

常鹏艳,王松良,王 涛,等. 镉胁迫下不同小白菜表型特征、光合能力及镉富集能力研究[J]. 江苏农业科学,2024,52(3):164–172.
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2024.03.025

镉胁迫下不同小白菜表型特征、光合能力及镉富集能力研究

常鹏艳^{1,2}, 王松良², 王 涛¹, 陈永快¹

(1. 福建省农业科学院数字农业研究所, 福建福州 350013; 2. 福建农林大学, 福建福州 350002)

摘要:为探明不同 Cd 胁迫浓度对 9 种小白菜表型特征、光合能力及镉富集能力的影响,筛选出高富集型、低富集型小白菜品种,为小白菜品质安全保障提供理论指导。以 9 种小白菜为试材,采用营养液膜技术(NFT)栽培方式,设置不同浓度(0、25、50、100 mg/L)镉处理,胁迫 96 h 后取样,测定各小白菜品种的相对生长率(RGR)、Cd 含量、荧光参数、表型参数等。结果表明,随着 Cd 胁迫浓度的升高,小白菜的 RGR 整体降低、Cd 含量上升,且 Cd 胁迫浓度越高,品种间差异性越明显,达到显著水平;不同小白菜品种的 BCF 与 TF 呈现下降趋势;小白菜植株最大光化学量子产量(F_v/F_m)呈逐渐下降或先上升后下降的趋势,稳态非光化学荧光淬灭(NPQ)呈现先上升后下降或先上升后下降再上升的趋势;实际光量子效率(Φ_{PSII})呈现逐渐下降或先下降后上升再下降的趋势;小白菜叶片出现变窄、变黄、变小的现象,其冠层面积及植株高度与对照组差异达到显著水平。T3 浓度下,金品 506 的冠层面积比对照组减少了 65.68%,金品 1 夏的植株高度比对照组减少了 51.35%。综合以上结果,发现不同小白菜品种在 Cd 胁迫下的 Cd 富集水平、植株表型特征及光合能力存在差异,并且随着 Cd 胁迫浓度的增加表现更加明显。其中,金品 1 夏、金品 008 对 Cd 的富集吸收能力较强,可尝试作为 Cd 富集或超富集能力植物用于修复 Cd 污染土壤或湿地;奶油快菜、四季小白菜对 Cd 的富集能力较弱,可作为 Cd 低富集或土壤警示植物,用于判断土壤是否受到 Cd 污染以及污染情况。

关键词:镉胁迫;小白菜;叶绿素荧光参数;表型参数;镉含量;光合能力;镉富集能力

中图分类号:S634.301 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2024)03–0164–09

随着城市化和工业化的快速发展,土壤重金属污染日益严重,其中位列重金属“五毒”[镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铬(Cr)、铅(Pb)]之首的 Cd 污染尤为突出^[1],Cd 是一种植物生长非必需的重金属元素,具有很强的生物毒性和化学活性,易被植物吸收、累积,对动植物和人体均可产生毒害作用^[2–3]。我国耕地土壤重金属的总超标率为 19.4%,其中 Cd 超标最为严重,达 7.0%^[4]。Cd 极易被蔬菜的根系吸收并向可食用部分迁移,导致蔬菜可食用部分 Cd 含量超标,成为蔬菜安全生产的障碍^[5],因此,研究 Cd 污染对蔬菜产量和品质的影响极为迫切。

小白菜(*Brassica chinensis* L.)属于十字花科芸

薹属芸薹种白菜亚种,俗称青菜,作为一种常见的芸薹属叶菜类蔬菜,具有较强的 Cd 富集能力。在土壤过量 Cd 的胁迫下,小白菜易发生表型与基因表达变异,这严重影响了其产量和品质^[6],进而影响小白菜安全生产和供应。

目前,已有学者研究了不同品种小白菜在 Cd 胁迫下的 Cd 累积特性和生理差异,结果表明,Cd 胁迫下,小白菜生长均不同程度受到抑制,且不同品种小白菜对 Cd 耐性不同^[7–10];另外,Cd 胁迫对植株表型及光合作用的影响研究也有报道^[11–14]。然而,同时研究 Cd 胁迫下不同品种小白菜的植株表型和光合特征及 Cd 富集能力的相关研究比较少见。本研究应用二维和三维表型技术,旨在研究 Cd 胁迫条件下小白菜植株的表型,以及利用荧光采集平台研究 Cd 胁迫条件下的小白菜植株叶绿素荧光参数,具有重要的理论和应用价值^[15]。

1 材料与方法

1.1 供试材料

9 个供试小白菜品种的名称、种子来源列于表

收稿日期:2023–07–15

基金项目:福建省农业科学院科技创新平台专项(编号:CXPT202110);自然资源部东南生态脆弱区监测修复工程技术创新中心 2021 年自主研究项目(编号:KY–090000–04–2021–008)。

作者简介:常鹏艳(1995—),女,河南商丘人,硕士研究生,主要从事农业生态学及作物研究。E-mail:1654104614@qq.com。

通信作者:陈永快,硕士,副研究员,主要从事数字农业研究。

E-mail:stonecyk@126.com。

1, 试验于 2023 年 1 月 10 日至 2023 年 3 月 3 日在福建省农业科学院数字农业研究所表型试验温室进行。

表 1 9 个供试小白菜品种基本信息

品种名称	生产厂家
华樱	中国广东省良种引进服务公司
金品 1 夏	福建金品农业科技有限公司
金品 008	福建金品农业科技有限公司
金品 101	福建金品农业科技有限公司
金品 506	福建金品农业科技有限公司
奶油快菜	青县兴运种业有限公司
金品 586	福建金品农业科技有限公司
四季小白菜	寿光欣欣然园艺有限公司
津双 30 快菜 F ₁	天津市宏程芹菜研究所

1.2 试验设计

1.2.1 无土育苗 以草炭为基质, 采用穴盘育苗方式, 每个小白菜品种播种 256 株, 将种子播入带育苗土的育苗盘中, 后用去离子水浇透, 待种子萌发出 2 张子叶后, 改用潮汐式苗床进行营养液浇灌, 培养 21 d 后移入营养液膜技术 (nutrient film technique, 简称 NFT) 栽培系统中进行试验。

1.2.2 营养液预培养 选择生长状况一致的小白菜幼苗进行 NFT 栽培试验, 设置 3 个试验组 (胁迫浓度分别为 25、50、100 mg/L) 和 1 个对照组 (胁迫浓度为 0 mg/L), 每组处理设 3 个重复, 每周更换 1 次营养液 (每 100 L 营养液含硝酸钙 9.580 0 g、氯化钙 0.761 9 g、硝酸钾 12.000 0 g、磷酸二氢钾 2.600 0 g、硫酸镁 3.000 0 g、螯合铁 0.750 0 g)。

