

重金属镉胁迫下棉花纤维品质和棉籽油质量的变化及评价

周成轩, 曾邹果, 文玉姣, 周南, 周仲华, 周智, 罗伟

引用本文:

周成轩, 曾邹果, 文玉姣, 周南, 周仲华, 周智, 罗伟. 重金属镉胁迫下棉花纤维品质和棉籽油质量的变化及评价[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(9): 1960–1968.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0949>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

施锰微肥对镉污染土壤中玉米生长及镉吸收分配的影响

胡艳美, 吕金朔, 孙维兵, 张兴, 陈璐, 郭大维, 党秀丽

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1635–1643 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0106>

小叶榕对土壤铅镉污染的抗性和修复潜力研究

彭维新, 庄玉婷, 梁智淇, 俞政男, 吴道铭, 张学平, 曾曙才

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1707–1717 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0241>

雪里蕻对于Cd、Zn的耐性及富集特性研究

郭堤, 管伟豆, 张洋, 刘翔宇, 李一曼, 张增强

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2151–2161 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1028>

叶面喷施苹果酸对水稻Cd积累特性的影响

王惠君, 薛卫杰, 张昕, 张长波, 黄永春, 任兴华, 刘仲齐

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 269–278 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0823>

蚯蚓粪对镉在土壤-水稻系统中迁移转化影响

张晓绪, 张嘉伟, 孙星星, 徐轶群, 许健, 朱靖

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1723–1733 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0110>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

周成轩, 曾邹果, 文玉姣, 等. 重金属镉胁迫下棉花纤维品质和棉籽油质量的变化及评价[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(9): 1960–1968.

ZHOU C X, ZENG Z G, WEN Y J, et al. Changes and evaluation of cotton fiber quality and cottonseed oil quality under cadmium stress[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(9): 1960–1968.



开放科学 OSID

重金属镉胁迫下棉花纤维品质和棉籽油质量的变化及评价

周成轩¹, 曾邹果², 文玉姣³, 周南², 周仲华¹, 周智^{2*}, 罗伟¹

(1. 湖南农业大学农学院, 长沙 410128; 2. 湖南农业大学化学与材料科学学院, 长沙 410128; 3. 湖南农业大学机电工程学院, 长沙 410128)

摘要:为探究Cd污染对棉花纤维品质和棉籽油质量的影响,明晰棉花产物质量变化规律,本试验以棉花品种中棉所65为材料,设置6个土壤有效Cd含量[0.97 mg·kg⁻¹(Cd1)、11.21 mg·kg⁻¹(Cd11)、14.26 mg·kg⁻¹(Cd14)、23.30 mg·kg⁻¹(Cd23)、49.36 mg·kg⁻¹(Cd49)和77.11 mg·kg⁻¹(Cd77)],测定不同含量Cd胁迫下棉花叶片SPAD值、净光合速率、各个器官的Cd含量、部分农艺性状、纤维品质及棉籽油质量,评价棉花纤维和棉籽油中Cd含量。试验结果显示:Cd胁迫对棉花株高影响差异显著。Cd11处理棉花总生物量较Cd1处理显著增加,而Cd23处理棉花总生物量显著下降。棉花富集Cd的主要器官为叶柄、茎和根,且不同含量土壤Cd污染环境下棉花不同器官对Cd的富集能力存在差异。随着Cd含量的增加,棉花纤维上半部平均长度、整齐度指数、纤维伸长率和纺纱均匀性指数显著降低,而断裂比强度和马克隆值变化不显著。在Cd49和Cd77处理条件下,棉花纤维中Cd含量超过GB/T 18885—2020规定的总Cd含量,棉花纤维使用存在风险。棉籽油中未检测到Cd,Cd胁迫对棉籽油的过氧化值影响不显著。随着Cd离子含量增加,棉籽出油率先上升后下降,棉籽油的酸价增加,导致棉籽油质量下降。研究表明,棉花具有优异的Cd耐受性及Cd累积能力,Cd胁迫显著降低了棉花纤维上半部分平均长度、整齐度指数、纤维伸长率和纺纱均匀性指数,降低了棉籽油出油率,增加了棉籽油酸价。

关键词:Cd污染;替代种植;棉花生长;纤维品质;棉籽油

中图分类号:X53;S562 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)09-1960-09 doi:10.11654/jaes.2023-0949

Changes and evaluation of cotton fiber quality and cottonseed oil quality under cadmium stress

ZHOU Chengxuan¹, ZENG Zouguo², WEN Yujiao³, ZHOU Nan², ZHOU Zhonghua¹, ZHOU Zhi^{2*}, LUO Wei¹

(1. College of Agriculture, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. College of Chemistry and Materials Science, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128)

Abstract: In order to explore the effect of Cd pollution on cotton fiber quality and cottonseed oil quality, and clarify the quality change rule of cotton product. The experiment used the cotton variety medium cotton house 65 as the material and set up a concentration gradient for six soil cadmium masses: 0.97 mg·kg⁻¹(Cd1), 11.21 mg·kg⁻¹(Cd11), 14.26 mg·kg⁻¹(Cd14), 23.30 mg·kg⁻¹(Cd23), 49.36 mg·kg⁻¹(Cd49), and 77.11 mg·kg⁻¹(Cd77). The cadmium content in various organs of cotton, some agronomic characteristics, fiber quality, and cottonseed oil quality under different cadmium concentrations were compared and analyzed, and the cadmium ion concentration in cotton fiber and

收稿日期:2023-11-08 录用日期:2024-02-01

作者简介:周成轩(1997—),男,湖南长沙人,硕士研究生,从事秸秆资源化利用研究。E-mail:837728564@qq.com

*通信作者:周智 E-mail:zhouzhi@hunau.edu.cn

基金项目:湖南省农业农村厅项目(湘财建指[2022]51号,湘财建指[2023]98号)

