

网络出版时间:2024-01-05 15:16 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2024.07.013
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20240104.0946.005

镉胁迫对生菜生长、生理特性及镉富集转运特征的影响

王涛,黄语燕,陈永快,廖水兰

(福建省农业科学院 数字农业研究所,福建 福州 350003)

【摘要】【目的】揭示镉胁迫对生菜生长的影响及毒害机理,为阐明镉的毒理效应提供依据。【方法】以水培生菜品种“四季生菜”为材料,设置镉处理低(25 mg/L)、高(50,100 mg/L)水平,以无镉处理(0 mg/L)为对照(CK),用营养液膜技术(NFT)进行试验,处理 7,14,21 d 后取样,研究镉处理对生菜的地上部和地下部鲜质量、镉含量、镉富集转运特征、生理指标、抗氧化酶活性、光合色素指标及叶绿素荧光参数的影响。【结果】25 mg/L 镉处理前 14 d 对生菜地上部和地下部鲜质量具有促进作用,21 d 时 25~100 mg/L 镉表现出明显的抑制作用。镉处理生菜的地下部镉含量、富集系数均高于地上部;随着镉质量浓度的升高,富集系数总体呈现下降的趋势;处理 7 d 后,随着镉质量浓度增加,转运系数下降,14 和 21 d 则先上升后下降。在 25~100 mg/L 镉处理后,生菜的可溶性蛋白含量随着镉质量浓度的升高而增加,但随着处理时间延长逐渐下降;MDA 含量随着镉质量浓度升高以及处理时间的延长而增加。与 CK 相比,7 d 时镉处理 SOD 活性显著升高,14 d 显著下降;21 d 各处理间差异不显著。镉处理 7~21 d 后 POD 活性均较 CK 显著升高(14 d 时 25 mg/L 处理除外)。随着时间推移,镉处理 CAT 活性总体表现出先降低后升高的规律。与 CK 相比,7 d 时镉处理生菜光合色素的含量明显增加,14 d 时低质量浓度(25 mg/L)镉处理光合色素指标总体增大,高质量浓度(50,100 mg/L)镉抑制了光合色素的合成,21 d 时镉处理光合色素指标较 CK 显著降低。25~100 mg/L 镉处理 7~21 d 后,镉对生菜叶绿素荧光参数有明显影响,其中镉处理 21 d 后 PSII 最大光量子效率(F_v/F_m)、PSII 有效光量子产量(F_v'/F_m')、PSII 实际光量子效率($\Phi PSII$)、稳态荧光衰减率(Rfd)较 7 d 均总体降低,而初始荧光值(F_0)和非光化学淬灭系数(NPQ)则表现为增大。【结论】镉质量浓度越高、处理时间越长,生菜的光能转化效率越低,叶片热量散耗越高,光合作用能力降低,植株生长受抑制程度越严重。

【关键词】 镉胁迫;生菜;镉富集;光合色素

【中图分类号】 S636.201

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2024)07-0115-10

Effects of cadmium stress on growth, physiological characteristics and cadmium enrichment and transport of lettuce

WANG Tao, HUANG Yuyan, CHEN Yongkuai, LIAO Shuilan

(Agricultural Digital Institute, Fujian Academy of Agriculture Sciences, Fuzhou, Fujian 350003, China)

Abstract:【Objective】 This study explored the effects of cadmium stress on lettuce growth and toxicity mechanism to provide basis for elucidating toxicological effect of cadmium.【Method】 The hydroponic lettuce variety ‘Si Ji lettuce’ was treated with four cadmium levels of control (CK, 0 mg/L), low (25 mg/L), and high (50 and 100 mg/L). The experiment was carried out with nutrient liquid membrane technology (NFT). Samples were taken 7, 14 and 21 days after treatment to analyzed the effects of cadmium on

【收稿日期】 2023-04-14

【基金项目】 福建省人民政府-中国农业科学院“5511”协同创新工程项目(XTCXGC2021015);福建省农业科学院对外合作项目(DWHZ-2022-06)

【作者简介】 王涛(1992-),男,福建福州人,助理研究员,主要从事设施农业、数字农业研究。E-mail:793831167@qq.com

【通信作者】 陈永快(1981-),男,福建霞浦人,副研究员,主要从事生态农业、数字农业研究。E-mail:stonecyk@126.com

aboveground and underground fresh weights, cadmium content, cadmium accumulation and transport characteristics, physiological indexes, antioxidant enzyme activities, photosynthetic pigment indexes and chlorophyll fluorescence parameters of lettuce. 【Result】 The treatment of 25 mg/L cadmium promoted fresh weight of lettuce in aboveground and underground parts at 14 days, while 25—100 mg/L cadmium showed significant inhibitory effect at 21 days. Cadmium content and enrichment coefficient in the underground part of cadmium treated lettuce were higher than those in the aboveground part. With the increase of cadmium concentration, the enrichment coefficient showed a downward trend. The transport coefficient decreased with the increase of cadmium concentration at 7 days, while it increased first and then decreased at days 14 and 21. For treatments with 25—100 mg/L cadmium, soluble protein content of lettuce increased with the increase of cadmium concentration, but it gradually decreased with the extension of treatment time. MDA content increased with the increase of cadmium concentration and the prolongation of treatment time. Compared with CK, SOD activity of cadmium treatment was significantly increased at 7 days while decreased significantly at 14 days, and there was no significant difference among all treatments at 21 days. POD activity was significantly higher from 7 days to 21 days in cadmium treatments than in control (except 25 mg/L treatment at 14 days). The activity of CAT treated with cadmium decreased first and then increased with the passage of time. Compared with CK, the photosynthetic pigment content of lettuce treated with cadmium increased significantly at 7 days. The photosynthetic pigment index of low concentration (25 mg/L) cadmium treatment increased overall at 14 days, while high concentration (50 and 100 mg/L) cadmium inhibited the synthesis of photosynthetic pigment. The photosynthetic pigment index of cadmium treatment was significantly decreased at 21 days compared with the control. The 25—100 mg/L cadmium treatments for 7 to 21 days had significant effect on chlorophyll fluorescence parameters of lettuce. PS II maximum quantum efficiency (F_v/F_m), PS II effective quantum yield (F_v'/F_m'), PS II actual quantum efficiency ($\Phi_{PS II}$) and steady state fluorescence decay rate (Rfd) decreased overall from 7 days to 21 days, while initial fluorescence value (F_o) and non-photochemical quenching coefficient (NPQ) increased. 【Conclusion】 Higher cadmium concentration and longer treatment time led to lower light energy conversion efficiency of lettuce, higher heat dissipation of leaves, lower photosynthesis ability and more serious inhibition of plant growth.

