



# 农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊  
中文核心期刊  
中国科技核心期刊

## JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

### 镉胁迫对伴矿景天细胞壁多糖果胶组分及其果胶甲酯酶的影响

毕莉艳, 李元, 李博, 李明锐, 王吉秀, 秦丽

引用本文:

毕莉艳, 李元, 李博, 李明锐, 王吉秀, 秦丽. 镉胁迫对伴矿景天细胞壁多糖果胶组分及其果胶甲酯酶的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 636–643.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0217>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 不同钾和硼水平对棉花叶片逆境生理及其细胞壁硼的影响

吴秀文, 郝艳淑, 雷晶, 姜存仓

农业资源与环境学报. 2016, 33(1): 29–34 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0154>

#### 不同茶树品种吸收累积镉的差异研究

杨柳, 陈钰佩, 方丽, 石元值

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 401–410 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0336>

#### 曼陀罗对镉的吸收及其亚细胞分布研究

周振, 杨素勤, 柳海涛, 陈先锋, 陈鑫, 张彪

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 385–391 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0314>

#### 硫对水稻幼苗镉积累特性及亚细胞分布特征的影响

潘瑶, 尹洁, 高子平, 王景安, 刘仲齐

农业资源与环境学报. 2015(3): 275–281 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0026>

#### 接种AM真菌对不同盐度土壤中向日葵生长的影响

周昕南, 杨亮, 许静, 王亚男, 杨久扬, 郝利君, 刁风伟, 郭伟

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 744–752 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0184>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

毕莉艳, 李元, 李博, 等. 镉胁迫对伴矿景天细胞壁多糖果胶组分及其果胶甲酯酶的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 636–643.

BI L Y, LI Y, LI B, et al. Effects of cadmium stress on pectin components and pectin methylesterase of cell wall polysaccharide in *Sedum plumbizincicola*[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 636–643.

## 镉胁迫对伴矿景天细胞壁多糖果胶组分及其果胶甲酯酶的影响

毕莉艳, 李元, 李博, 李明锐, 王吉秀, 秦丽\*

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

**摘要:**为探究细胞壁果胶对Cd胁迫的响应机理,通过盆栽实验研究了不同镉(Cd)浓度(0、25、50、75、100、200 mg·kg<sup>-1</sup>)对伴矿景天细胞壁果胶含量、果胶甲酯酶(PME)活性、细胞壁果胶半乳糖醛酸含量和Cd含量的影响。结果表明,随着Cd处理浓度的增加,伴矿景天地上部和根部细胞壁螯合态果胶、碱性果胶含量均在Cd处理浓度为100 mg·kg<sup>-1</sup>时最大,且螯合态果胶含量表现为地上部>根部,碱性果胶含量表现为地上部<根部。地上部细胞壁PME活性和半乳糖醛酸含量在Cd处理浓度为25 mg·kg<sup>-1</sup>时最大,与对照相比显著增加了40.4%和39.2%。Cd胁迫抑制了根部细胞壁PME活性,Cd处理浓度为75 mg·kg<sup>-1</sup>时,伴矿景天地上部和根部Cd含量最高,与对照相比分别显著增加了58.4倍和70.1倍;螯合态果胶含量和碱性果胶含量与植物Cd含量呈显著正相关;根部的细胞壁果胶半乳糖醛酸含量和螯合态果胶含量呈显著负相关( $r=-0.880, P<0.05$ )。研究发现,伴矿景天通过调整细胞壁果胶半乳糖醛酸含量来改变果胶含量,以增强伴矿景天对Cd的吸收累积。

**关键词:**伴矿景天;镉;细胞壁;果胶;果胶甲酯酶;半乳糖醛酸

中图分类号:Q945.78;X173

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2023)03-0636-08

doi: 10.13254/j.jare.2022.0217

### Effects of cadmium stress on pectin components and pectin methylesterase of cell wall polysaccharide in *Sedum plumbizincicola*

BI Liyan, LI Yuan, LI Bo, LI Mingrui, WANG Jixiu, QIN Li\*

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract:** Pot experiments were carried out to study the effects of different cadmium (Cd) concentrations (0, 25, 50, 75, 100, 200 mg·kg<sup>-1</sup>) on pectin content, pectin methylesterase enzyme (PME) activity, pectin galacturonic acid content, and Cd accumulation in the cell wall of *Sedum plumbizincicola* and explore the response mechanism of cell wall pectin to cadmium stress. The results showed that with the increase in Cd concentration, the contents of chelated pectin and alkaline pectin in the shoot and root cell walls of *S. plumbizincicola* reached a maximum at a concentration of 100 mg·kg<sup>-1</sup> Cd, with the content of chelated pectin in shoots overtopping that in the roots. However, alkaline pectin content in the shoots was lower than that in the roots. The PME activity and galacturonic acid content of the shoot cell wall were the highest in the treatment of 25 mg·kg<sup>-1</sup> Cd, which were significantly increased by 40.4% and 39.2%, respectively, compared with the control. The PME activity of root cell walls was inhibited under Cd stress. The shoot and root Cd contents reached their maximum values in the treatment of 75 mg·kg<sup>-1</sup> Cd, which were 58.4 times and 70.1 times higher than that of the control, respectively. There was a significant positive correlation between chelated pectin content, alkaline pectin content, and Cd content. Furthermore, there was a

收稿日期:2022-04-23 录用日期:2022-06-29

作者简介:毕莉艳(1997—),女,云南楚雄人,硕士研究生,从事土壤重金属污染修复研究。E-mail:1911085193@qq.com

\*通信作者:秦丽 E-mail:qinli2975@ynau.edu.cn

基金项目:云南省重点研发计划课题(2019BC001-04);国家自然科学基金项目(31560163,31860112,41761073,41967049)

**Project supported:** The Key Research and Development Project in Yunnan Province (2019BC001-04); The National Natural Science Foundation of China (31560163,31860112,41761073,41967049)

significant negative correlation between the content of pectin galacturonic acid and chelated pectin in the root cell wall, with a correlation coefficient of  $-0.880(P<0.05)$ . The pectin content was found to change by regulating the pectin galacturonic acid content in the cell wall of *S. plumbizincicola* to enhance Cd absorption and accumulation.