Project supported: Hunan Agriculture and Rural Affairs Department Project(Xiangcai Construction Index[2022]No.51, Xiangcai Jianzhi[2023]No.98)

cottonseed oil was evaluated. The effect of cadmium stress on cotton plant height was significant. Compared with the Cd1 treatment, the total biomass of cotton treated with Cd11 was significantly increased. But under Cd23 treatment, the total biomass of cotton decreased significantly. In addition, petioles, stems, and roots were the main cotton organs to concentrate cadmium, and they had different enrichment abilities under various soil cadmium pollution concentrations. With the increase in soil cadmium concentration, the average length, uniformity index, fiber elongation, and spinning uniformity index of the upper part of cotton fiber decreased significantly, but the specific breaking strength and micronization value were not significantly affected. Under Cd49 and Cd77 cadmium stress treatment conditions, the cadmium ion concentration in cotton fiber exceeds the total cadmium concentration specified in GB/T 18885—2020, and cotton fiber use has risks. No cadmium ion was detected in cottonseed oil, and the effect of cadmium stress on the peroxide value of cottonseed oil was not significant. As the cadmium ion concentration increased, the cottonseed oil quality declined. This was evident in two ways: first, the oil's acidity (measured by acid value) steadily increased, and second, the oil's volume initially increased before ultimately decreasing. Cotton has excellent cadmium tolerance and accumulation ability. Cadmium stress significantly decreased the average length of the top half of cotton fiber, uniformity index, fiber elongation, and spinning uniformity index, as well as the yield of cottonseed oil, but increased the acid value of cottonseed oil.

Keywords: cadmium pollution; substitute plantation; cotton growth; fiber quality; cottonseed oil

棉花具有生物量大、富集系数高、耐受性强和成本低等特性,是良好的重金属污染土壤替代种植作物,且已被证明能显著降低土壤Cd污染水平^[1]。目前,关于Cd离子对棉花影响的研究进展主要集中在以下3个方面:(1)Cd离子对棉花生长的影响。Cd作为棉花生长的非必需元素,低含量时对生长发育有积极作用,但含量过高会对植株造成伤害,抑制生长发育^[2]。在Cd含量低时,棉花植株能维持正常的生理功能并正常生长,随着Cd含量的增加,棉花根长缩短,果枝数减少^[3],叶绿素含量和气孔数减少,活性氧(ROS)和丙二醛(MDA)含量升高^[4],蒸腾速率和气孔导度逐渐降低^[5],导致籽棉产量、皮棉产量、铃质量和单株结铃数显著降低,但对棉花纤维品质的影响不显著^[6]。棉籽的物理品质如种子指数、籽粒指数、籽粒百分率和粒壳比都随着土壤中Cd含量的增加而下降。Cd胁迫改变了棉花根尖和棉籽的细胞结构,对细胞造成不可逆的致命损伤^[7]。(2)棉花对Cd离子的吸收、转运及富集特性。相关研究表明,将不同品种棉花在含Cd 2 mg·L⁻¹的营养液中进行培养,Cd的吸收量为29.2~248.0 mg·kg⁻¹,表明棉花具有较强的Cd吸收能力,但不同品种棉花对Cd的吸收能力存在较大差异^[8]。棉花Cd转运系数在6.0~13.6之间,表明其对Cd具有较好的耐受性和转运能力。陈丽丽等^[9]研究发现棉花器官中的Cd含量排序为根>茎>叶~蕾,李玲等^[5]认为Cd含量排序为纤维<种子<种壳<根<叶<梢<棉铃壳<叶柄,这可能是两项研究的Cd污染背景值差异较大所致。根据棉花根、茎、叶中Cd离子的亚细胞分布结果,发现Cd含量排序为可溶性组分>细胞壁>细胞器,Cd绝大多数富集在可溶性组分中,细胞

器富集很少,且不同品种根、茎、叶各亚细胞组分的Cd含量均表现出根>茎>叶的特征,说明棉花根富集Cd的能力最强,叶最弱^[10]。(3)棉花对Cd胁迫的适应和耐受机理。棉花对重金属胁迫的应答机制可分为避害性和耐受性^[11-12]。金属离子进入植物根系细胞壁是被动非代谢过程,重金属主要以离子形式存在或结合在细胞壁的纤维素和木质素上。植物细胞壁作为阻止重金属离子进入细胞原生质体的第一道屏障,对重金属离子具有一定的吸附作用。在棉花叶片囊泡中存在重金属沉积区,这些区域在消除重金属毒性和提高植物耐受性方面发挥着重要作用^[13-16]。植物络合素^[17]、金属离子结合蛋白^[18]、有机酸和氨基酸等物质可以与重金属离子结合,避免重金属离子与细胞器接触,降低细胞内游离离子的浓度,从而降低重金属胁迫对植物的毒性^[19-20]。在重金属胁迫条件下,棉花会产生大量ROS,包括超氧阴离子(O₂⁻)、羟基自由基(·OH)和过氧化氢(H₂O₂)等^[21-22],ROS过度积累是重金属胁迫的主要作用机制,对棉花生长发育造成损害。过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)和非酶抗氧化剂参与清除这些ROS。当培养环境中Cd含量增大时,棉花幼苗根、茎叶的POD活力不断升高,而SOD和CAT活力呈现先上升后下降的趋势,且茎叶中的相对酶活力均大于根中^[23]。棉花细胞内抗氧化酶簇组成的自由基清除系统协同工作,缓解棉花受到的损伤^[24-25]。综上所述,棉花对Cd胁迫的适应和耐受机制涉及植物细胞壁的吸附、螯合作用、金属硫蛋白的表达以及抗氧化系统的活化等多个方面。

尽管棉花对Cd胁迫的适应与耐受机理研究相对

较多,但是关于土壤Cd污染对棉花纤维品质和棉籽油质量影响的研究还相对较少,且关于棉籽油质量的研究仅限于棉籽层面。为更好地了解在不同含量土壤Cd污染条件下,棉花纤维和棉籽油质量的变化趋势,本试验以中棉所65为研究材料,采用盆栽实验的方法,开展土壤Cd胁迫对棉花纤维质量和棉籽油品质的影响分析。该试验有助于全面了解土壤Cd污染对棉花主、副产物品质的影响,以期为湖南Cd污染耕地棉花替代种植的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2022年4—11月在湖南农业大学棉花所试验站(28°18'N, 113°08'E)进行。Cd胁迫处理棉花采用盆栽方式种植,供试土壤质地为壤土,土壤基础理化性质为:碱解氮含量 $16.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效磷含量 $11.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效钾含量 $130.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有机质含量 $14.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、土壤全Cd含量 $1.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、pH 5.78。CdCl₂·2.5H₂O晶体购自国药集团化学试剂有限公司(上海),性状为无色半透明易风化结晶,纯度为分析级。

