth, Cd accumulation, and quality of bolt low-Cd-accumulation varieties. The results indicated significant differences in Cd accumulation and aboveground dry weight among 22 rapeseed varieties under Cd stress. Notably, Annongyou 1 (ANY-1) and Tongyouza 2 (TYZ-2) exhibited high-biomass and low-Cd-accumulation characteristics, making them suitable for cultivation as dual-usage rapeseed varieties. Compared with the control (CK), Cd treatment resulted in stunted rapeseed growth and reduced rapeseed flower stalk yield and quality. The exogenous application of 10–40 mmol · L<sup>-1</sup> trehalose could alleviate the toxicity of Cd on rapeseed to varying degrees, reduce Cd accumulation in rapeseed flower stalks, and improve the yield and quality. Among the different application stages and concentrations, spraying 20 mmol · L<sup>-1</sup> trehalose at the seedling stage was the most effective. Spraying 20 mmol · L<sup>-1</sup> trehalose at the seedling stage alleviated Cd toxicity in two rapeseed varieties. It significantly increased the relative chlorophyll content (SPAD), shoot fresh weight, root fresh weight, and crown diameter by 13.4%–16.1%, 59.1%–63.3%, 42.1%–103.6%, and 30.6%–37.8%, respectively. The Cd content of rapeseed flower stalks was significantly decreased by 61.5%–70.6%, while the yield, soluble protein, and soluble sugar contents were increased by 28.4%–34.5%, 41.9%–46.0%, and 62.6%–76.1%, respectively. In conclusion, the cultivation of rapeseed varieties ANY-1 and TYZ-2 with bolt low Cd accumulation in Cd-contaminated soil, combined with spraying 20 mmol · L<sup>-1</sup> trehalose at the seedling stage, effectively reduced Cd accumulation in rapeseed flower stalk, ensuring their safety for consumption and improving their yield and quality.

**Keywords:** rapeseed flower stalk; cadmium accumulation; trehalose; low-accumulation varieties; quality

近年来,由于工农业的快速发展,农田土壤镉(Cd)污染日益严峻<sup>[1-2]</sup>。2014年《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国土壤Cd污染以7%的点位超标率位居第一<sup>[3]</sup>。Cd具有毒性较大和难降解的特点,Cd流入土壤,会造成土壤环境恶化,从而导致植物光合性能下降、生长受抑、代谢紊乱、作物产量和品质下降等,Cd通过食物链富集更会严重危害人体健康<sup>[4-5]</sup>。油菜是我国南方广泛种植的油料作物,同时双低油菜薹还可作为食用蔬菜,即具有“油蔬两用”的功能<sup>[6-8]</sup>。大量的研究和应用表明,“油蔬两用”油菜在采收菜薹增加收入的同时还可通过促进二次分枝,稳定甚至增加油菜籽的产量<sup>[9-10]</sup>。因此,“油蔬两用”种植模式具有增产增效和促进油菜产业发展的重要作用,并且该模式在“十三五”期间得到广泛推广和应用。但是,油菜具有较强的Cd吸收积累能力,且油菜体内的Cd主要富集在茎叶中,导致生产面临着Cd污染的风险<sup>[11]</sup>。开展降低油菜可食部位Cd积累栽培调控技术的研究对降低长期食用油菜薹和菜籽油带来的健康风险、保障Cd污染农田的安全生产意义重大。

筛选和应用Cd低积累作物品种是保障Cd污染农田安全生产的有效措施之一<sup>[12-13]</sup>。研究表明,不同品种油菜对Cd的吸收积累特性存在着显著差异,这为Cd低积累油菜品种的筛选提供了可能<sup>[14-15]</sup>。Wang等<sup>[16]</sup>研究了成都平原32个油菜品种的Cd积累分布模式,确定了适合什邡广泛种植的Cd低积累品种47、47A。然而,以上研究主要侧重于筛选籽粒Cd低积累油菜品种,随着“油蔬两用”模式的发展和应用,油菜茎叶Cd低积累品种的筛选和培育就显得尤为重要。

农艺调控措施是生产中降低作物Cd积累的有效举措之一,能与低积累品种结合起到保障Cd污染农田安全生产的作用<sup>[11,17]</sup>。喷施化学调控剂因其经济、有效和可操作性强的特点而受到越来越多的关注和应用<sup>[17-19]</sup>。海藻糖作为一种广泛存在于生物体内的非还原性二糖,对植物生长发育和逆境响应具有重要调控作用<sup>[20]</sup>。研究发现,海藻糖因其糖苷键的存在,具有稳定的化学性质和较高的亲水性,可以稳定逆境胁迫下植物体内蛋白质等生物大分子的活性,保护生物结构免受氧化损伤<sup>[21]</sup>。此外,外源海藻糖可通过调节细胞渗透势、保持细胞膜的稳定性和增强抗氧化酶活性来缓解低温、高温、干旱和盐胁迫对植物的不利影响<sup>[22]</sup>。近年来研究表明,海藻糖在缓解植物Cd胁迫上也有重要作用。例如,研究发现外源海藻糖能显著缓解Cd对水稻<sup>[23]</sup>、绿豆<sup>[21]</sup>、辣椒<sup>[24]</sup>、玉米<sup>[25]</sup>等植物的毒害作用,通过增强植物光合能力、渗透调节物质合成和抗氧化酶活性等途径来提高植物对Cd胁迫的耐性。外源海藻糖还可通过诱导自身合成,与Cd螯合降低Cd的迁移率和对植物的毒害作用,减少植株Cd积累<sup>[23]</sup>。目前研究多关注海藻糖对水培条件下植物Cd毒害的缓解机理,鲜见土壤条件下外源喷施海藻糖调控油菜薹Cd积累及品质的相关报道。

本试验以22个甘蓝型“油蔬两用”油菜品种为材料,通过盆栽试验,根据油菜薹期植株各器官Cd含量及生物量的变化情况,筛选得到2个Cd低积累油菜品种。在品种筛选的基础上,通过叶面喷施海藻糖阻控的方式,探讨Cd胁迫下外源海藻糖对油菜薹Cd积累及品质的影响,分析不同喷施浓度和喷施时期条件

下油菜生长发育、可食用部位Cd含量及品质的变化规律,筛选海藻糖最适喷施浓度及时期,为完善和发展Cd污染农田油菜安全生产栽培调控技术提供一定的理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 品种筛选试验

#### 1.1.1 供试材料

供试品种选取适宜在长江中下游种植的22个甘蓝型“油蔬两用”油菜品种,随机编号为S1~S22,详情见表1。

供试土壤均取自安徽农业大学农萃园0~20 cm耕层土壤,其基本理化性质为:pH 7.79,铵态氮 $144.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷 $51.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾 $104.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有机质 $20.93 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效Cd $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

#### 1.1.2 试验设计

品种筛选试验于2020年9月至2021年4月在安徽农业大学农萃园进行,以盆栽的形式开展试验。供试土壤经风干、过20目筛后,称取适量土壤均匀喷施CdCl<sub>2</sub>溶液,使土壤Cd含量达到 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (重度Cd污染水平)。每千克土均匀施加N 0.2 g、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.15 g、K<sub>2</sub>O 0.2 g和1 mL Arnon微量元素营养液作为基肥,N、P、K肥源分别为(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>和KCl。Cd处理土壤经搅拌混匀后,每盆装土6 kg(以风干土计),加入等量去离子水,保持土壤在湿润状态下稳定60 d后备用。选取饱满均一的油菜种子,经1%次氯酸钠浸泡消毒30 min后,用去离子水洗净,浸种12 h后催芽。选取长势一致的种子转移至盆中,每盆均匀播种5粒。试验采用完全随机设计,每个油菜品种设置3