1.2.3 Cd 胁迫水培 经营养液培养 15 d 后的小白菜植株进行 CdCl₂ 胁迫培养, Cd 胁迫浓度梯度设置为 0 mg/L (CK)、25 mg/L (T1)、50 mg/L (T2) 以及 100 mg/L (T3), 选择胁迫时间为 96 h。胁迫后选择长势大小一致的小白菜植株, 测定其不同 Cd 浓度营养液培养下的植株相对生长率 (relative growth rate, 简称 RGR)、Cd 含量、植株叶绿素荧光以及表型参数。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 相对生长率 作物干物质累积 RGR 计算公式^[16-19]为:

$$R_{\Delta t} = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1}。$$

式中: W₁ 为时间 t₁ 时的干质量; W₂ 为时间 t₂ 时的

干质量; R_{Δt} 为相对生长率 (即 t₁ ~ t₂ 时间内的平均生长率)。

通过对上式两边积分与取对数运算后, 可得 RGR 的基本计算式, 具体为:

$$RGR = \frac{1}{W} \frac{dW}{dt}。$$

1.3.2 Cd 含量、生物富集系数以及转运系数 Cd 含量用原子吸收分光光度计测定^[20]。

Cd 生物富集系数 (bioaccumulation factor, 简称 BCF) 与 Cd 转运系数 (translocation factor, 简称 TF) 的计算公式^[21-23]分别为:

$$BCF_{Cd} = C_i / C_s; \\ TF_{Cd} = C_p / C_r。$$

式中: C_i 为小白菜地上部 Cd 含量, mg/kg; C_s 为营养液中 Cd 含量, mg/L; C_p 为小白菜地上部 Cd 含量, mg/kg; C_r 为小白菜地下部 Cd 含量, mg/kg。

1.3.3 叶绿素荧光参数 利用多功能植物荧光表型测量系统 (PSI、FluorCam) 测定暗适应 30 min 后小白菜的叶绿素荧光参数, 含最小荧光 (F₀)、最大荧光 (F_m)、最大光量子效率 (F_v/F_m)、非光化学淬灭系数 (NPQ)、实际光化学效率 (Φ_{PSII}) 等。

1.3.4 表型数据 采用福建省农业科学院数字农业研究所自主研发的表型图像采集设备进行批量采集处理叶面积、叶色、叶型等形态数据。同时通过植物多维表型采集设备, 对不同品种、不同 Cd 胁迫水平下的小白菜进行非破坏性的三维重建, 以采集小白菜株高、冠层面积等表型参数。

1.4 数据分析与处理

应用 Excel 进行数据初步处理, 用 Origin 软件进行制图, 应用软件 SPSS 12.0 和 DPS 进行方差分析、多重比较分析 (Duncan's 新复极差法)。

2 结果与分析

2.1 Cd 胁迫下不同小白菜品种干物质相对生长率 (RGR) 比较

RGR 反映小白菜在受 Cd 胁迫期内的总干物质平均相对增长速度, 其值大小变化反映了小白菜在该时期内对 Cd 胁迫程度的响应。由表 2 可知, 随着 Cd 浓度的增加, 小白菜 RGR 整体呈现明显下降趋势甚至出现负增长现象, 在 T3 浓度 (100 mg/L) 下除了华樱、金品 008、奶油快菜、津双 30 快菜 F₁ 这 4 个小白菜品种外, 其他品种都呈现负增长趋势, 受 Cd 胁迫影响较为严重。

表 2 Cd 胁迫对不同小白菜相对生长率的影响

品种	相对生长率			
	CK	T1	T2	T3
华樱	0.006 0 ± 0.013 1b	-0.000 3 ± 0.002 1de	0.044 0 ± 0.036 6ab	0.003 3 ± 0.021 2abc
金品 1 夏	0.074 0 ± 0.014 0a	0.010 3 ± 0.019 0cde	0.032 0 ± 0.016 8abc	-0.028 0 ± 0.026 3c
金品 008	0.099 7 ± 0.033 7a	0.040 0 ± 0.008 2bcd	0.034 0 ± 0.010 6abc	0.003 0 ± 0.007 8abc
金品 101	0.123 3 ± 0.021 9a	0.031 3 ± 0.022 2cde	0.033 3 ± 0.016 6abc	-0.020 7 ± 0.026 3bc
金品 506	0.100 7 ± 0.017 2a	0.008 0 ± 0.009 0cde	0.010 7 ± 0.016 2bc	-0.048 3 ± 0.021 8c
奶油快菜	0.103 0 ± 0.033 0a	0.088 0 ± 0.035 4a	0.060 7 ± 0.016 4a	0.058 3 ± 0.008 6a
金品 586	0.111 0 ± 0.034 7a	0.052 7 ± 0.024 9abc	0.061 0 ± 0.009 5a	-0.008 7 ± 0.015 8abc
四季小白菜	0.098 7 ± 0.005 5a	0.079 0 ± 0.017 3ab	-0.007 0 ± 0.034 0c	-0.009 7 ± 0.020 8abc
津双 30 快菜 F ₁	-0.009 7 ± 0.038 8b	-0.009 0 ± 0.043 5e	0.018 3 ± 0.022 3bc	0.046 7 ± 0.152 5ab

注:表中同列数据后标有不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。表 3、表 4 同。

2.2 Cd 胁迫下不同小白菜品种地上部 Cd 含量以及 Cd 富集系数(BCF)及转运系数(TF)比较

由表 3 可知,同一品种小白菜地上部 Cd 含量均随着 Cd 胁迫浓度的增加而增加;在同一 Cd 胁迫浓度下,不同小白菜品种间地上部 Cd 含量存在差异。在 T1(25 mg/L)浓度下,品种金品 506 地上部 Cd 含量最高(69.706 mg/kg),是含量最低品种奶油快菜(51.257 mg/kg)的 1.36 倍;在 T2(50 mg/L)浓度下,地上部 Cd 含量最高品种金品 1 夏

(87.128 mg/kg),是含量最低品种奶油快菜(52.936 mg/kg)的 1.65 倍;在 T3(100 mg/L)浓度下,品种金品 1 夏地上部 Cd 含量最高,为 127.917 mg/kg,品种奶油快菜最低,为 62.117 mg/kg,前者是后者的 2 倍多。其他积累量超过 120 mg/kg 的品种有金品 101(125.444 mg/kg)、金品 008(126.844 mg/kg);且 Cd 浓度越高,品种间差异性越明显。

