

## 镉胁迫下不同镉富集能力叶菜类蔬菜的品质比较

詹文雨, 王海娟, 王宏镔

### 引用本文:

詹文雨, 王海娟, 王宏镔. 镉胁迫下不同镉富集能力叶菜类蔬菜的品质比较[J]. 农业环境科学学报, 2026, 415(1): 50-60.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2025-0066>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 东北设施叶菜类蔬菜镉铅污染安全生产分区研究

李想, 龙振华, 朱彦谚, 杨映, 李明堂

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2239-2248 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0315>

#### 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>

#### 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>

#### 绿肥作物对云南旱地土壤镉有效性的影响

王赟, 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>

#### 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

詹文雨, 王海娟, 王宏宾. 镉胁迫下不同镉富集能力叶菜类蔬菜的品质比较[J]. 农业环境科学学报, 2026, 45(1): 50–60.

ZHAN W Y, WANG H J, WANG H B. Quality comparison of leafy vegetables with different cadmium-accumulating abilities under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2026, 45(1): 50–60.



开放科学 OSID

# 镉胁迫下不同镉富集能力叶菜类蔬菜的品质比较

詹文雨, 王海娟, 王宏宾\*

(昆明理工大学环境科学与工程学院/云南省土壤固碳与污染控制重点实验室, 昆明 650500)

**摘要:**为探究镉(Cd)胁迫下不同Cd富集能力叶菜类蔬菜的品质,采用室内盆栽试验方法,研究了土壤不同Cd含量[0(CK)、0.5、2.0、5.0、10 mg·kg<sup>-1</sup>]处理下,低Cd富集茼蒿和高Cd富集菠菜对Cd的富集特征以及叶片光合色素、可溶性糖、抗氧化类物质、可溶性蛋白和总游离氨基酸的变化。结果表明:随着土壤Cd含量的增加,2种蔬菜体内的Cd含量显著增加,菠菜对Cd的富集能力显著高于茼蒿,在土壤Cd 2.0 mg·kg<sup>-1</sup>处理下,茼蒿地上部Cd含量[(0.19±0.01)mg·kg<sup>-1</sup>]满足食品安全国家标准。2种蔬菜不同部位对Cd的富集能力存在显著差异,茼蒿表现为根>茎>叶,菠菜为叶>根>茎。土壤Cd 0.5 mg·kg<sup>-1</sup>处理下,2种蔬菜的光合色素含量均比CK显著增加,但Cd 10 mg·kg<sup>-1</sup>处理时,茼蒿的叶绿素a、类胡萝卜素、可溶性糖和总叶绿素含量显著下降,降幅为16.95%~71.97%,菠菜则与CK无显著差异。Cd 10 mg·kg<sup>-1</sup>处理时,2种蔬菜的总黄酮、总游离氨基酸和可溶性蛋白含量均显著下降,但在Cd 0.5~5.0 mg·kg<sup>-1</sup>处理时,茼蒿的可溶性糖、维生素C、总黄酮、总游离氨基酸和可溶性蛋白含量与CK持平或显著增加,菠菜的总黄酮在Cd 2.0 mg·kg<sup>-1</sup>和5.0 mg·kg<sup>-1</sup>处理时则出现显著下降(18.59%和33.32%)。研究表明,高含量Cd胁迫能显著降低低Cd富集茼蒿的品质,为保持其品质不受影响,土壤Cd含量必须控制在2.0 mg·kg<sup>-1</sup>以下。

**关键词:**叶菜类蔬菜;镉;抗氧化物质;可溶性蛋白;总游离氨基酸

中图分类号:S63;X173;X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2026)01-0050-11 doi:10.11654/jaes.2025-0066

## Quality comparison of leafy vegetables with different cadmium-accumulating abilities under cadmium stress

ZHAN Wenyu, WANG Haijuan, WANG Hongbin\*

(Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology/Yunnan Key Lab of Soil Carbon Sequestration and Pollution Control, Kunming 650500, China)

**Abstract:** In order to investigate the quality of leafy vegetables with different cadmium (Cd) accumulation abilities under Cd stress, a pot experiment was carried out to study the characteristics of Cd accumulation in low-Cd-accumulating *Glebionis coronaria* (L.) Cass. ex Spach and high-Cd-accumulating *Spinacia oleracea* L., as well as the changes of photosynthetic pigments, soluble sugars, antioxidative substances, soluble proteins and total free amino acids in the leaves under different soil Cd concentrations[0(CK), 0.5, 2.0, 5.0, 10 mg·kg<sup>-1</sup>]. The results showed that the Cd content in two vegetables significantly increased with the increment in soil Cd concentration, and *S. oleracea* exhibited a higher Cd accumulation capacity than *G. coronaria*. Under the soil Cd treatment of 2.0 mg·kg<sup>-1</sup>, the Cd content [(0.19±0.01)mg·kg<sup>-1</sup>] in the aboveground part of *G. coronaria* met the national food safety standards. Significant differences in Cd accumulation were observed among different parts of the two vegetables. *G. coronaria* showed the pattern of root > stem > leaf, while *S. oleracea* showed the pattern of leaf > root > stem. Under the soil Cd treatment of 0.5 mg·kg<sup>-1</sup>, the contents of photosynthetic pigments in both vegetables were significantly higher than those in the CK. However, under the soil Cd treatment of 10 mg·kg<sup>-1</sup>, the contents of chlorophyll a,

收稿日期:2025-01-19 录用日期:2025-04-16

作者简介:詹文雨(1997—),女,云南曲靖人,硕士研究生,研究方向为重金属污染生态。E-mail:y1989104710@163.com

\*通信作者:王宏宾 E-mail:whb1974@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目(31960264)

Project supported: National Natural Science Foundation of China(31960264)

carotenoids, soluble sugar and total chlorophylls in *G. coronaria* decreased significantly with a reduction range of 16.95%–71.97%, while *S. oleracea* showed no significant difference from the CK. Under the soil Cd treatment of  $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , the contents of total flavonoids, total free amino acids and soluble protein in the two vegetables significantly decreased, but the contents of soluble sugar, vitamin C, total flavonoids, total free amino acids and soluble proteins in *G. coronaria* were the same as or significantly higher than those in the CK under soil Cd treatments of  $0.5\text{--}5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . The contents of total flavonoids in *S. oleracea* significantly decreased by 18.59% and 33.32% under the soil Cd treatments of  $2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively. Therefore, high concentration Cd stress can significantly reduce the quality of low-Cd-accumulating *G. coronaria*. To maintain its quality of *G. coronaria*, the soil Cd concentration must be controlled within  $2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  under the experimental conditions.

**Keywords:** leafy vegetables; cadmium (Cd); antioxidative substances; soluble protein; total free amino acid

蔬菜是人类不可缺少的食物,是人体生长所需营养物质的重要来源。人体每日摄入的叶菜类蔬菜,可为人类提供必需的营养物质<sup>[1]</sup>。作为蔬菜中比较常见的种类,叶菜类蔬菜中的钾有助于维持血压健康,膳食纤维可降低血液中的胆固醇水平,并可能降低罹患心脏病的风险<sup>[2]</sup>。随着人们对叶菜类蔬菜的需求日益增加,其食品安全问题引起了广泛关注,与根茎类和瓜果类蔬菜相比,叶菜类蔬菜对重金属的吸收能力更强,土壤重金属超标问题也直接影响叶菜类蔬菜的品质及人体健康<sup>[3]</sup>。2014年4月发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国土壤总的点位超标率为16.1%,其中Cd点位超标率为7%,居无机污染物之首。Cd具有高移动性和易积累性,易对人体和动物健康构成严重威胁<sup>[4]</sup>。Cd在土壤中积累,通过植物根系吸收并经食物链进入人体,进而损害人体健康<sup>[5]</sup>。过量的Cd会降低叶菜类蔬菜对大量、微量营养元素的吸收,使可食用部分的品质恶化<sup>[6]</sup>。吕金印等<sup>[7]</sup>对5种叶菜类蔬菜(青菜、塌地乌、小白菜、菠菜及芥菜)进行高浓度Cd处理下的水培( $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )与土培( $70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )实验,结果表明5种蔬菜的维生素C和可溶性糖含量均下降;杜小平等<sup>[8]</sup>发现 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Cd胁迫显著降低了高积累青菜品种(KR605)可食用部位维生素C的含量,但显著增加了青菜可食部位硝酸盐含量;Li等<sup>[9]</sup>的研究表明千穗谷中黄酮类化合物的代谢活性与Cd含量高度相关,对Cd耐受性有显著影响;Zhu等<sup>[10]</sup>的研究表明Cd胁迫影响藿香蓟和野苘蒿这2种Cd富集植物体内游离氨基酸的积累,在 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Cd处理下野苘蒿体内的总游离氨基酸含量显著下降。因此,高含量Cd进入蔬菜体内会显著降低蔬菜品质。