试验设置6个有效Cd含量,在土壤中按照相应含量加入CdCl₂·2.5H₂O溶液进行混匀,前15 d每天搅均两次,共陈化30 d,陈化后测定土壤中有效Cd含量。各处理有效Cd含量为0.97、11.21、14.26、23.30、49.36 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和77.11 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别以Cd1、Cd11、Cd14、Cd23、Cd49和Cd77表示。每盆装土12 kg,称量后将土壤装入盆中。

棉花出苗后,每盆定苗1株为1个重复,每个处理20个重复。定期浇水,无雨天搬出室外,避免温室温度过高,其他栽培管理方法与大田栽培相同。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 叶绿素相对含量的测定

利用SPAD-502 PLUS便携式叶绿素测定仪(柯尼卡美能达,日本)在棉花苗期、蕾期、花铃期、吐絮期,随机选取棉花不同部位的5片棉叶测定叶绿素相对含量,以叶绿素测定仪读取值(SPAD值)表征叶绿素相对含量。

1.2.2 净光合速率的测定

使用美国LI-COR公司的便携式光合仪LI-6400XT在棉花苗期、蕾期、花铃期、吐絮期的晴天选取棉花倒4功能叶测定植物的净光合速率(Pn),每个处理各测定3片叶,取平均值。

1.2.3 棉花农艺性状的测定

株高:于吐絮期对每个处理随机选取3株棉花,用卷尺测量子叶节点至生长点之间的高度作为株高。干物质量:在棉花吐絮期进行取样,从每个处理内随机挑选3株可代表整体长势的棉花,将植株分为根、茎、叶、叶柄、棉铃壳、棉纤维、棉籽壳和棉仁。取得植株根部后用自来水冲洗再用蒸馏水漂洗,将分离后的器官样品装入信封袋中,置于105℃烘箱中杀青0.5 h,随后调整烘箱温度至80℃,将样品进行干燥直至质量恒定。地下部干物质量为根的质量,其余部分质量总和为地上部干物质量。

1.2.4 土壤有效Cd含量测定

采用GB/T 25282—2010中的乙酸法测定土壤Cd的有效态含量,测定3次取平均值。

1.2.5 植株Cd含量测定

(1)粉碎:将烘干后的各个器官分别粉碎,过60目筛;(2)称样:称取粉碎后样品0.25 g,倒入三角瓶中,加入10 mL混酸(硝酸:高氯酸=4:1),过夜;(3)消煮:消煮温度为230℃,每隔2 h摇动一次三角瓶,消化至第1次轻摇无白烟即为消化终点;(4)转移:把三角瓶从电热板上取下,冷却至室温,用超纯水冲洗弯颈漏斗以及锥形瓶内壁至少3次后定容至50 mL,静置过夜;(5)过膜:采用孔径为0.45 μm针筒过滤器过滤后将样品迅速倒入10 mL离心管中待测;(6)采用电感耦合等离子体-质谱法(ICP-MS)测定Cd含量。各器官有效富集系数计算公式为:有效富集系数=器官中Cd含量/土壤中有效Cd含量。

1.2.6 棉花纤维质量测定方法

在棉花吐絮期按不同处理分别取15.0 g皮棉进行纤维品质测定,包括纤维上半部平均长度(Fiber length, FL)、断裂比强度(Fiber strength, FS)、马克隆值(Fiber micronaire value, FM)、整齐度指数(Fiber uniformity, FU)、伸长率(Fiber elongation ratio, FER)、纺纱均匀性指数(Spinning consistency index, SCI)和纤维Cd含量(Fiber cadmium concentration, FCC)。首先将皮棉纤维样品放在恒温(20℃±2℃)、恒湿(相对湿度65%±3%)实验室平衡48 h,然后送中国科学院棉花研究所用HVI1000纤维品质测定仪进行品质测定。

1.2.7 棉籽油质量测定方法

棉籽去壳后,粉碎过40目筛即得棉仁粉,用石油醚作为提取溶剂。用电子天平分别称量20.0 g棉籽粉,量筒量取80 mL溶剂,将棉籽粉与溶剂混合[液固比为4:1(mL:g)]置于蒸馏烧瓶中,超声20 min,静置

过夜。将提取液进行抽滤,去除滤渣,滤液放入水浴温度为40℃的旋转蒸发器中,回收溶剂,冷却后称量,计算出油率(OY,%),每组处理测3次取平均值,计算公式如下:

$$\text{出油率} = \frac{A2-A1}{A0} \times 100\%$$

式中:A0为棉仁样品质量,g;A1为浸提烧杯质量,g;A2为含有棉籽油的浸提烧杯质量,g。棉籽油中Cd含量(Cadmium concentration in cottonseed oil, CCCO)及油粕中Cd含量(Cadmium concentration in oil meal, CCOM)的测定方法参照1.2.5。

1.2.8 棉籽油酸价检测

采用GB 5009.229—2016中的冷溶剂自动电位滴定法进行棉籽油酸价(Acid value, AV)的测定,测定3次取平均值。

1.2.9 棉籽油过氧化值测定

采用GB 5009.227—2016中的滴定法进行过氧化值(Peroxide value, PV)测定,测定3次取平均值。

1.3 数据处理

采用Microsoft Excel 2016和SPSS 21.0进行数据统计分析。采用LSD多重比较法($P < 0.05$)分析不同处理间差异。使用Origin 8.0制图。

2 结果与分析

2.1 不同含量Cd处理对棉花叶片SPAD值的影响

图1显示,在不同含量的Cd处理条件下,棉花叶片的SPAD值随着植物生长发育而变化,呈现出先上升后下降的趋势,并且在花铃期达到最高值。在棉花苗期,不同Cd含量处理组之间的SPAD值差异不显