**Keywords:** *Sedum plumbizincicola*; cadmium; cell wall; pectin; pectin methylesterase enzyme; galacturonic acid

工业三废的大量排放、大气沉降、污水灌溉、农药和肥料不合理使用等造成我国农田土壤镉(Cd)点位超标率达7.0%,严重影响土壤安全利用和农业生产<sup>[1-3]</sup>。Cd是毒性最强的重金属之一,在某些植物中过量积累,干扰植物对必需矿质元素的吸收、运输和利用,造成根系损伤<sup>[4]</sup>。超累积植物能吸收利用并积累Cd,将其输送并贮存在地上部分。

细胞壁在超累积植物Cd积累中具有重要作用,细胞壁是阻止重金属进入细胞的第一道屏障。植物细胞壁与Cd<sup>2+</sup>的结合作用能够减少重金属向细胞内转移,降低其对植物代谢的影响<sup>[5]</sup>。细胞壁与重金属的结合能力取决于其中羧基(—COOH)、羟基(—OH)和巯基(—SH)等官能团的数量。果胶(主要由半乳糖醛酸组成的酸性多糖)在细胞壁中对Al<sup>3+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>以及其他金属离子的结合和富集起着关键性作用<sup>[6]</sup>。果胶主要在植物组织的高尔基体中合成,其在发生去甲酯化反应后,分子中含有大量的羧基,为细胞壁提供所需的负电荷,其中果胶甲酯酶(PME)参与了果胶分子的去甲酯化过程<sup>[7]</sup>,在PME作用下被去甲基化的羧基能够与细胞壁中70%~90%的阳离子结合,含羧基的果胶酸能够与重金属离子牢固结合,降低细胞质中游离态重金属离子浓度<sup>[8-9]</sup>。

重金属在细胞壁中的积累量与细胞壁果胶含量及其甲基化程度和PME活性有关。研究表明,果胶酯化程度越高,PME活性越低,果胶对Cd的累积量越少<sup>[7]</sup>。植物通过改变细胞壁的组成和性质,如果胶的结构、甲基化程度和PME活性来响应Cd胁迫<sup>[10]</sup>。然而,Cd如何影响超富集植物细胞壁的组成和PME活性的变化尚不清楚。

本研究以伴矿景天为材料,研究不同浓度Cd处理对伴矿景天地上部和根部细胞壁果胶含量、PME活性和果胶半乳糖醛酸含量的影响,确定果胶在植物细胞壁Cd<sup>2+</sup>结合中的作用,并进一步解析伴矿景天地

上部和根部Cd含量与细胞壁果胶多糖变化的关系,以揭示细胞壁果胶多糖组分在伴矿景天Cd累积过程中的作用机制,旨在为Cd污染土壤的植物修复技术提供科学思路<sup>[11]</sup>。

1 材料与方法

1.1 供试材料

在伴矿景天幼苗时期,从云南兰坪铅锌矿区采集伴矿景天幼苗,迁移至实验室进行盆栽培养。在迁栽时,挑选长势良好、大小均匀的幼苗开展盆栽试验,每盆种植3株。供试土壤采自云南农业大学后山。土壤类型为山地红壤,将所取土壤与适量底肥混合均匀,备用。该土壤的理化性质如表1所示。

1.2 试验设计

盆栽试验在云南农业大学东校区实验棚进行。每盆装土3 kg,进行土壤Cd处理,将不同浓度的CdCl<sub>2</sub>(CdCl<sub>2</sub>·2.5 H<sub>2</sub>O分析纯)溶液喷洒到盆栽试验土中,使土壤与溶液混合均匀,稳定1周。挑选长势良好、大小均匀的幼苗开展盆栽试验。试验设置6个不同的Cd处理浓度:0、25、50、75、100 mg·kg<sup>-1</sup>和200 mg·kg<sup>-1</sup>,每个处理设5个重复,共30盆。在植物种植期间,每两日浇一次水,根据植物的生长和需水状况,适当为其提供充足的水分。120 d后收获,首先将伴矿景天带回实验室,先用自来水清洗干净,再放入去离子水中浸泡15 min,然后取出晾干,将其分成地上部和根部,分别称量其鲜质量,部分用于提取细胞壁,其余的伴矿景天样品在105 ℃时杀青30 min,然后放入烘箱于75 ℃烘至恒质量。将烘干后的样品取出并用研钵研磨至粉末状,密封保存,装袋备用,用抖土法收集植物根际土样,并带回实验室分析。

1.3 指标测定

1.3.1 Cd含量的测定

植物Cd含量的测定采用HNO<sub>3</sub>消解-火焰原子吸

表1 供试土壤理化性质  
Table 1 Physical and chemical properties of the test soil

| pH  | 有机质Organic matter/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全氮Total N/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全磷Total P/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全钾Total K/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 有效磷Available P/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 速效钾Available K/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 碱解氮Alkali-hydrolysable N/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | Cd/(mg·kg <sup>-1</sup> ) |
|-----|-----------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------|
| 5.8 | 12.68                                   | 0.5                             | 1.2                             | 4.1                             | 27.6                                  | 211.9                                 | 56.61                                           | 0.91                      |

收分光光度法<sup>[12]</sup>。

### 1.3.2 细胞壁的提取

细胞壁的提取参考 Zhong 等<sup>[13]</sup>的方法进行。将收获后的伴矿景天用液氮进行冷冻处理,放置在-80℃冰箱中保存。将冷冻保存的伴矿景天的根系和地上部分取出,放入研钵加液氮进行研磨,转移至离心管中,加入75%的冰乙醇浸没混匀,浸提3次,每次冰乙醇的用量为10 mL·g<sup>-1</sup>。混合物静置20 min后于4℃下5 000×g离心10 min,去上清液后沉淀物再次用鲜质量与体积比为1:7(g·mL<sup>-1</sup>)的冰丙酮、甲醇/氯仿(1:1)混合液和甲醇溶液洗涤。每次洗涤后悬浮静置10 min,于4℃下5 000×g离心10 min,将得到的沉淀物进行冷冻干燥处理,即可得到细胞壁,放置4℃冰箱中备用。