已有学者揭示了不同Cd胁迫水平对高积累叶菜类蔬菜抗氧化类物质和可溶性蛋白的影响,以及白菜低Cd积累品种和高Cd积累品种叶片、茎和根中Cd的亚细胞分布和化学形态<sup>[11]</sup>。低Cd积累蔬菜被认为

是Cd污染区种植结构调整的首选种类,但随着土壤中Cd含量的增加其品质是否会受到影响,目前还少见文献报道。Cd富集能力强的叶菜类蔬菜势必会品质降低,但对于Cd污染区提倡种植的低Cd积累蔬菜的品质会不会受到影响、什么样的土壤Cd含量会影响其品质、同样的Cd污染土壤对高Cd积累蔬菜品质的影响又有多大,目前这方面的比较研究尚少。

本试验在14种叶菜类蔬菜中筛选出地上部对Cd富集能力存在显著差异的2个种类(低富集苘蒿和高富集菠菜),研究土壤不同Cd含量对其生长状况、Cd富集特征、光合色素、抗氧化类物质、可溶性蛋白和总游离氨基酸含量的影响,以期对Cd污染区叶菜类蔬菜的合理种植提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤分别采自云南省红河哈尼族彝族自治州个旧市锡多金属矿区污染土壤和云南省昆明市呈贡区昆明理工大学恬园(清洁土壤),由于矿区污染土壤栽培植物时容易板结,因此在供试土壤中加入少许腐殖土(原土与腐殖土的质量比为8:1),其基本理化性质如表1所示。14种叶菜类蔬菜的种子购于云南省红河哈尼族彝族自治州个旧市当地种子市场。

### 1.2 试验设计

#### 1.2.1 2种不同Cd富集能力叶菜类蔬菜的筛选

从矿区采回的供试土壤样品经风干粉碎后过2 mm筛,为防止土壤板结,按上述8:1的比例在污染土中加入腐殖土,混匀后装入花盆中播撒14种叶菜类蔬菜的种子,并设置3组平行试验,花盆随机排列,共计42盆。盆栽试验于2023年5—7月在昆明理工大学呈贡校区温室室内自然光下进行,昼夜温差范围为 $15\text{--}28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。种植期间,定期检查花盆土壤湿度并以此确定浇水频次,使土壤含水量约为田间最大含水量的60%,整个种植过程不额外施加肥料。播种60 d后,

表1 供试土壤的基本理化性质( $n=3$ )Table 1 Basic physical and chemical properties of the soil ( $n=3$ )

指标 Item	未加腐殖土的 污染土壤	加腐殖土后的 污染土壤	清洁土壤
	Polluted soil without humus	Polluted soil with humus	
pH	6.96±0.02	6.92±0.02	6.15±0.04
阳离子交换量/( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	5.84±0.10	8.97±0.57	13.50±0.60
有机质/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	25.33±0.50	47.91±1.37	68.17±8.92
总氮/%	0.07±<0.01	0.10±0.01	0.12±0.01
有效磷/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	132±1	143±4	35±3
总磷/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	1 196±192	1 432±68	746±53
总Cd/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	2.37±0.05	2.19±0.05	未检出
DTPA-Cd/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	1.42±0.07	1.32±0.06	未检出
总钾/%	1.53±0.06	1.60±0.17	0.97±0.03
速效钾/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	332±3	611±37	246±9

收获蔬菜鲜样待测。

### 1.2.2 Cd胁迫下不同Cd富集能力叶菜类蔬菜品质的比较研究

土壤Cd含量设置为0(CK)、0.5、2.0、5.0、10  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,以 $\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 水溶液的形式与清洁土壤混合均匀,放置阴凉处陈化60 d,晾干后备用。将供试土壤装入塑料盆,每盆1 kg。将低Cd富集茼蒿和高Cd富集菠菜进行播种,每一土壤Cd含量处理重复3次,定植后每盆6株,茼蒿和菠菜数量一致,塑料盆随机排列,共计30盆。湿度控制同1.2.1,种植时间为2024年5—7月,昼夜温差范围为18~28  $^{\circ}\text{C}$ ,在播种后50 d收获。

### 1.3 生长状态指标、光合色素及品质指标的测定

蔬菜收获时采用整株挖掘法,将植株完整挖出,小心清除附着土壤,先后用自来水和去离子水清洗,再用含20  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙二胺四乙酸二钠( $\text{EDTA-Na}_2$ )的去离子水溶液浸泡15 min,以去除植物表面附着的重金属和其他污染物,最后用去离子水清洗干净,在阴凉处用滤纸吸干叶菜类蔬菜表面的水分后测定每一处理的株高、鲜质量和叶长(每一株从顶端向下数第3片和第4片叶子长度的平均值)。

分别称取吸干表面水分后蔬菜的根0.08~1.70 g、茎0.41~2.63 g、叶0.40~3.55 g,剪碎后放入消化管中加 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (5:1, V/V)加热消解,用火焰原子吸收光谱法(FAAS, AA240FS, Varian, 美国)测定其根、茎、叶Cd含量。

叶片光合色素的测定采用95%乙醇浸提法<sup>[12]</sup>,蔬菜维生素C含量测定采用2,6-二氯靛酚比色法<sup>[13]</sup>,可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法<sup>[14]</sup>,可溶性蛋白含量

测定采用考马斯亮蓝G-250比色法<sup>[15]</sup>,总黄酮的测定参考《枸杞中黄酮类化合物的测定》(NY/T 3903—2021),总游离氨基酸含量测定采用茚三酮显色法<sup>[15]</sup>。

### 1.4 数据分析

实验数据采用Excel进行整理,运用SPSS 25.0软件进行单因素和双因素方差分析,平均数之间的多重比较采用最小显著差数法(LSD),显著性差异水平 $\alpha$ 取值为0.05,极显著差异水平 $\alpha$ 取值为0.01。使用Origin 2021绘图。

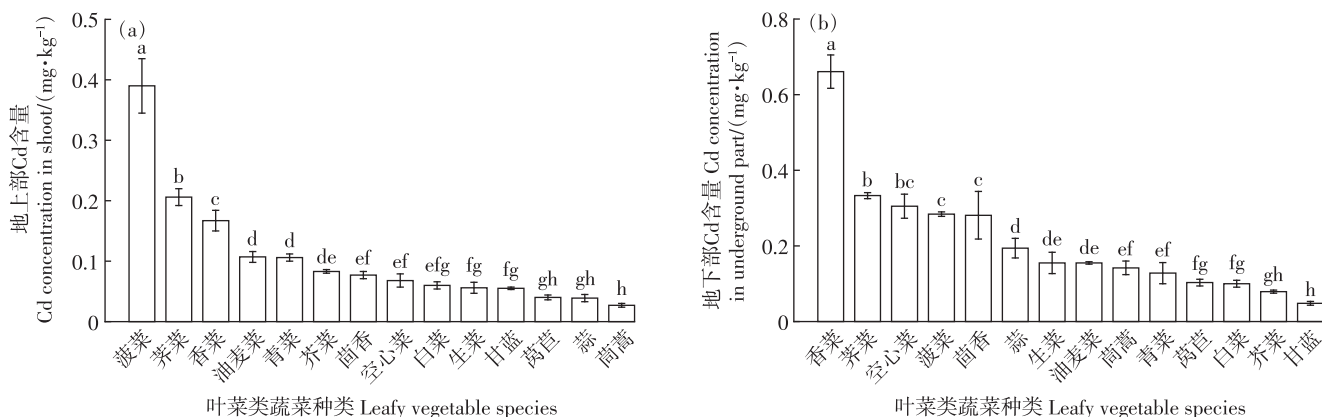
## 2 结果与分析

### 2.1 不同Cd富集能力叶菜类蔬菜的筛选

供试的14种叶菜类蔬菜的Cd含量存在明显差异(图1)。菠菜地上部Cd含量显著高于其余13种蔬菜,为(0.39±0.04)  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。地上部Cd含量最低的是茼蒿,为(0.03±<0.01)  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,显著低于除茼蒿和蒜以外的其他11种蔬菜( $P<0.05$ ,图1a)。根据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022),叶菜类蔬菜可食部位Cd含量标准限值为0.2  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (以鲜质量计),在供试叶菜类蔬菜中,菠菜可食部位(即地上部)Cd含量超标。由图1b可知,不同叶菜类蔬菜的地下部Cd含量也存在明显差异,变化范围为0.05~0.66  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,整体高于叶菜类蔬菜地上部Cd含量。菠菜地下部的Cd含量[(0.28±0.01)  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]显著低于香菜和芥菜( $P<0.05$ )。如表2所示,不同叶菜类蔬菜对Cd的富集和转运存在显著差异。菠菜的Cd富集系数(地上部Cd含量/土壤Cd含量)为0.18±0.02,显著高于其他蔬菜( $P<0.05$ ),而茼蒿的Cd富集系数(0.01±<0.01)最低。从转移系数(地上部Cd含量/根部Cd含量)看,甘蓝和芥菜表现出较强的Cd转运能力,其转移系数均大于1。相比之下,茼蒿对Cd的转运能力最弱,转移系数仅为0.20±<0.01。综合地上部Cd含量、Cd富集系数和转移系数,选择菠菜和茼蒿作为高、低Cd积累蔬菜进行下一步研究。