表 3 Cd 胁迫对不同小白菜地上部 Cd 含量的影响

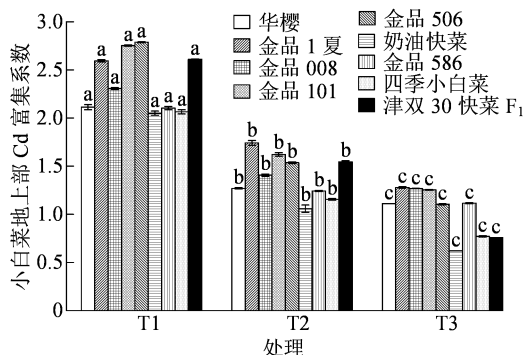
品种	Cd 含量(mg/kg)		
	T1	T2	T3
华樱	52.838 ± 0.807d	63.488 ± 0.419e	111.093 ± 0.223de
金品 1 夏	64.884 ± 0.352b	87.128 ± 1.491a	127.917 ± 1.005a
金品 008	57.681 ± 0.275c	70.358 ± 0.757d	126.844 ± 0.320b
金品 101	68.829 ± 0.220a	81.134 ± 1.087b	125.444 ± 0.604c
金品 506	69.706 ± 0.201a	76.826 ± 0.556c	110.437 ± 0.730e
奶油快菜	51.257 ± 0.678e	52.936 ± 2.291g	62.117 ± 0.181h
金品 586	52.606 ± 0.523d	62.119 ± 0.357e	111.556 ± 0.704d
四季小白菜	51.634 ± 0.674de	57.819 ± 0.497f	77.095 ± 0.847f
津双 30 快菜 F ₁	65.259 ± 0.110b	77.270 ± 0.686c	75.803 ± 0.147g

由图 1 可知,所有供试小白菜品种的 Cd 富集系数(BCF)在 T1、T2 处理下均大于 1,BCF 范围介于 1.06 ~ 2.79 之间,不同品种的 BCF 随着 Cd 胁迫浓度的增加呈现下降趋势,且具有显著性差异,地上部富集 Cd 的能力有所下降;在 T1、T2 浓度下,品种金品 1 夏、金品 101、金品 506 的 BCF 较高;在 T3 浓度下,品种金品 1 夏、金品 008、金品 101 的 BCF 较高。图 2 显示,小白菜的转运系数(TF)均小于 1,转移系数范围介于 0.006 ~ 0.051 之间,Cd 从小白

菜地下部转运至地上部过程中,随着 Cd 胁迫浓度的增大,大部分小白菜呈现下降趋势,其 TF 在 T3 浓度下最小,表明在此浓度下,Cd 从地下部向地上部的转运较为困难。

2.3 Cd 胁迫下不同小白菜品种叶绿素荧光参数比较

F_v/F_m 是最大光化学量子产量,表示光合反应中心的最大光能转换效率,在正常条件下该参数变化极小^[24],逆境下该参数明显下降^[25]。本试验用



图中柱上含有不同小写字母表示相同小白菜品种对不同 Cd 胁迫浓度的响应存在显著差异($P < 0.05$);

图中误差线的长度表示其标准误差的大小。图 2 同

图1 Cd 胁迫对不同小白菜富集系数的影响

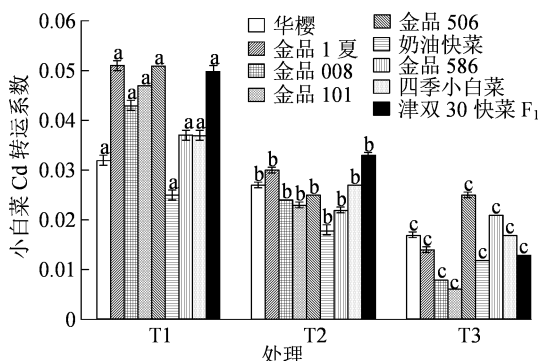
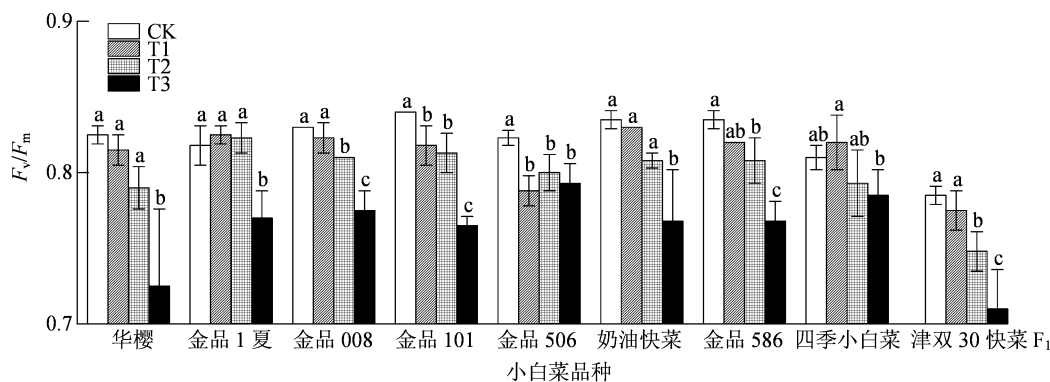


图2 Cd 胁迫对不同小白菜转运系数的影响



图中柱上含有不同小写字母表示相同小白菜品种对不同 Cd 胁迫浓度的响应存在显著差异($P < 0.05$);