Key words: cadmium stress; lettuce; cadmium enrichment; photosynthetic pigment

随着社会发展和各类生产活动加速,大量重金属污染物被不合规地排放出来,造成土壤严重污染。据 2014 年《全国土壤污染调查公报》数据显示,我国约 7% 的土壤采样位点存在镉污染,其污染超标率最高^[1]。土壤中的镉极易被植物吸收、富集,最终通过食物链等途径进入人体,造成严重的健康风险。镉作为植物生长的非必需营养元素,过量镉会造成植物体内代谢紊乱、光合效率降低以及细胞膜受损,最终影响植物的产量及品质^[2-4]。

生菜(*Lactuca sativa* L.) 属菊科莴苣属,具有较高的营养价值和低热量,可作为生食沙拉蔬菜,深受消费者喜爱,在全国各地均有种植。联合国粮食及农业组织(FAO)统计数据显示,2020 年,我国生菜及菊苣类蔬菜播种面积为 60.643 万 hm^2 ,产量达 1 432.31 万 t,占全球的 49.45%。在美国,生菜为

研究污染的标准植物之一^[5]。有研究表明,福建省东部区域污染程度总体表现为轻度污染,但多数区域土壤潜在生态风险处于强风险,尤其是土壤镉污染问题突出^[6]。田丹等^[7]研究发现,随着镉质量浓度升高,生菜发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数均降低;唐希望等^[8]研究发现,生菜镉含量的变化与其生物量的变化高度相关。生菜体内富集的镉约 15% 在苗期积累,约 80% 在器官形成期积累,约 5% 来自抽薹期。林琳等^[9]研究表明,在 0.02 mg/L 镉胁迫下生菜叶片叶绿体结构遭破坏,线粒体空泡化,染色质出现不同程度凝缩。贾月慧等^[10]研究发现,生菜叶绿素含量随着营养液中镉浓度的升高呈低促高抑现象,其中根系镉含量显著高于叶片。

目前,国内外关于镉富集效应的研究主要集中在十字花科类作物,对生菜栽培过程镉胁迫影响机

制机理的研究较少,且缺乏全生育期光合荧光动态特性的研究。为此,本试验以生菜为研究对象,采用营养液膜技术(nutrient film technique, NFT)进行栽培,研究镉胁迫对生菜形态建成、生理生化及品质的影响,以期为阐明重金属镉对生菜栽培过程中的毒理效应提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试生菜品种为“四季生菜”,种子购自福建农林农业良种开发有限公司。育苗基质采用进口德国 K 牌草炭土。无水氯化镉(CdCl_2)购于上海麦克林生化科技有限公司。

1.2 试验方法

2022 年 12 月 2 日—2023 年 1 月 28 日,在福建省农业科学院表型实验温室和生理生化实验室进行试验。生菜播种时间为 2022 年 12 月 2 日,播种在基质穴盘中,播种后置于小温室潮汐式育苗床内,营养液配方为每 100 L 水中分别加入 A($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 11.2 kg, KNO_3 12 kg) 和 B(KH_2PO_4 2.6 kg, MgSO_4 3 kg, EDTA-Fe 750 g)。育苗期间,营养液电导率(EC)设置为 1.0 mS/cm,潮汐式苗床每日 08:00 进水 5 min,持续 10 min,排水 10 min。为减少土壤中其他因素对试验产生的干扰,采用 NFT 进行栽培,确保试验过程仅受镉质量浓度的影响。定植时间为 2023 年 1 月 3 号,将幼苗从穴盘移植到自行开模的 NFT 栽培槽内,营养液 EC 为 1.5 mS/cm,用正常营养液预培养 2 d 后,于 1 月 5 日往营养液中添加镉,在前期预试验中,镉质量浓度设置参考《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)^[11],以总镉限值(0.01 mg/L)为标准,扩大质量浓度倍数,结合预试验结果和文献[10],本试验中镉质量浓度设置 25, 50, 100 mg/L 3 个水平,其中 25 mg/L 为低水平,50 和 100 mg/L 为高水平,并以无镉处理(0 mg/L)作为对照(CK),每个处理 30 株,各处理均重复 3 次。NFT 试验区域 4 个,每个试验区单独配置水肥供应系统,采用定时灌溉模式,每次灌溉 5 min,间隔 15 min,每周一更换 1 次蓄水桶内营养液。处理 7, 14, 21 d 后采集生菜样本,进行生物量、生理生化指标及叶绿素荧光参数测定。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 生菜生物量及镉含量 每个处理选取 10 株,将各处理生菜按地上部和地下部分开,地上部依次用自来水、超纯水洗涤,擦干水分后用天平称质

量;地下部用自来水冲洗干净后,置于 20 mmol/L 的 $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 溶液中浸泡 20 min,以除去地下部表面的镉离子,再用超纯水冲洗干净,擦干水分后用天平称质量。各部分均于 105 °C 烘箱中杀青 30 min, 75 °C 烘干至恒质量,烘干后的样品粉碎过 0.15 mm 孔径筛;称取 0.5 g 样品于 50 mL 消解管中,加入硝酸-高氯酸(体积比 4 : 1)混合酸 10 mL,加塞静置过夜,然后用石墨消解仪消解。消解步骤为:100 °C 加热 20 min, 140 °C 加热 20 min, 180 °C 加热 20 min。消解至消化液呈无色透明或略带黄色,取出消化管,冷却后用蒸馏水定容至 50 mL,用原子吸收分光光度计(AAS, PinAAcle 900F, PerkinElmer)测定镉含量,计算富集系数(bioconcentration factor, BF)和转运系数(translocation factor, TF)。

$\text{BF} = \text{地上部或地下部镉含量} / \text{溶液中镉含量}$;

$\text{TF} = \text{地上部镉含量} / \text{地下部镉含量}$ 。

1.3.2 生菜生理生化指标 除根系活力采用根尖样品外,其他指标测定样品均为生菜叶片鲜样,取 3 株生菜叶片去除叶脉后剪碎混匀进行指标测定,各指标均重复测定 3 次。可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法^[12]测定;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法^[12]测定;根系活力取根尖样品采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法^[12]测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑光还原法^[12]测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法^[13]测定;过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法^[12]测定;光合色素(叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素)含量采用丙酮乙醇混合液法^[14]提取后,用紫外分光光度计(T2600 型,上海佑科仪器仪表有限公司)测定,计算叶绿素总量及叶绿素 a/b。