### 2.2 不同Cd含量处理下2种叶菜类蔬菜的生长状况

如表3所示,不同土壤Cd含量处理对菠菜和茼蒿生长的影响存在显著差异。与CK相比,0.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd处理显著促进了菠菜的生长,茼蒿的株高在0.5~10  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd处理下均显著降低( $P<0.05$ )。在0.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd处理下,茼蒿的根部生物量显著下降,而茎部生物量与CK无显著差异;同时,其叶片生物量和叶长分别显著增加了11.49%和39.81%。相比之



不同字母表示不同种类蔬菜 Cd 含量存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。  
Different letters indicate a significant difference in Cd concentrations among different vegetable species ( $P < 0.05$ ).

图 1 14 种叶菜类蔬菜的 Cd 含量

Figure 1 Cd concentrations in 14 leafy vegetables

下,菠菜的根、茎、叶生物量及叶长均较CK显著增加 ( $P < 0.05$ )。此外,10 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理对2种蔬菜的生长均表现出明显抑制:菠菜表现为植株矮小、叶片黄化,而茼蒿叶片也变小、变黄(图2)。具体而言,在10 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理下,茼蒿的根、茎、叶生物量较CK分别显著降低57.41%、42.14%和33.91% ( $P < 0.05$ );菠菜的根和叶生物量与CK无显著差异,但其茎生物量显著下降 ( $P < 0.05$ )。

表 2 14 种叶菜类蔬菜的 Cd 富集系数和转移系数

Table 2 Cd bioconcentration factors and translocation factors of 14 leafy vegetables

蔬菜种类 Vegetable species	富集系数 Bioconcentration factor (BCF)	转移系数 Translocation factor (TF)
菠菜 ( <i>Spinacia oleracea</i> L.)	0.18±0.02a	0.83±0.10b
芥菜 ( <i>Capsella bursa-pastoris</i> L.)	0.09±0.01b	0.62±0.04c
香菜 ( <i>Coriandrum sativum</i> L.)	0.08±0.010c	0.38±0.04d
油麦菜 ( <i>Lactuca sativa</i> L.)	0.05±<0.01d	0.98±0.09ab
青菜 [ <i>Brassica rapa</i> var. <i>chinensis</i> (L.) Kitam.]	0.05±<0.01d	0.86±0.24b
芥菜 ( <i>Brassica juncea</i> Coss)	0.04±<0.01de	1.05±0.07a
茴香 ( <i>Foeniculum vulgare</i> Mill)	0.04±<0.01ef	0.37±0.03de
空心菜 ( <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk)	0.03±<0.01ef	0.37±0.03de
白菜 ( <i>Brassica rapa</i> var. <i>glabra</i> Regel)	0.03±<0.01efg	0.22±0.03de
生菜 ( <i>Lactuca sativa</i> L.)	0.02±<0.01fg	0.61±0.10c
茼蒿 ( <i>Lactuca sativa</i> L.)	0.02±<0.01gh	0.38±0.13d
蒜 ( <i>Allium sativum</i> L.)	0.02±<0.01gh	0.20±0.04de
茼蒿 [ <i>Glebionis coronaria</i> (L.) Cass. ex Spach]	0.01±<0.01h	0.20±<0.01e
甘蓝 ( <i>Brassica napus</i> L.)	0.02±<0.01fg	1.14±0.12a

注: 同列不同小写字母表示 14 种蔬菜的 Cd 富集系数或转移系数存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate a significant difference ( $P < 0.05$ ) in Cd bioconcentration factors or translocation factors among the 14 vegetable species.

### 2.3 不同 Cd 含量处理下 2 种叶菜类蔬菜对 Cd 的富集

随着土壤 Cd 含量的增加,2 种蔬菜对 Cd 的富集存在显著差异(图 3)。在 10 mg·kg<sup>-1</sup> Cd 处理下,茼蒿和菠菜根、茎、叶部 Cd 含量均达到最大值。2 种蔬菜各部位 Cd 含量也存在显著差异,茼蒿表现为根>茎>叶,菠菜则为叶>根>茎 ( $P < 0.05$ )。在 5.0 mg·kg<sup>-1</sup> Cd 处理下,茼蒿叶片中 Cd 含量达(0.33±0.01)mg·kg<sup>-1</sup>,其地上部(可食部位)高达(0.41±0.03)mg·kg<sup>-1</sup>(图 3d),均高于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)中规定的限值(0.2 mg·kg<sup>-1</sup>,以鲜质量计),菠菜除 CK 外则均超过该限值,在农业生产中必须引起重视。但在 2.0 mg·kg<sup>-1</sup> Cd 处理下,茼蒿地上部 Cd 含量[(0.19±0.01) mg·kg<sup>-1</sup>]满足食品安全国家标准。由表 4 可知,茼蒿的 Cd 富集系数和转移系数均小于菠菜,在土壤不同 Cd 含量处理下,茼蒿的转移系数无显著差异 ( $P > 0.05$ ),而菠菜的转移系数则随着土壤 Cd 含量的升高而增加,在 10 mg·kg<sup>-1</sup> Cd 处理下达到最大值 1.31±0.25 ( $P < 0.05$ )。

### 2.4 2 种不同 Cd 富集能力叶菜类蔬菜光合色素和可溶性糖含量

2 种蔬菜的光合色素含量均随土壤 Cd 含量的增加呈现先增后降的趋势,菠菜的光合色素含量水平显著高于茼蒿(图 4)。在 0.5 mg·kg<sup>-1</sup> Cd 处理下,2 种蔬菜的光合色素含量均比 CK 显著增加,菠菜的叶绿素 a 含量在 2.0 mg·kg<sup>-1</sup> Cd 处理下仍显著高于 CK,但茼蒿此时与 CK 无显著差异 ( $P > 0.05$ ,图 4a)。在 10 mg·kg<sup>-1</sup> Cd 处理下,茼蒿的叶绿素 a、类胡萝卜素、总叶绿素含量显著低于 CK,但菠菜则与 CK 无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

2 种蔬菜的可溶性糖含量随土壤 Cd 含量升高呈

表3 Cd处理对2种叶菜类蔬菜生长的影响

Table 3 Effects of Cd treatments on the growth of two leafy vegetables

蔬菜种类 Vegetable species	土壤Cd含量 Soil concentration of Cd/(mg·kg <sup>-1</sup> )	生物量(鲜质量)Biomass(fresh weight)/(g·plant <sup>-1</sup> )			叶长 Leaf length/cm	株高 Plant height/cm
		根Root	茎Stem	叶Leaf		
茼蒿 <i>Glebionis coronaria</i> (L.) Cass. ex Spach	CK	0.54±0.09a	1.59±0.10a	1.74±0.20b	5.20±0.18c	29.8±4.52a
	0.5	0.38±0.01b	1.49±0.09ab	1.94±0.04a	7.27±0.04a	23.7±3.89b
	2.0	0.38±0.01b	1.27±0.04b	1.54±0.04c	6.10±0.15b	23.0±1.69b
	5.0	0.32±0.01bc	1.25±0.26b	1.32±0.02d	5.27±0.12c	23.7±0.71b
	10	0.23±0.02c	0.92±0.10c	1.15±0.04d	4.28±0.16d	21.4±0.18b
菠菜 <i>Spinacia oleracea</i> L.	CK	0.13±0.03c	1.33±0.41b	1.65±0.33b	6.55±0.03b	15.4±1.10b
	0.5	0.42±0.03a	2.31±0.12a	3.58±0.68a	8.56±0.85a	19.2±0.51a
	2.0	0.20±0.05b	1.14±0.08b	1.84±0.13b	6.68±0.75b	16.0±1.98b
	5.0	0.17±0.01bc	0.92±0.18bc	1.70±0.36b	6.94±0.38b	14.9±1.24b
	10	0.14±0.03c	0.63±0.19c	1.23±0.49b	6.03±0.05b	12.0±1.31c

注: 同列不同小写字母表示同种蔬菜的同一生长指标在不同Cd含量处理下存在显著差异(P<0.05)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate a significant difference in the same growth index among different Cd concentration treatments in the same vegetable (P<0.05). The same below.