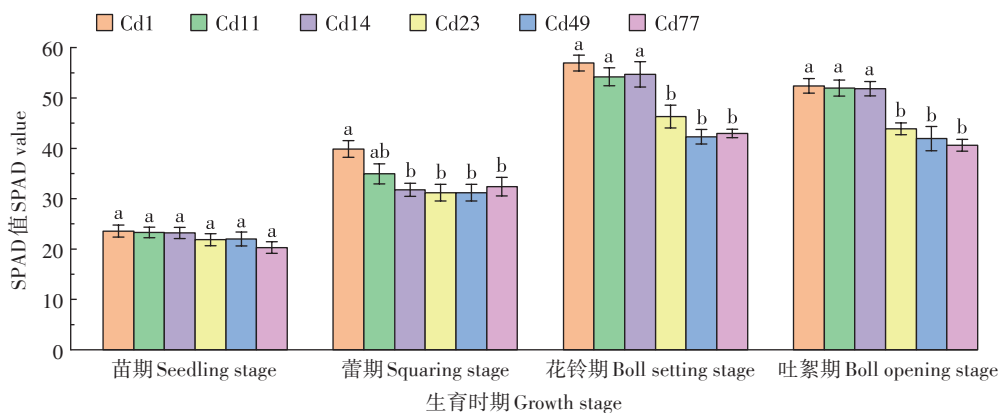
著。Cd1处理下的SPAD值在各生育时期均最大,表明Cd胁迫对SPAD值呈抑制作用。棉花蕾期不同处理组SPAD值开始呈现出显著性差异,Cd23处理下棉花叶片SPAD值达到最低,为31.2,较Cd1处理组降低了21.72%。花铃期,Cd1与Cd11、Cd14处理组间SPAD值差异不显著,Cd23与Cd49、Cd77处理组间SPAD值差异也不显著。随着棉花的衰老,吐絮期各处理组SPAD值较花铃期均降低,不同处理组间的显著性差异与花铃期一致。

2.2 不同含量Cd处理对Pn的影响

图2表明,不同Cd含量处理条件下,棉花Pn值整体呈现先升高后降低的趋势。在棉花苗期,不同处理组间Pn值差异不显著。随着棉花生长发育,各处理间Pn值差异显著。在蕾期,Cd11处理组Pn值最大,为 $22.4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,相较于Cd77处理提高了18.00%。在花铃期,各处理Pn值均达到最大值,但Cd1和Cd11处理组差异不显著,随着各处理组土壤Cd含量的升高,Pn值逐渐降低,且差异显著,表明Cd胁迫抑制了棉花的光合作用。在吐絮期,各处理Pn值较花铃期均降低。Cd11处理组Pn值在不同时期均高于Cd1处理组,表明低Cd胁迫对棉花光合作用有促进作用,但两处理差异不显著。

2.3 不同含量Cd处理对棉花生长发育的影响

由表1可知,Cd1处理下吐絮期株高达到最高值,为62.00 cm;Cd77处理下株高最低,为55.30 cm,较Cd1处理株高显著降低10.80%。低含量Cd胁迫促进棉花地下部分生长,与Cd1处理相比,Cd11和Cd14地下部生物量分别提升了6.9%和16.4%;当有效Cd含



不同字母表示同一生育时期不同处理间差异显著($P < 0.05$)。图2同。

Different letters indicate significant differences among different treatments at the same growth period ($P < 0.05$). The same as figure 2.

图1 不同含量Cd处理下棉花各时期叶片SPAD值

Figure 1 SPAD value of cotton leaves at different periods under different Cd treatment concentrations

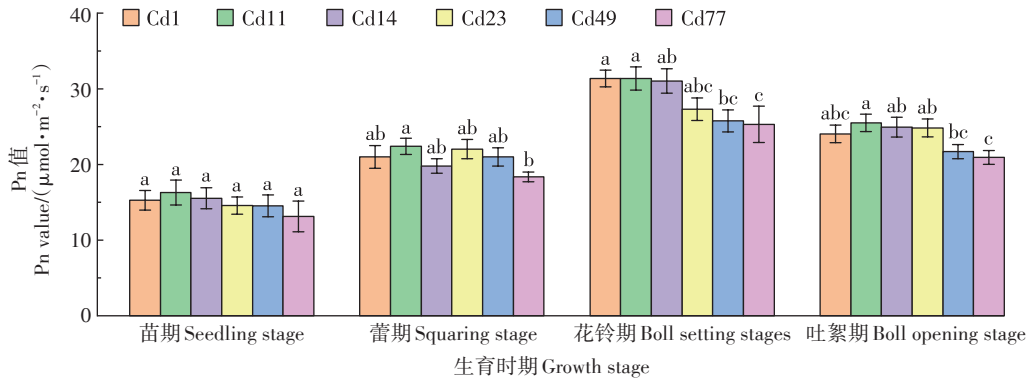


图2 不同含量Cd处理下棉花各时期叶片Pn值

Figure 2 Pn value of cotton leaves at different periods under different Cd concentration treatment

表1 不同Cd含量处理下棉花生长情况

Table 1 Cotton growth under different Cd concentrations

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	生物量 Biomass/g		
		地下部 Root	地上部 Shoot	总生物量 Total biomass
Cd1	62.00±0.26a	6.03±0.05b	57.61±0.55b	63.64±0.51b
Cd11	60.33±0.68a	6.45±0.08b	56.53±0.68b	62.98±0.66b
Cd14	57.03±1.78b	7.02±0.22a	60.82±1.43a	67.84±1.38a
Cd23	58.13±0.60ab	5.34±0.22c	40.70±0.72d	46.04±0.85c
Cd49	61.53±0.76a	5.56±0.11c	41.97±0.33cd	47.53±0.50c
Cd77	55.30±0.85b	4.59±0.21d	42.56±0.14c	47.15±0.26c

注:数据为平均值±标准差,同列数据后不同小写字母表示不同处理间在5%水平差异显著。下同。

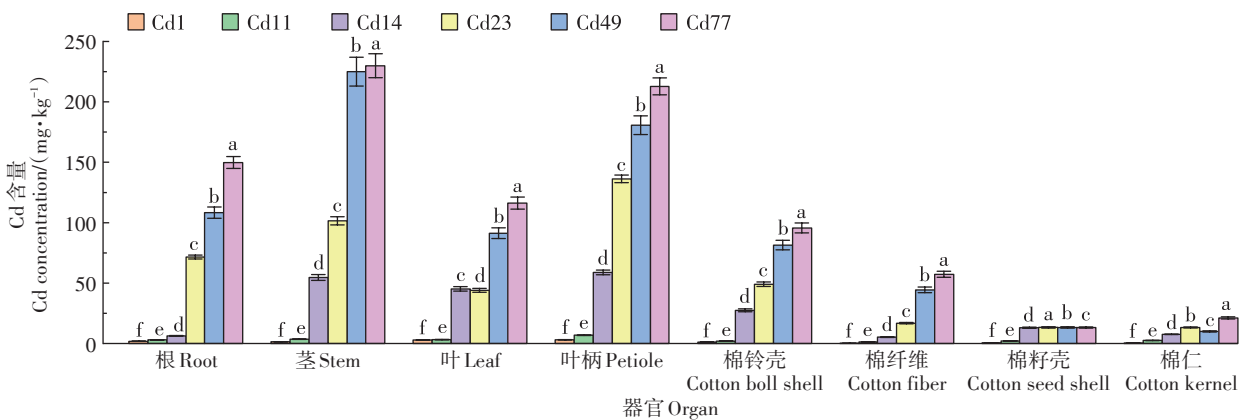
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant differences between different treatments at the 5% level. The same below.