1.3.3 叶绿素荧光参数 用叶绿素荧光成像仪(FC800-D, Photon Systems Instruments (PSI) 公司,捷克)测定。先在温室内暗环境下对待测样品(整体活株)进行暗适应 30 min,在 Fluorcam10 系统上设置 Saturating pulse 值为 5 250 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, Actinic light2 值为 422 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;再将待测样品放入仪器内,样品与镜头距离为 30 cm,测定实时初始荧光值(F_0)、冠层投影面积、PS II 最大光量子效率(F_v/F_m)、PS II 有效光量子产量(F_v'/F_m')、PS II 实际光量子效率($\Phi\text{PS II}$)、非光化学淬灭系数(NPQ)和稳态荧光衰减率(Rfd)。

1.4 数据分析

使用 WPS 软件进行做图,用 DPS 7.05 软件的 Duncan's 法进行差异显著性分析,采用 Fluorcam 7

分析叶绿素荧光成像参数。

2 结果与分析

2.1 镉处理对生菜生物量的影响

由表 1 可知,7 d 后,在 25~100 mg/L 时,生菜地上部鲜质量随镉质量浓度升高呈现先上升后下降的趋势,地下部鲜质量呈现下降趋势;镉处理生菜地上部和地下部鲜质量与 CK 无显著差异,其中 50 mg/L 镉处理对地上部鲜质量有促进作用,25,50

mg/L 镉处理对地下部鲜质量具有促进作用;而 100 mg/L 镉处理生菜地上部和地下部鲜质量均小于其他镉处理和 CK,且与 CK 均无显著差异。14 d 后,25 mg/L 镉处理生菜地上部和地下部鲜质量显著高于其他镉处理,促进作用明显。21 d 后,生菜地上部和地下部鲜质量随着镉质量浓度的升高呈下降趋势,镉处理生菜鲜质量均显著低于 CK,其中 100 mg/L 镉处理对生菜生物量积累有显著抑制甚至是毒害作用。

表 1 镉处理对生菜生物量的影响

Table 1 Effect of cadmium treatment on biomass of lettuce

处理时间/d Treatment time	镉质量浓度/(mg·L ⁻¹) Cadmium concentration	地上部鲜质量/g Aboveground fresh weight	地下部鲜质量/g Underground fresh weight
7	0(CK)	4.52±0.37 ab	0.45±0.08 ab
	25	4.48±0.30 ab	0.64±0.12 a
	50	4.99±0.04 a	0.64±0.15 a
	100	4.21±0.19 b	0.41±0.06 b
14	0(CK)	7.38±0.31 c	1.04±0.02 c
	25	11.21±0.26 a	1.48±0.04 a
	50	6.97±0.12 c	1.22±0.06 b
	100	7.86±0.20 b	0.76±0.04 d
21	0(CK)	19.23±1.46 a	2.17±0.12 a
	25	11.09±1.54 b	1.83±0.06 b
	50	9.04±0.40 c	1.74±0.18 b
	100	3.96±0.19 d	0.62±0.06 c

注:同列数据后标不同小写字母表示同一时间下各处理间差异达显著水平($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments during same time periods ($P<0.05$). The same below.

2.2 镉处理对生菜地上部和地下部镉含量的影响

不同处理对生菜地上部和地下部镉含量的影响见表 2,因为 CK 生菜未添加镉,地上部和地下部未检测出镉,均小于国家标准限量(0.2 mg/kg)^[15],因此表 2 中未列出。由表 2 可知,生菜地下部镉含量和富集系数均高于地上部。处理 7 d 后,地上部和地下部镉含量均随着镉质量浓度的升高而显著增加,地上部、地下部富集系数和转运系数均下降;14

d 后,随着镉质量浓度升高,生菜地上部镉含量显著增加,地上部富集系数显著下降,而地下部镉含量、富集系数均先降低后升高,转运系数先升高后降低,各处理之间差异显著;21 d 后,100 mg/L 镉处理的地上部和地下部镉含量均高于其余 2 个处理,随着镉质量浓度升高,地上部和地下部富集系数总体呈现下降趋势,转运系数先升高后降低。

表 2 镉处理对生菜地上部和地下部镉含量的影响

Table 2 Effect of cadmium treatment on cadmium content in aboveground and underground parts of lettuce

处理时间/d Treatment time	镉质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Cadmium concentration	地上部镉含量/ (mg·kg ⁻¹) Cadmium content in aerial parts	地下部镉含量/ (mg·kg ⁻¹) Cadmium content in underground	地上部富集系数 Overground enrichment coefficient	地下部富集系数 Underground enrichment coefficient	转运系数 Transfer coefficient
7	25	38.66±1.24 c	236.79±1.59 c	1.55±0.05 a	9.47±0.06 a	0.16±0.00 a
	50	58.55±0.04 b	408.32±0.16 b	1.17±0.00 b	8.17±0.00 b	0.14±0.00 b
	100	89.51±0.30 a	618.68±2.16 a	0.90±0.00 c	6.19±0.02 c	0.14±0.00 b
14	25	30.15±0.62 c	412.65±1.03 b	1.21±0.03 a	16.51±0.04 a	0.07±0.00 c
	50	57.97±0.04 b	376.73±2.02 c	1.16±0.00 b	7.53±0.04 c	0.15±0.00 a
	100	97.70±0.45 a	892.27±2.75 a	0.98±0.00 c	8.92±0.03 b	0.11±0.00 b
21	25	45.26±0.59 b	483.28±2.05 b	1.81±0.02 a	19.33±0.08 a	0.09±0.00 b
	50	77.39±2.03 a	394.54±3.62 c	1.55±0.04 b	7.89±0.07 b	0.20±0.01 a
	100	78.98±0.04 a	792.63±2.78 a	0.79±0.00 c	7.93±0.03 b	0.10±0.00 b

2.3 镉处理对生菜可溶性蛋白、MDA 含量和根系活力的影响

镉处理对生菜可溶性蛋白、MDA 含量和根系活力的影响见表 3。从表 3 可以看出,在 25~100 mg/L 时,生菜可溶性蛋白含量随着镉质量浓度的升高而升高,随着处理时间延长呈下降趋势。7 d 后,镉处理生菜可溶性蛋白含量均显著高于 CK(除

25 mg/L 镉处理外);14 d 后,25,50 mg/L 镉处理的可溶性蛋白含量显著低于 CK,而 100 mg/L 镉处理的可溶性蛋白含量高出 CK 49.77%,二者之间差异显著;21 d 后,25,50,100 mg/L 镉处理的可溶性蛋白含量较 CK 分别显著下降 99.82%,90.57%,78.29%,且 3 个镉处理间差异显著。

表 3 镉处理对生菜可溶性蛋白、MDA 含量和根系活力的影响

Table 3 Effects of cadmium treatment on soluble protein content,MDA content and root activity of lettuce