个重复。待幼苗生长至2片真叶后,每盆定苗3株。于薹期取样,测定各项指标。

### 1.2 外源海藻糖喷施试验

#### 1.2.1 供试材料

供试品种为筛选试验获得的2个Cd低积累品种——安农油1号(S3, ANY-1)和同油杂2号(S15, TYZ-2)。供试土壤同1.1.1。

#### 1.2.2 试验设计

外源海藻糖喷施试验于2021年9月至2022年4月开展,试验地点、形式及供试土壤处理同1.1.2。采用双因素完全随机试验设计,设喷施浓度(C)和喷施时期(T)2个因素。设4个喷施浓度,分别为10、20、40、80 mmol·L<sup>-1</sup>,标记为C1、C2、C3、C4;设3个喷施时期,分别为苗期喷施处理(T1)、薹期喷施处理(T2)、苗期+薹期喷施处理(T3);同时设无Cd对照组(CK)、Cd污染清水喷施对照组(CD)。试验共14个处理,每个处理设置2个品种重复和3个生物学重复(表2)。统一于薹期处理后的第8天取样。

### 1.3 测定项目和方法

#### 1.3.1 植株形态学指标

取整株样品分别从子叶节和距顶端15 cm处剪断分为根系、茎叶和薹3个部分。样品用清水洗净后再用去离子水进行二次清洗,吸水纸吸干多余水分后烘干至恒质量,测定干物质量。取样前使用便携式叶绿素测定仪测定叶绿素相对含量(SPAD)。

#### 1.3.2 植株样品Cd含量

植物样品中Cd含量的提取和测定参照GB 5009.15—2014。将烘干样品研磨至粉状,称取0.5 g置于聚四氟乙烯消解管中,加入10 mL混酸(HNO<sub>3</sub>:

表1 供试“油蔬两用”油菜品种

Table 1 Tested rapeseed (*Brassica napus*) varieties of “oil-vegetable-dual-usage”

品种名称 Variety	选育单位 Breeding unit	品种名称 Variety	选育单位 Breeding unit
徽油50	安徽农业大学	丰早45	长沙新万农种业有限公司
绿油218	安徽绿雨种业股份有限公司	新德油59	重庆三峡农业科学院
安农油1号	安徽农业大学	浙双72	浙江省农业科学院
天禾油6号	天禾农业科技集团股份有限公司	同油杂2号	安徽同创种业有限公司
天禾油17	天禾农业科技集团股份有限公司	油薹929	常德市农林科学研究院
徽油49	安徽农业大学	中双11号	中国农业科学院油料作物研究所
迎春1号	浙江省农业科学院	中油杂19	中国农业科学院油料作物研究所
徽油48	安徽农业大学	洋油5103	湖南省作物研究所
中双9号	河南省农业科学院经济作物研究所	金薹花	中国农业科学院油料作物研究所
中核杂418	安徽省农业科学院作物研究所	宁杂1838	江苏省农业科学院经济作物研究所
油研50	贵州省油菜研究所	宁杂1818	江苏省农业科学院经济作物研究所

表2 海藻糖叶面喷施试验设计

Table 2 Test design for foliar spraying of trehalose

编号 Abbreviation	处理 Treatment
CK	无Cd对照
CD	5 mg·kg <sup>-1</sup> Cd+清水+苗期和薹期2次喷施
C1T1	5 mg·kg <sup>-1</sup> Cd+10 mmol·L <sup>-1</sup> 海藻糖+苗期喷施
C2T1	5 mg·kg <sup>-1</sup> Cd+20 mmol·L <sup>-1</sup> 海藻糖+苗期喷施
C3T1	5 mg·kg <sup>-1</sup> Cd+40 mmol·L <sup>-1</sup> 海藻糖+苗期喷施
C4T1	5 mg·kg <sup>-1</sup> Cd+80 mmol·L <sup>-1</sup> 海藻糖+苗期喷施
C1T2	5 mg·kg <sup>-1</sup> Cd+10 mmol·L <sup>-1</sup> 海藻糖+薹期喷施
C2T2	5 mg·kg <sup>-1</sup> Cd+20 mmol·L <sup>-1</sup> 海藻糖+薹期喷施
C3T2	5 mg·kg <sup>-1</sup> Cd+40 mmol·L <sup>-1</sup> 海藻糖+薹期喷施
C4T2	5 mg·kg <sup>-1</sup> Cd+80 mmol·L <sup>-1</sup> 海藻糖+薹期喷施
C1T3	5 mg·kg <sup>-1</sup> Cd+10 mmol·L <sup>-1</sup> 海藻糖+苗期和薹期2次喷施
C2T3	5 mg·kg <sup>-1</sup> Cd+20 mmol·L <sup>-1</sup> 海藻糖+苗期和薹期2次喷施
C3T3	5 mg·kg <sup>-1</sup> Cd+40 mmol·L <sup>-1</sup> 海藻糖+苗期和薹期2次喷施
C4T3	5 mg·kg <sup>-1</sup> Cd+80 mmol·L <sup>-1</sup> 海藻糖+苗期和薹期2次喷施

HClO<sub>4</sub>=9:1, V:V)消解至溶液变澄清。定容过滤后使用电感耦合等离子体发射光谱仪(美国 Thermo Fisher, iCAP 6300 Series)测定Cd含量。

### 1.3.3 菜薹产量及品质

记录单株菜薹产量,距顶端15 cm取薹,称取鲜质量。可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法<sup>[26]</sup>测定。可溶性糖含量采用蒽酮比色法<sup>[27]</sup>测定。

### 1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2019对数据进行整理,数据统计和统计分析采用基于R 4.1.2的RStudio实现。采用R程序包vegan进行方差分析,并通过Duncan法比较各处理间差异显著性。采用R程序包factoextra进行k-均值聚类。采用R程序包ggplot2绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 薹Cd低积累油菜品种筛选

#### 2.1.1 不同品种油菜Cd积累特性及生物量差异

22个油菜品种薹、茎叶、根系Cd含量及地上部干质量差异显著,结果如图1所示。薹Cd积累量最高的品种为S10,达到2.15 mg·kg<sup>-1</sup>,其次为S21和S22;薹Cd积累量最低的品种为S3,为0.14 mg·kg<sup>-1</sup>,其次为S7和S6。22个供试品种油菜薹Cd含量范围为0.14~2.15 mg·kg<sup>-1</sup>,平均值为0.82 mg·kg<sup>-1</sup>,各品种间薹Cd含量最大值为最小值的15.36倍。供试油菜品种除S10外,茎叶Cd含量均大于薹Cd含量。茎叶Cd含量分布范围介于0.57(S3)~4.79(S4) mg·kg<sup>-1</sup>之间,

其均值为2.19 mg·kg<sup>-1</sup>。各品种间茎叶Cd含量的最大值是最小值的8.40倍,低于薹Cd含量的相应倍数。22个油菜品种根Cd含量分布在0.66~8.37 mg·kg<sup>-1</sup>的范围内,各品种间最大值为最小值的12.68倍,平均值为2.57 mg·kg<sup>-1</sup>。其中,S10的Cd含量最高,为8.37 mg·kg<sup>-1</sup>;S11的Cd含量最低,为0.66 mg·kg<sup>-1</sup>。22个油菜品种的干质量分布范围为5.18(S10)~36.93(S3) g,平均值为15.52 g。其中,S3的干质量显著高于其他品种,达到36.93 g;S7、S15次之,分别为26.97、26.25 g。