### 1.3.3 细胞壁果胶甲酯酶提取和活性测定

PME的提取参照 Bordenave 等<sup>[14]</sup>的方法。样品加提取缓冲液(0.1 mol·L<sup>-1</sup>柠檬酸,0.2 mol·L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 1 mol·L<sup>-1</sup> NaCl, pH值为5.0)在研钵中充分研磨并置于离心管中充分振荡,匀浆被转移到离心管放于冰上1 h,振荡3次,间隔20 min后,于4℃15 000×g离心10 min,收集上清液待测。

PME活性的测定参考 Richard 等<sup>[15]</sup>的方法进行。取上述样品液200 μL加入到10 mL PME分析缓冲液[0.5%(m/V)柑橘果胶,0.2 mol·L<sup>-1</sup> NaCl,0.015%(m/V)甲基红,pH值为6.8]中,37℃温水浴1.5 h,果胶pH值降低发生脱脂,颜色由黄色变成红色。分别将0、100、150、200、250、290 μL的0.01 mol·L<sup>-1</sup> HCl加入到10 mL PME分析缓冲液中,绘制标准曲线。由样品在525 nm波长处测得的吸光值得到相应的H<sup>+</sup>浓度,由此可以算出果胶甲酯酶活性。

### 1.3.4 伴矿景天细胞壁果胶的提取和含量的测定

细胞壁果胶的提取参考 Zhang 等<sup>[16]</sup>的方法进行。将20 mL 0.5%草酸铵缓冲液(内含0.1% NaHB<sub>4</sub>)加入至0.000 5 g细胞壁样品中,沸水中煮沸1 h,10 000×g离心5 min,取上清液,重复一次,将两次的上清液混合,测量体积,上清液即为总果胶。

A:细胞壁在70℃烘干,用研钵研碎,称取0.01 g的细胞壁样品于50 mL离心管中,加入10 mL 0.5 mol·L<sup>-1</sup>咪唑溶液(pH 7.0)常温振荡24 h,5 000×g离心后取上清液。再用提取液离心洗涤2~3次后合并上清液,测量体积,可计算出螯合态果胶含量<sup>[17]</sup>。

B:将A步取上清液所留沉淀用超纯水离心冲洗2次,然后加入10 mL 50 mmol·L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>(内含20 mmol·

L<sup>-1</sup> CDTA)提取碱性果胶,方法同螯合态果胶提取。

### 1.3.5 伴矿景天细胞壁果胶半乳糖醛酸测定

果胶中糖醛酸含量参考 Willats 等<sup>[18]</sup>、宾文等<sup>[19]</sup>的方法测定。称取0.1 g干燥的半乳糖醛酸,在100 mL容量瓶中加水定容,混匀,制成1 mg·mL<sup>-1</sup>标准溶液。比色管中倒入0、0.05、0.15、0.30、0.45、0.60 mL和0.75 mL标准溶液,用水稀释至10 mL,取上述标准溶液各1 mL冰浴10 min,加入硫酸-硼酸盐溶液振荡30 s,样品煮沸5 min,冷却后加入0.1 mL 0.15%间二苯酚显色,充分振荡。静置20 min后在525 nm测量吸光度,绘制标准曲线。取果胶样品进行上述操作,依据标准曲线计算其细胞壁果胶半乳糖醛酸含量。

### 1.4 数据计算与处理

富集系数=植物体内Cd含量/土壤Cd含量

转运系数=植物地上部Cd含量/地下部Cd含量

有效转运系数=(植物地上部Cd含量×植物地上部生物量)/(地下部Cd含量×植物地下部生物量)

数据采用Excel计算平均值和标准差,用Origin制图,并利用SPSS 17.0进行差异显著性检验和相关性分析。

## 2 结果与分析

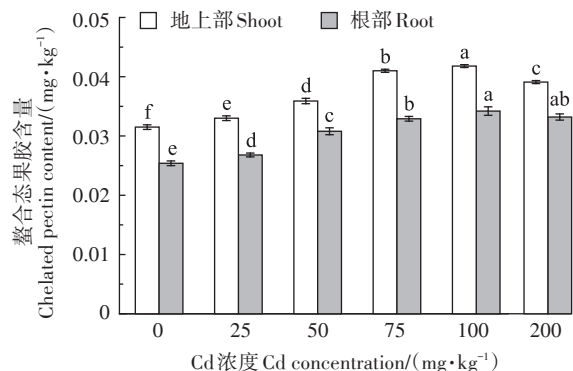
### 2.1 伴矿景天细胞壁果胶含量的变化

#### 2.1.1 伴矿景天细胞壁中螯合态果胶含量

如图1所示,伴矿景天地上部的螯合态果胶含量在不同Cd处理浓度下均大于根部。随着Cd处理浓度的升高,伴矿景天植物地上部和地下部的螯合态果胶含量总体表现出先增加后减少的趋势,在Cd处理浓度为0~100 mg·kg<sup>-1</sup>范围内呈现增长趋势,地上部和地下部的螯合态果胶含量在100 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理浓度时同时达到最高,与对照相比分别显著增加了32.7%和34.6%,且各Cd浓度处理与对照均差异显著( $P<0.05$ );在100~200 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理浓度范围内呈现递减趋势。总的来说,不同Cd处理浓度下,伴矿景天地上部和根部细胞壁螯合态果胶含量均显著高于对照。

#### 2.1.2 伴矿景天细胞壁碱性果胶含量

如图2所示,除25 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理浓度外,伴矿景天地上部和根部细胞壁碱性果胶含量均显著高于对照。与对照相比,4个Cd处理浓度下地上部碱性果胶含量分别增加了27.9%、30.4%、30.9%、25.0%;根部碱性果胶含量分别增加了15.0%、16.7%、17.6%、13.0%。随着Cd浓度的上升,伴矿景天地上部和根部



