

‘光谱’月季对Cd、Zn的富集特征和耐性机制

俞诗音, 潘淑桢, 唐敏, 王美仙

引用本文:

俞诗音, 潘淑桢, 唐敏, 王美仙. ‘光谱’月季对Cd、Zn的富集特征和耐性机制[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(1): 48–59.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0186>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

Zn对水稻吸收转运Cd的影响

陈仕淼, 辛子兵, 陆覃昱, 郑富海, 何冰

农业环境科学学报. 2019, 38(10): 2270–2277 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0174>

硅锌互作对水稻幼苗镉吸收转运特性的影响

焦欣田, 薛卫杰, 赵艳玲, 张长波, 闫雷, 刘仲齐

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2491–2497 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0880>

施锰微肥对镉污染土壤中玉米生长及镉吸收分配的影响

胡艳美, 吕金朔, 孙维兵, 张兴, 陈璐, 郭大维, 党秀丽

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

猪场粪水施用对设施白菜及土壤重金属的影响

程娟, 刘沐衡, 肖能武, 杨柳, 杜会英, 杜连柱, 张克强

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2559–2567 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1030>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

俞诗音, 潘淑桢, 唐敏, 等. ‘光谱’月季对Cd、Zn的富集特征和耐性机制[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(1): 48–59.

YU S Y, PAN S Z, TANG M, et al. Cd and Zn accumulation characteristics and tolerance mechanism of *Rosa* ‘Spectra’ [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(1): 48–59.



开放科学 OSID

‘光谱’月季对Cd、Zn的富集特征和耐性机制

俞诗音, 潘淑桢, 唐敏, 王美仙*

(北京林业大学园林学院, 国家花卉工程技术研究中心, 城乡生态环境北京实验室, 北京 100083)

摘要:为进一步研究月季对Cd、Zn的富集特征和耐性机制,以‘光谱’月季(*Rosa* ‘Spectra’)为研究对象,采用盆栽污染模拟试验,研究不同Cd含量(0、25、50、100、200 mg·kg⁻¹)和Zn含量(0、500、1 000、1 500、2 000 mg·kg⁻¹)单一胁迫下‘光谱’月季的生物量和生理指标变化,以及重金属积累转运机制。结果表明:低含量Cd、Zn处理促进‘光谱’月季的生长,随着处理含量的增加,‘光谱’月季生长受到抑制,但均未致死。‘光谱’月季体内吸收的Cd、Zn主要积累在根系,含量分别为68.48、918.74 mg·kg⁻¹,其中Cd主要以NaCl提取态存在,占比为25.19%~60.80%,Zn主要以HAc提取态和去离子水提取态存在,占比分别为20.20%~46.65%和12.69%~29.33%。随处理含量的增加,Cd、Zn处理组都提高了毒性较低的提取态占比,以减弱Cd、Zn对植物根系的毒害。根系中的Cd、Zn均主要富集在细胞碎屑组分,占比分别为55.01%~77.38%、52.35%~63.17%,其次是金属富集颗粒组分和热稳定蛋白组分。随处理含量的增加,‘光谱’月季根系内的Cd、Zn表现出向可溶性组分转移的特征。Cd、Zn处理下,‘光谱’月季根系细胞中均出现黑色颗粒物质,且其密度随着处理含量的增加而增大。根系细胞壁上与Cd、Zn结合的官能团均是羟基、氨基。研究表明,通过根部吸收限制、细胞壁固定、液泡区隔化将Cd、Zn转化为低活性的形态赋存,以及用细胞壁上的羟基、氨基提供结合位点,可能是‘光谱’月季应对Cd、Zn胁迫的重要机制。

关键词:‘光谱’月季;Cd;Zn;富集特征;耐性机制

中图分类号:S685.12;X173;X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)01-0048-12 doi:10.11654/jaes.2023-0186

Cd and Zn accumulation characteristics and tolerance mechanism of *Rosa* ‘Spectra’

YU Shiyin, PAN Shuzhen, TANG Min, WANG Meixian*

(School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, National Engineering Research Center for Floriculture, Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing 100083, China)