图中误差线的长度表示其标准误差的大小。图 5、图 6 同

图3 Cd 处理对不同小白菜叶片 F_v/F_m 的变化

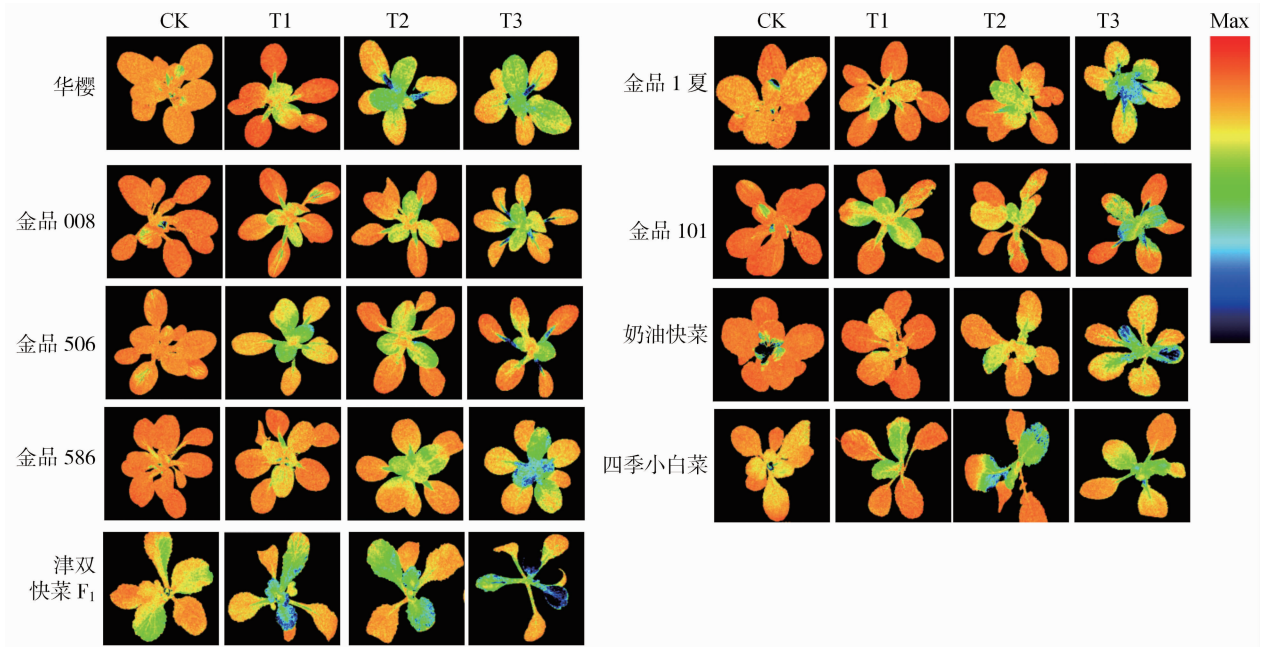
对光合结构起到一定的保护作用,是一种自我保护机制。由图 5 可知,金品 1 夏、金品 008、金品 101 3 个小白菜的 NPQ 随着 Cd 胁迫浓度的增加呈现先上升后下降的趋势,金品 506、奶油快菜、金品 586、四季小白菜、津双 30 快菜 F_1 这 5 个小白菜的 NPQ 随着 Cd 胁迫浓度的增加呈先上升后下降再上升的趋势。华樱、金品 1 夏、金品 101 这 3 个品种,在 T3 浓度下,分别相对于对照组降低了 5.66%、9.73%、13.16%;奶油快菜、金品 586、四季小白菜、津双 30 快

F_v/F_m 来评估 Cd 胁迫对小白菜最大光合能力的影响程度^[26]。图 3 显示,华樱、金品 008、金品 101、奶油快菜、金品 586、津双 30 快菜 F_1 这 6 个小白菜品种的 F_v/F_m 随着 Cd 胁迫浓度的增加而下降,金品 1 夏、四季小白菜这 2 个小白菜品种的 F_v/F_m 随着 Cd 浓度的增加呈现先上升后下降的趋势;较多品种小白菜在 Cd 胁迫浓度 T1 时与对照组无显著差异,同时在 T3 浓度时 F_v/F_m 含量降到最低值,与对照组具有显著性差异($P < 0.05$),分别降低了 12.12%、5.87%、6.63%、8.93%、3.65%、8.02%、8.02%、3.09% 和 9.55%。总之,随着 Cd 胁迫浓度的增加,小白菜植株 F_v/F_m 整体呈现下降趋势。如图 4 所示,T1 浓度下,小白菜品种的 F_v/F_m 呈现冠层中心位置降低的趋势,随着 Cd 胁迫浓度的增加,小白菜受影响的区域增大,逐渐由冠层中心位置向整个叶片延伸,在 T3 浓度下,小白菜品种的 F_v/F_m 图像发生显著变化,呈现出整个叶片 F_v/F_m 值的降低,且冠层中心 F_v/F_m 受影响的程度最大。

稳态非光化学荧光淬灭 (non photochemical quenching, 简称 NPQ) 反应 PS II 吸收的光能不能用于光合电子传递,而以热能形式耗散的部分, NPQ

菜 F_1 这 4 个品种分别在 T2 浓度下 NPQ 达到最低,分别降低了 24.34%、36.15%、7.66%、51.83%。

PS II 的实际光量子效率 (Φ_{PSII}) 反映部分关闭的 PS II 反应中心原初光能捕获效率,是植物响应 Cd 胁迫的重要指标。由图 6 可知,在 T1、T2、T3 胁迫浓度下,除四季小白菜外,其他小白菜的 Φ_{PSII} 与对照组存在显著性差异,不同小白菜品种 Φ_{PSII} 的变化趋势存在差异性,品种金品 506、津双 30 快菜 F_1 随着 Cd 胁迫浓度的增加呈现逐渐下降趋势,华樱、