不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。  
The different lowercase letters indicate significant differences among treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

图1 不同浓度Cd处理对伴矿景天细胞壁螯合态果胶含量的影响

Figure 1 Effects of different concentrations of Cd on the content of chelated pectin in the cell wall of *S. plumbizincicola*

的碱性果胶含量总体呈现先增加后减少的趋势,在Cd处理浓度为0~100 mg·kg<sup>-1</sup>范围内呈现增长趋势,并在100 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理浓度时地上部和根部的碱性果胶含量均达到最大值,分别为0.026 mg·kg<sup>-1</sup>和0.028 mg·kg<sup>-1</sup>;在100~200 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理浓度范围内呈现递减趋势。总的来说,伴矿景天地上部细胞壁碱性果胶含量在不同Cd处理浓度下均小于根部。

## 2.2 伴矿景天细胞壁果胶甲酯酶活性的变化

伴矿景天细胞壁果胶甲酯酶活性的变化如图3所示,从地上部果胶甲酯酶活性来看,在Cd处理浓度为25 mg·kg<sup>-1</sup>和75 mg·kg<sup>-1</sup>时,PME活性与对照相比分别显著增加了40.4%和27.6%。在Cd处理浓度为25 mg·kg<sup>-1</sup>时,PME活性最大;在200 mg·kg<sup>-1</sup> Cd浓度下,PME活性最小。由图3可以看出,除了Cd处理浓

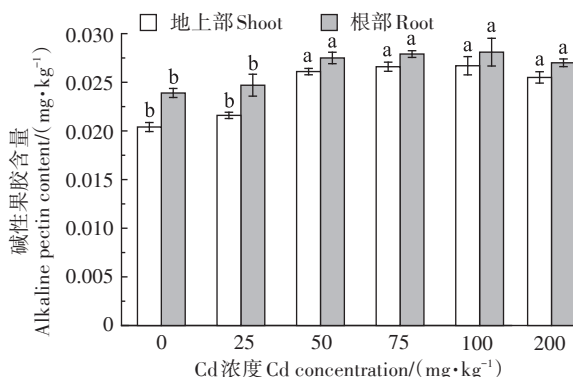


图2 不同浓度Cd处理对伴矿景天细胞壁碱性果胶含量的影响

Figure 2 Effects of different concentrations of Cd on alkaline pectin content in the cell wall of *S. plumbizincicola*

度为50 mg·kg<sup>-1</sup>外,其他Cd处理伴矿景天细胞壁PME活性与对照差异显著 ( $P<0.05$ );从根部果胶PME活性来看,随着Cd处理浓度的增加,PME活性逐渐降低,与对照相比,分别减少了11.6%、11.0%、17.6%、22.3%和59.2%,且在Cd处理浓度为75、100 mg·kg<sup>-1</sup>和200 mg·kg<sup>-1</sup>时,PME活性与对照组间差异显著 ( $P<0.05$ )。

## 2.3 伴矿景天细胞壁果胶半乳糖醛酸含量变化

由图4可知,相同Cd浓度下伴矿景天地上部半乳糖醛酸含量比根部低。随着Cd处理浓度的增加,地上部细胞壁果胶半乳糖醛酸含量先增加后降低,且细胞壁果胶半乳糖醛酸含量在Cd浓度25 mg·kg<sup>-1</sup>时达到最大值,与对照相比增加了39.2%;根部细胞壁果胶半乳糖醛酸含量呈现相同趋势,同样在Cd浓度25 mg·kg<sup>-1</sup>时达到最大值,与对照相比增加了1.1%。这可能是由于植物在受到高浓度Cd胁迫时,植株内

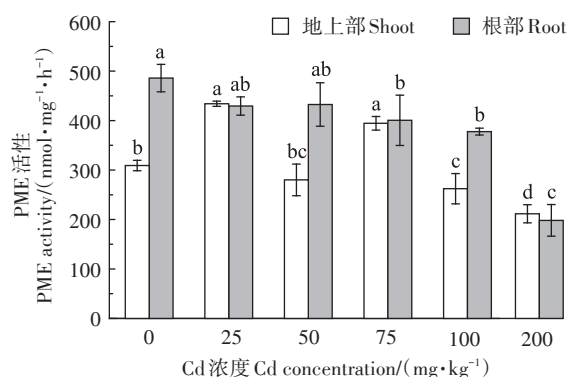


图3 不同Cd浓度处理下伴矿景天细胞壁PME活性的变化  
Figure 3 Changes in cell wall PME activity of *S. plumbizincicola* under different concentrations of Cd stress

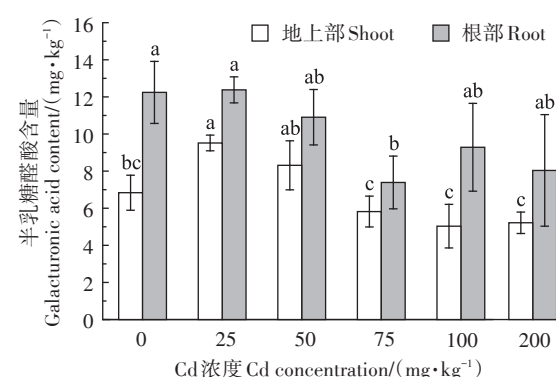


图4 不同Cd浓度处理下伴矿景天体内半乳糖醛酸含量

Figure 4 Contents of galacturonic acid in *S. plumbizincicola* under different Cd concentrations