Abstract: Simulated pot pollution was adopted with *Rosa* ‘Spectra’ as the research object to further study the enrichment characteristics and tolerance mechanisms of Cd and Zn in Chinese rose. The biomass and physiological indexes, as well as the mechanism of heavy metal accumulation and transport of *Rosa* ‘Spectra’ were studied under the single stress of Cd content (0, 25, 50, 100 mg·kg⁻¹, and 200 mg·kg⁻¹) and Zn content (0, 500, 1 000, 1 500 mg·kg⁻¹, and 2 000 mg·kg⁻¹). The results showed that: the treatment of low Cd and Zn content promoted the growth of *Rosa* ‘Spectra’. With an increase in content, the growth of *Rosa* ‘Spectra’ was inhibited, but no death was caused. Cd and Zn absorbed by the *Rosa* ‘Spectra’ were mainly accumulated in the root system, with contents of 68.48 mg·kg⁻¹ and 918.74 mg·kg⁻¹ respectively. Cd predominately existed in NaCl-extracted forms, accounting for 25.19%–60.80%, while Zn primarily existed in HAc-

收稿日期:2023-03-14 录用日期:2023-06-15

作者简介:俞诗音(1999—),女,浙江舟山人,硕士研究生,从事园林植物应用研究。E-mail:yusinyin@163.com

*通信作者:王美仙 E-mail:wangmx@bjfu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(31600574);北京市共建项目专项;北京林业大学建设世界一流学科和特色发展引导专项资金项目(2019XKJS0322);北京市教委科学研究与研究生培养共建科研项目(2019GJ-03)

Project supported: National Natural Science Foundation of China (31600574); Beijing Joint Construction Project; Beijing Forestry University to Build a World-Class Discipline and Guide the Development Special Fund (2019XKJS0322); Scientific Research and Postgraduate Training Joint Research Project of Beijing Education Commission (2019GJ-03)

extracted and deionized water forms, accounting for 20.20%–46.65%, 12.69%–29.33% respectively. With the increase of treatment gradients, both Cd and Zn treatment groups increased the proportion of extraction states with low toxicity, so as to weaken the toxicity of Cd and Zn in plant roots. Cd and Zn enrichment in the roots were mostly in the cellular debris fraction, accounting for 55.01%–77.38%, 52.35%–63.17% respectively, and followed by the metal-rich granule and heat stable protein fractions. With the increase in treatment gradients, Cd and Zn in the root of *Rosa* ‘Spectra’ showed characteristics of transferring to soluble components. Under Cd and Zn treatment, black particulate matter appeared in root cells of *Rosa* ‘Spectra’, and the density increased with increasing treatment gradients. The functional groups binding Cd and Zn on the root cell wall are hydroxyl and amino groups. Research shows that root absorption restriction, cell wall fixation, vacuoles segregation, conversion of Cd and Zn into less active forms, and the use of hydroxyl and amino groups on the cell wall to provide binding sites may be significant mechanisms for *Rosa* ‘Spectra’ to cope with Cd and Zn stress.

Keywords: *Rosa* ‘Spectra’; Cd; Zn; accumulation characteristics; tolerance mechanism

城市土壤重金属污染已成为人类日益关注的热点之一^[1]。Cd和Zn是目前污染土壤较为严重的两种金属,二者化学性质相似,且为同族重金属元素,常共存于土壤中^[2]。Cd是植物生长的非必需元素,具有较高的流动性、积累性和毒性^[3]。Zn是植物生长的必需营养元素,可调节植物生理和代谢过程,但过量的Zn会导致植物生长缓慢、叶片枯黄和营养紊乱^[4]。植物修复技术主要通过植物的新陈代谢作用来吸收、固定、降解、挥发土壤重金属,是一项成本低、环境友好、可持续的土壤重金属治理措施,具有十分广阔的应用前景^[5]。目前,植物修复研究主要集中在草本植物^[6–8],但其生物量小,且多呈野生状态,这很大程度上限制了它们在城市土壤中的修复应用。为此,筛选应用范围广并对重金属具有耐性的园林木本植物成为新的研究方向之一^[9]。