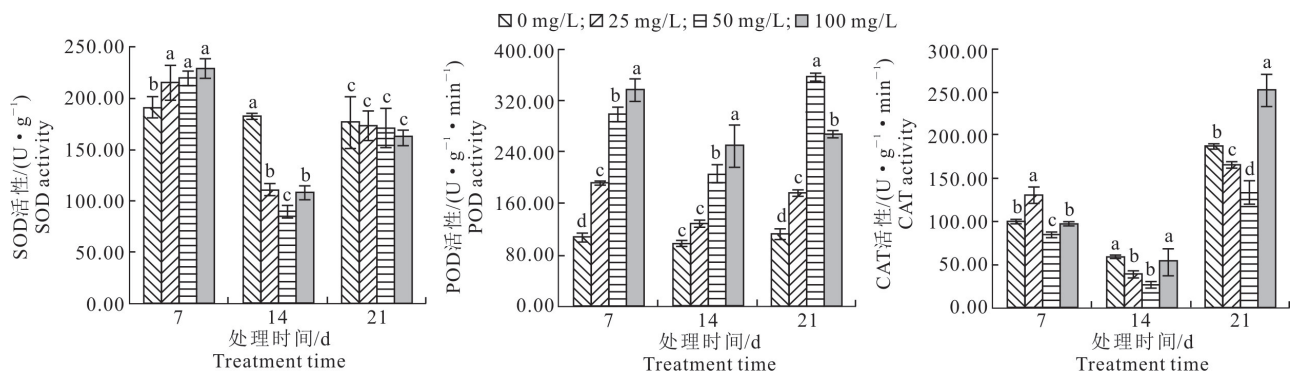
处理时间/d Treatment time	镉质量浓度/ (mg · L ⁻¹) Cadmium concentration	可溶性蛋白含量/ (mg · g ⁻¹) Soluble protein content	MDA 含量/ (nmol · g ⁻¹) MDA content	根系活力/ (μg · g ⁻¹ · h ⁻¹) Root activity
7	0(CK)	8.88±0.43 b	0.33±0.01 d	39.54±0.71 d
	25	10.10±0.18 b	0.36±0.01 c	42.80±0.16 c
	50	11.52±0.58 a	0.49±0.01 b	51.35±0.23 b
	100	11.96±1.11 a	0.63±0.00 a	56.90±0.16 a
14	0(CK)	2.17±0.02 b	0.81±0.03 c	238.60±1.08 b
	25	0.58±0.02 d	1.26±0.03 b	248.52±4.50 a
	50	1.18±0.02 c	1.34±0.01 a	173.26±2.28 c
	100	3.25±0.02 a	1.31±0.02 a	172.90±1.66 c
21	0(CK)	5.62±0.02 a	3.83±0.03 d	219.37±9.26 b
	25	0.01±0.00 d	4.26±0.01 b	171.98±3.73 c
	50	0.53±0.03 c	3.95±0.03 c	102.75±3.02 d
	100	1.22±0.01 b	5.03±0.03 a	266.12±4.27 a

由表 3 可知,CK 的 MDA 含量均显著低于 3 个镉处理。镉处理生菜 MDA 含量总体随着镉质量浓度的升高而升高,且随着处理时间的延长,MDA 含量增高。7 d 后,100 mg/L 镉处理 MDA 含量最高,比 CK 显著增加了 90.91%,3 个镉处理之间差异显著;14 d 后,50 mg/L 镉处理 MDA 含量最高,比 CK 显著增加了 65.43%,与 100 mg/L 镉处理差异不显著,与 25 mg/L 镉处理差异显著;21 d 后,100 mg/L 镉处理 MDA 含量仍为最高,比 CK 显著增加了 31.33%,3 个镉处理之间差异显著。

由表 3 还可知,7 d 后,镉处理生菜根系活力均高于 CK,且随着镉质量浓度的升高显著增强;14 d 后,随着镉质量浓度的升高,根系活力呈现减弱趋势,100 mg/L 镉处理根系活力最低,比 CK 显著下降 27.54%;21 d 后,根系活力表现出先下降后升高的规律,镉质量浓度为 100 mg/L 时最高,比 CK 显著提高 21.31%。

2.4 镉处理对生菜抗氧化酶活性的影响

镉处理对生菜抗氧化酶活性的影响见图 1。



图柱上标不同小写字母表示同一时间下各处理间差异达显著水平($P < 0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicate significant difference between treatments at same time periods ($P < 0.05$). The same below.

图 1 镉处理对生菜抗氧化酶活性的影响

Fig. 1 Effect of cadmium treatment on antioxidant enzyme activities in lettuce

如图 1 所示,7 d 后,在 25~100 mg/L 时,随着 镉质量浓度的升高,生菜 SOD 活性呈现上升趋势,

与 CK 差异显著,3 个镉处理之间差异不显著;14 d 后,与 CK 相比,25,50,100 mg/L 镉处理 SOD 活性分别显著下降 38.78%,50.44%,40.23%;21 d 后,随着镉质量浓度的升高,SOD 活性呈下降趋势,但与 CK 差异均不显著。

由图 1 可知,7 和 14 d 后,随着镉质量浓度的升高,生菜 POD 活性显著升高,100 mg/L 镉处理达到最高,是 CK 的 3.09 和 2.58 倍;21 d 后,随着镉质量浓度的升高,表现出先升高后下降的规律,当镉质量浓度为 50 mg/L 时,POD 活性最高,是 CK 的 3.15 倍。

从图 1 可以看出,生菜 CAT 活性随着时间推移表现出先下降后升高的规律。7 d 后,25 mg/L 镉处理 CAT 活性显著高于 CK 和其他镉处理,100 mg/L 镉处理与 CK 无显著差异;14 d 后,与 CK 相

比,镉处理 CAT 活性下降,且 100 mg/L 镉处理显著高于 25,50 mg/L 处理,但与 CK 差异不显著;21 d 后,100 mg/L 镉处理 CAT 活性显著高于 CK 和其他镉处理。

2.5 镉处理对生菜光合色素参数的影响

如表 4 所示,7 d 后,镉处理的叶绿素 a、b 以及叶绿素总量和类胡萝卜素含量均高于 CK,CK 与镉处理之间无显著差异;镉处理的叶绿素 a/b 均小于 CK,但与 CK 差异不显著。14 d 后,镉处理的叶绿素 a、b 以及叶绿素总量和类胡萝卜素含量随镉质量浓度的升高总体呈先降低后升高趋势,其中 25 mg/L 镉处理显著高于 CK;在 25~100 mg/L,叶绿素 a/b 随镉质量浓度的升高呈先升高后下降趋势,但镉处理均显著低于对照 CK。21 d 后,镉处理的生菜光合色素指标均显著低于对照 CK。

表 4 镉处理对生菜光合色素参数的影响

Table 4 Effect of cadmium treatment on photosynthetic pigment parameters of lettuce