荧光图像红色表示荧光参数最大值，蓝色表示荧光参数最小值

图4 Cd 胁迫下各供试小白菜叶绿素荧光成像

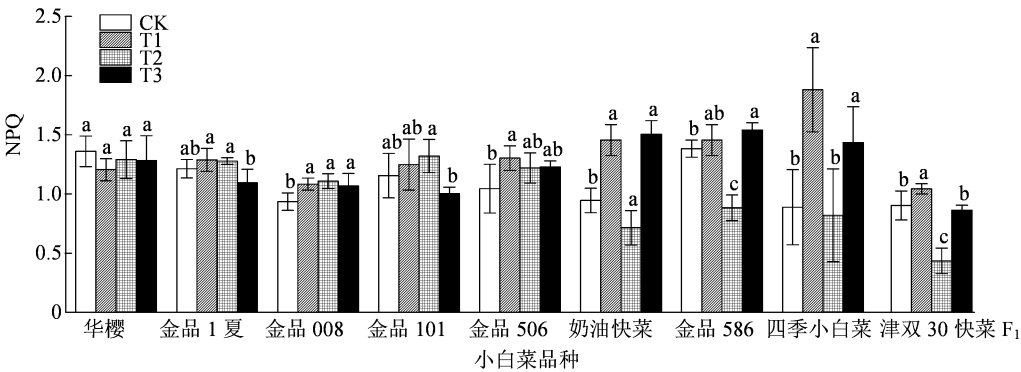


图5 各供试小白菜品种在不同 Cd 浓度下植株 NPQ 的变化

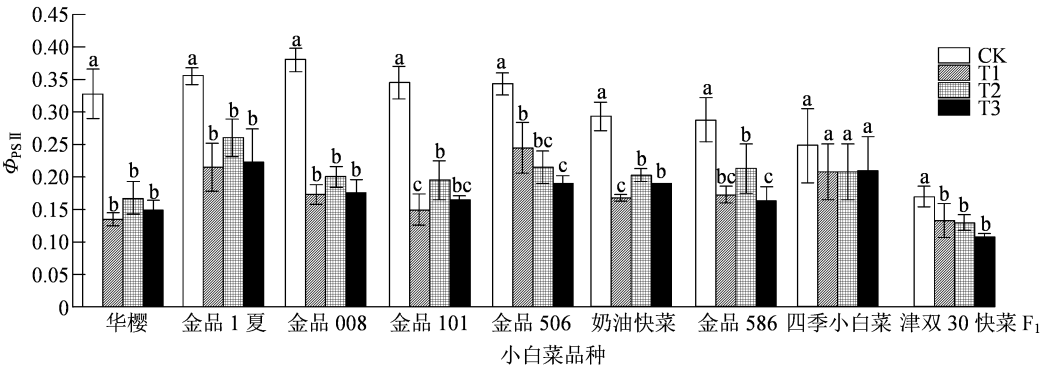


图6 各供试小白菜品种在不同 Cd 浓度胁迫下植株 Φ_{PSII} 的变化

金品 1 夏、金品 008、金品 101、奶油快菜、金品 586 这 6 个小白菜品种随着 Cd 胁迫浓度的增加呈现先下降后上升再下降的趋势。

2.4 Cd 胁迫下不同小白菜品种表型参数比较
随着 Cd 胁迫浓度的增加,小白菜叶片出现变窄、变黄、变小的现象(图 7、图 8),小白菜品种华

樱、金品 1 夏、金品 101、金品 506、奶油快菜、金品 586、津双 30 快菜 F₁ 在 T3 浓度下,其叶片面积最小(表 4),相较于对照组分别减少了 30.93%、

39.28%、37.87%、39.00%、44.58%、31.72%、46.12%。小白菜品种金品 008、四季小白菜在 T2 浓度下叶面积受胁迫较为严重。

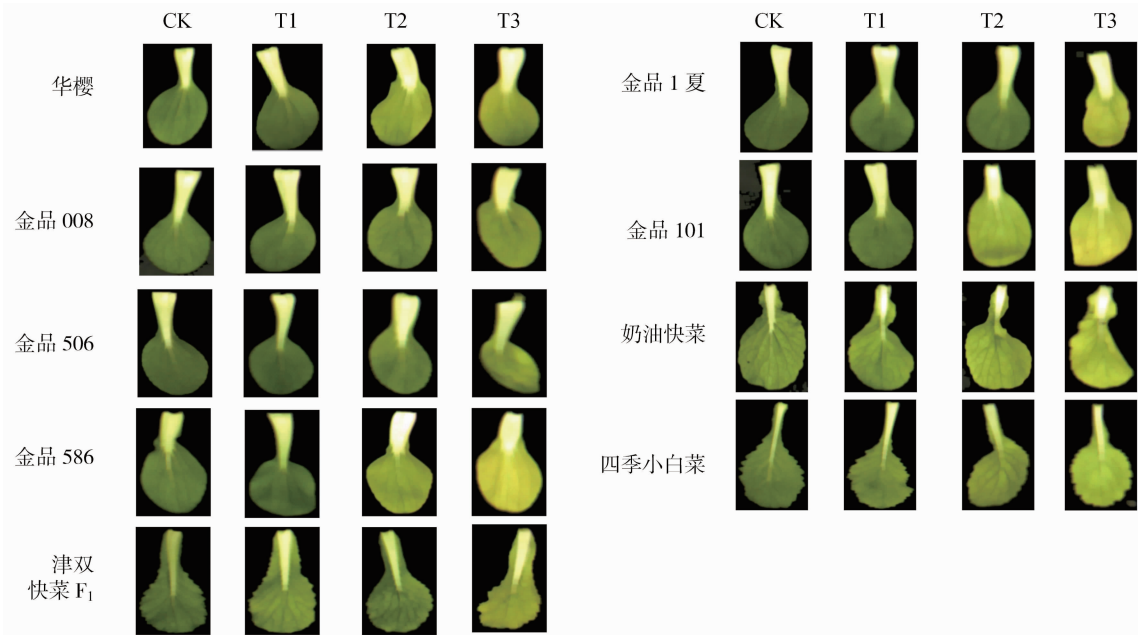


图7 不同 Cd 浓度胁迫下各供试小白菜品种的叶片形态观察

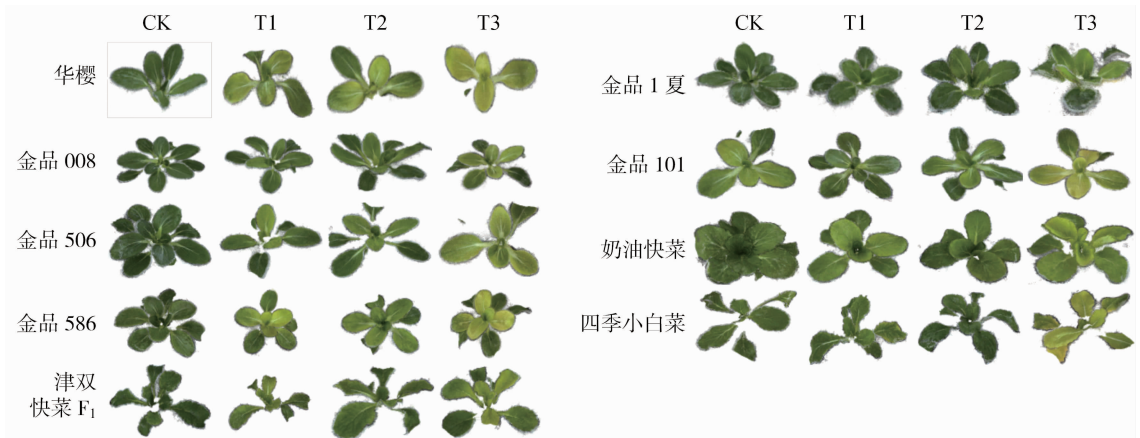


图8 Cd 胁迫下各供试小白菜品种的植株形态观察

由表 5 可知,在 T1、T2、T3 浓度下,所有小白菜的冠层面积均小于对照组,在 T3 浓度下,品种华樱、金品 1 夏、金品 101、金品 506、奶油快菜、四季小白菜、津双 30 快菜 F₁ 受到的胁迫较严重,冠层面积相较于对照组分别减少了 37.02%、45.47%、54.41%、65.68%、50.02%、14.14% 和 38.57%。在 T1、T2、T3 浓度下,不同小白菜品种的植株高度均小于对照组,其降低程度存在差异,其中金品 1 夏、金品 008、金品 101、金品 506、津双 30 快菜 F₁ 这 5 个品种与对照之间的差异达到显著水平,品种金品 1 夏、金品 008、金品 101、金品 506、奶油快菜、金品