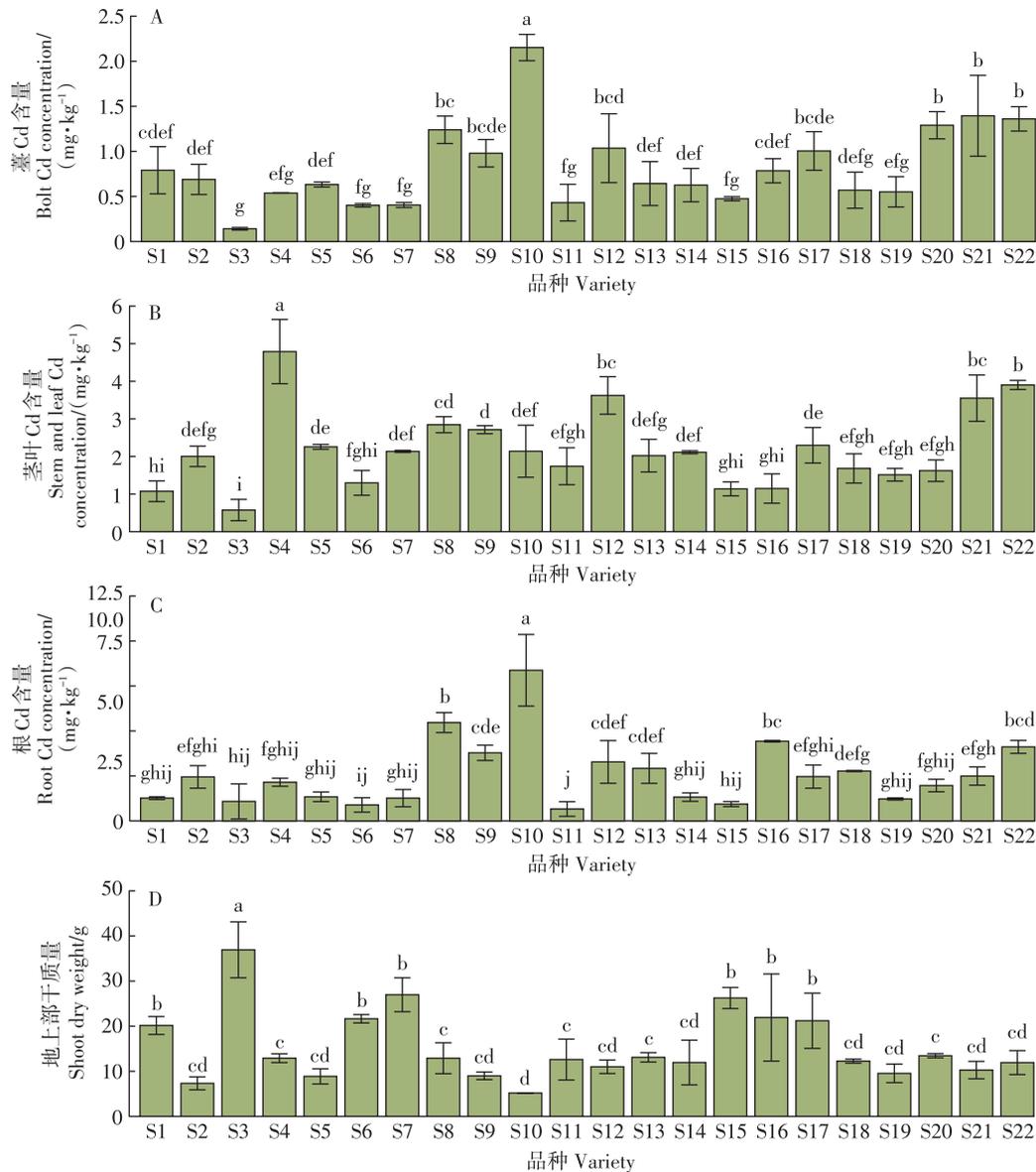
#### 2.1.2 不同品种油菜各部位Cd含量的聚类分析

综合22个品种油菜薹、茎叶及根系Cd含量,采用k-均值聚类,将22个甘蓝型“油蔬两用”油菜品种分为3个类群,即第I类群(Cd低积累品种)、第II类群(Cd中积累品种)、第III类群(Cd高积累品种),从而更直观地反映这些品种的Cd积累能力差异,结果如图2所示。I类、II类和III类分别占供试油菜品种总数的45.45%、45.45%、9.09%。其中,第I类由S1、S3、S5、S6、S7、S11、S14、S15、S19、S20共10个品种组成;第II类由S2、S4、S9、S12、S13、S16、S17、S18、S21、S22共10个品种组成;第III类由S8和S10共2个品种组成。第I类10个品种的菜薹Cd含量为0.14~1.29 mg·kg<sup>-1</sup>,平均值为0.57 mg·kg<sup>-1</sup>,是试验优先考虑的Cd低积累品种;第II类10个品种的菜薹Cd含量为0.53~1.39 mg·kg<sup>-1</sup>,平均值为0.90 mg·kg<sup>-1</sup>,作为薹用在Cd污染地区种植有一定的风险。第III类2个品种的菜薹Cd含量分别为1.24 mg·kg<sup>-1</sup>和2.15 mg·kg<sup>-1</sup>,从食品安全的角度出发,不推荐以上2个“油蔬两用”品种在Cd污染地区推广种植。在Cd低积累品种中,S3和S15各部位Cd积累量均较低,且具有高生物量的特点,因此选择S3和S15为高生物量、Cd低积累甘蓝型“油蔬两用”油菜品种,进一步探究外源喷施海藻糖对2个品种油菜薹Cd积累及品质的影响。

### 2.2 外源喷施海藻糖对Cd胁迫下油菜生长发育的影响

#### 2.2.1 SPAD值

由图3A和图3B分析可知,CD处理显著降低了S3和S15的SPAD值,较CK分别降低了10.9%和12.6%。喷施一定浓度的海藻糖能提高Cd胁迫下油菜的SPAD值。S3喷施C2浓度海藻糖在T3、T1喷施时期SPAD值较CD处理分别显著增加了16.1%和14.1%;T2喷施时期对SPAD值影响不显著。S15喷施处理后SPAD值变化情况与S3基本一致,在C2T3、C2T1处理较CD处理分别显著增加了15.2%和



不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

Different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at  $P < 0.05$ . The same below.

图1 不同油菜品种菜薹、茎叶、根系Cd含量及地上部干质量差异

Figure 1 Cd concentration in flower stalk, root, stem and leaf and shoot dry weight among different rapeseed varieties

13.4%;相同喷施浓度下,C2T2处理对SPAD值影响不显著。

### 2.2.2 地上部鲜质量

与CK相比,CD处理在一定程度上抑制了2个品种油菜地上部的生长,S3和S15地上部鲜质量分别降低了23.5%(图3C)和35.3%(图3D)。外源喷施海藻糖可在一定程度上缓解Cd胁迫对油菜地上部生长的抑制。C2T3、C2T1处理下,S3地上部鲜质量较CD处理分别显著提高了91.1%和59.1%;C1T1、C1T3处理下,地上部鲜质量相比CD处理分别提高了39.1%和32.1%,达到正常生长水平。S15在C2喷施浓度下,

T1、T2和T3喷施时期处理较CD处理地上部鲜质量均显著提高,其中C2T3处理达到最大值,较CD处理提高了75.9%,其他处理对S15地上部鲜质量影响不显著。

### 2.2.3 根鲜质量及根颈粗

由图3可知,CD处理显著抑制了2个品种油菜根系的生长。CD处理下,S3和S15的根鲜质量分别降低了27.1%(图3E)和52.8%(图3F)。适宜的海藻糖喷施处理可在一定程度上缓解Cd胁迫对油菜根系生长的抑制作用。S3在C2T1、C2T3、C3T1处理下根鲜质量较CD处理分别显著增加了42.1%、33.4%和