量提升至 14.26 mg·kg⁻¹ 以上时,地下部分生长受到显著抑制。地上部生物量在Cd11处理下相较于Cd1有

所降低,但差异并不显著,在Cd14处理下达到最大值,为60.82 g。当土壤中有效Cd浓度大于14.26 mg·kg⁻¹时,地下部生物量显著下降。Cd11处理下的株高和生物量相较于Cd1均无显著差异,但随着土壤中Cd含量逐渐增大,棉花植株总生物量较Cd1显著降低。

2.4 棉花吐絮期各器官Cd含量及有效Cd富集系数

如图3所示,棉花各器官中Cd含量随土壤中Cd含量的增加而提高,主要富集的器官为叶柄、茎和根,棉花纤维、棉籽壳和棉仁中含量相对较低。当土壤有效Cd含量低于23.31 mg·kg⁻¹时,叶柄中的Cd含量最高,最大值达136.23 mg·kg⁻¹,其次为茎。当Cd含量在23.31~77.11 mg·kg⁻¹时,茎中Cd含量逐渐超过叶柄,最高值为229.9 mg·kg⁻¹。以上结果表明不同含量Cd污染环境下棉花不同器官对Cd的富集能力存在差异。棉籽壳中Cd含量在Cd23处理下达到最大值,



不同字母表示同一器官不同处理间差异显著(P<0.05)。

Different letters indicate significant differences among different treatments at the same organs (P<0.05).

图3 不同含量Cd处理下棉花器官Cd含量

Figure 3 Cd concentration in cotton organs treated with different Cd concentration

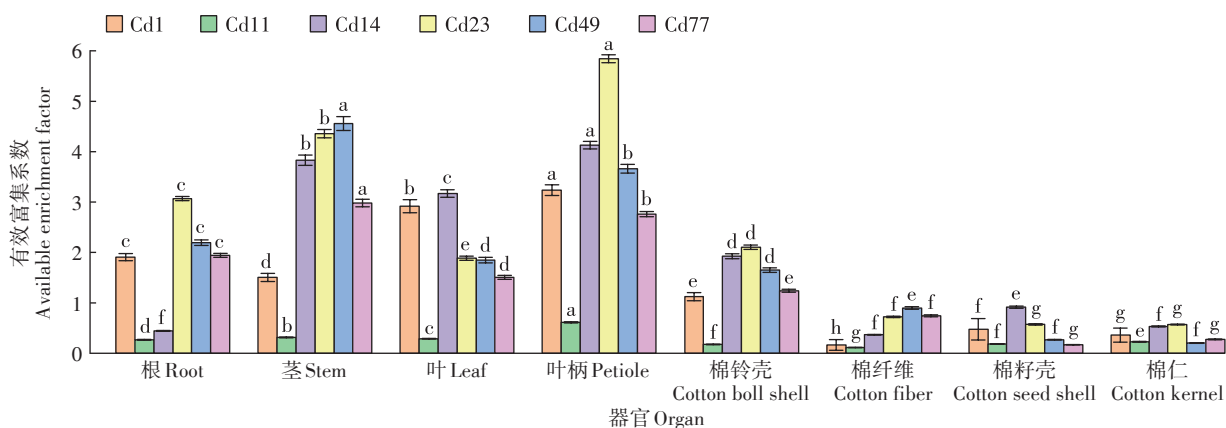
为 $13.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在 Cd49 和 Cd77 处理下 Cd 含量略微降低。

如图 4 所示, 棉花各器官 Cd 富集系数未随土壤有效 Cd 含量的增加而增加。棉花富集 Cd 的主要器官为叶柄和茎。在 Cd14 处理下棉花的茎、叶、棉铃壳等对 Cd 的富集能力较强, 但根系和叶柄在 Cd23 处理下对 Cd 的吸收能力较强。棉花纤维和棉籽油原料-棉仁的 Cd 富集系数随着土壤有效 Cd 含量增加呈现先降低后增大的趋势, 但棉花纤维在 Cd49 处理条件下有效 Cd 富集系数最大, 而棉仁在 Cd23 处理条件下 Cd 有效富集系数最大, 这表明棉花植株的不同器官在不同有效 Cd 含量下将 Cd 离子吸收转移到体内的能力存在差异。

2.5 不同含量 Cd 处理对棉花纤维品质的影响

表 2 结果表明, Cd1 处理条件下, 棉花纤维上半部分平均长度为 27.59 mm, Cd11 处理达到最低值, 为 26.79 mm, Cd14 处理的上半部平均长度较 Cd11 增加, 在 Cd23 处理时达到最高值(28.22 mm)。Cd14~Cd77

处理组之间上半部平均长度差异不显著, 表明 Cd 含量大于 $14.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之后, 棉花纤维上半部平均长度趋于稳定。在低 Cd 含量下棉花纤维上半部平均长度增加, 在高含量处理时降低。整齐度指数在 Cd49 处理下达到最大值(83.95%), Cd77 处理达到最低值(81.21%), 在 Cd 含量为 $0 \sim 49.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 区间内, 整齐度指数差异不显著。尽管 Cd 胁迫对棉花断裂比强度的影响不显著, 但断裂比强度在 Cd77 下达到最低值, 为 $27.08 \text{ cN} \cdot \text{tex}^{-1}$, 这表明 Cd 胁迫对棉花断裂比强度仍有一定影响。马克隆值作为反映棉花纤维细度与成熟度的综合指标, 本研究中不同 Cd 含量处理间的棉花纤维马克隆值没有显著差异, 这表明 Cd 胁迫对马克隆值影响不大。纺纱均匀性指数为纤维连续可纺性指标, 与纤维上半部强度、整齐度指数等品质指标相关, 由表 2 可知该值随着土壤有效 Cd 含量的增加而降低, 且 Cd 胁迫对纺纱均匀性指数的影响显著。纤维伸长率在 Cd11 处理下达到最大值(6.81%), Cd1 与 Cd14 较 Cd11 下降程度分别为 2.93% 和 3.20%, 表



不同字母表示同一有效镉含量处理下不同器官间差异显著 ($P < 0.05$)。
Different letters indicate significant differences among different organs at the same Cd concentration ($P < 0.05$).