处理时间/d Treatment time	镉质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Cadmium concentration	叶绿素 a 含量/ (mg·g ⁻¹) Chlorophyll a content	叶绿素 b 含量/ (mg·g ⁻¹) Chlorophyll b content	叶绿素总量/ (mg·g ⁻¹) Total chlorophyll	类胡萝卜素含量/ (mg·g ⁻¹) Carotenoid content	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b
7	0(CK)	0.51±0.02 a	0.14±0.00 a	0.66±0.02 a	0.14±0.01 a	3.57±0.07 a
	25	0.53±0.02 a	0.15±0.01 a	0.69±0.03 a	0.16±0.01 a	3.47±0.13 a
	50	0.54±0.06 a	0.16±0.01 a	0.70±0.07 a	0.16±0.02 a	3.42±0.11 a
	100	0.54±0.04 a	0.16±0.01 a	0.70±0.05 a	0.16±0.01 a	3.46±0.11 a
14	0(CK)	0.60±0.00 b	0.18±0.00 b	0.78±0.01 b	0.17±0.00 b	3.29±0.01 a
	25	0.65±0.00 a	0.22±0.00 a	0.87±0.00 a	0.18±0.00 a	2.90±0.07 c
	50	0.51±0.01 c	0.17±0.00 c	0.67±0.01 d	0.15±0.00 c	3.04±0.01 b
	100	0.52±0.01 c	0.18±0.00 b	0.70±0.02 c	0.15±0.00 c	2.89±0.01 c
21	0(CK)	0.87±0.01 a	0.21±0.00 a	1.07±0.01 a	0.29±0.01 a	4.12±0.03 a
	25	0.31±0.00 b	0.12±0.00 c	0.43±0.01 c	0.11±0.00 c	2.61±0.02 b
	50	0.27±0.01 c	0.11±0.00 d	0.39±0.01 d	0.11±0.00 c	2.52±0.02 c
	100	0.31±0.01 b	0.15±0.01 b	0.46±0.01 b	0.12±0.01 b	2.09±0.06 d

2.6 镉处理对生菜叶绿素荧光参数的影响

由图 2 可知,随着栽培时间的延长,生菜 F_v 逐步上升。镉处理的植株中心位置主要呈红色,边缘呈黄绿色,说明镉处理 F_v 较高部分主要集中在植株中心位置。7 d 后,CK 与镉处理之间 F_v 无显著差异;14 d 后,CK 的 F_v 显著低于镉处理,且 F_v 随着镉质量浓度的增加而增大;21 d 后,CK 的 F_v 最低,而 3 个镉处理之间无显著差异。

由表 5 可知,7 d 后,随镉质量浓度的升高,生菜冠层投影面积逐渐下降,25,50 mg/L 镉处理均大于 CK,但差异不显著,100 mg/L 镉处理冠层投影面积最小;14,21 d 后,随着镉质量浓度的升高,生菜冠层投影面积下降,且均小于 CK。7 d 后,镉处理 F_v/F_m 与 CK 无显著差异;14,21 d 后,镉处理 F_v/F_m 与 CK 相比显著下降。7 d 后,镉处理

F_v'/F_m' 较 CK 显著增加;14,21 d 后,镉处理 F_v'/F_m' 较 CK 显著降低。7 d 后,与 CK 相比,镉处理的 $\Phi PS II$ 均显著增加;14,21 d 后,与 CK 相比,镉处理 $\Phi PS II$ 均下降,其中 14 d 后以 50 mg/L 镉处理 $\Phi PS II$ 下降幅度最大,21 d 后 25,50,100 mg/L 镉处理的 $\Phi PS II$ 较 CK 分别显著降低 75%,71.43%,71.43%。7 d 后,NPQ 和 Rfd 随着镉质量浓度的升高均下降,且均小于 CK;14 d 后,NPQ 和 Rfd 随镉质量浓度的升高均表现出先升高后降低的趋势,镉质量浓度为 100 mg/L 时,NPQ 和 Rfd 均最低,与 CK 相比分别下降 21.43%和 24.32%;21 d 后,在 25~100 mg/L,NPQ 和 Rfd 随着镉质量浓度的升高逐渐升高,其中 100 mg/L 镉处理 NPQ 最高,显著高出 CK 28.18%,而 Rfd 比 CK 降低 6.96%,但差异不显著。

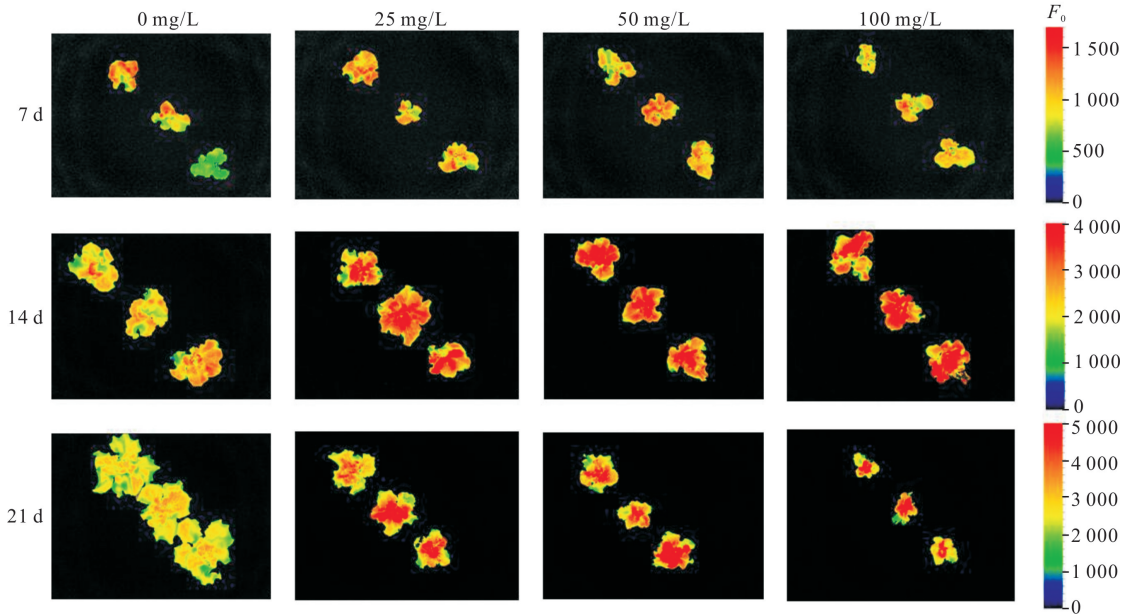
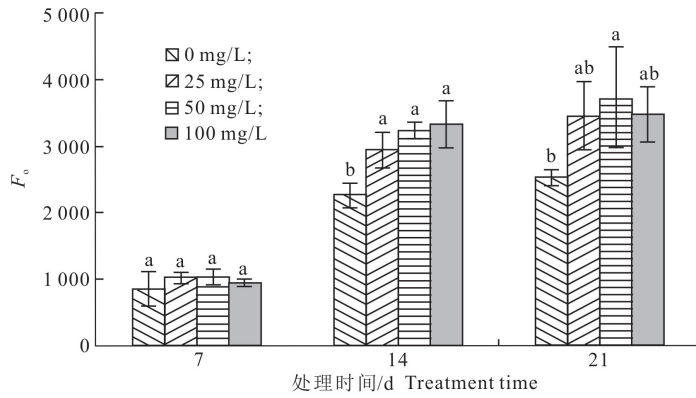