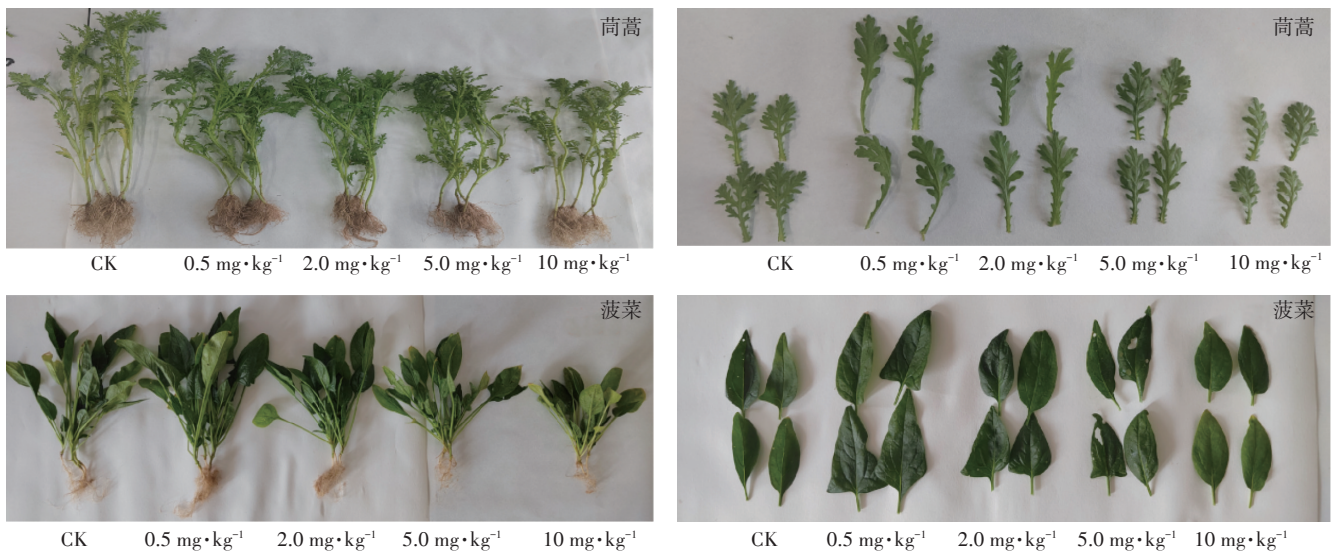


图2 Cd处理对茼蒿和菠菜生长的影响

Figure 2 Effects of Cd treatments on growth of *G. coronaria* and *S. oleracea*

现先升后降的趋势,且对茼蒿的影响显著高于菠菜(图4e)。与CK相比,茼蒿的可溶性糖含量在2.0 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理下显著增加,在10 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理下达到最小值,降低了71.97%,而菠菜在0.5、2.0 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理下可溶性糖含量均比CK显著增加(P<0.05),但在5.0、10 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理下与CK无显著差异(P>0.05),说明高含量Cd处理下菠菜的可溶性糖含量能够维持正常。

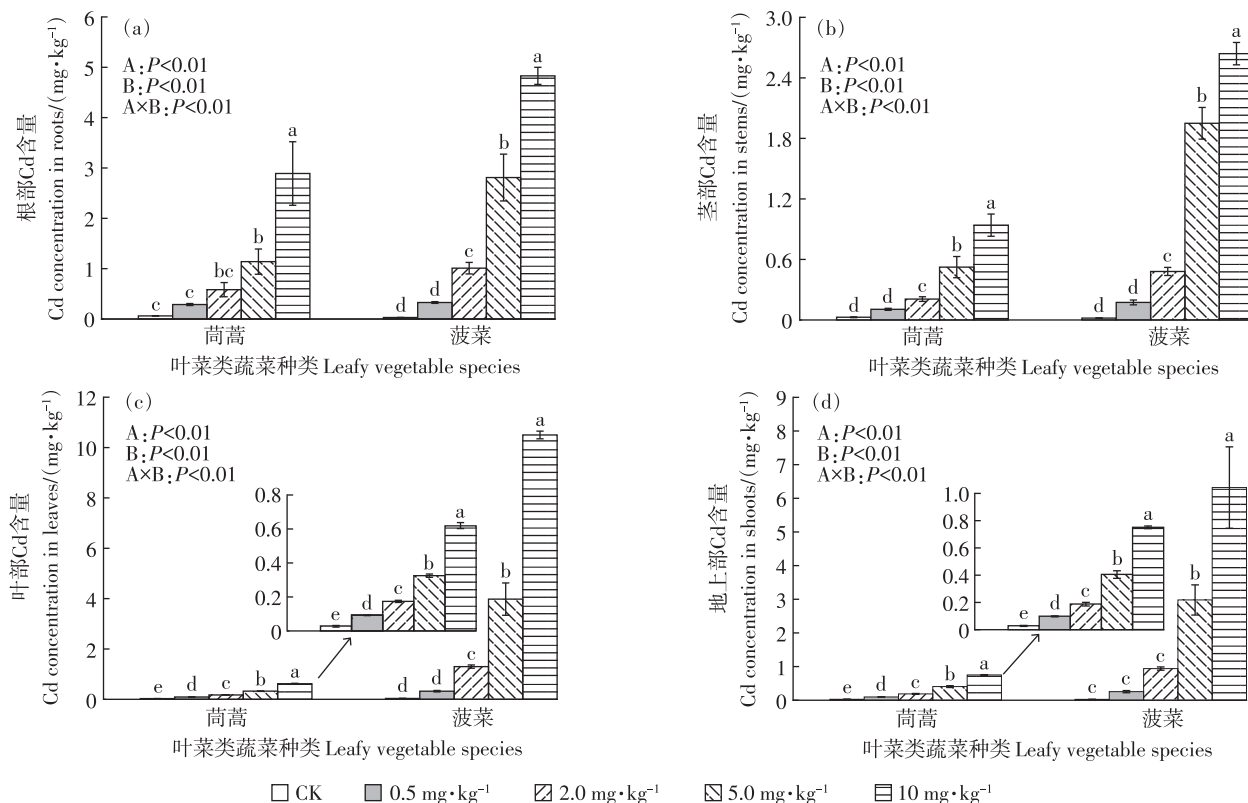
### 2.5 2种不同Cd富集能力叶菜类蔬菜抗氧化类物质的含量

茼蒿维生素C含量在土壤Cd含量为2.0 mg·kg<sup>-1</sup>处理下比CK显著增加了47.00%,而菠菜在土壤不同

Cd含量处理下与CK均无显著差异(图5a)。由图5b可知,在0.5 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理下,2种蔬菜的总黄酮含量与CK相比均显著增加,但在10 mg·kg<sup>-1</sup>处理下又显著降低(P<0.05)。茼蒿的总黄酮在2.0、5.0 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理下与CK无显著差异(P>0.05),而菠菜的总黄酮在2.0 mg·kg<sup>-1</sup>和5.0 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理下则出现显著下降(18.59%和33.32%)。

### 2.6 2种不同Cd富集能力叶菜类蔬菜总游离氨基酸和可溶性蛋白的含量

由图6a可知,茼蒿在土壤Cd含量为0.5 mg·kg<sup>-1</sup>处理下总游离氨基酸含量达到7.40 μg·g<sup>-1</sup>(最大值),菠菜在土壤Cd含量为2.0 mg·kg<sup>-1</sup>处理下达到18.48



A, 叶菜类蔬菜种类; B, Cd 含量。不同小写字母表示同种蔬菜在土壤不同 Cd 含量处理下蔬菜 Cd 含量存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。下同。  
A, Leafy vegetable species; B, Cd concentration. Different lowercase letters indicate significant differences in Cd concentrations of vegetables among different concentration of Cd in soil in the same vegetable ( $P < 0.05$ ). The same below.