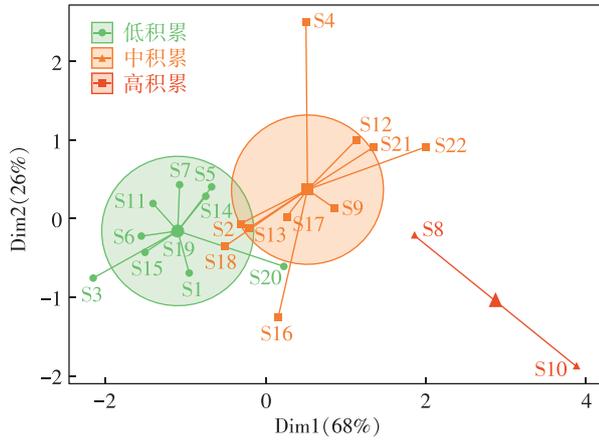


图2 不同油菜品种薹、根系及茎叶部Cd含量聚类分析

Figure 2 Clustering analysis of Cd concentration in flower stalk, roots, stems and leaf of different rapeseed varieties

27.1%。C2T1、C2T2、C1T3、C2T3、C3T3处理较CD处理显著增加了Cd胁迫下S15的根鲜质量,其中C2T3、C2T1与CD处理相比增幅分别为123.0%和103.6%,效果显著。Cd处理下2个品种油菜根颈粗均显著降低(图3G和图3H),喷施C2浓度海藻糖在T1、T3喷施时期显著缓解了Cd胁迫导致的两品种油菜根颈粗的下降,其他处理对根颈粗影响不显著。

### 2.3 外源喷施海藻糖对油菜薹Cd积累的影响

由图4分析可知,不同喷施时期不同和浓度的海藻糖处理均降低了2个油菜品种薹Cd含量,且各浓度下T1、T3喷施时期对薹Cd含量的降低效果均优于T2时期。在T1、T3时期喷施不同浓度的海藻糖,S3薹Cd含量较CD处理均显著降低,其中,C2T1处理下Cd含量达到最低值,较CD处理显著下降了61.5%;T2喷施时期仅在C2浓度下薹Cd含量显著降低,C1、C3、C4浓度下降低不显著(图4A)。除C1T2处理外,其他喷施处理均可显著降低S15薹Cd含量,其中,C2T1和C2T3处理下Cd含量最低,与CD处理相比均降低了70.6%(图4B)。综上所述,海藻糖喷施浓度以C2为最佳,喷施时期以T1、T3为最佳。

### 2.4 外源喷施海藻糖对油菜薹产量及品质的影响

#### 2.4.1 对油菜薹产量的影响

综合考虑不同喷施处理下S3和S15 2个品种油菜生长发育及Cd积累情况,认为C2为最佳喷施浓度,适宜喷施时期为T1或T3。据此选取C2浓度研究不同喷施时期2个品种油菜薹产量及品质的变化情况。由图5A、图5B可知,CD处理下S3和S15单株薹产量较CK分别显著下降了25.7%和35.3%。T3喷施

时期下,2个品种油菜单株薹产量较CD处理均显著增加,分别增长了58.4%和74.9%,薹产量达到CK水平。T1喷施时期对2个品种单株薹产量的影响不显著,但仍增长了28.4%和34.5%。T2喷施时期对Cd胁迫下油菜单株薹产量无显著影响。

#### 2.4.2 对油菜薹品质的影响

CD处理下,S3和S15可溶性蛋白含量显著降低了32.3%(图5C)和19.5%(图5D)。T1、T3生育期喷施海藻糖能显著增加Cd胁迫下2个品种油菜薹可溶性蛋白含量。S3在T3处理下薹可溶性蛋白含量达到最大值,为 $4.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,较CD处理提高了56.2%;T1处理下薹可溶性蛋白含量为 $4.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,较CD处理提高了46.0%;T2与CD处理差异不显著。S15在T1处理下薹可溶性蛋白含量最高,为 $4.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,分别比CK和CD处理增加了14.2%和41.9%;T3次之,为 $4.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,较CD处理增加了30.9%;T2与CD处理差异不显著。

CD处理下,S3和S15两油菜品种可溶性糖含量降低了31.98%(图5E)和40.9%(图5F)。从方差分析结果可知,外源喷施海藻糖对ANY-1薹可溶性糖含量的影响未达到显著水平,但相对Cd处理而言,可溶性糖含量仍有所提升。T3、T1时期外源喷施海藻糖S3薹可溶性糖含量较CD处理分别提高了78.7%和76.11%。S15油菜品种在T3、T1处理下薹可溶性糖含量较CD处理分别显著增加了99.2%和62.6%,T2与CD处理无显著差异。

## 3 讨论

### 3.1 油菜品种间Cd积累差异及菜薹Cd低积累品种筛选

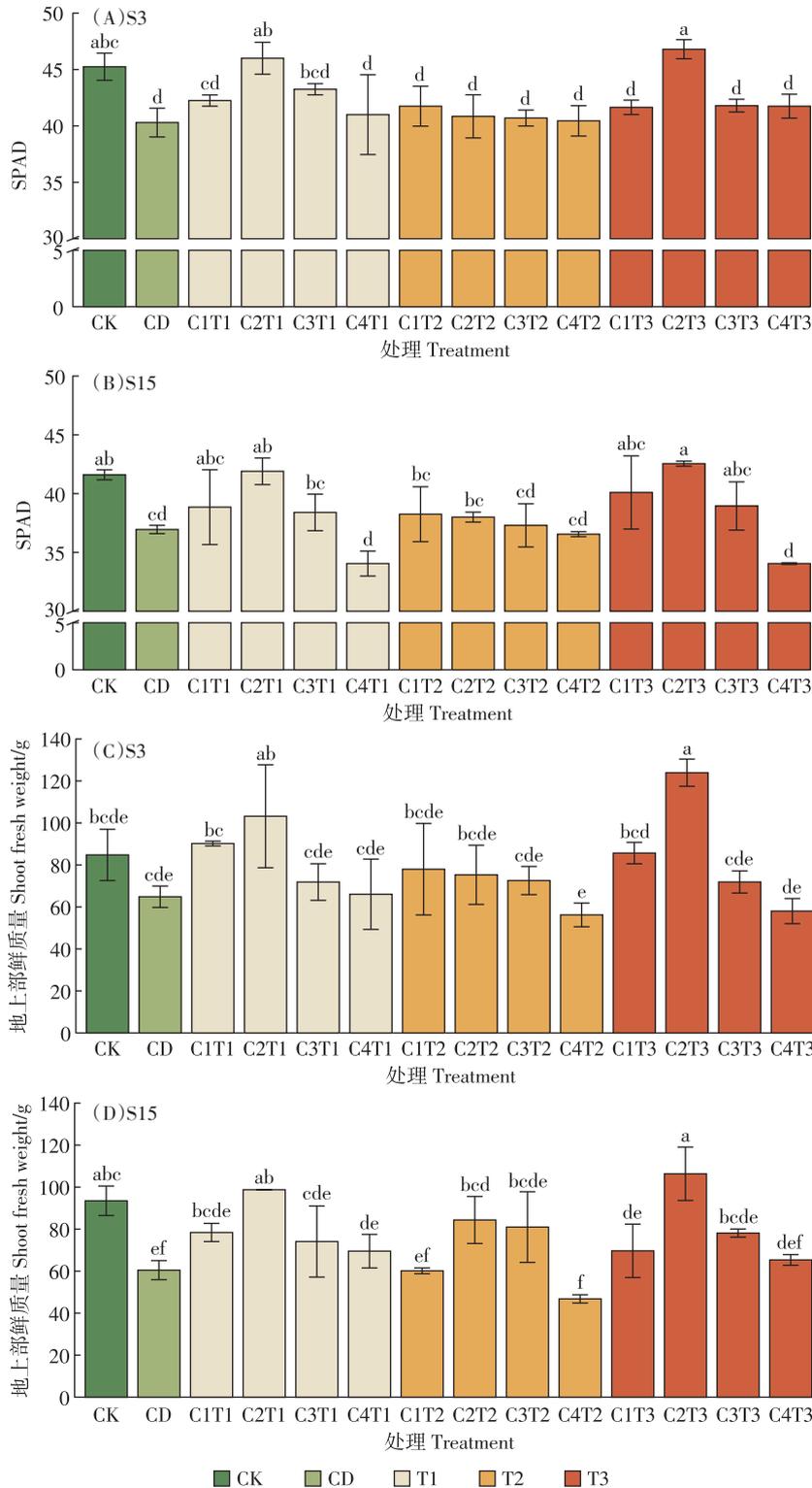
研究表明,叶菜类作物的可食用叶或茎相比种子或果实更易吸收和积累重金属,Cd含量超标风险更大<sup>[28]</sup>。对油菜不同部位Cd积累分布的研究发现,不同部位Cd积累量的排序为地上部>根部>角果皮>种子,通常菜籽油经体外消化后Cd的生物利用率较低,对人体危害较小,但地上部的高积累使其作为蔬菜食用存在潜在风险<sup>[29-30]</sup>。筛选Cd低积累“油蔬两用”油菜品种能在一定程度上避免菜薹中Cd的过量积累。由于自身遗传性状和生理生化机制的不同,芸薹属蔬菜不同品种间Cd积累量存在明显差异<sup>[31-32]</sup>。本试验在盆栽条件下同样发现,不同品种油菜各部位对Cd的积累差异显著,其中菜薹部位Cd含量最大值是最小值的15.3倍。这与黄志亮<sup>[33]</sup>在大田轻度Cd污染条件下的研究结果相似。