月季(*Rosa chinensis*)为我国传统的十大名花之一,其应用于重金属污染环境的绿化和修复价值备受关注。曾俊等^[10]的研究发现月季品种‘彩虹’(*R.* ‘Rainbow’s End’)对Cd、Pb表现出较强的抗性,适用于修复Cd、Pb污染场地。徐持平^[11]指出月季品种‘金玛丽’(*R.* ‘Golden Marie’)对Cd具有一定富集能力,适合栽种于Cd含量在20 mg·kg⁻¹以下的污染场地。唐敏等^[12]的研究表明月季对Cd–Pb–Zn–Cu复合污染土壤表现出较好的修复能力。有研究表明月季具有一定的Cd、Zn污染土壤修复的潜力,但目前对Cd、Zn胁迫下月季生长变化及月季对Cd、Zn富集特征和耐性机制尚不明确。‘光谱’月季花期长、观赏价

值高、适应能力强,在我国大部分地区城市绿化中都有广泛的应用^[13]。因此,本研究以‘光谱’月季为材料,采用盆栽污染模拟试验,测定不同Cd、Zn处理下‘光谱’月季生长指标,对重金属吸收、转运和富集特征变化及根系Cd、Zn化学形态、亚细胞分布、细胞超微结构和细胞壁官能团信息,分析‘光谱’月季对Cd、Zn胁迫的富集特征和耐性机制,以期对月季治理修复城市Cd、Zn污染土壤提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料及处理

供试材料为‘光谱’月季的扦插苗(4年生),购自北京顺义苗木基地。试验土壤为草炭土:珍珠岩=8:2。以高26.5 cm、直径24 cm的三加仑塑料盆为容器,每盆装入土壤5 kg,土壤基本理化性质和重金属本底值见表1。依据北京地区土壤Cd、Zn含量^[14–15],以及预试验中植物适应的含量范围,本试验设置5个Cd处理含量,分别为0、25、50、100、200 mg·kg⁻¹,标记为CK、T₁、T₂、T₃、T₄;5个Zn处理含量,分别为0、500、1 000、1 500、2 000 mg·kg⁻¹,标记为CK、T₁、T₂、T₃、T₄。按照设定的含量,以适量分析纯CdCl₂·2.5H₂O和ZnCl₂粉末药品配成的溶液分别作为试验中Cd和Zn的污染源,利用气压喷壶将重金属溶液均匀施入土壤中,然后将污染土置于阴凉处1个月,使土壤中的重金属平衡稳定。挑选株高、冠幅、根长基本一致的树苗栽植于试验盆中,每盆栽植1株苗木,每个处理组设置3个重复。盆栽试验于4–10月进行,因土壤为种植土

表1 土壤基本理化性质和重金属本底值

Table 1 Basic physical, chemical properties and heavy metal background value of soil

pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable N/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P/ (mg·kg ⁻¹)	全钾 Total K/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Olsen-K/ (mg·kg ⁻¹)	Cd/ (mg·kg ⁻¹)	Zn/ (mg·kg ⁻¹)
7.55	329.2	11.28	1.75	556	4.93	3 274	57.32	0.21	76.92

以及带土球种植,具备生长的肥力要求,因此不施肥,每周等量浇入淡水1次或2次,并保持正常的日光照射,雨天用塑料布进行遮雨处理。

1.2 样品制备及分析

植株收获后先用自来水洗净,再用 20 mmol·L⁻¹ Na₂-EDTA 溶液浸泡根部 20 min 以除去根表面附着的 Cd、Zn,最后用去离子水清洗全株 3 遍,吸干表面水分,将收获的植株分为根、枝、叶 3 个部分^[16]。一部分植物样品放至 105 ℃烘箱中杀青 30 min,后降至 70 ℃烘干至恒质量,用电子天平称取干物质质量,最后用高速粉碎机制成粉末,过 0.15 mm 筛,置于自封袋中待测;另一部分植物样品保存于-80 ℃冰箱备用。

将磨碎后的根、枝、叶样品各称取 1 g,全部采用 HNO₃-H₂O₂ 法进行消解,消解完全后过滤、定容至 50 mL,采用电感耦合等离子体光谱法(ICP-OES, Agilent 5110)测定各器官重金属元素 Cd、Zn 含量^[17]。参照 Lan 等^[18]的方法利用化学试剂逐步提取法提取植物体内 Cd、Zn 的不同化学形态。参照舒婉钦等^[19]的方法采用差速离心法分离 Cd、Zn 的亚细胞组分。参照谢天志等^[20]的方法采用透射电镜观察法观测植物细胞超微结构。参照张虹等^[21]的方法提取植物根系细胞壁,后通过傅里叶红外光谱法对不同重金属处理组的植物根系细胞壁的化学官能团信息进行表征。