图3 土壤不同 Cd 含量处理下 2 种叶菜类蔬菜各部位 Cd 含量

Figure 3 Cd concentrations in different parts of two leafy vegetables treated with different Cd concentrations in soil

表4 土壤不同 Cd 含量处理下 2 种叶菜类蔬菜对 Cd 的富集和转移

Table 4 Accumulation and translocation of Cd in two leafy vegetables treated with different Cd concentrations in soil

蔬菜种类 Vegetable species	土壤 Cd 添加量 Concentration of Cd added to soil/(mg·kg <sup>-1</sup> )	富集系数 Bioconcentration factor(BCF)	转移系数 Translocation factor(TF)
茼蒿 <i>Glebionis coronaria</i> (L.) Cass. ex Spach	0.5	0.20±0.01a	0.34±0.01a
	2.0	0.09±0.01b	0.33±0.08a
	5.0	0.08±0.01c	0.37±0.08a
	10	0.08±0.00c	0.27±0.05a
菠菜 <i>Spinacia oleracea</i> L.	0.5	0.51±0.06a	0.78±0.11c
	2.0	0.47±0.02a	0.94±0.07c
	5.0	0.60±0.09a	1.08±0.20bc
	10	0.63±0.12a	1.31±0.25a

$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (最大值),与 CK 相比分别显著增加了 60.18% 和 56.97%;在 10  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd 处理下总游离氨基酸含量被显著抑制,在茼蒿和菠菜中分别降低了 35.47% 和 38.01% ( $P < 0.05$ )。菠菜在 2.0、5.0  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd 处理下可溶性蛋白含量较 CK 分别显著增加了 14.74% 和

11.40%,在 10  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd 处理下则显著降低了 20.92% ( $P < 0.05$ , 图 6b)。与菠菜不同的是,茼蒿在 0.5~5.0  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd 处理下可溶性蛋白含量与 CK 均无显著差异,但在 10  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd 处理下比 CK 显著降低了 29.22% ( $P < 0.05$ ),说明低 Cd 处理下茼蒿的可溶性蛋白含量能够维持正常。

### 3 讨论

#### 3.1 Cd 处理对叶菜类蔬菜 Cd 含量及生长的影响

随着土壤 Cd 含量的增加,2 种叶菜类蔬菜体内的 Cd 含量也增加,且 2 种蔬菜不同部位对 Cd 的吸收存在显著差异:茼蒿表现为根>茎>叶,菠菜则为叶>根>茎(图 3a~图 3c)。这主要是因为植物细胞中 Cd 的储存形态会影响植物对 Cd 的耐受性和积累能力<sup>[6]</sup>。低积累蔬菜根中 Cd 的主要结合态是不溶性磷酸盐,而高积累蔬菜根中 Cd 是以果胶盐态、蛋白质结合态或吸附态的形式存在,这类物质更容易向上运输,导致高积累蔬菜地上部对 Cd 的吸收量高于低积累蔬菜<sup>[7]</sup>。同时低积累蔬菜还会通过区室化储存 Cd 的方

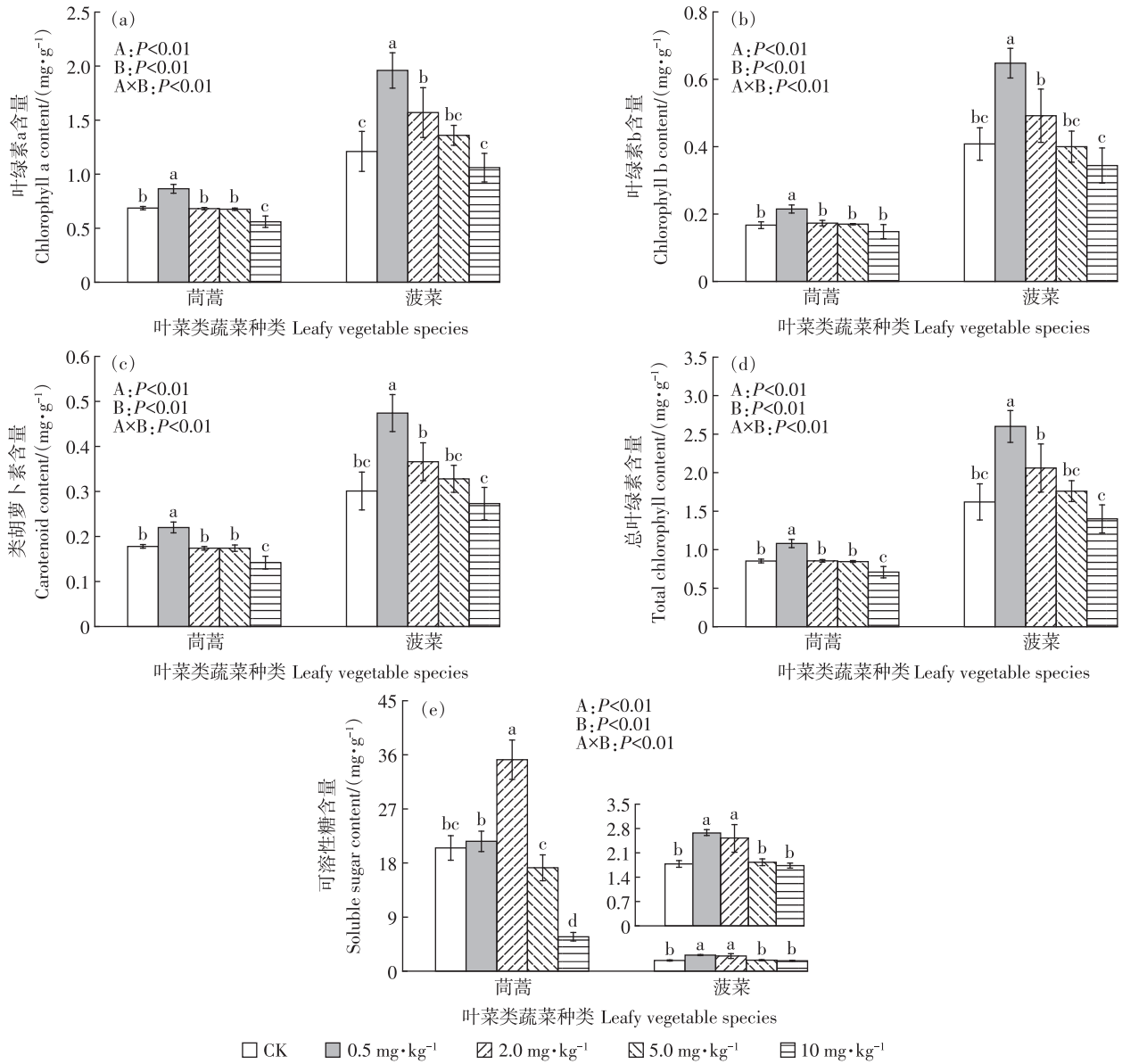


图4 Cd对2种叶菜类蔬菜光合色素和可溶性糖的影响

Figure 4 Effects of Cd on photosynthetic pigments and soluble sugars in two leafy vegetables