图 2 镉处理对生菜叶绿素荧光 F_0 的影响

Fig. 2 Effect of cadmium treatment on chlorophyll fluorescence F_0 in lettuce

表 5 镉处理对生菜叶绿素荧光参数的影响

Table 5 Effect of cadmium treatment on chlorophyll fluorescence parameters of lettuce

处理时间/d Treatment time	镉质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Cadmium concentration	冠层投影面积 Projection area of canopy	F_v/F_m	F_v'/F_m'	ΦPSII	NPQ	Rfd
7	0(CK)	6 690.00±410.51 ab	0.85±0.01 a	0.71±0.01 c	0.40±0.02 c	1.43±0.06 a	2.72±0.15 a
	25	7 400.67±253.78 a	0.85±0.01 a	0.74±0.01 b	0.46±0.03 b	1.07±0.12 b	2.46±0.08 ab
	50	6 969.00±339.40 ab	0.85±0.01 a	0.76±0.01 a	0.51±0.03 a	0.81±0.18 c	2.30±0.25 b
	100	6 488.67±615.54 b	0.85±0.00 a	0.77±0.01 a	0.52±0.02 a	0.68±0.08 c	2.21±0.05 b
14	0(CK)	14 482.00±1 031.44 a	0.84±0.01 a	0.69±0.01 a	0.38±0.02 a	1.40±0.08 bc	2.59±0.06 a
	25	13 401.33±4 402.18 a	0.79±0.02 b	0.61±0.01 b	0.37±0.03 ab	1.43±0.12 b	2.44±0.12 a
	50	11 197.00±838.44 a	0.75±0.01 c	0.53±0.02 c	0.29±0.02 c	1.76±0.17 a	2.53±0.16 a
	100	11 389.00±1 173.04 a	0.74±0.03 c	0.58±0.05 bc	0.33±0.03 bc	1.10±0.24 c	1.96±0.36 b
21	0(CK)	23 355.33±2 645.97 a	0.82±0.01 a	0.63±0.01 a	0.28±0.00 a	1.81±0.05 c	2.73±0.03 a
	25	11 017.33±2 065.18 b	0.64±0.04 b	0.38±0.04 b	0.07±0.02 b	2.03±0.04 bc	2.07±0.08 c
	50	8 747.67±2 034.74 b	0.62±0.04 b	0.35±0.05 b	0.08±0.02 b	2.19±0.22 ab	2.29±0.26 bc
	100	4 258.67±637.17 c	0.60±0.07 b	0.34±0.07 b	0.08±0.03 b	2.32±0.17 a	2.54±0.07 ab

3 讨论

3.1 镉处理对生菜生物量和镉富集的影响

生物量是植株在生境条件及自身适应下的综合

表现,本试验中,镉处理 7 和 14 d 后,生菜生物量随着镉质量浓度增加总体呈现“低促高抑”的现象,与张堃等^[16]在小麦上的研究结果相似,可能是因为低质量浓度镉促进了植株细胞分裂,体内合成酶活性

受到刺激,从而表现为促进植株生长。植株对重金属胁迫具有相应的耐受阈值,当重金属质量浓度超过其耐受阈值时,植株生长就会受到抑制,植株表现为生长缓慢、矮小乃至死亡^[17]。本试验中,100 mg/L 镉处理 7 和 14 d 后生菜生物量与 CK 相差较小,但 21 d 后镉处理生菜生长均明显被抑制,说明镉质量浓度越高抑制作用越强,可能是因为早期生菜生长过程对镉胁迫的响应较弱,随着植株快速增长其体内镉含量不断增加,植株代谢紊乱、胞间组织和光合系统受损严重,最终导致生长受限。

高质量浓度镉处理不仅会造成植株生长受限,还会影响植株对镉的吸收,最终对可食用部位造成污染,影响人体健康。《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)^[15]规定,叶类蔬菜镉限量为 0.2 mg/kg。本试验中,镉处理生菜的镉含量远高于可食用标准,且地下部镉含量积累明显高于地上部,这是由于根系直接与营养液中的镉进行接触并吸收,且根系本身对镉的吸收能力较强,因此根为镉富集最高的器官^[18]。而地上部镉积累较少的原因主要是为了降低大量镉积累而导致的毒害作用,根系通过在细胞壁上残留,以有机物或与无机配体结合等多种方式来减少向地上部运输^[19-20]。本试验还发现,随着镉质量浓度的增加,转运系数总体呈现先上升后下降的趋势,可能也是为了降低植株在高质量浓度镉胁迫下的毒害作用,通过降低地上部的镉富集从而起到保护植株的作用。

3.2 镉处理对生菜生理特性的影响

可溶性蛋白为一种渗透调节物质,植株可以通过提高可溶性蛋白含量来维持体内正常渗透压从而抵抗外界胁迫^[21]。本试验中,在 25~100 mg/L,随着镉质量浓度增加,生菜可溶性蛋白含量呈现上升趋势,说明植株可以通过增加体内可溶性蛋白含量从两方面对胁迫进行响应,一方面与 Cd^{2+} 形成镉结合蛋白,限制自由态的 Cd^{2+} 存在,降低镉的毒害作用;另一方面通过提高蛋白数量,增加细胞渗透势,维持细胞正常代谢,提高植株的抗逆性^[22]。当植株受胁迫时会在体内产生大量的活性氧自由基,造成膜脂过氧化并生成 MDA,其含量可反映植株体内细胞膜受损程度^[23]。本试验中,随着镉质量浓度增加及处理时间的延长,MDA 含量总体呈上升趋势,说明生菜细胞膜受到了损伤。