的Cd结合所需要的半乳糖醛酸更多。

#### 2.4 伴矿景天Cd累积特征

从图5可知,随着Cd处理浓度的增加,伴矿景天地上部和根部Cd含量均呈先增加后减少的趋势,而且地上部Cd含量明显高于根部。从伴矿景天地上部Cd含量来看,各处理Cd含量与对照相比均显著增加,分别增加了17.2、40.0、58.4、49.1倍和47.4倍,且植物地上部Cd含量除在100 mg·kg<sup>-1</sup>和200 mg·kg<sup>-1</sup>处理间无显著差异外,其他Cd浓度处理间均存在显著差异( $P<0.05$ )。从伴矿景天根部Cd含量来看,各处理Cd含量与对照相比均显著增加,分别增加了36.4、41.7、70.1、21.5倍和39.3倍。在75 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理浓度时,地上部和地下部的Cd含量都达到最大值。由此可见,伴矿景天是一种Cd积累能力较强的植物,能够较好地吸收和转运土壤中的Cd,但Cd主要积累在天上部,根部累积量较少。

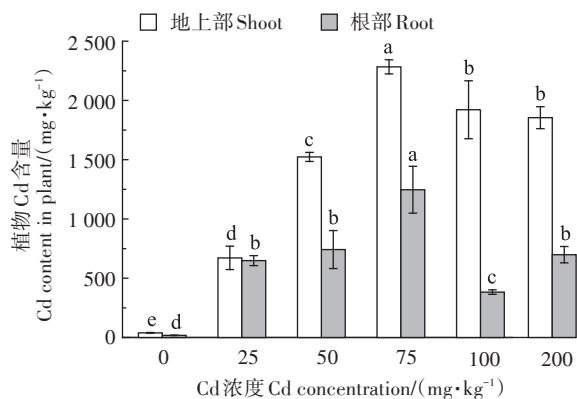


图5 不同Cd浓度处理下伴矿景天体内Cd含量

Figure 5 Cd content in *S. plumbizincicola* under different Cd concentrations

由表2可知,伴矿景天地上部生物量随Cd处理浓度的增加呈先增加后减少的趋势。与对照相比,50、75 mg·kg<sup>-1</sup> Cd处理地上部生物量分别增加了4.9%、22.5%,Cd处理浓度为100、200 mg·kg<sup>-1</sup>时地上部生物量分别降低了6.9%、58.9%。Cd处理浓度为75 mg·kg<sup>-1</sup>时地上部生物量达到最大值,浓度为200 mg·kg<sup>-1</sup>时降至最小值,且在Cd处理浓度为25、75、200 mg·kg<sup>-1</sup>时与对照之间存在显著差异( $P<0.05$ )。伴矿景天根部生物量随Cd处理浓度的增加逐渐降低,与对照相比,分别显著降低了52.9%、49.6%、43.8%、63.6%、78.5%( $P<0.05$ )。由此可见,中低浓度的Cd可以促进伴矿景天植株生长,中高浓度的Cd对其生长有一定的抑制作用。

由表3可知,伴矿景天富集系数在Cd处理浓度为50、75、100 mg·kg<sup>-1</sup>时,分别为对照的2.1、1.4、3.0倍。而在Cd处理浓度为25、200 mg·kg<sup>-1</sup>时与对照相比降低了23.0%、58.1%,表明在中高Cd浓度处理时,伴矿景天对Cd具有较强的富集能力。伴矿景天转运系数在Cd处理浓度为100、200 mg·kg<sup>-1</sup>时,分别为对照的2.3、1.2倍,在Cd处理浓度为25、50、75 mg·kg<sup>-1</sup>时与对照相比分别降低了54.5%、4.5%、18.2%,表明高浓度Cd处理能够提高伴矿景天从根部向地上部转运Cd的能力,中低浓度Cd处理减少了Cd向地上部的转运。伴矿景天有效转运系数除在Cd处理浓度为25 mg·kg<sup>-1</sup>时与对照相比是降低的,其余Cd浓度处理下与对照相比均是增加的。

#### 2.5 相关性分析

由表4可知,伴矿景天植株Cd含量与细胞壁整合态果胶含量呈显著正相关,相关系数分别为0.903

表2 不同Cd浓度处理下伴矿景天生物量(g·株<sup>-1</sup>)

Table 2 Biomass of *S. plumbizincicola* under different Cd concentrations(g·plant<sup>-1</sup>)

| 部位 Parts | 0 mg·kg <sup>-1</sup> | 25 mg·kg <sup>-1</sup> | 50 mg·kg <sup>-1</sup> | 75 mg·kg <sup>-1</sup> | 100 mg·kg <sup>-1</sup> | 200 mg·kg <sup>-1</sup> |
|----------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 地上部      | 5.33±0.22bc           | 4.69±0.14d             | 5.59±0.1b              | 6.53±0.21a             | 4.96±0.15cd             | 2.19±0.26e              |
| 根部       | 1.21±0.22a            | 0.57±0.07bc            | 0.61±0.05bc            | 0.68±0.03b             | 0.44±0.06cd             | 0.26±0.04d              |

注:同行不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant differences among treatments( $P<0.05$ ).

表3 不同Cd浓度处理下伴矿景天Cd累积特征

Table 3 Cd accumulation characteristics of *S. plumbizincicola* under different Cd concentrations

| 项目 Item | 0 mg·kg <sup>-1</sup> | 25 mg·kg <sup>-1</sup> | 50 mg·kg <sup>-1</sup> | 75 mg·kg <sup>-1</sup> | 100 mg·kg <sup>-1</sup> | 200 mg·kg <sup>-1</sup> |
|---------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 富集系数    | 74                    | 57                     | 159                    | 101                    | 220                     | 31                      |
| 转运系数    | 2.2                   | 1.0                    | 2.1                    | 1.8                    | 5.0                     | 2.7                     |
| 有效转运系数  | 9.7                   | 8.5                    | 18.9                   | 17.5                   | 56.2                    | 22.4                    |