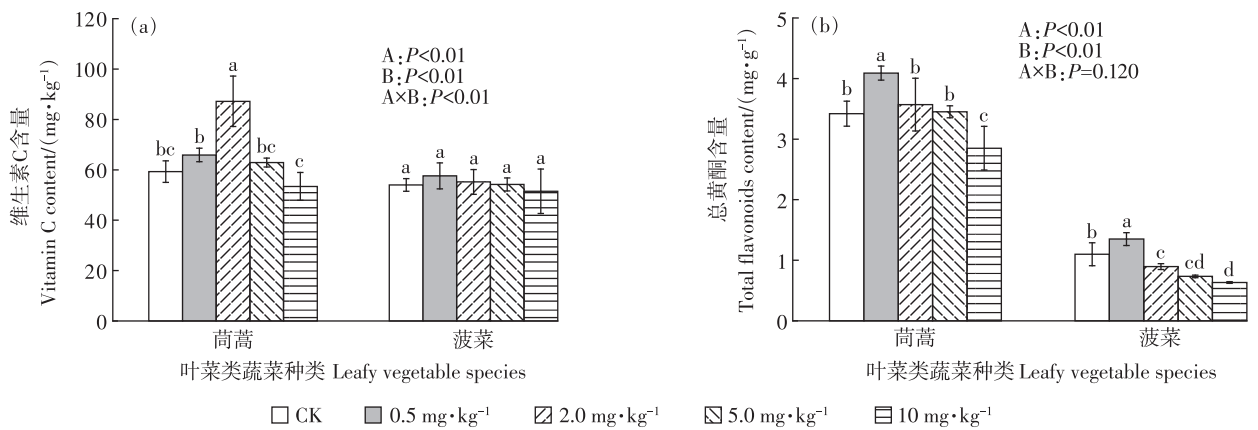


图5 Cd对2种叶菜类蔬菜抗氧化类物质的影响

Figure 5 Effects of Cd on antioxidative substances in two leafy vegetables

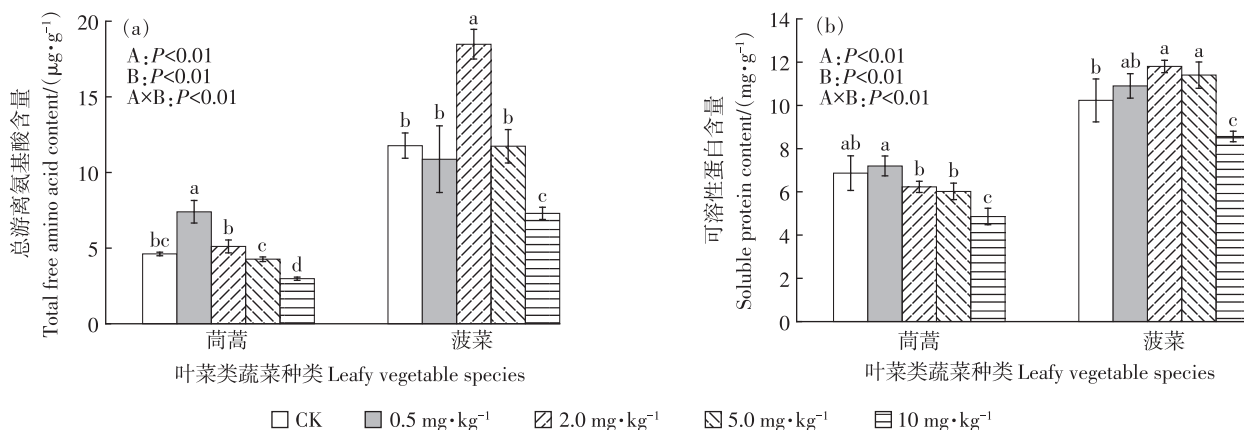


图6 Cd对2种叶菜类蔬菜总游离氨基酸和可溶性蛋白的影响

Figure 6 Effects of Cd on total free amino acids and soluble protein in two leafy vegetables

式抑制其由根部向其他部位转运<sup>[18]</sup>,如Cd可以诱导植物螯合素(PCs)的形成,PCs含有源自谷胱甘肽的巯基,能与Cd在细胞质中形成PCs-金属(或类金属)复合物,然后通过ATP结合盒转运蛋白运输到液泡中被区隔化<sup>[19]</sup>。当土壤Cd含量超过 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,茼蒿地上部(即可食部位)中Cd含量也会超标。Guo等<sup>[20]</sup>的研究表明,当土壤Cd含量不超过 $0.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,芥蓝的4个低Cd品种的Cd含量才能达标。低积累油菜可以在土壤Cd含量不超过 $6.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的农田中安全生产<sup>[21]</sup>。因此,当土壤Cd含量达到一定阈值后,低积累叶菜类蔬菜也会超标,不同种类低积累叶菜类蔬菜超标所需的土壤Cd含量不同。因此,在评估Cd污染区种植低积累的叶菜类蔬菜安全风险时,也要考虑土壤中重金属的污染状况。

土壤低含量Cd对叶菜类蔬菜的生长具有促进作用,而高含量的Cd会抑制其生长<sup>[22]</sup>。2种叶菜类蔬菜在高Cd含量下其生长均受到显著抑制,但受到抑制的Cd含量存在差异,茼蒿在 $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Cd含量下的生长就受到显著抑制,而菠菜在 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Cd处理下仅有茎的生物量和株高比CK显著下降(图2、表3)。刘周莉等<sup>[23]</sup>的研究发现,低浓度Cd对忍冬的生长和光合作用具有一定的毒物兴奋效应。在高含量Cd胁迫下叶菜类蔬菜受到毒害作用有两种途径:一是Cd通过影响细胞的氧化还原电位,导致细胞膜氧化损伤、程序性细胞凋亡,从而使植物整体的生物量显著减少<sup>[24]</sup>;二是Cd通过作为抗代谢物质或与必需代谢物形成沉淀物,导致酶失活和细胞损伤,从而影响植物的生长<sup>[25]</sup>。

此外,Cd在植物体内蓄积还会改变叶绿体的超微结构,导致其形状扭曲以及类囊体膨胀,同时还会

抑制叶绿素合成酶的活性以及激活叶绿素降解酶<sup>[26-27]</sup>。在本试验中,土壤Cd含量为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理下2种不同Cd富集能力的叶菜类蔬菜的所有光合色素含量均显著增加(图4),而 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Cd处理下,茼蒿叶绿素a、类胡萝卜素和总叶绿素比CK显著下降,叶绿素b无显著差异,而菠菜均无显著差异。高Cd胁迫显著降低了茼蒿的光合色素含量,而对菠菜光合色素的影响小于茼蒿。

### 3.2 Cd处理对叶菜类蔬菜可溶性糖和抗氧化类物质的影响

可溶性糖对植物的渗透调节起着至关重要的作用<sup>[28]</sup>,同时还能充当能量物质和信号分子,调节参与糖感应机制基因的表达<sup>[29]</sup>。在本试验中,观察到2种蔬菜在土壤低Cd含量处理下的可溶性糖含量均增加,糖分的积累可能与金属胁迫适应过程有关,叶片中可溶性糖的积累可以帮助植株在非生物胁迫条件下维持水分状态并消除活性氧自由基(ROS)<sup>[30]</sup>。但在高Cd胁迫下,茼蒿的可溶性糖含量与CK相比显著下降,而菠菜则与CK无显著差异(图4e),在Cd胁迫下,菠菜可溶性糖含量变化较小,而茼蒿则波动较大。这种差异可能反映了2种蔬菜面对Cd胁迫的不同调节策略,即茼蒿通过大量合成可溶性糖来维持细胞渗透压,而菠菜的可溶性糖多用于维持自身生长<sup>[31]</sup>,它可能通过其他途径维持细胞的渗透压以应对Cd胁迫,因此其可溶性糖含量未受到显著影响。

叶菜类蔬菜除了为人体提供所需的蛋白质、微量元素与碳水化合物等营养元素外,还提供天然的抗氧化类物质,这类物质在预防细胞氧化损伤和抗衰老过程中发挥着积极作用<sup>[32]</sup>。在本试验中,茼蒿的维生素C含量在 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Cd处理下显著增加,其余Cd处

理下无显著差异,而菠菜均无显著差异(图5a)。低Cd处理会增加维生素C在植物体内的积累,有助于提高茼蒿对Cd胁迫的适应能力。Cd暴露会诱导植物产生ROS,从而破坏植物体内的脂质、蛋白质、核酸和色素的结构和功能<sup>[33]</sup>。植物会通过适应性策略来清除ROS以缓解Cd毒害,其中包括抗氧化系统的激活<sup>[34]</sup>。抗坏血酸(ASA)通过ASA-谷胱甘肽(GSH)循环来缓解Cd对植物的毒害,这个循环是通过ASA和GSH这2种抗氧化剂的共同作用来保护细胞免受损伤。有研究表明,Cd胁迫下红麻叶片中ASA含量增加,GSH含量降低,表明ASA在提高红麻对抗Cd胁迫能力中起着重要作用<sup>[35]</sup>。此外,野生型水稻(Cd低积累)的抗氧化水平和抗氧化酶活性显著高于突变体*cadB-1*(Cd高积累),并且在不同时间段下野生型的ASA含量高于突变体*cadB-1*<sup>[36]</sup>,这与本试验结果一致。