586、四季小白菜这 7 个品种在 T3 浓度下植株高度最低,分别较对照组减少 51.35%、41.05%、50.91%、40.38%、50.52%、42.35%、37.04%。

3 讨论

植物干物质累积相对生长率是其响应逆境的重要指标。本试验结果显示,随着 Cd 胁迫浓度的增加,小白菜的 RGR 值整体呈下降趋势,当 Cd 浓度为 T3(100 mg/L) 时,其值明显下降甚至呈现负增长,表明 Cd 胁迫对小白菜生长有明显的抑制作用,低浓度 Cd 胁迫时存在一定的耐受性仍可以生长发

表 4 各供试小白菜品种在不同 Cd 胁迫浓度下的叶片面积

品种	叶片面积(cm ²)			
	CK	T1	T2	T3
华樱	16.475 ± 0.142g	12.801 ± 0.579e	16.016 ± 0.946d	11.380 ± 0.645de
金品 1 夏	17.526 ± 1.185fg	13.020 ± 0.439de	11.565 ± 0.200f	10.641 ± 0.890e
金品 008	21.457 ± 1.131d	13.444 ± 0.249de	12.191 ± 0.307f	12.557 ± 0.403c
金品 101	19.851 ± 1.191de	17.316 ± 0.478c	17.424 ± 0.088c	12.333 ± 0.519c
金品 506	19.062 ± 0.652ef	13.932 ± 0.767d	14.085 ± 0.245e	11.627 ± 0.226cd
奶油快菜	30.057 ± 1.000a	25.904 ± 0.845a	22.733 ± 0.352a	16.659 ± 0.070a
金品 586	17.934 ± 0.217efg	14.069 ± 0.414d	15.857 ± 0.644d	12.245 ± 0.022cd
四季小白菜	24.163 ± 1.364c	21.774 ± 0.739b	14.301 ± 0.559e	14.495 ± 0.198b
津双 30 快菜 F ₁	26.834 ± 2.328b	21.865 ± 0.635b	20.956 ± 0.679b	14.458 ± 0.764b

注:表中同行数据后标有不同小写字母表示处理间差异达到显著水平($P < 0.05$)。表 5 同。

表 5 各供试小白菜品种在不同 Cd 胁迫浓度下的冠层面积及植株高度

小白菜品种	冠层面积(cm ²)				植株高度(cm)			
	CK	T1	T2	T3	CK	T1	T2	T3
华樱	170.7 ± 36.7a	155.5 ± 28.1a	147.3 ± 41.9ab	107.5 ± 33.0b	7.8 ± 1.8a	5.0 ± 0.6b	6.3 ± 1.2ab	6.5 ± 0.7ab
金品 1 夏	287.2 ± 85.1a	192.6 ± 39.4b	197.3 ± 48.5b	156.6 ± 45.2b	11.1 ± 1.2a	6.3 ± 1.2bc	7.1 ± 1.0b	5.4 ± 0.9c
金品 008	373.6 ± 122.8a	176.1 ± 24.6b	195.6 ± 34.8b	203.5 ± 37.0b	9.5 ± 0.2a	5.8 ± 1.1b	6.5 ± 1.2b	5.6 ± 1.3b
金品 101	314.2 ± 73.0a	181.3 ± 36.3bc	206.9 ± 54.3b	143.2 ± 13.7c	11.0 ± 1.4a	6.2 ± 0.8b	6.5 ± 0.8b	5.4 ± 1.2b
金品 506	262.8 ± 57.2a	149.1 ± 36.8b	151.7 ± 37.3b	90.2 ± 45.5c	10.4 ± 3.6a	6.3 ± 0.6b	6.4 ± 1.6b	6.2 ± 1.6b
奶油快菜	417.0 ± 71.5a	217.8 ± 75.8bc	287.4 ± 57.7b	208.4 ± 36.9c	9.7 ± 2.8a	6.3 ± 1.0b	8.4 ± 1.4a	4.8 ± 0.6b
金品 586	224.1 ± 40.5a	152.7 ± 31.9b	192.9 ± 31.2ab	202.1 ± 53.6ab	8.5 ± 0.6a	7.0 ± 2.3ab	6.7 ± 1.0b	4.9 ± 0.7c
四季小白菜	278.7 ± 116.1a	263.3 ± 63.5a	267.7 ± 64.3a	239.3 ± 68.9a	8.1 ± 3.7a	7.1 ± 1.6ab	6.6 ± 0.68ab	5.1 ± 0.8b
津双 30 快菜 F ₁	337.8 ± 116.1a	242.4 ± 31.9b	235.5 ± 65.6b	207.5 ± 44.9b	10.1 ± 3.6a	5.9 ± 0.9b	6.1 ± 1.1b	6.2 ± 2.1b

注:表中同行数据后不同小写字母表示相同品种小白菜不同处理的冠层面积及植株高度差异达到显著水平($P < 0.05$)。

育,高浓度 Cd 胁迫抑制严重导致小白菜生长缓慢甚至不再生长。这与全秋梅等研究半叶马尾藻对 Cd 离子的响应^[27]一致。

不同小白菜品种在不同 Cd 浓度胁迫下的 Cd 吸收能力、富集系数以及转运系数不同,在 T1、T2 处理下,所有小白菜品种的生物富集系数均大于 1(图 1),这与赵怀敏等的研究结果^[28]一致,说明不同小白菜品种地上部均具备富集 Cd 的能力;另外不同小白菜品种的 Cd 富集系数随着 Cd 胁迫浓度的增加呈现下降趋势,地上部 Cd 富集能力有所下降;小白菜的 Cd 转运系数均小于 1(图 2),这与李乐乐等的研究结果^[29]一致,即各小白菜品种富集 Cd 的部位主要为地下部。在 T3 浓度(100 mg/L)下,Cd 转运系数最小,表明在此浓度下,影响 Cd 从地下部向地上部的转运较为严重。说明基于不同小白菜品种因其遗传特性差异而形成对 Cd 吸收能力的差异,可作为筛选 Cd 高富集、低富集作物品种

的生理指标^[30]。在低 Cd 浓度胁迫下,品种金品 1 夏、金品 101、金品 506 有较强的 Cd 吸收富集能力,且具有一定的转运能力,可作为 Cd 富集或超富集能力的潜力植物,用于 Cd 污染土壤或湿地修复^[31]。