生物量在一定程度上反映了作物对重金属元素的稀释能力和高产潜力<sup>[34]</sup>,作物对重金属耐受性可以通过其生物量的变化来评估<sup>[16,35]</sup>。对食用安全而言,高生物量和可食用部位Cd低积累的特性尤为重要。本试验根据22个“油蔬两用”甘蓝型油菜薹期各部位Cd积累量和地上部干质量的差异,在5 mg·kg<sup>-1</sup> Cd含

量土壤背景下筛选得到高生物量、Cd低积累的油菜品种S3和S15,二者可作为Cd污染农田安全生产的“油蔬两用”油菜品种。

### 3.2 外源喷施海藻糖对油菜生长发育、Cd积累及品质的影响

Cd胁迫可在一定程度上阻碍作物对养分的吸收



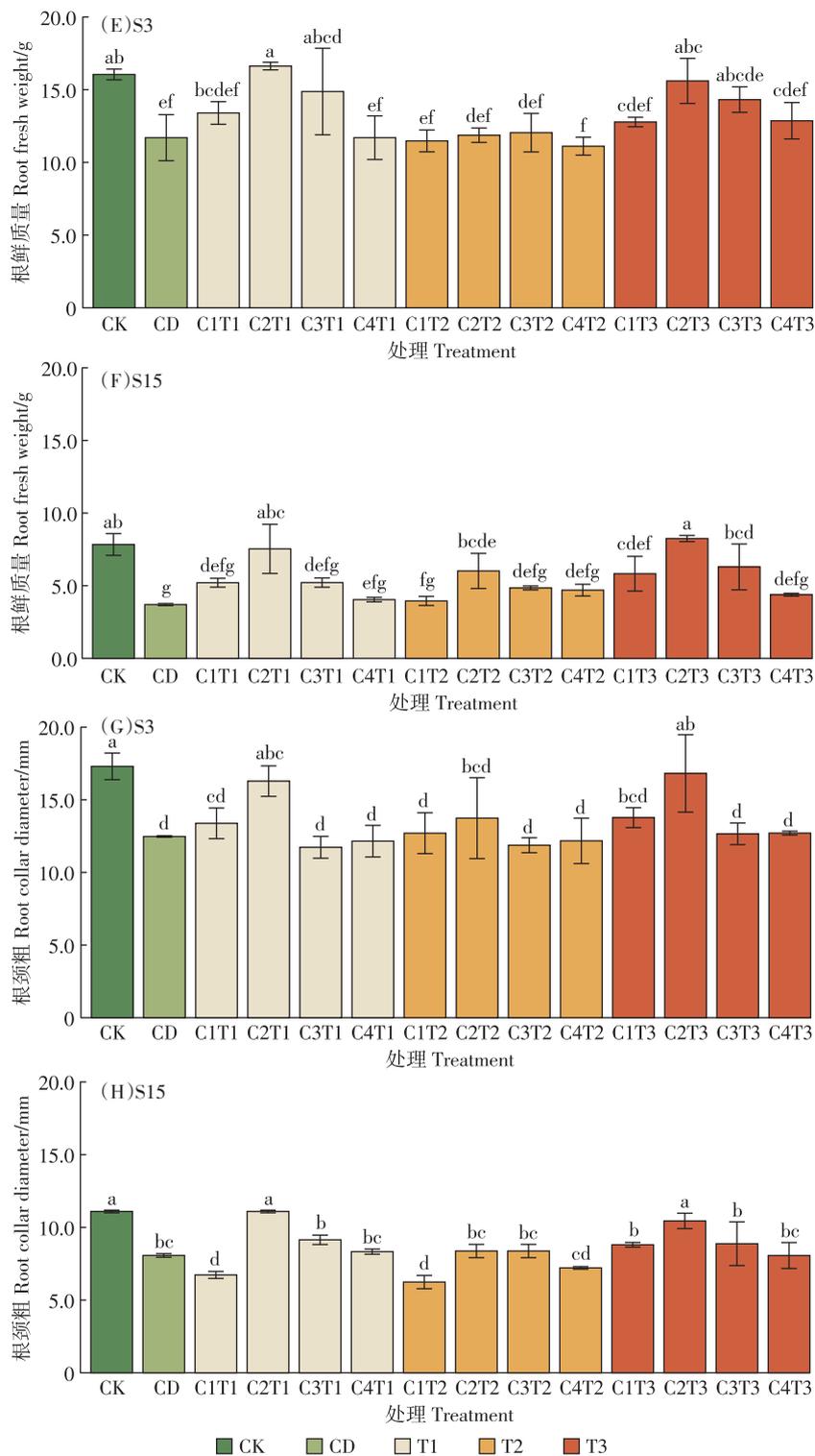


图3 海藻糖不同喷施时期及喷施浓度对Cd胁迫下油菜生长发育的影响

Figure 3 Effects of different spraying periods and concentrations of trehalose on growth and phenotype of rapeseed under Cd stress

和转运,增加氧化损伤,扰乱植物新陈代谢,从而降低作物生产力<sup>[4,36]</sup>。牛雅典<sup>[37]</sup>在不同Cd处理(0、1、10 mg·kg<sup>-1</sup>)对不同品种油菜生长影响的研究中发现,Cd处理显著降低了苗期和薹期3个品种油菜的地上部生物量,对油菜生长发育影响较大。也有研究表明,

低浓度Cd对油菜光合作用、氧化应激和阳离子吸收量影响不大,并且促进了油菜地上部干、鲜质量的增加;高浓度Cd对油菜的生长发育、光合作用和阳离子吸收均表现出显著的抑制作用<sup>[38]</sup>。本试验条件下,5 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理显著抑制了2个Cd低积累品种油菜