Cd胁迫能诱导黄酮类化合物的生物合成,如花色素苷含量增加,从而提高植物对Cd毒害下ROS的清除能力<sup>[37]</sup>。本试验发现,2种不同Cd富集能力叶菜类蔬菜的总黄酮含量在0.5、2.0 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理下比CK显著增加,而在10 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理下被显著抑制,但与CK相比,低积累茼蒿的总黄酮含量在2.0、5.0 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理下无显著差异,而菠菜则出现显著降低(图5b),这说明Cd胁迫对菠菜黄酮类物质的影响更大。Mwamba等<sup>[38]</sup>通过比较代谢组学响应揭示出2种基因型甘蓝型油菜ZD622(低积累)和GB671(高积累)通过增加它们的总抗氧化能力来响应Cd胁迫,在ZD622中,Cd引起碳水化合物和维生素的急剧消耗,同时还发现Cd显著诱导了上游黄酮亚类(Flavonoid sub-classes)的产生,而GB671似乎优先促进花青素这种黄酮物质的产生。综上所述,2种叶菜类蔬菜的抗氧化类物质在Cd胁迫下表现出不同的敏感性,可能参与清除ROS的抗氧化类物质也不同。茼蒿中的2种抗氧化类物质均参与解毒机制,而维生素C在菠菜解毒机制中的作用并不明显。

### 3.3 Cd处理对叶菜类蔬菜总游离氨基酸和可溶性蛋白的影响

氨基酸和蛋白质是构成蔬菜营养成分的重要指标,参与体内众多重要生理过程,同时也是人体重要的营养来源<sup>[39]</sup>。2种叶菜类蔬菜的总游离氨基酸和可溶性蛋白含量在土壤不同Cd含量处理下均受到影响,均呈现先促进后抑制的趋势。茼蒿的总游离氨基酸含量在0.5 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理下达到最大值,菠菜在

2.0 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理下达到最大值(图6a),由此可以推断:Cd处理下茼蒿的游离氨基酸响应比菠菜更为快速。已有研究表明,在高Cd积累水稻品系中,赖氨酸合成途径受到的抑制较小<sup>[40]</sup>。在重金属胁迫下植物体内积累的氨基酸发挥着重要作用,包括充当信号分子、渗透调节物质、调节离子运输和促进解毒等<sup>[41]</sup>。Cd胁迫导致总游离氨基酸含量以及碳、氮稳定同位素组成增加,表明游离氨基酸是植物氮代谢的主要物质,在植物对Cd胁迫响应中起着重要作用。Zhu等<sup>[42]</sup>通过不同Cd浓度水培实验,分析了2种蓖麻游离氨基酸和碳氮同位素组成,表明Zibo-3(Cd低积累)的总游离氨基酸含量高于Zibo-9(Cd高积累),其增加量也显著高于Zibo-9。本试验中,与CK相比,茼蒿的总游离氨基酸含量在0.5 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理下比CK增加了60.18%,而菠菜的总游离氨基酸含量在2.0 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理下比CK增加了56.97%(图6a),与上述结果相似,茼蒿的总游离氨基酸增长量高于菠菜,在10 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理下2种蔬菜的总游离氨基酸均显著下降,这可能是由于茼蒿需要更多的游离氨基酸来与Cd<sup>2+</sup>结合,形成结合态氨基酸,缓解Cd对茼蒿的毒性。Khan等<sup>[43]</sup>的研究也发现,Cd处理显著降低了白菜的游离氨基酸含量。

抑制2种叶菜类蔬菜可溶性蛋白的土壤外源Cd含量也存在显著差异,茼蒿在0.5~5.0 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理下与CK无显著性差异,而菠菜在2.0、5.0 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理下显著促进,10 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理下2种蔬菜均被显著抑制(图6b)。Cd与蛋白质的结合会抑制ROS的产生,并诱导解毒机制<sup>[44]</sup>。可溶性蛋白质多为与膜系统特异结合的酶,其含量越高,该部位的生理生化反应与代谢活动就越旺盛<sup>[45]</sup>。低含量Cd处理刺激了2种叶菜的生理生化反应与代谢活动,使可溶性蛋白在植物体内积累。在土壤高含量Cd胁迫时,2种叶菜类蔬菜受到毒害作用,可溶性蛋白急剧下降。重金属ATP酶(HMA)和ATP结合盒蛋白能够将Cd离子转运到液泡中,从而降低Cd离子对植物的毒性<sup>[46]</sup>。由此可以看出,菠菜比茼蒿具有更高的耐受性。菠菜的总游离氨基酸和可溶性蛋白的含量显著高于茼蒿,可能是菠菜自身比茼蒿含有更丰富的游离氨基酸和可溶性蛋白。

## 4 结论

(1)从14种叶菜类蔬菜中筛选出高Cd富集的菠菜和低Cd富集的茼蒿。2种蔬菜不同部位对Cd的吸

致存在差异:茼蒿表现为根>茎>叶,菠菜表现为叶>根>茎。

(2)在土壤Cd含量为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理下,茼蒿地上部可食部位Cd含量能达标;但在 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Cd处理时,茼蒿可食部位Cd含量高达 $(0.41 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,是标准限值的2倍。

(3)在土壤Cd含量为 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理下,茼蒿的生物量、叶绿素a、类胡萝卜素、总黄酮、总游离氨基酸、可溶性蛋白和可溶性糖与CK相比均显著下降,而菠菜只有总黄酮、总游离氨基酸和可溶性蛋白显著低于CK,表明高Cd胁迫下菠菜的光合色素维持能力优于茼蒿。

致谢:昆明理工大学生命科学与技术学院博士生导师、University of Pennsylvania 博士后张琦教授修改润色英文摘要,特此致谢!

#### 参考文献:

- [1] GONI M A, HOSEN L, KHAN A S, et al. Elevated uptake and translocation patterns of heavy metals in different food plants parts and their impacts on human health[J]. *Biological Trace Element Research*, 2025, 203(1):512-534.
- [2] SUNDQVIST M L, LARSEN F J, CARLSTRÖM M, et al. A randomized clinical trial of the effects of leafy green vegetables and inorganic nitrate on blood pressure[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2020, 111(4):749-756.
- [3] SCHREINEMACHERS P, SIMMONS E B, WOPEREIS M C S. Tapping the economic and nutritional power of vegetables[J]. *Global Food Security*, 2018, 16:36-45.
- [4] WANG P, CHEN H P, KOPITTKÉ P M, et al. Cadmium contamination in agricultural soils of China and the impact on food safety[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 249:1038-1048.
- [5] DENG J B, LI W Y, XU W H, et al. Correlation and the concentrations of Pb, Cd, Hg and As in vegetables and soils of Chongqing, China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, 43(6):2357-2376.
- [6] ROCHAYATI S, DU LAING G, RINKLEBE J, et al. Use of reactive phosphate rocks as fertilizer on acid upland soils in Indonesia: accumulation of cadmium and zinc in soils and shoots of maize plants [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, 174(2):186-194.
- [7] 吕金印,张微,柳玲. Cd<sup>2+</sup>处理对几种叶菜可食部分Cd含量及品质的影响[J]. 核农学报, 2010, 24(4):856-862. LÜ J Y, ZHANG W, LIU L. Effect of cadmium treatment on Cd absorption and nutrition quality of edible part in different leaf vegetables[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2010, 24(4):856-862.
- [8] 杜小平,康靖全,吕金印. 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[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8):1592-1601. DU X P, KANG J Q, LÜ J Y. Selection for low - Cd - accumulating cultivars of pakchoi (*Brassica chinensis* L.), effects of sulfur on Cd content, and quality characters under Cd stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8):1592-1601.
- [9] LI N, LIU J X, YANG L, et al. Synergistic effect of antioxidant systems enhance cadmium phytoextraction and translocation in *Amaranthus hypochondriacus* under rutin application[J]. *South African Journal of Botany*, 2022, 149:582-590.
- [10] ZHU G X, XIAO H Y, GUO Q J, et al. Effects of cadmium stress on growth and amino acid metabolism in two Compositae plants[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 158:300-308.
- [11] XUE M, ZHOU Y H, YANG Z Y, et al. Comparisons in subcellular and biochemical behaviors of cadmium between low-Cd and high-Cd accumulation cultivars of pakchoi (*Brassica chinensis* L. ) [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014, 8(2):226-238.
- [12] 杨海龙,丁云杰,蔡金洋. 早籼稻功能叶叶绿素含量变化及其与产量的关系[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(3):99-104. YANG H L, DING Y J, CAI J Y. Dynamics of chlorophyll content in functional leaves of early indica rice and its correlation with yield[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(3):99-104.
- [13] 陶兴林,朱惠霞,王晓巍,等. 5个不同产区地理标志辣椒营养成分分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(3):303-310. TAO X L, ZHU H X, WANG X W, et al. Nutrient composition analysis of different geographical indications peppers in 5 different production areas[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(3):303-310.
- [14] 耿晓东,张召增,朱秀征,等. 山桐子芽叶果可溶性糖和可溶性蛋白含量与其大小年的关系[J]. 经济林研究, 2024, 42(4):62-71. GENG X D, ZHANG Z Z, ZHU X Z, et al. Relationship between soluble sugar and soluble protein content in leaves, buds and fruits of *Idesia polycarpa* and its alternate bearing years[J]. *Non-wood Forest Research*, 2024, 42(4):62-71.
- [15] 黄松,吴月娜,刘梅,等. 茼蒿三酮比色法测定青天葵中总游离氨基酸的含量[J]. 中国中医药信息杂志, 2010, 17(12):50-52. HUANG S, WU Y N, LIU M, et al. Quantitative determination of total free - amino acid in *Nervilia fordii* (Hance) Schltr. by ninhydrin colorimetric method[J]. *Chinese Journal of Information on Traditional Chinese Medicine*, 2010, 17(12):50-52.
- [16] ZOU J H, WANG Y R, WANG S Y, et al. Ca alleviated Cd-induced toxicity in *Salix matsudana* by affecting Cd absorption, translocation, subcellular distribution, and chemical forms[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2023, 281:153926.
- [17] XIAO Q Q, WANG S, CHI Y H. Accumulation and chemical forms of cadmium in tissues of different vegetable crops[J]. *Agronomy*, 2023, 13(3):680.
- [18] 刘奇,王晟,何涛,等. 不同玉米品种对Pb、Cd积累与转运差异研究[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(1):130-137. LIU Q, WANG S, HE T, et al. Differences in lead and cadmium accumulation and translocation in different varieties of *Zea mays* [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(1):130-137.
- [19] WEI W, PENG H, XIE Y H, et al. The role of silicon in cadmium alleviation by rice root cell wall retention and vacuole compartmentalization under different durations of Cd exposure[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 226:112810.
- [20] GUO J J, TAN X, FU H L, et al. Selection for Cd pollution-safe cultivars of Chinese kale (*Brassica alboglabra* L. H. bailey) and