表4 伴矿景天植株Cd含量、PME活性、螯合态果胶含量、碱性果胶含量和半乳糖醛酸含量间的相关性分析  
Table 4 Correlation analysis of Cd content ,PME activity ,chelated pectin content , alkaline pectin content and galacturonic acid content of *Sedum plumbizincicola*

| 项目<br>Item | 部位<br>Part | 地上部Cd含量<br>Cd content in<br>shoot | 根部Cd含量<br>Cd content in<br>root | PME活性<br>PME activity | 螯合态果胶含量<br>Chelated pectin<br>content | 碱性果胶含量<br>Alkaline pectin<br>content | 半乳糖醛酸含量<br>Galacturonic acid<br>content |
|------------|------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|
| 植株Cd含量     | 地上部        | 1                                 | 0.733                           | -0.244                | 0.903*                                | 0.919**                              | -0.565                                  |
|            | 根部         |                                   | 1                               | -0.280                | 0.881*                                | 0.758                                | -0.643                                  |
| PME活性      | 地上部        |                                   |                                 | 1                     | -0.312                                | -0.371                               | 0.734                                   |
|            | 根部         |                                   |                                 | 1                     | -0.639                                | -0.428                               | 0.683                                   |
| 螯合态果胶含量    | 地上部        |                                   |                                 |                       | 1                                     | 0.909*                               | -0.741                                  |
|            | 根部         |                                   |                                 |                       | 1                                     | 0.952**                              | -0.880*                                 |
| 碱性果胶含量     | 地上部        |                                   |                                 |                       |                                       | 1                                    | -0.529                                  |
|            | 根部         |                                   |                                 |                       |                                       | 1                                    | -0.793                                  |
| 半乳糖醛酸含量    | 地上部        |                                   |                                 |                       |                                       |                                      | 1                                       |
|            | 根部         |                                   |                                 |                       |                                       |                                      | 1                                       |

注:\*显著水平  $P<0.05$ ,\*\*极显著水平  $P<0.01$ 。  
Note:\* indicates significant correlation at  $P<0.05$  level,\*\* indicates highly significant correlation at  $P<0.01$  level.

和0.881( $P<0.05$ ),伴矿景天地上部Cd含量与细胞壁碱性果胶含量呈极显著正相关( $r=0.919$ , $P<0.01$ );细胞壁碱性果胶含量与螯合态果胶含量之间呈显著正相关,相关系数分别为0.909( $P<0.05$ )和0.952( $P<0.01$ ),表明在细胞壁对Cd的累积过程中,果胶含量越高,伴矿景天对Cd的累积量越大。伴矿景天根部细胞壁螯合态果胶含量与细胞壁果胶半乳糖醛酸含量呈显著负相关( $r=-0.880$ , $P<0.05$ ),表明随着螯合态果胶含量的增加,细胞壁果胶半乳糖醛酸含量会降低。

3 讨论

细胞壁是响应重金属胁迫的功能信号分子和代谢所在的位点,参与植物对重金属胁迫的响应过程<sup>[20-21]</sup>。植物通过改变细胞壁中各种化学成分的含量来提高细胞壁对金属离子的结合量,这是植物细胞壁耐Cd胁迫的一种机制。细胞壁的多糖组分尤其是果胶在固定Cd方面发挥重要作用,果胶含量的变化可能是植物重金属耐性机理的表征<sup>[22]</sup>。果胶作为细胞壁的主要成分之一,其含量变化是植物对重金属胁迫的一种响应机制。Cd胁迫下植物可通过调整果胶含量来增加或减少对重金属的积累。Konno等<sup>[23]</sup>研究发现,剑叶舌叶藓原丝体细胞壁上的果胶结合了43%的Cu。袁翠红<sup>[24]</sup>研究发现,果胶的去除使得细胞壁负电荷显著减少,降低了其与阳离子的结合能力,减弱其对重金属离子的抗性;Yu等<sup>[25]</sup>的研究表明,果胶的去除使水稻根系吸附Cd的能力下降了50%。徐劼

等<sup>[26]</sup>研究发现,对芹菜细胞壁进行果胶酶改性处理,可去除根细胞中的部分果胶质,果胶含量降低后,其对Cd的吸附能力降低了40.5%。在细胞壁果胶组分中,螯合态果胶的含量显著高于碱性果胶,螯合态果胶占果胶组分的绝大部分<sup>[27]</sup>。在本研究中,随着Cd胁迫浓度的增加,细胞壁螯合态果胶含量和碱性果胶含量增加(图1、图2),植物对Cd的累积量也增加(图5),且细胞壁螯合态果胶含量高于碱性果胶含量,表明在植物对Cd的累积过程中,螯合态果胶具有重要作用。

在细胞壁果胶组成中最基本的三种结构是同聚半乳糖醛酸(Homogalacuraonic acid, HG)、聚鼠李糖半乳糖醛酸Ⅰ(Rhomnogalacturonan Ⅰ, RGⅠ)和聚鼠李糖半乳糖醛酸Ⅱ(Rhomnogalacturonan Ⅱ, RGⅡ)<sup>[28]</sup>,其中同聚半乳糖醛酸和聚鼠李糖半乳糖醛酸含有很多负电基团,可以与多种重金属螯合<sup>[29]</sup>。但在三种果胶结构域中,HG约占果胶多糖的70%,在细胞壁果胶结合重金属过程中发挥重要作用<sup>[27]</sup>。另外,半乳糖醛酸羧基在甲基转移酶的催化下形成甲基或者甲酯化。高度甲酯化的果胶分泌到细胞壁中,酯基就会被细胞壁内的果胶甲酯酶进行不同程度的去甲酯化,产生游离的羧基,与细胞壁中70%~90%的阳离子结合<sup>[30]</sup>。在本研究中,低浓度Cd胁迫下伴矿景天细胞壁果胶半乳糖醛酸含量增加,植物Cd含量也随之增加,这是因为细胞壁果胶半乳糖醛酸在PME的作用下发生酯化反应,产生更多游离的羧基与Cd<sup>2+</sup>结合。有研究发现,细胞壁果胶中结合铜离子的主要组分为HG,HG可与

约40%的铜离子紧密结合,且在低浓度铜处理下,HG含量会增加<sup>[23]</sup>。这表明细胞壁果胶半乳糖醛酸含量的变化是响应细胞壁对Cd累积的一种机制。