图 4 不同含量 Cd 处理下棉花器官有效 Cd 富集系数

Figure 4 Cd enrichment coefficient of cotton organs under different Cd treatment concentrations

表 2 不同有效 Cd 含量处理下棉花纤维品质比较

Table 2 Comparison of cotton fiber quality under different available Cd concentration treatment

处理 Treatment	纤维上半部 平均长度 FL/mm	整齐度指数 FU/%	断裂比强度 FS/($\text{cN} \cdot \text{tex}^{-1}$)	马克隆值 FM	伸长率 FER/%	纺纱均匀性 指数 SCI	纤维 Cd 含量 FCC/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Cd1	27.59±1.16ab	82.71±0.60ab	28.32±0.61a	5.13±0.20a	6.61±0.25ab	137.16±2.25a	0.16±0.08e
Cd11	26.79±0.25b	81.62±0.35ab	28.41±0.95a	5.26±0.12a	6.81±0.10a	133.30±1.46ab	1.27±0.08e
Cd14	27.81±0.47a	82.46±1.59ab	27.81±0.87a	4.93±0.19a	6.59±0.08ab	133.28±0.96ab	5.27±0.13d
Cd23	28.22±1.21a	83.03±0.78ab	27.89±0.80a	4.96±0.03a	6.47±0.22b	130.18±1.40b	16.83±1.56c
Cd49	27.81±0.65a	83.95±1.40a	28.08±0.35a	5.10±0.58a	6.52±0.36b	124.64±2.51c	44.34±1.74b
Cd77	27.65±1.30a	81.21±0.99b	27.08±0.44a	5.23±0.12a	6.40±0.14b	121.40±0.81c	57.30±3.20a

明低 Cd 含量下纤维伸长率增加,但 3 个处理间差异不显著。当有效 Cd 含量在 23.31~77.11 mg·kg⁻¹时,各处理间纤维伸长率差异不显著。纤维中的 Cd 含量随着土壤中 Cd 含量的增加而增加,不同处理组之间差异显著,Cd49 处理下棉花纤维中 Cd 含量达到 44.34 mg·kg⁻¹,超过《生态纺织品技术要求》(GB/T 18885—2020)中规定的总 Cd 含量。

2.6 不同含量 Cd 处理对棉籽油品质的影响

由表 3 可知,不同处理间出油率和酸价存在显著差异,而过氧化值在处理间均无显著差异。随着有效 Cd 含量的增加,各处理棉籽出油率呈现先上升后下降的趋势,在 Cd11 条件下达到最大值,为 19.78%,随着土壤有效 Cd 含量增加,棉籽出油率下降,与 Cd1 处理相比,Cd77 处理下棉籽出油率显著下降了 7.03%,当 Cd 含量超过 14.26 mg·kg⁻¹后棉籽出油率趋于稳定。酸价与土壤中 Cd 含量呈现正相关关系,与 Cd1 处理相比,不同 Cd 胁迫处理,酸价分别增加了 1.51%、3.02%、18.18%、28.79%、37.88%,但 Cd1 与 Cd11 和 Cd14 处理之间酸价差异不显著,Cd49 和 Cd77 处理之间差异也未达到显著水平。不同处理组棉籽油过氧化值为 1.03~1.16 g·100 g⁻¹,但不同 Cd 含量胁迫处理未对其造成显著影响。在棉籽油当中未检测出 Cd 离子,测定油粕中 Cd 离子发现,棉籽浸提后 Cd 离子留在油粕中,未进入棉籽油内。

3 讨论

棉花生育过程中叶绿素相对含量和 Pn 在作物生长发育及光合同化物形成的过程中起到关键性作用^[26]。本试验结果显示,不同有效 Cd 含量处理下棉花苗期 SPAD 值和 Pn 值差异不显著,但在棉花营养生长和生殖生长最旺盛的花铃期表现出了较大差异。花铃期,Cd1、Cd11、Cd14 处理组间 SPAD 值和 Pn 值较

Cd23、Cd49、Cd77 差异显著,在吐絮期测定棉花植株干物质质量也在 Cd23 处理组观察到显著降低。而 Cd11 相较于 Cd1 处理组 P_n 值增加,表明低 Cd 含量促进了棉花 Pn 值增加,而高 Cd 含量抑制了棉花光合作用。棉花开花后光合同化物主要用于形成籽棉产量及产量构成,当土壤中 Cd 含量超过 23.31 mg·kg⁻¹时,有可能导致籽棉产量等显著降低。

棉花生长发育影响棉花纤维品质和棉籽发育。本试验结果表明一定含量的 Cd 胁迫促进了棉花地上部和地下部的发育,增加了棉株的生物量。与 Cd1 处理相比,在高含量(23.31 mg·kg⁻¹以上)的 Cd 胁迫下,由于地上部分生物量总量的降低,棉株的平均总生物量显著降低,这与李玲等^[5]的研究结果相似。陈丽丽等^[9]的研究发现,棉株在 1、5、16.26 mg·kg⁻¹ Cd 胁迫下的平均高度显著降低,但本研究结果表明低含量的 Cd 胁迫对棉花株高的影响不大,推测是由于先前研究是在棉花生长 60 d 时测定株高,而本试验取样时间为棉花吐絮期,棉花对于 Cd 胁迫已逐渐适应。陈浩东等^[27]在湖南省棉花科学研究所设置 4 个不同 Cd 胁迫处理对 3 个棉花品种开展研究,结果表明当 Cd 处理浓度为 1 mg·L⁻¹时,3 个棉花品种相较于对照株高都有增长,但增长幅度不同,而当 Cd 处理浓度为 10 mg·L⁻¹时,3 个棉花品种的株高相较于对照都有所降低,但下降幅度也不同,这表明不同品种对于 Cd 胁迫的耐受性差异较大。本试验只是基于 1 年单一品种的盆栽试验,还需要进行多年、多点、多品种的试验,降低环境因素对结果的影响。