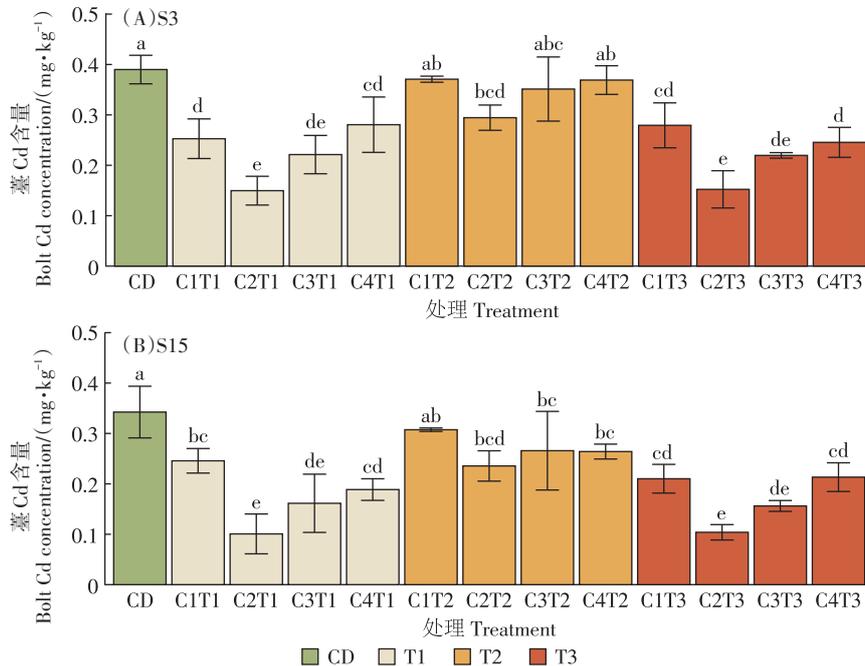


图4 海藻糖不同喷施时期及喷施浓度对油菜薹Cd积累的影响

Figure 4 Effects of different spraying periods and concentrations of trehalose on Cd accumulation in rapeseed flower stalk

的生长发育,主要表现为SPAD值、地上部鲜质量、根鲜质量和根颈粗的下降,这与前人研究结果一致。海藻糖在提高作物抗逆性和降低作物Cd积累方面有重要的调控作用<sup>[20]</sup>。Rehman等<sup>[21]</sup>的研究发现,开花期前喷施海藻糖显著增加了Cd胁迫下绿豆的生物量和光合色素的生物合成。本试验结果显示,T1、T3时期喷施20 mmol·L<sup>-1</sup>海藻糖后2个品种油菜的SPAD值、地上部干质量、根干质量、根颈粗均显著增加,对Cd毒害缓解作用较明显;该浓度下,T1、T3喷施时期对油菜生长影响显著,且均显著优于T2喷施时期,推测这可能是由于薹期喷施时间与取样时间间隔较短,导致该时期外源喷施海藻糖对Cd毒害的缓解有限;此外,薹期是油菜生长发育的快速期,生物量的迅速增长,使得海藻糖相对含量降低,对油菜生长发育的影响降低,其具体原因有待进一步探究。实际生产中如将第2次喷施时期提前到油菜薹期之前,有望更有效地缓解油菜Cd毒害。综上,苗期生物量较低,相比薹期外源喷施海藻糖能更好地缓解Cd毒害;该时期喷施适宜浓度的海藻糖对Cd胁迫下油菜的生长有一定的促进作用。

油菜薹既是营养物质合成后向生殖器官运输的通道,又是营养物质贮藏的关键器官,且作为蔬菜具有较高的营养价值<sup>[39]</sup>,但油菜茎叶Cd富集的特性使得菜薹安全生产风险较大。本试验结果表明,外源喷

施海藻糖降低了2个品种油菜薹Cd积累,其中以T1、T3时期喷施20 mmol·L<sup>-1</sup>海藻糖效果最为显著。这一方面可能是由于海藻糖可通过氢键和磷酸基团来稳定生物膜,增强Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>同Cd<sup>2+</sup>的竞争能力,减少转运蛋白对Cd的转运<sup>[40]</sup>;另一方面海藻糖具有相对较低的表面电位,易与Cd作用形成海藻糖-Cd复合物,减少Cd的转运,从而提高作物生产力<sup>[21,23,41]</sup>。但外源喷施海藻糖降低油菜薹Cd积累的具体机制尚不清楚,仍有待进一步探究。

菜薹产量、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量在一定程度上能衡量蔬菜的外观和营养品质<sup>[39,42-43]</sup>。时建业等<sup>[44]</sup>的研究发现,Cd胁迫下菠菜生物量、可溶性糖、可溶性蛋白、VC含量均降低,严重影响了菠菜叶片的外观和营养品质。Hussain等<sup>[45]</sup>通过研究不同Cd浓度下番茄果实品质的变化情况,发现Cd浓度增加导致了果实蛋白质、葡萄糖和果糖含量降低。本试验条件下,5 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理导致菜薹产量、可溶性蛋白含量和可溶性糖含量降低,这可能是由于Cd胁迫抑制了油菜的光合作用<sup>[36,44]</sup>,并增加了蛋白酶活性<sup>[46]</sup>,从而导致油菜植株糖类物质合成减少和蛋白质降解,使菜薹品质降低。逆境胁迫下外源喷施海藻糖能显著改善作物的营养品质<sup>[21,47]</sup>。本试验结果表明,外源喷施海藻糖在T1、T3时期增加了Cd胁迫下菜薹产量和可溶性蛋白、可溶性糖含量。这可能是由于Cd胁迫