有研究发现,植物细胞壁重金属积累量与果胶的甲酯化程度有关,低酯化的果胶含有较多游离的羧基,可以提供更多重金属离子结合位点,而果胶甲酯化程度与细胞壁果胶甲酯酶活性之间存在密切关系<sup>[31-32]</sup>。在植物生长过程中,PME会促使甲酯化果胶上的甲醇基从同聚半乳糖醛酸上脱离,降低果胶甲酯化程度,产生游离的羧基,增加与重金属离子的结合位点<sup>[33]</sup>。本研究发现,在Cd胁迫下PME活性降低,果胶含量增加,伴矿景天对Cd的累积量增加,这是因为PME可以通过影响果胶酯化程度为细胞壁结合重金属离子提供更多的带负电基团来响应Cd的胁迫。Szerement等<sup>[10]</sup>研究发现,Cd胁迫使萝卜根中果胶甲基酯酶活性降低,果胶含量和果胶甲基化程度增加,植物Cd累积量增加。郭军康等<sup>[34]</sup>研究发现PME活性会影响细胞壁果胶的含量,果胶含量增加,PME活性会降低,植物对Cd的累积量会增加。本研究发现,不同浓度Cd胁迫下,伴矿景天细胞壁果胶半乳糖醛酸含量先增加后降低,螯合态果胶含量和碱性果胶含量随Cd处理浓度的增加而增加,根部细胞壁果胶甲酯酶活性逐渐降低。但在低浓度Cd处理下,伴矿景天细胞壁螯合态果胶含量、碱性果胶含量和细胞壁果胶半乳糖醛酸含量显著增加,其结果与Cd胁迫下非超积累生态型东南景天和番茄细胞壁果胶含量、褐藻细胞壁中的甘露糖和半乳糖醛酸含量变化一致<sup>[22,28,35]</sup>。

综上所述,在伴矿景天细胞壁果胶对Cd的累积过程中,螯合态果胶含量和碱性果胶含量显著增加,而PME则通过影响果胶发生甲酯化反应,导致半乳糖醛酸结构改变,产生大量游离的羧基,为果胶结合重金属离子提供更多的结合位点,进而增加细胞壁果胶对Cd<sup>2+</sup>的吸附。

## 4 结论

(1)伴矿景天地上部和根部细胞壁螯合态果胶、碱性果胶含量以及地上部果胶甲酯酶活性、果胶半乳糖醛酸含量和根部果胶半乳糖醛酸含量均随着Cd浓度的升高先增加后减少,根部果胶甲酯酶活性与对照相比逐渐降低。

(2)随着Cd处理浓度的增加,伴矿景天体内Cd累积量先增加后减少,在75 mg·kg<sup>-1</sup> Cd浓度时累积量达到最高,且地上部Cd累积量高于地下部。

(3)伴矿景天细胞壁螯合态果胶与植物Cd含量显著正相关,碱性果胶含量与植物地上部Cd含量呈极显著正相关,伴矿景天根部螯合态果胶含量与果胶半乳糖醛酸含量呈显著负相关。

## 参考文献:

- [1] 王晓娟,王文斌,杨龙,等. 重金属镉(Cd)在植物体内的转运途径及其调控机制[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7921-7929. WANG X J, WANG W B, YANG L, et al. Transport pathways of cadmium(Cd) and its regulatory mechanisms in plant[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(23): 7921-7929.
- [2] ZU Y Q, MEI X Y, LI B, et al. Effects of calcium application on the yields of flavonoids and saponins in *Panax notoginseng* under cadmium stress[J]. *International Journal of Environmental & Analytical Chemistry*, 2020, 102(16): 4208-4219.
- [3] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等.《全国土壤污染状况调查公报》探析[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 *Bulletin of National Soil Pollution Survey*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [4] 关萍,金恺,袁蕴宁,等. 镉胁迫对两种蕹菜生长的影响及其在植物体内的积累和转运特性[J]. 沈阳农业大学学报, 2020, 51(6): 714-720. GUAN P, JIN K, YUAN Y N, et al. Effects of cadmium stress on growth of two species of *orippa* and the characteristics of accumulation and translocation to Cd in plants[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2020, 51(6): 714-720.
- [5] COLZI I, DOUMETT S, BUBBA M D, et al. On the role of the cell wall in the phenomenon of copper tolerance in *Silene paradoxa* L[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2011, 72(1): 77-83.
- [6] MUSCHITZ A, RIOU C, MOLLET J C, et al. Modifications of cell wall pectin in tomato cell suspension in response to cadmium and zinc[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2015, 37: 245.
- [7] 郑绍建. 细胞壁在植物抗营养逆境中的作用及其分子生理机制[J]. 中国科学, 2014, 44(4): 334-341. ZHENG S J. The role of cell wall in plant resistance to nutritional stresses and the underlying physiological and molecular mechanisms[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2014, 44(4): 334-341.
- [8] 王胜,孟昆,罗会颖,等. 果胶甲酯酶的结构与功能研究进展[J]. 生物工程学报, 2020, 36(6): 1021-1030. WANG S, MENG K, LUO H Y, et al. Research progress in structure and function of pectin methyl-esterase[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2020, 36(6): 1021-1030.
- [9] GAO M Y, CHEN X W, HUANG W X, et al. Cell wall modification induced by an arbuscular mycorrhizal fungus enhanced cadmium fixation in rice root[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 416: 125894.
- [10] SZEREMENT J, SZATANIK-KLOC A. Cell-wall pectins in the roots of *Apiaceae* plants: Adaptations to Cd stress[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2022, 44(5): 1-9.
- [11] 何玉君,孙梦荷,沈亚婷,等. 超富集植物与重金属相互作用机制及应用研究进展[J]. 岩矿测试, 2020, 39(5): 639-657. HE Y J, SUN M H, SHEN Y T, et al. Research progress on the interaction