镉胁迫会诱导植株产生大量活性氧自由基(ROS),损害细胞正常代谢,植株体内的抗氧化酶就会启动并清除多余的活性氧自由基,防止膜脂过氧

化。其中 SOD 主要用于清除超氧阴离子自由基,POD 和 CAT 主要将 H_2O_2 分解为 O_2 和 H_2O ,从而保证植株正常生长^[24]。本试验中,生菜 SOD 活性随着镉处理时间的延长表现为先下降后上升,这与陈顺钰等^[25]的研究结果相一致。随着镉质量浓度增加,各时期 SOD 活性表现不一致,其中 7 d 后 SOD 活性逐渐升高,14 d 后 SOD 活性先下降后上升;21 d 后各处理间差异不显著,可能是因为早期植株受到镉胁迫时 SOD 活性被诱导,植株抗逆性提高,而长时间的镉胁迫反而抑制了 SOD 活性。本研究中,POD 活性总体随着镉质量浓度增加呈现上升趋势,这与田丹等^[7]的研究结果相似,表现为生菜叶片 POD 活性随镉质量浓度增加而受到明显诱导,起到减少活性氧对细胞膜脂的伤害作用。CAT 活性总体随镉质量浓度增加呈先下降后上升的趋势,表明 CAT 主要受高质量浓度镉胁迫的诱导。

3.3 镉处理对生菜光合特性的影响

叶绿素是光合色素的重要组成部分,其含量能反映光合作用的强度,其中叶绿素 a 起到光能捕获和电荷分离作用,叶绿素 b 起到光能吸收和传递作用,因此被广泛用于评价重金属胁迫对植株的损伤程度^[10,26]。本试验中,镉处理 7 d 后,各个叶绿素指标均高于 CK(除了叶绿素 a/b 之外),表明镉胁迫初期对植株光合作用具有一定促进作用;14 d 后,随着镉质量浓度的增加,叶绿素含量总体呈先上升后下降的趋势,表现为明显的“低促高抑”;21 d 后,镉处理的叶绿素含量均显著低于 CK,可能是因为生菜叶片中的镉大量积累后,抑制了合成叶绿素所需的叶绿素酸脂还原酶活性,或是使细胞中 ROS 增加,导致叶绿体中 O_2^{2-} 和 H_2O_2 增多,促进叶绿素降解^[27]。

PS II 是对逆境最敏感的部位,因此重金属对植株的胁迫可以通过叶绿素荧光诱导动力学变化来反映^[28]。 F_v 可以反映 PS II 受到的损害程度。本试验中,随着镉质量浓度增加, F_v 总体表现为上升趋势,说明镉质量浓度越高,对 PS II 的伤害越大。 F_v/F_m 为 PS II 最大光量子效率, F_v'/F_m' 为 PS II 有效光量子产量。本研究中, F_v/F_m 和 F_v'/F_m' 均随着镉处理时间的延长及其质量浓度增加总体呈下降趋势,表明随着镉胁迫的加重,植株的光能转化效率逐步下降。 $\Phi\text{PS II}$ 为 PS II 实际光量子效率,反映部分关闭的 PS II 反应中心的原初光能捕获效率,是重要的胁迫指标,本试验中,随着镉处理时间的延长, $\Phi\text{PS II}$ 逐步下降。非光化学淬灭系数(NPQ)作为胁迫

胁迫指标,主要反映 PS II 吸收的光能不能用于光合电子传递,而以热量形式散耗的部分,是一种植株的自我保护机制。本试验中,随着镉处理时间的延长,生菜 NPQ 总体呈上升趋势,表明受镉胁迫的程度越重,叶片热量散耗越高。Rfd 主要反映光合作用能力。本试验中,7~21 d 后,与 CK 相比,镉处理 Rfd 均明显下降,表明植株光合作用能力因长时间镉胁迫而降低。

4 结 论

1) 镉质量浓度对生菜生物量的“低促高抑”效应存在于栽培早期(前 14 d),后期随镉质量浓度增加植株生长明显受到抑制。地下部镉含量积累明显高于地上部,转运系数在 14 和 21 d 后随镉质量浓度的增加均呈先上升后下降趋势。

2) 随着镉处理时间的延长,生菜可溶性蛋白含量明显下降,MDA 含量较 CK 明显增加。7 d 时 SOD 活性随着镉质量浓度增大呈上升趋势,14 d 呈先下降后上升趋势,21 d 各处理间差异不显著;POD 活性总体随着镉质量浓度增加呈现上升趋势;CAT 活性总体随镉质量浓度增加呈现先下降后上升的趋势。

3) 前 14 d,低质量浓度(25 mg/L)镉能够促进叶绿素含量增大;14~21 d,随着时间的延长,镉处理叶绿素含量逐渐降低。处理 7~21 d 后,不同质量浓度镉对生菜叶绿素荧光参数的影响有差异,其中 100 mg/L 镉处理 21 d 后的冠层投影面积、 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 和 $\Phi PS II$ 均较低,而 F_o 和 NPQ 较高,说明镉处理时间越长、镉质量浓度越高,对 PS II 伤害越大,光能转化效率降低,光合作用下降。

[参考文献]

[1] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等.《全国土壤污染状况调查公报》解析[J].农业环境科学学报,2017,36(9):1689-1692.
Chen N C, Zheng Y J, He X F, et al. Analysis of the report on the national general survey of soil contamination [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(9): 1689-1692.

[2] 周蛟,韩盼盼,潘远智,等. Cd 胁迫对两种龙葵光合生理及叶绿素荧光特性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1): 26-34.
Zhou J, Han P P, Pan Y Z, et al. Effects of cadmium stress on photosynthetic physiology and chlorophyll fluorescence in *Solanum nigrum* and *Solanum americanum* [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(1): 26-34.

[3] Zhu X, Zou D, Huang Y, et al. Physiological responses of *Portulaca haitanensis* (Rhodophyta) to copper and cadmium ex-

posure [J]. Botanica Marina, 2017, 60(1): 27-37.

[4] Pavlovkin J, Artiushenko T, Syshchikov D, et al. Physiological responses to cadmium, nickel and their interaction in the seedlings of two maize (*Zea mays* L.) cultivars [J]. Agriculture, 2017, 62(4): 2016-2127.

[5] Hua L, Yang X, Liu Y J, et al. Spatial distributions, pollution assessment, and qualified source apportionment of soil heavy metals in a typical mineral mining city in China [J]. Sustainability, 2018, 10(9): 3115.

[6] 滕英,陈金凤,张宇豪,等.福建省东部代表性区域农用地镉污染状况调查及风险评估[J].福建农业科技,2021,52(11):80-86.
Teng Y, Chen J F, Zhang Y H, et al. Investigation and risk assessment of cadmium pollution in agricultural land in the eastern part of Fujian Province [J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2021, 52(11): 80-86.