陈悦等^[6]认为 Cd 胁迫对于棉花纤维上半部平均长度、整齐度指数、断裂比强度和马克隆值的影响均不显著,但在低 Cd 含量下棉花纤维质量提高,随着 Cd 含量增加,棉花纤维质量下降,且不同棉花品种均符合此规律。本试验结果表明,Cd 对棉花纤维上半

表 3 不同有效 Cd 含量处理下棉籽油品质比较

Table 3 Comparison of cottonseed oil quality under different available Cd concentration treatment

处理 Treatment	出油率 OY/%	酸价 AVI/(mg·g ⁻¹)	过氧化值 PV/(g·100 g ⁻¹)	棉籽油 Cd 含量 CCCO/(mg·kg ⁻¹)	油粕 Cd 含量 CCCM/(mg·kg ⁻¹)
Cd1	19.31±0.39ab	0.66±0.04c	1.03±0.01a	—	0.44±0.03f
Cd11	19.78±0.32a	0.67±0.09c	1.08±0.04a	—	2.58±0.27e
Cd14	18.94±0.05bc	0.68±0.04c	1.16±0.04a	—	7.58±0.57d
Cd23	18.56±0.18bc	0.78±0.14b	1.15±0.06a	—	13.28±0.82b
Cd49	18.45±0.10c	0.85±0.19a	1.06±0.04a	—	10.80±0.51c
Cd77	18.39±0.40c	0.91±0.11a	1.12±0.06a	—	21.60±0.72a

注:—表示未检出。

Note:— indicates that the device is not detected.

部分平均长度、整齐度指数、纤维伸长率和纺纱均匀性指数的影响显著,对断裂比强度和马克隆值影响不显著。在Cd49和Cd77处理下,棉花纤维Cd含量大于 $40.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超过《生态纺织品技术要求》(GB/T 18885—2020)中规定的总Cd含量。以上结果表明尽管棉花的耐Cd性较强,但当土壤中有效Cd含量超过 $49.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时就不再适合种植棉花。

棉籽油作为棉花的副产品,2022年全国产量达到148.4万t^[28]。本试验结果表明无论棉仁中Cd含量高低,棉籽油中Cd含量均低于检测限($1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)。武林霞等^[29]采集全国各地菜籽样品,以评估油菜Cd污染对菜籽油质量的影响,结果发现重金属Cd从油菜籽到菜籽油的转移率为2%~10%,Cd积累量的顺序为油菜籽>油菜籽粕>菜籽油,转移率与油菜籽蛋白含量呈负相关。棉籽油中未能检测出Cd可能是由于棉籽中蛋白含量更高,与Cd结合度更高导致。棉籽油出油率随Cd含量增加呈现先上升后下降的趋势,不同处理组间差异显著,这与李玲^[22]对棉籽中油分含量检测结果一致。棉籽油酸价与土壤中Cd含量呈正相关,而对过氧化值影响差异不显著。

4 结论

(1)土壤有效Cd含量超过 $23.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,棉花SPAD值、净光合速率和干物质质量显著下降,棉花生长发育受到较大抑制,可能影响后期产量。

(2)Cd胁迫对棉花纤维上半部平均长度、整齐度指数、纤维伸长率和纺纱均匀性指数的影响显著,对断裂比强度和马克隆值影响不显著。当土壤有效Cd含量超过 $49.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,棉花纤维Cd含量超过国家标准。

(3)随着土壤有效Cd含量增加,棉籽出油率降低,棉籽油酸价增加,过氧化值受Cd影响不显著,棉籽油中均未检测到Cd。

(4)在土壤有效Cd含量低于 $23.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的地区种植棉花,既能保证棉花生长、纤维品质和棉籽油质量不降低太多,又能带来较好的生态效益。

参考文献:

- [1] 郭利双,何叔军,李景龙. 镉污染区棉花替代种植技术研究[J]. 中国棉花, 2016, 43(11): 5-8. GUO L S, HE S J, LI J L. Research progress on planting technology of cotton as a substitute crop in polluted area by Cd[J]. *China Cotton*, 2016, 43(11): 5-8.
- [2] HOSSAIN M A, PIYATIDA P, DA SILVA J A T, et al. Molecular mechanism of heavy metal toxicity and tolerance in plants: central role of glutathione in detoxification of reactive oxygen species and methylglyoxal and in heavy metal chelation[J]. *Journal of Botany*, 2012, 2012: 872875.
- [3] WU F B, WU H X, ZHANG G P, et al. Differences in growth and yield in response to cadmium toxicity in cotton genotypes[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2004, 167(1): 85-90.
- [4] KHAN M D, MEI L, ALI B, et al. Cadmium-induced upregulation of lipid peroxidation and reactive oxygen species caused physiological, biochemical, and ultrastructural changes in upland cotton seedlings[J]. *BioMed Research International*, 2013, 2013: 374063.
- [5] 李玲,陈进红,何秋伶,等. 3个陆地棉种质(系)重金属镉的积累、转运和富集特性分析[J]. 棉花学报, 2012, 24(6): 535-540. LI L, CHEN J H, HE Q L, et al. Accumulation, transportation, and bioconcentration of cadmium in three upland cotton plants under cadmium stress[J]. *Cotton Science*, 2012, 24(6): 535-540.
- [6] 陈悦,李玲,何秋伶,等. 镉胁迫对三个棉花品种(系)产量、纤维品质和生理特性的影响[J]. 棉花学报, 2014, 26(6): 521-530. CHEN Y, LI L, HE Q L, et al. Effects of cadmium stress on yield, fiber quality, and physiological traits of three upland cotton cultivars (lines) [J]. *Cotton Science*, 2014, 26(6): 521-530.
- [7] 郭利双,陈浩东,贺云新,等. 镉高积累棉花品种水培筛选结果初报[J]. 中国棉花, 2015, 42(10): 14-16. GUO L S, CHEN H D, HE Y X, et al. Preliminary results on cotton cultivars screening for high accumulation of cadmium[J]. *China Cotton*, 2015, 42(10): 14-16.
- [8] SALT D E, RAUSER W E. MgATP-dependent transport of phytochelators across the tonoplast of oat roots[J]. *Plant Physiology*, 1995, 107(4): 1293-1301.
- [9] 陈丽丽,李俊华,鲁伟丹,等. 不同程度镉污染对棉花生长和镉富集特征的影响[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(5): 920-928. CHEN L L, LI J H, LU W D, et al. Effects of different levels of cadmium pollution on cotton growth and cadmium enrichment[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2021, 58(5): 920-928.
- [10] 易鹏辉,汪培文,刘爱玉,等. 不同镉累积特性棉花品种镉亚细胞分布特征[J/OL]. 分子植物育种, 2023: 1-10[2023-09-14]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230913.1531.004.html>. YI P H, WANG P W, LIU A Y, et al. Characteristics of the subcellular distribution of Cd in cotton varieties with different Cd accumulation characteristics[J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, 2023: 1-10[2023-09-14]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230913.1531.004.html>.
- [11] 刘秀梅,聂俊华,王庆仁. 6种植物对Pb的吸收与耐性研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 533-537. LIU X M, NIE J H, WANG Q R. Research on lead uptake and tolerance in six plants[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(5): 533-537.
- [12] 梅磊,李玲,DAUD M K,等. 棉花对重金属胁迫的应答反应与抗性机理研究进展[J]. 棉花学报, 2018, 30(1): 102-110. MEI L, LI L, DAUD M K, et al. Advances on response and resistance to heavy metal stress in cotton[J]. *Cotton Science*, 2018, 30(1): 102-110.
- [13] BRUNETTI P, ZANELLA L, PROIA A, et al. Cadmium tolerance and phytochelatin content of *Arabidopsis* seedlings over-expressing the phytochelatin synthase gene AtPCS1[J]. *Journal of Experimental*