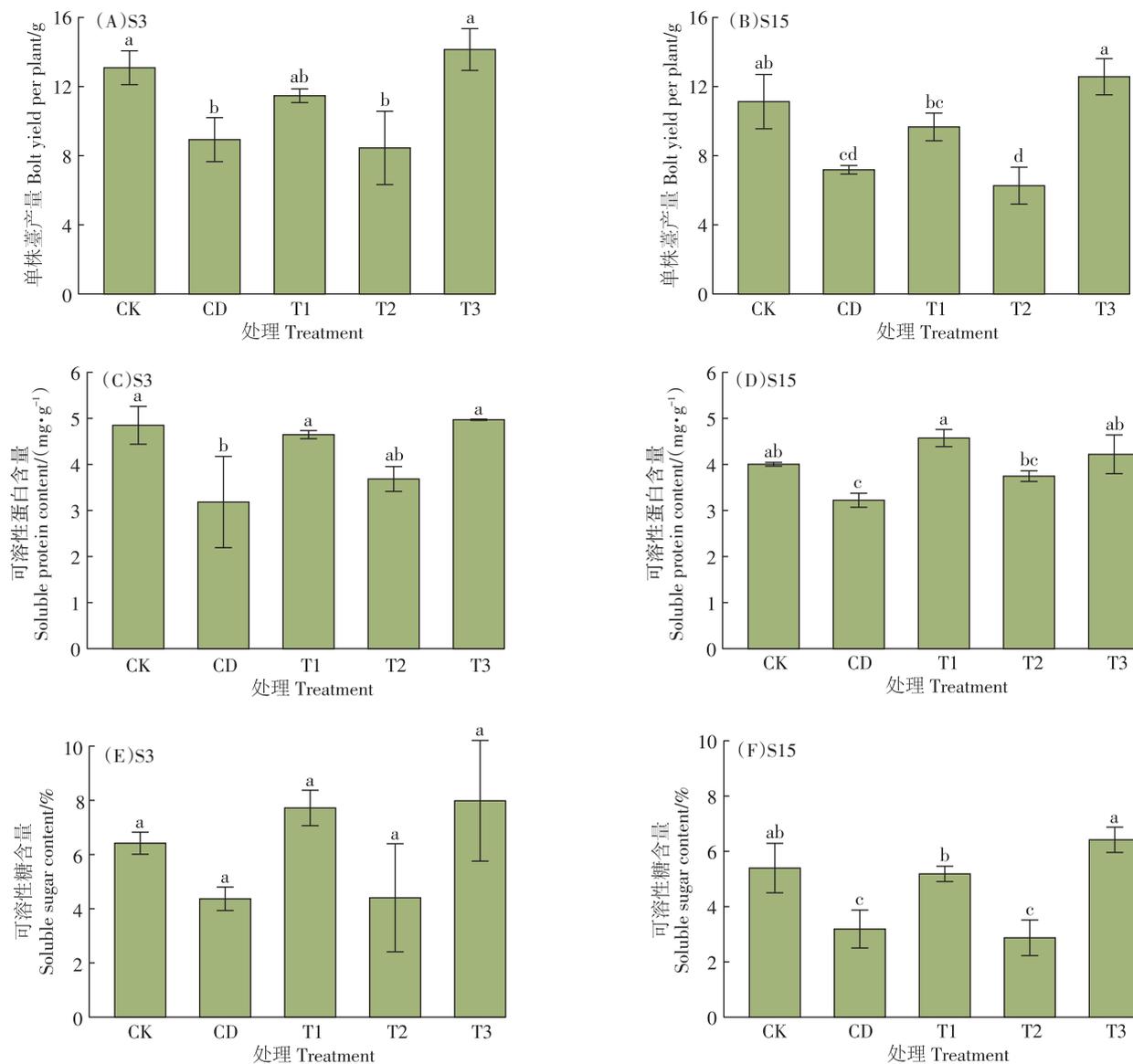


图5 外源喷施海藻糖对油菜薹产量及品质的影响

Figure 5 Effects of exogenous trehalose on spray on yield and quality of rapeseed flower stalk

下外源喷施海藻糖能够稳定植物体内蛋白质合成相关酶,保护蛋白质等生物大分子的活力<sup>[47]</sup>,进而增加菜薹可溶性蛋白含量;此外,外源海藻糖可直接提高植株可溶性糖含量,或通过增强光合作用,促进糖类物质合成,来间接增加可溶性糖含量<sup>[48]</sup>。但外源海藻糖调控油菜薹Cd积累和品质的机理仍有待进一步研究,以期利用分子手段改良作物提供一定的理论依据。

#### 4 结论

(1)Cd处理下,供试22个甘蓝型“油蔬两用”品种油菜各部位Cd含量和地上部生物量均表现出显著差异。对22个品种油菜各部位Cd含量进行综合聚类

分析,并结合地上部生物量差异,综合筛选得到2个生物量大、Cd积累低的品种,分别为安农油1号(ANY-1)和同油杂2号(TYZ-2)。

(2)5 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理显著抑制了2个品种油菜的生长。苗期1次叶面喷施、苗期+薹期2次叶面喷施20 mmol·L<sup>-1</sup>的海藻糖可有效缓解Cd毒害并降低菜薹Cd积累,但两时期差异不显著。综合考虑苗期1次喷施20 mmol·L<sup>-1</sup>海藻糖为最适喷施时期和喷施浓度,该处理下2个品种油菜SPAD值、地上部鲜质量、根鲜质量、根颈粗分别提高了13.4%~16.1%、59.1%~63.3%、42.1%~103.6%和30.6%~37.8%,菜薹Cd含量降低了61.5%~70.6%。

(3) 苗期外源喷施  $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  海藻糖使 2 个品种油菜薹产量显著增加了 28.4%~34.5%, 并通过提高可溶性蛋白含量和可溶性糖含量来改善菜薹品质。

#### 参考文献:

- [1] HU Y N, CHENG H F, TAO S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: a critical review[J]. *Environment International*, 2016, 92/93:515-532.
- [2] YANG Q Q, LI Z Y, LU X N, et al. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: pollution and risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642:690-700.
- [3] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报(2014年4月17日)[J]. 环境教育, 2014(6):8-10. Ministry of Environmental Protection, Ministry of Natural Resources. National soil pollution survey bulletin(2014-04-17)[J]. *Environmental Education*, 2014(6):8-10.
- [4] GALLEGOS M, PENA L B, BARCIA R A, et al. Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: insight into regulatory mechanisms[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, 83:33-46.
- [5] LI H, LUO N, LI Y W, et al. Cadmium in rice: transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 224:622-630.
- [6] 刘成, 冯中朝, 肖唐华, 等. 我国油菜产业发展现状、潜力及对策[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(4):485-489. LIU C, FENG Z C, XIAO T H, et al. Development, potential and adaptation of Chinese rapeseed industry[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2019, 41(4):485-489.
- [7] FU D H, JIANG L Y, MASONS A S, et al. Research progress and strategies for multifunctional rapeseed: a case study of China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(8):1673-1684.
- [8] 余燕, 贺原, 邹翔宇, 等. 双低甘蓝型油菜“油蔬两用”开发利用现状与展望[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(5):921-929. YU Y, HE Y, ZOU X Y, et al. Status and prospects for development and utilization of double-low rapeseed (*Brassica napus*) for oil-vegetable-dual-purpose[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2022, 44(5):921-929.
- [9] 郑本川, 李浩杰, 张锦芳, 等. 采摘次数对油蔬两用甘蓝型油菜菜薹和菜籽品质及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(22):1-7. ZHENG B C, LI H J, ZHANG J F, et al. Effects of picking times on the quality and yield of young stem and rapeseed of oilseed-vegetable dual-purpose *Brassica napus* varieties[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(22):1-7.
- [10] 王淑芬, 王金顺, 吴晓芸, 等. 甘蓝型双低油菜油蔬两用栽培的农艺性状、产量与效益研究[J]. 宁夏农林科技, 2012, 53(9):20-21. WANG S F, WANG J S, WU X Y, et al. Agronomic traits, yields and benefits of double low rapeseed variety for oilseed and vegetable cultivation[J]. *Journal of Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2012, 53(9):20-21.
- [11] CAO X R, WANG X Z, TONG W B, et al. Distribution, availability and translocation of heavy metals in soil-oilseed rape (*Brassica napus* L.) system related to soil properties[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 252:733-741.
- [12] CHEN Q, WU F B. Breeding for low cadmium accumulation cereals[J]. *Journal of Zhejiang University-Science B*, 2020, 21(6):442-459.
- [13] 任超, 任彧仲, 王浩, 等. 镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性[J]. 环境科学, 2022, 43(3):1606-1619. REN C, REN Y Z, WANG H, et al. Cadmium accumulation characteristics of different heat varieties under cadmium stress[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(3):1606-1619.
- [14] CAO X R, WANG X Z, TONG W B, et al. Accumulation and distribution of cadmium and lead in 28 oilseed rape cultivars grown in a contaminated field[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(2):2400-2411.
- [15] 卞建林, 郭俊梅, 王学东, 等. 两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制[J]. 环境科学, 2020, 41(2):970-978. BIAN J L, GUO J M, WANG X D, et al. Tolerance mechanism and cadmium enrichment abilities in two *Brassica napus* L. cultivars[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(2):970-978.
- [16] WANG X, BAI J Y, WANG J, et al. Variations in cadmium accumulation and distribution among different oilseed rape cultivars in Chengdu Plain in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(4):3415-3427.
- [17] RIZWAN M, ALI S, ADREES M, et al. A critical review on effects, tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables[J]. *Chemosphere*, 2017, 182:90-105.
- [18] CHEN L, HU W F, LONG C, et al. Exogenous plant growth regulator alleviate the adverse effects of U and Cd stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.) and improve the efficacy of U and Cd remediation[J]. *Chemosphere*, 2021, 262:127809.
- [19] YU Y, ZHOU X Y, ZHU Z H, et al. Sodium hydrosulfide mitigates cadmium toxicity by promoting cadmium retention and inhibiting its translocation from roots to shoots in *Brassica napus*[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(1):433-440.
- [20] FERNANDEZ O, BETHENCOURT L, QUERO A, et al. Trehalose and plant stress responses: friend or foe?[J]. *Trends in Plant Science*, 2010, 15(7):409-417.
- [21] REHMAN S, CHATTHA M U, KHAN I, et al. Exogenously applied trehalose augments cadmium stress tolerance and yield of mung bean (*Vigna radiata* L.) grown in soil and hydroponic systems through reducing Cd uptake and enhancing photosynthetic efficiency and antioxidant defense systems[J]. *Plants-Basel*, 2022, 11(6):822.
- [22] KOSAR F, AKRAM N A, SADIQ M, et al. Trehalose: a key organic osmolyte effectively involved in plant abiotic stress tolerance[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2019, 38(2):606-618.
- [23] WANG K, LI F J, GAO M L, et al. Mechanisms of trehalose-mediated mitigation of Cd toxicity in rice seedlings[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 267:121982.
- [24] KAYA C, ASHRAF M, ALYEMENI M N, et al. Trehalose and NO work together to alleviate Cd toxicity in pepper (*Capsicum annuum* L.) plants by regulating cadmium sequestration and distribution within cells and the antioxidant defense system[J]. *Scientia Horticulturae*,