[7] 田丹,任艳芳,王艳玲,等.镉胁迫对生菜种子萌发及幼苗抗氧化酶系统的影响[J].北方园艺,2018(2):15-21.
Tian D, Ren Y F, Wang Y L, et al. Effect of cadmium stress on seed germination and seedling antioxidant enzyme system in lettuce [J]. Northern Gardening, 2018(2): 15-21.

[8] 唐希望,吉普辉,同延安,等.生菜地上部镉累积规律及其与矿物质元素浓度的关系[J].农业环境科学学报,2018,37(5):860-867.
Tang X W, Ji P H, Tong Y A, et al. Cadmium accumulation in above-ground parts of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and its relationship between mineral nutrients concentration [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(5): 860-867.

[9] 林琳,旦增卓嘎,吴玲玲.铅、镉单一及复合胁迫对生菜幼苗抗氧化酶及亚细胞结构的毒性效应[J].生态毒理学报,2022,17(2):337-348.
Lin L, Tenzin Dolker, Wu L L. Toxicity of single and combined Pb and Cd stress on antioxidant enzymes and subcellular structure of lettuce [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2022, 17(2): 337-348.

[10] 贾月慧,韩莹琰,刘杰,等.生菜对镉胁迫的生理响应及体内镉的累积分布[J].农业环境科学学报,2018,37(8):1610-1618.
Jia Y H, Han Y Y, Liu J, et al. Physiological adaptations to cadmium stresses and cadmium accumulation in lettuce [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(8): 1610-1618.

[11] 生态环境部,国家市场监督管理总局.农田灌溉水质标准:GB 5084—2021[S].北京:中国环境出版集团,2021.
Ministry of Ecology and Environment, State Administration for Market regulation. Water quality standards for agricultural irrigation: GB 5084—2021 [S]. Beijing: China Environmental Publishing Group, 2021.

[12] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2006.
Wang X K. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

- [13] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
Zhang Z L, Qu W J. Experimental guidance in plant physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [14] 张宪政. 植物叶绿素含量测定: 丙酮乙醇混合液法 [J]. 辽宁农业科学, 1986(3): 26-28.
Zhang X Z. Plant chlorophyll content determination: acetone ethanol mixture method [J]. Liaoning Agricultural Science, 1986(3): 26-28.
- [15] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准: 食品中污染物限量: GB 2762—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. National food safety standard: limit of pollutants in food: GB 2762—2022 [S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2022.
- [16] 张堃, 许亚芳, 刘红恩, 等. 不同品种冬小麦幼苗生长对镉响应的差异研究 [J]. 山东农业科学, 2022, 54(7): 104-112.
Zhang K, Xu Y F, Liu H E, et al. Difference Study of response of different winter wheat seedling growth to cadmium [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(7): 104-112.
- [17] 熊敏先, 吴迪, 许向宁, 等. 土壤重金属镉对高等植物的毒性效应研究进展 [J]. 生态毒理学报, 2021, 16(6): 133-149.
Xiong M X, Wu D, Xu X N, et al. Advances in toxic effects of soil heavy metal cadmium on higher plants [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, 16(6): 133-149.
- [18] 张茹, 赵宝平, 王永宁, 等. 不同镉浓度对 3 个燕麦品种光合特性及镉富集转运系数的影响 [J]. 草地学报, 2022, 30(8): 2089-2099.
Zhang R, Zhao B P, Wang Y N, et al. Effect of different cadmium concentrations on photosynthetic characteristics and cadmium enrichment transport coefficient of three oat varieties [J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(8): 2089-2099.
- [19] 贾茵, 刘才磊, 兰晓悦, 等. 外源水杨酸对镉胁迫下小报春幼苗生长及生理特性的影响 [J]. 草地学报, 2020, 28(5): 1346-1354.
Jia Y, Liu C L, Lan X Y, et al. Effect of exogenous salicylic acid on growth and physiological characteristics of small-spring seedlings under cadmium stress [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(5): 1346-1354.
- [20] 李文学, 陈同斌. 超富集植物吸收富集重金属的生理和分子生物学机制 [J]. 应用生态学报, 2003(4): 627-631.
Li W X, Chen T B. Physiological and molecular biological mechanisms of heavy metals by super enriched plants [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003(4): 627-631.
- [21] 黄秋婵, 黎晓峰, 李耀燕. 镉对水稻的毒害效应及耐性机制的研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2007(7): 1971-1974.
Huang Q C, Li X F, Li Y Y. Progress on the toxic effect and tolerance mechanism of cadmium in rice [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007(7): 1971-1974.
- [22] 刘慧, 张崇洋, 刘世亮, 等. 干旱胁迫对屋顶绿化植物小叶黄杨叶片抗氧化特性的影响 [J]. 林业与环境科学, 2022, 38(3): 86-93.
Liu H, Zhang C Y, Liu S L, et al. Effects of drought stress on antioxidant properties of roof greening plant *Buxus microphylla* leaves [J]. Forestry and Environmental Science, 2022, 38(3): 86-93.
- [23] Thakur S, Singh L, Zularisam A W, et al. Lead induced oxidative stress and alteration in the activities of antioxidative enzymes in rice shoots [J]. Biologia Plantarum, 2017, 61(3): 595-598.
- [24] Rahoui S, Chaoui A, Ferjani E E. Membrane damage and solute leakage from germinating pea seed under cadmium stress [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 178: 1128-1131.
- [25] 陈顺钰, 韩航, 薛凌云, 等. Pb、Cd 和酸胁迫对枫香种子萌发、幼苗生长及体内抗氧化酶活性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 647-655.
Chen S Y, Han H, Xue L Y, et al. Effects of Pb, Cd, and acid stress on seed germination, seedling growth, and antioxidant enzyme activities of *Liquidambar formosana* [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(4): 647-655.
- [26] 胡国涛, 杨兴, 陈小米, 等. 速生树种竹柳对重金属胁迫的生理响应 [J]. 环境科学学报, 2016, 36(10): 3870-3875.
Hu G T, Yang X, Chen X M, et al. Physiological responses of bamboo-willow plants to heavy metal stress [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(10): 3870-3875.
- [27] 自海云, 李琬婷, 程小毛, 等. 镉胁迫对洋常春藤叶绿素荧光特性的影响 [J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2018, 38(5): 7-12.
Zi H Y, Li W T, Cheng X M, et al. Effects of cadmium stress on chlorophyll fluorescence characteristics of *Hedera helix* [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2018, 38(5): 7-12.
- [28] 董名扬, 孙瑶, 冯晓晖, 等. 两种生态型香根草对镉的耐受和积累特性比较 [J]. 西北植物学报, 2022, 42(8): 1330-1338.
Dong M Y, Sun Y, Feng X H, et al. Comparative tolerance and accumulation characteristics of cadmium in two vetiver grass ecotype [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2022, 42(8): 1330-1338.