- biochemical mechanisms of the cultivar-dependent Cd accumulation involving in Cd subcellular distribution[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(8):1923-1934
- [21] ZHANG Q Y, WANG L, ZHU J, et al. Screening of low-Cd-accumulating and Cd-remediating oilseed rape varieties using a newly indicator system for risk management of Cd-contaminated agricultural land[J]. *Chemosphere*, 2024, 358:142148.
- [22] 李晓婧, 郑向群, 郑顺安. 叶菜对Cd的富集特征及敏感性分布[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(5):720-727. LI X J, ZHENG X Q, ZHENG S A. Accumulation and sensitivity distribution of cadmium in leafy vegetables[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(5):720-727.
- [23] 刘周莉, 陈玮, 何兴元, 等. 低浓度镉对忍冬生长及光合生理的影响[J]. *环境化学*, 2018, 37(2):223-228. LIU Z L, CHEN W, HE X Y, et al. Effects of low concentration cadmium on the growth and photosynthetic physiology of *Lonicera japonica* Thunb. [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(2):223-228.
- [24] YUE X M, SONG J X, FANG B, et al. BeNRAMP1 promotes the absorption of cadmium and manganese in *Arabidopsis*[J]. *Chemosphere*, 2021, 283:131113.
- [25] LING T, GAO Q, DU H L, et al. Growing, physiological responses and Cd uptake of corn (*Zea mays* L.) under different Cd supply[J]. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 2017, 29(1):216-221.
- [26] NAJEEB U, JILANI G, ALI S, et al. Insights into cadmium induced physiological and ultra-structural disorders in *Juncus effusus* L. and its remediation through exogenous citric acid[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(1):565-574.
- [27] PARMAR P, KUMARI N, SHARMA V. Structural and functional alterations in photosynthetic apparatus of plants under cadmium stress [J]. *Botanical Studies*, 2013, 54(1):45.
- [28] 周蛟, 潘远智, 赵胤, 等. 黄果龙葵幼苗对镉胁迫的生理生长响应 [J]. *广西植物*, 2022, 42(4):628-638. ZHOU J, PAN Y Z, ZHAO Y, et al. Physiological and growth responses of *Solanum diphyllum* seedlings to Cd stress[J]. *Guihaia*, 2022, 42(4):628-638.
- [29] WANG Y, CUI T, NIU K J, et al. Comparison and characterization of oxidation resistance and carbohydrate content in Cd-tolerant and -sensitive Kentucky bluegrass under Cd stress[J]. *Agronomy*, 2021, 11(11):2358.
- [30] ZHENG X, ZHANG B, PAN N, et al. Hydrogen sulfide alleviates cadmium stress by enhancing photosynthetic efficiency and regulating sugar metabolism in wheat seedlings[J]. *Plants*, 2023, 12(13):2413.
- [31] SHAHID M A, BALAL R M, KHAN N, et al. Selenium impedes cadmium and arsenic toxicity in potato by modulating carbohydrate and nitrogen metabolism[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 180:588-599.
- [32] SANA S, RAMZAN M, EJAZ S, et al. Differential responses of chili varieties grown under cadmium stress[J]. *BMC Plant Biology*, 2024, 24(1):7.
- [33] WEI S, GUO B L, FENG L X, et al. Cadmium distribution and characteristics of cadmium-binding proteins in rice (*Oryza sativa* L.) kernel[J]. *Food Science and Technology Research*, 2017, 23(5):661-668.
- [34] WU X W, TIAN H, LI L, et al. Higher Cd-accumulating oilseed rape has stronger Cd tolerance due to stronger Cd fixation in pectin and hemicellulose and higher Cd chelation[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 285:117218.
- [35] SAEED W, MUBEEN S, PAN J, et al. Integrated physiological and metabolomic responses reveal mechanisms of Cd tolerance and detoxification in kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) under Cd stress[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15:1332426.
- [36] 沈国明. Cd<sup>2+</sup>诱导的镉敏感水稻突变体 cadB-1 叶片抗坏血酸循环的变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2):346-353. SHEN G M. Cd<sup>2+</sup> induced changes of ascorbate-glutathione cycle in Cd sensitive rice mutant cadB-1 leaves[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(2):346-353.
- [37] SONG Q Q, ZHAO Y, WU F, et al. Physiological and molecular responses of strawberry plants to Cd stress[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, 213:108800.
- [38] MWAMBA T M, ISLAM F, ALI B, et al. Comparative metabolomic responses of low- and high-cadmium accumulating genotypes reveal the cadmium adaptive mechanism in *Brassica napus*[J]. *Chemosphere*, 2020, 250:126308.
- [39] 赵文琦, 夏菲, 第五文博, 等. 5种高山蔬菜的氨基酸含量分析及营养评价[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(10):157-160. ZHAO W Q, XIA F, DIWU W B, et al. Amino acid contents analysis and nutrition assessment of five alpine vegetables[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(10):157-160.
- [40] FU H J, YU H Y, LI T X, et al. Effect of cadmium stress on inorganic and organic components in xylem sap of high cadmium accumulating rice line (*Oryza sativa* L.)[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 168:330-337.
- [41] XU J, ZHU Y Y, GE Q, et al. Comparative physiological responses of *Solanum nigrum* and *Solanum torvum* to cadmium stress[J]. *New Phytologist*, 2012, 196(1):125-138.
- [42] ZHU G X, CHENG D D, WANG X F, et al. Free amino acids, carbon and nitrogen isotopic compositions responses to cadmium stress in two Castor (*Ricinus communis* L.) species[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, 184:40-46.
- [43] KHAN K Y, ALI B, STOFFELLA P J, et al. Study amino acid contents, plant growth variables and cell ultrastructural changes induced by cadmium stress between two contrasting cadmium accumulating cultivars of *Brassica rapa* ssp. *chinensis* L. (pak choi) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 200:110748.
- [44] ANDRESEN E, FLORES-SANCHEZ I J, BRÜCKNER D, et al. Sublethal and lethal Cd toxicity in soybean roots specifically affects the metabolome, Cd binding to proteins and cellular distribution of Cd [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 442:130062.
- [45] 曹莹, 李建东, 赵天宏, 等. 镉胁迫对玉米生理生化特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(增刊1):8-11. CAO Y, LI J D, ZHAO T H, et al. Effects of Cd stress on physiological and biochemical traits of maize[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl 1):8-11.
- [46] FU S, LU Y S, ZHANG X, et al. The ABC transporter ABCG36 is required for cadmium tolerance in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2019, 70(20):5909-5918.

(责任编辑:潘淑君)