- 2023, 314:111948.
- [25] 张艳华. 海藻糖缓解玉米苗期镉毒害的生理及分子机制[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2022. ZHANG Y H. Physiological and molecular mechanism of trehalose alleviating cadmium toxicity in maize seedlings[D]. Shenyang:Shenyang Agricultural University, 2022.
- [26] JONES C G, DANIEL H J, COMPTON S J. Measuring plant protein with the Bradford assay: 1. Evaluation and standard method[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1989, 15(3):979-992.
- [27] MANESS, Niels. Extraction and analysis of soluble carbohydrates[J]. *Methods in Molecular Biology(Clifton, NJ)*, 2010, 639:341-370.
- [28] FANG H W, LI W S, TU S X, et al. Differences in cadmium absorption by 71 leaf vegetable varieties from different families and genera and their health risk assessment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 184:109593.
- [29] 武琳霞, 丁小霞, 李培武, 等. 我国油菜镉污染及菜籽油质量安全性评估[J]. *农产品质量与安全*, 2016(1):41-46. WU L X, DING X X, LI P W et al. Cadmium pollution of rapeseed and assessment of quality and safety of rapeseed oil in China[J]. *Quality and Safety of Agro-Products*, 2016(1):41-46.
- [30] ZHANG H, TAO R, NIE J, et al. Cadmium distribution, availability, and translocation in soil-oilseed rape (*Brassica napus* L.) system and its risk assessment[J]. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2022, 6(8):2053-2062.
- [31] WANG L, YANG D, LI Z T, et al. A comprehensive mitigation strategy for heavy metal contamination of farmland around mining areas: screening of low accumulated cultivars, soil remediation and risk assessment[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 245:820-828.
- [32] XU Z M, MEI X Q, TAN L, et al. Low root/shoot (R/S) biomass ratio can be an indicator of low cadmium accumulation in the shoot of Chinese flowering cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis* Tsen et Lee) cultivars[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(36):36328-36340.
- [33] 黄志亮. 镉低积累蔬菜品种筛选及其镉积累与生理生化特性研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2012. HUANG Z L. Screening of low Cd-accumulation vegetable cultivars and research on it's properties of Cd-accumulation and physiology[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012.
- [34] 贾伟涛, 吕素莲, 林康祺, 等. 高生物量经济植物修复重金属污染土壤研究进展[J]. *生物工程学报*, 2020, 36(3):416-425. JIA W T, LÜ S L, LIN K Q, et al. Research progress in phytoremediation of heavy-metal contaminated soils with high-biomass economic plants [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2020, 36(3):416-425.
- [35] LIU W T, ZHOU Q X, ZHANG Z N, et al. Evaluation of cadmium phytoremediation potential in Chinese cabbage cultivars[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(15):8324-8330.
- [36] HAIDER F U, CAI L Q, COULTER J A, et al. Cadmium toxicity in plants: impacts and remediation strategies[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 211:111887.
- [37] 牛雅典. 不同油菜品种对镉耐性差异及其初步机理研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2012. NIU Y D. Cultivar differences of oilseed rapes in Cd tolerance and its preliminary mechnism[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012.
- [38] HAN Z X, WEI X, WAN D J, et al. Effect of molybdenum on plant physiology and cadmium uptake and translocation in rape (*Brassica napus* L.) under different levels of cadmium stress[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(7):2355.
- [39] 林宝刚, 任韵, 柳寒, 等. 不同生态区对油菜薹营养品质的影响及摘薹后产量表现[J]. *核农学报*, 2020, 34(9):2071-2079. LIN B G, REN Y, LIU H, et al. Effects of ecological sites on the nutritional quality of young stem of rapeseed and yield performance after post-harvesting[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(9):2071-2079.
- [40] 李昉峻, 周其文, 漆新华, 等. 海藻糖对镉胁迫下水稻幼苗生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(8):1827-1834. LI F J, ZHOU Q W, QI X H, et al. Effects of trehalose on the growth of rice seedlings under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8):1827-1834.
- [41] DONG L B, YU D, LIN X T, et al. Improving expression of thermostable trehalase from *Myceliophthora sepedonium* in *Aspergillus niger* mediated by the CRISPR/Cas9 tool and its purification, characterization [J]. *Protein Expression and Purification*, 2020, 165:105482.
- [42] 任韵, 柳寒, 朱建方, 等. 施氮量和株高采收时期对油蔬两用型油菜菜薹糖分积累的影响[J]. *核农学报*, 2022, 36(6):1236-1243. REN Y, LIU H, ZHU J F, et al. Effects of nitrogen rates and plant heights during harvesting on carbohydrate accumulation in young stem of oil-vegetable double usage type rapeseed[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(6):1236-1243.
- [43] 孙灵湘, 孙华, 王毓宁, 等. 油蔬两用型油菜不同采摘期下油菜薹的品质变化研究[J]. *农产品质量与安全*, 2021(2):74-79. SUN L X, SUN H, WANG Y N, et al. The study on bolt quality of rape for oil-seed-vegetable-dual-purpose in different picking periods[J]. *Quality and Safety of Agro-Products*, 2021(2):74-79.
- [44] 时建业, 张辉, 李怡雪, 等. 凹凸棒黏土对镉胁迫下菠菜光合作用和品质的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2022, 57(4):75-83. SHI J Y, ZHANG H, LI Y X, et al. Effects of attapulgitic clay on photosynthesis and quality of spinach under cadmium stress[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2022, 57(4):75-83.
- [45] HUSSAIN I, ASHRAF M A, RASHEED R, et al. Cadmium-induced perturbations in growth, oxidative defense system, catalase gene expression and fruit quality in tomato[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2017, 19(1):61-68.
- [46] PALMA J M, SANDALIO L M, CORPAS F J, et al. Plant proteases, protein degradation, and oxidative stress: role of peroxisomes[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2002, 40(6/7/8):521-530.
- [47] LUO Y, WANG Y, XIE Y Y, et al. Transcriptomic and metabolomic analyses of the effects of exogenous trehalose on heat tolerance in wheat[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(9):5194.
- [48] LUO Y, XIE Y, HE D, et al. Exogenous trehalose protects photosystem II by promoting cyclic electron flow under heat and drought stresses in winter wheat[J]. *Plant Biology*, 2021, 23(5):770-776.