叶绿素荧光参数是研究植物光合生理状况及植物与逆境胁迫关系的重要方法之一,能直接反映光系统Ⅱ对光能的吸收、传递和耗散情况^[32]。本试验通过测定小白菜的叶绿素荧光参数以反映 Cd 胁迫对植物光合作用的伤害情况。其中, F_v/F_m 表示小白菜在暗适应下的最大光能转换效率,可以反映小白菜在 Cd 胁迫下光合作用光反应受影响程度的情况^[33-34]。在本试验条件下,金品 1 夏、四季小白菜这 2 个品种 F_v/F_m 呈现先上升后下降趋势,说明随着 Cd 浓度的增加,PSⅡ 反应中心实际光能转换效率降低,小白菜通过提高最大光能转换效率来抵御胁迫,但随着 Cd 胁迫浓度的增加,小白菜的最大光能转换效率受到抑制,从而导致其光能利用能力

降低,这与仰路希等关于 Cd 胁迫对人参菜的影响研究^[35]一致;华樱、金品 008、金品 101、奶油快菜、金品 586、津双 30 快菜 F_1 等 6 个小白菜品种的 F_v/F_m 随着 Cd 胁迫浓度的增大而下降;且 9 个小白菜品种在 Cd 胁迫浓度较大 (100 mg/L) 时,其 F_v/F_m 含量降到最低值 (金品 506 除外),具有显著性差异,这与 Larsson 等对油菜的研究^[36]以及与时建业等对 Cd 胁迫下菠菜光合作用的影响研究结果^[37]一致,说明在 Cd 胁迫下 PS II 受到破坏,反应中心光能转化效率降低,小白菜的光合作用受到抑制;NPQ 是稳态非光化学荧光淬灭系数,反映的是植物将过剩的光能耗散为热能的能力^[38],是植物应对逆境的重要指标。本试验表明,在 Cd 胁迫下,不同小白菜品种的 NPQ 值存在显著差异,金品 1 夏、金品 008、金品 101 3 个小白菜的 NPQ 随着 Cd 胁迫浓度的增加呈现先上升后下降的趋势,金品 506、奶油快菜、金品 586、四季小白菜、津双 30 快菜 F_1 这 5 个小白菜的 NPQ 随着 Cd 胁迫浓度的增加呈现先上升后下降再上升的趋势。说明小白菜在低浓度 Cd 胁迫下,可通过自身调节机制,即快速消耗光能,来减轻光合系统的损伤,从而适应胁迫环境。但随着 Cd 胁迫浓度的增大,小白菜不能进行正常热耗散,PS II 反应中心受损,并抑制了光合作用的原初反应,阻碍了光合电子传递过程^[39],从而导致 NPQ 值显著下降;PS II 光合电子传递量子效率反映光合电子传递速率,也是植物响应 Cd 胁迫的主要指标。本试验表明,不同 Cd 胁迫浓度下,小白菜 Φ_{PSII} 与对照组均存在显著性差异,华樱、金品 1 夏、金品 008、金品 101、奶油快菜 5 个小白菜品种在低浓度 (25 mg/L) Cd 胁迫下, Φ_{PSII} 最小;金品 506、金品 586、津双 30 快菜 F_1 这 3 个品种小白菜在高浓度 (100 mg/L) Cd 胁迫下,其 Φ_{PSII} 值最小,这与罗红艳等应用磷和铝胁迫杉木的叶绿素荧光特性研究结果^[40]一致,其 Φ_{PSII} 值越小,表明其受 Cd 胁迫影响越大。

植物表型是基因与环境共同作用下的植株表现,体现为植物生长发育过程中物理、生理、生化方面的特征和性状^[41-42]。Cd 透过细胞壁经植物根部皮层细胞进入植物根部,通过质外体和共质体途径吸收并转运到地上部分的 Cd 对叶片发育产生影响^[43]。本试验研究表明,在低 Cd 浓度胁迫下,小白菜植株叶片面积与对照组相比差异显著,随着 Cd 浓度的增加,叶片出现失绿、变小、变窄等现象,这

与肖旭峰等的研究结果^[39]一致。说明 Cd 胁迫会抑制植物碳同化和电子传递,导致植物的光合能力下降^[44]。本试验条件下,随着 Cd 胁迫浓度的增大,小白菜植株高度、冠层面积呈下降趋势。

4 结论

本试验表明,不同小白菜品种在不同浓度 Cd 胁迫下的 Cd 积累量、富集系数、转运系数均存在差异性,后者可作为筛选 Cd 高富集、低富集小白菜品种的判断指标。其中金品 1 夏、金品 008 对 Cd 的富集吸收能力较强,可尝试作为 Cd 富集或超富集能力植物用于修复 Cd 污染土壤或湿地;奶油快菜、四季小白菜对 Cd 的富集能力较弱,可作为 Cd 低富集植物或 Cd 污染警示植物,用于判断土壤是否受到 Cd 污染以及污染情况。

本试验还表明,不同小白菜品种间光合作用存在差异性,小白菜最大光化学量子产量 (F_v/F_m) 随着 Cd 胁迫浓度的增加呈逐渐下降或先上升后下降的趋势,稳态非光化学荧光淬灭系数呈现先上升后下降或先上升后下降再上升的趋势;实际光量子效率则呈现逐渐下降或先下降后上升在下降的趋势;随着 Cd 胁迫浓度的增大,小白菜的光合作用受抑制越严重。

在供试材料响应 Cd 胁迫的表型变化方面,随着 Cd 胁迫浓度的增加,小白菜叶片出现变窄、变黄、变小的现象,其冠层面积及植株高度小于对照组,说明在 Cd 胁迫使小白菜的生长发育受到抑制。

参考文献:

- [1] 王松良. 芸苔属蔬菜重金属累积特性及抗 Cd 基因的差异表达与克隆[D]. 福州:福建农林大学,2004:4-6.
- [2] 胡彦,陈沁,邓志瑞,等. 辣椒光合系统对重金属 Cd^{2+} 胁迫的响应[J]. 上海大学学报(自然科学版),2005,11(5):531-534.
- [3] 颜昌苗,郭建华. 氮肥管理对植物镉吸收的影响[J]. 生态环境学报,2020,29(7):1466-1474.
- [4] 周利军,武琳,林小兵,等. 土壤调理剂对镉污染稻田修复效果[J]. 环境科学,2019,40(11):5098-5106.
- [5] 胡文友,祖艳群,李元. 无公害蔬菜生产中重金属含量的控制技术[J]. 农业环境科学学报,2005,24(增刊1):353-357.
- [6] 张思佳. Cd 胁迫对高、低镉积累白菜生理生化特性及关键基因表达的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2021:2-4.
- [7] 宋阿琳,李萍,李兆君,等. 镉胁迫下两种不同小白菜的生长、镉吸收及其亚细胞分布特征[J]. 环境化学,2011,30(6):1075-1080.
- [8] 张菊平,焦新菊,崔文朋,等. 不同品种小白菜对镉胁迫的生理性