- mechanism between hyperaccumulator and heavy metals and its application[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2020, 39(5):639–657.
- [12] 董明芳, 郭军康, 冯人伟, 等.  $\text{Fe}^{2+}$ 和 $\text{Mn}^{2+}$ 对水稻根表铁膜及镉吸收转运的影响[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(3):249–253. DONG M F, GUO J K, FENG R W, et al. Effects of  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{Mn}^{2+}$  on rice root iron plaque formation and Cd uptake and transportation[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2017, 39(3):249–253.
- [13] ZHONG H, LAUCHIL A. Changes of cell wall composition and polymer size in primary roots of cotton seedlings under high salinity[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1993, 44(261):773–778.
- [14] BORDENAVE M, GOLDBERG R. Immobilized and free apoplastic pectin methylesterases in mung bean hypocotyl[J]. *Plant Physiology*, 1994, 106(3):1151–1156.
- [15] RICHARD L, QIN L X, GADAL P, et al. Molecular cloning and characterisation of a putative pectin methylesterase cDNA in *Arabidopsis thaliana* (L.) [J]. *FEBS Letters*, 1994, 355(2):135–139.
- [16] ZHANG X H, LIN A J, GAO Y L, et al. Arbuscular mycorrhizal colonisation increases copper binding capacity of root cell walls of *Oryza sativa* L. and reduces copper uptake[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(5):930–935.
- [17] 刘家友, 喻敏, 刘丽屏, 等. 硼对豌豆根边缘细胞和根细胞壁多糖组分含量的影响[J]. 华中农业大学学报, 2009, 3:311–315. LIU J Y, YU M, LIU L P, et al. Effect of boron on the content of cell wall polysaccharides in border cells and root apices of pea (*Pisum sativum*) [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2009, 3:311–315.
- [18] WILLATS W G, KNOX J P, MIKKELSEN J D. Pectin: New insights into an old polymer are starting to gel[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2006, 17(3):97–104.
- [19] 宾文, 于荣敏, 白秀峰. 人工培养蛹虫草多糖的研究[J]. 沈阳药科大学学报, 2000, 17(5):361–364. BIN W, YU R M, BAI X F. Studies on polysaccharide in the tissue cultures of *Cordyceps militaris* [J]. *Journal of Shenyang Pharmaceutical University*, 2000, 17(5):361–364.
- [20] CHEN G C, LIU Y Q, WANG R M, et al. Cadmium adsorption by willow root: The role of cell walls and their subfractions[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(8):5665–5672.
- [21] DALCORO G, FARINATI S, FURINI A. Regulatory networks of cadmium stress in plants[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2010, 5(5):663–667.
- [22] 王学华, 戴力. 作物根系镉滞留作用及其生理生化机制[J]. 中国农业科学, 2016, 49(22):4323–4341. WANG X H, DAI L. Immobilization effect and its physiology and biochemical mechanism of the cadmium in crop roots[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(22):4323–4341.
- [23] KONNO H, NAKASHIMA S, KATOH K. Metal-tolerant moss *Scopelophila cataractae* accumulates copper in the cell wall pectin of the protonema[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2010, 167(5):358–364.
- [24] 袁翠红. 可溶性果胶对根细胞壁阳离子结合性质的影响[J]. 分子植物育种, 2021, 19(19):6581–6586. YUAN C H. Effect of soluble pectin on the cationic binding properties of root cell wall[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(19):6581–6586.
- [25] YU H, WU Y, HUANG H, et al. The predominant role of pectin in binding Cd in the root cell wall of a high Cd accumulating rice line (*Oryza sativa* L.) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 206:111210.
- [26] 徐劼, 保积庆. 芹菜根细胞壁对镉的吸附固定机制及其FTIR表征研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(8):2605–2612. XU J, BAO J Q. Adsorption and fixation mechanism of cadmium on celery (*Apium graveolens* L.) root cell wall and the analysis of FTIR spectra[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(8):2605–2612.
- [27] 刘婷婷, 彭程, 王梦, 等. 海州香薷根细胞壁对铜的吸附固定机制研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2):514–523. LIU T T, PENG C, WANG M, et al. Mechanism of fixation and adsorption of copper on root cell wall of *Elsholtzia splendens* [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(2):514–523.
- [28] 曹升, 罗洁文, 胡华英, 等. 类芦根细胞壁对铅的吸附固定机制[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3):496–503. CAO S, LUO J W, HU H Y, et al. Lead adsorption and fixation mechanisms in root cell walls of *Neyraudia reynaudiana* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(3):496–503.
- [29] 代晶晶. 镉胁迫对不同品种油菜根系细胞壁多糖组分及其吸附镉的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017:12–13. DAI J J. Response mechanisms of polysaccharide in root cell wall and cadmium adsorption of pakchoi with different Cd-tolerance[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017:12–13.
- [30] CAFFALL K H, MOHNEN D. The structure, function, and biosynthesis of plant cell wall pectic polysaccharides[J]. *Carbohydrate Research*, 2009, 344(14):1879–1900.
- [31] 唐剑锋, 罗湖旭, 林咸永, 等. 铝胁迫下小麦根细胞壁果胶甲酯酶活性的变化及其与耐铝性的关系[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2006, 32(2):145–151. TANG J F, LUO H X, LIN X Y, et al. Aluminum-induced changes in cell-wall pectin methylesterase activity of wheat seedlings in relation to their aluminum tolerance[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci)*, 2006, 32(2):145–151.
- [32] WU X, SONG H, GUAN C, et al. Boron alleviates cadmium toxicity in *Brassica napus* by promoting the chelation of cadmium onto the root cell wall components[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 728:138833.
- [33] MOUSTACAS A M, NARI J, BOREL M, et al. Pectin methylesterase, metal ions and plant cell-wall extension: The role of metal ions in plant cell wall extension[J]. *Biochemical Journal*, 1991, 279(2):351–354.
- [34] 郭军康, 周冉, 任心豪, 等. 不同年限设施菜地番茄细胞壁果胶Cd累积的研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1):45–51. GUO J K, ZHOU R, REN X H, et al. Accumulation of Cd in cell wall pectin of tomato plants grown in greenhouse soil of different planting years[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1):45–51.
- [35] 周冉. 番茄细胞壁果胶累积重金属Cd机制研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2018:27–40. ZHOU R. Study of mechanism for cadmium accumulation by pectin in tomato cell wall[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2018:27–40.