- Botany*, 2011, 62(15):5509–5519.
- [14] DAUD M K, MEI L, VARIATH M T, et al. Chromium (VI) uptake and tolerance potential in cotton cultivars: effect on their root physiology, ultramorphology, and oxidative metabolism[J]. *BioMed Research International*, 2014, 2014:975946.
- [15] 李慧, 丛郁, 常有宏. 番茄植物络合素合酶基因全长cDNA的克隆及其表达特点[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(1):136–142. LI H, CONG Y, CHANG Y H. Cloning of a phytochelatin synthase gene (LePCS1) from tomato seedlings and its expression characteristics under heavy metal stress[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 26(1):136–142.
- [16] KNEER R, ZENK M H. Phytochelatins protect plant enzymes from heavy metal poisoning[J]. *Phytochemistry*, 1992, 31(8):2663–2667.
- [17] CLEMENS S. Evolution and function of phytochelatin synthases[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2006, 163(3):319–332.
- [18] XUE T T, LI X Z, ZHU W, et al. Cotton metallothionein GhMT3a, a reactive oxygen species scavenger, increased tolerance against abiotic stress in transgenic tobacco and yeast[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(1):339–349.
- [19] WYCISK K, KIM E J, SCHROEDER J I, et al. Enhancing the first enzymatic step in the histidine biosynthesis pathway increases the free histidine pool and nickel tolerance in *Arabidopsis thaliana*[J]. *FEBS Letters*, 2004, 578(1/2):128–134.
- [20] WENBIN H, RUI M, DI Y, et al. Organic acids secreted from plant roots under soil stress and their effects on ecological adaptability of plants[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2014, 15(7):1167–1173.
- [21] 仇硕, 张敏, 孙延东, 等. 植物重金属镉(Cd²⁺)吸收、运输、积累及耐性机理研究进展[J]. 西北植物学报, 2006, 26(12):2615–2622. QIU S, ZHANG M, SUN Y D, et al. Research advances in the mechanisms of Cd²⁺ uptake, transport, accumulation and tolerance in plants[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(12):2615–2622.
- [22] 李玲. 镉胁迫对陆地棉生长发育、产量和品质的影响及其耐镉性的遗传研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012. LI L. Effect of cadmium stress on growth, yield and quality in upland cotton and its genetic analysis for cadmium tolerance[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [23] 王霞, 吴霞, 马亮, 等. 棉花幼苗受铅、镉胁迫的抗氧化酶反应[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(12):105–107. WANG X, WU X, MA L, et al. Antioxidant enzyme reaction of cotton seedlings under lead and cadmium stress[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2012, 40(12):105–107.
- [24] 杨舒怡, 陈晓阳, 惠文凯, 等. 逆境胁迫下植物抗氧化酶系统响应研究进展[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2016, 45(5):481–489. YANG S Y, CHEN X Y, HUI W K, et al. Progress in responses of antioxidant enzyme systems in plant to environmental stresses[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition)*, 2016, 45(5):481–489.
- [25] LIU L T, SUN H C, CHEN J, et al. Cotton seedling plants adapted to cadmium stress by enhanced activities of protective enzymes[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2016, 62(2):80–85.
- [26] 许豆豆, 赵亮, 张宁, 等. 长江流域棉区带状间作对棉花生长、产量及棉田经济效益的影响[J]. 棉花学报, 2023, 35(2):146–156. XU D D, ZHAO L, ZHANG N, et al. Effects of strip intercropping on cotton growth, yield and economic benefits of cotton fields in the Yangtze River Basin[J]. *Cotton Science*, 2023, 35(2):146–156.
- [27] 陈浩东, 贺云新, 郭利双, 等. 镉胁迫对3个棉花品种生理生化特征及农艺性状的影响[J]. 棉花学报, 2018, 30(1):62–70. CHEN H D, HE Y X, GUO L S, et al. Effects of cadmium stress on physiological and biochemical characteristics and agronomic traits of three upland cotton cultivars[J]. *Cotton Science*, 2018, 30(1):62–70.
- [28] 夏热帕提·吐孙, 阿地力·吾布力, 熊燕. 环氧棉籽油制备工艺优化及其下游产品研究[J]. 中国油脂, 2024, 49(8):92–96. TUSUN X R P T, WUBULI A D L, XIONG Y. Optimization of preparation process of epoxy cottonseed oil and its downstream products study[J]. *China Oils and Fats*, 2024, 49(8):92–96.
- [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 quality safety assessment of rapeseed oil in China[J]. *Quality and Safety of Agro-Products*, 2016(1):41–46.