- 差异[J]. 北方园艺, 2013(8): 9-12.
- [9] 王松良, 陈选阳, 陈 辉, 等. 小白菜镉耐性形成的生理生化机理研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 120-124.
- [10] 陈永快. 小白菜镉抗性形成代谢关键基因的克隆及胁迫表达研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010: 11-13.
- [11] 吴博晗, 吴向阳, 李 霞, 等. 镉对水稻及种植土壤影响的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(18): 25-33.
- [12] 陈丽丽, 田 爽, 鲁伟丹, 等. 镉胁迫对 3 种植物生长及镉吸收和积累的影响[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(4): 1009-1015.
- [13] 孙光闻, 朱祝军, 方学智, 等. 镉对小白菜光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 700-703.
- [14] Siedlecka A, Krupa Z. Interaction between cadmium and iron and its effects on photosynthetic capacity of primary leaves of *Phaseolus vulgaris* [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 1996, 34(6): 833-841.
- [15] 曾 媛, 吴 楠, 王宁宁. 重金属胁迫下水稻基因表达变异相关研究进展[J]. 分子植物育种, 2018, 16(24): 8179-8184.
- [16] 张秀如. 生长解析法及其在棉花科研中的初步应用[J]. 华中农学院学报, 1984, 3(4): 1-9.
- [17] Pommerening A, Muszta A. Methods of modelling relative growth rate[J]. Forest Ecosystems, 2015(2): 82-90.
- [18] 陈 伟, 蒋文艳, 杨玉霞, 等. 钻叶紫菀对镉胁迫的生理响应及富集转运特征[J]. 西南农业学报, 2022, 35(12): 2860-2866.
- [19] 蒋尚明, 袁宏伟, 崔 毅, 等. 基于相对生长率的大豆旱灾系统敏感性定量评估研究[J]. 大豆科学, 2018, 37(1): 92-100.
- [20] 王松良, 郑金贵. 13 种小白菜基因型对 Cd、Pb、As 累积特性比较[J]. 福建农业大学学报, 2005, 34(3): 304-308.
- [21] 赵毅辉, 徐圆圆, 蒋维昕, 等. 重金属(镉/铬/铅)胁迫对柳杉幼苗生长的影响及其富集特征[J]. 贵州农业科学, 2016, 44(2): 166-171.
- [22] 周珍华, 谷有君, 刘汇川, 等. 基于 BCF 的砷低积累水稻品种筛选[J]. 湖南生态科学学报, 2022, 9(3): 31-37.
- [23] 杨金山, 罗小三, 张欣悦, 等. 污染农田水茛菜等野生植物镉富集能力和修复潜力调查[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(8): 1739-1747.
- [24] 孙光闻. 小白菜镉积累及毒害生理机制的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004: 65-67.
- [25] Li X, Jiao D M, Liu Y L, et al. Chlorophyll fluorescence and membrane lipid peroxidation in the flag leaves of different high yield rice variety at late stage of development under natural condition[J]. Acta Botanica Sinica, 2002, 44(4): 413-421.
- [26] 杨 青, 谢俊婷, 张志盼, 等. 外源植物激素喷施对三叶鬼针草修复镉污染土壤的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(10): 5757-5768.
- [27] 全秋梅, 贺 亮, 梁 忠, 等. 镉离子胁迫下半叶马尾蕨中国变种生理生化响应的研究[J]. 海洋湖沼通报, 2019(2): 139-146.
- [28] 赵怀敏, 李 艳, 刘丽萍, 等. 水稻和大豆对重金属 Cd 的富集效应差异性比较[J]. 绵阳师范学院学报, 2021, 40(2): 60-64.
- [29] 李乐乐, 刘 源, 李宝贵, 等. 镉低积累小麦品种的筛选研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(8): 53-58, 72.
- [30] 陈 瑛, 李廷强, 杨肖娥, 等. 不同品种小白菜对镉的吸收积累差异[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 736-740.
- [31] 陈 伟, 蒋文艳, 杨玉霞, 等. 钻叶紫菀对镉胁迫的生理响应及富集转运特征[J]. 西南农业学报, 2022, 35(12): 2860-2866.
- [32] 黄丽芳, 龙宇宙, 李金芹, 等. 低温胁迫对小粒种咖啡幼苗光合及叶绿素荧光特性的影响[J/OL]. 分子植物育种, 2023: 1-14 (2023-04-18) [2023-07-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230417.1547.022.ht>.
- [33] 朱春艳, 宋佳伟, 白天亮, 等. NaCl 胁迫对不同耐盐性粳稻种质幼苗叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(13): 2509-2525.
- [34] 方怡然, 薛 立. 盐胁迫对植物叶绿素荧光影响的研究进展[J]. 生态科学, 2019, 38(3): 225-234.
- [35] 仰路希, 谢永东, 贺志群. 人参菜对镉胁迫的生理响应[J]. 土壤通报, 2020, 51(2): 481-486.
- [36] Larsson E H, Bornman J F, Asp H. Influence of UV-B radiation and Cd²⁺ on chlorophyll fluorescence, growth and nutrient content in *Brassica napus* [J]. Journal of Experimental Botany, 1998, 49(323): 1031-1039.
- [37] 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.
- [38] Szymańska R, Ślesak I, Orzechowska A, et al. Physiological and biochemical responses to high light and temperature stress in plants [J]. Environmental and Experimental Botany, 2017, 139: 165-177.
- [39] 肖旭峰, 李 猛, 龙俊敏, 等. 镉诱导小白菜活性氧及抗氧化酶活性与自噬关系分析[J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(5): 873-880.
- [40] 罗红艳, 费裕翀, 曹光球, 等. 低磷和铝胁迫对杉木光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 亚热带农业研究, 2018, 14(4): 229-235.
- [41] 袁培森, 薛铭家, 熊迎军, 等. 基于无人机高通量植物表型大数据分析及应用研究综述[J]. 农业大数据学报, 2021, 3(3): 62-75.
- [42] 杜思梦, 方保停, 李向东, 等. 外源水杨酸对低温胁迫下小麦幼苗叶绿素荧光特性及抗氧化酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(19): 68-73.
- [43] 杜云燕, 张大为, 陈红松, 等. 镉胁迫对 2 种油菜土壤真菌群落的影响[J]. 微生物学通报, 2021, 48(11): 4030-4045.
- [44] 张 欣, 王英杰, 豆昕桐, 等. Cd 胁迫对 2 个耐 Cd 能力不同的小麦品种幼苗生长和生理特征的影响[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2020, 40(6): 30-36.