富集系数(Bioconcentration factors, BCF)=植物体内重金属含量(mg·kg⁻¹)/土壤重金属含量(mg·kg⁻¹),其反映植物将重金属吸收转移到体内的能力^[22]。

转移系数(Translocation factor, TF)=植物地上部重金属含量(mg·kg⁻¹)/地下部重金属含量(mg·kg⁻¹),用来评价植物将重金属从地下部向地上部运输的能

力^[23]。

1.3 统计方法

使用 Excel 软件进行数据处理,采用 SPSS Statistics 26 软件中的单因素方差分析方法(ANOVA)进行数据差异性分析,并运用 Duncan 进行显著性检验($P<0.05$),采用 Origin 2022 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同 Cd、Zn 处理对‘光谱’月季生物量的影响

如表 2 所示,Cd、Zn 处理对‘光谱’月季根部生长的影响大于地上部,随着处理含量的增加,根部生物量呈下降趋势,均在 T₄处理时达最小值。‘光谱’月季总生物量随 Cd、Zn 处理含量的增长呈先升后降的趋势,但均未发生植物死亡的现象。Cd 处理下,当土壤中外源 Cd 含量为 25 mg·kg⁻¹时,‘光谱’月季生长旺盛,生物量较对照组略有增加;Cd 含量>25 mg·kg⁻¹时,‘光谱’月季总生物量有所降低,但 T₁~T₄处理组总生物量较对照组无显著差异。Zn 处理下,当土壤中外源 Zn 含量为 500、1 000 mg·kg⁻¹时,‘光谱’月季生物量随处理含量的增长呈上升趋势,但较对照组差异不显著;Zn 含量>1 000 mg·kg⁻¹时,‘光谱’月季总生物量陡然下降($P<0.05$),1 500 mg·kg⁻¹处理组仅为对照组的 73.97%,与对照组差异显著。

2.2 不同 Cd、Zn 处理对‘光谱’月季体内 Cd、Zn 积累与分布的影响

如表 3 所示,‘光谱’月季各器官 Cd、Zn 总含量均随处理含量的增加呈上升的趋势,其中根系 Cd、Zn 含量显著高于叶和枝,最大值分别为 68.48 mg·kg⁻¹和 918.74 mg·kg⁻¹。Cd 处理下,‘光谱’月季各器官的 Cd

表2 不同 Cd、Zn 处理对‘光谱’月季生物量的影响(g)
Table 2 Effects of different Cd and Zn concentration treatments on biomass of R. ‘Spectra’ (g)

重金属类型 Metal specy	处理 Treatment	叶 Leaf	枝 Branch	根 Root	总量 Total
Cd	CK	32.61±8.30a	37.87±5.54a	33.55±7.33a	104.03±10.63ab
	T ₁	39.60±4.93a	46.81±7.30a	33.13±9.27a	119.54±17.64a
	T ₂	29.59±3.09a	36.97±3.46a	26.56±5.13ab	93.13±5.46b
	T ₃	33.69±2.37a	44.59±7.85a	29.96±1.74ab	108.24±9.41ab
	T ₄	37.04±2.35a	40.11±1.58a	19.84±4.01b	96.99±7.79ab
Zn	CK	32.61±8.30ab	37.87±5.54b	33.55±7.33a	104.03±10.63a
	T ₁	34.41±3.29ab	42.43±3.23ab	27.75±6.70ab	104.59±12.34a
	T ₂	37.09±1.79a	49.69±3.62a	30.38±7.33a	117.16±9.32a
	T ₃	25.99±6.45b	33.64±6.18b	17.31±3.18bc	76.94±12.40b
	T ₄	30.91±0.55ab	35.44±7.66b	13.79±1.63c	80.13±9.84b

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters represent significant difference among treatments at 0.05 level. The same below.

含量均随处理含量的升高而增加,低含量处理时,各器官对Cd的吸收量较小且各含量间相差不大,当处理含量提高时,根内Cd含量远大于叶和枝内的Cd含量。Zn处理下,Zn在‘光谱’月季各器官中含量也随处理含量的升高而增加,但是增加的幅度不同,Zn积累在根内的增幅要远大于在叶片和枝条内的增幅。

表3 不同Cd、Zn处理对‘光谱’月季Cd、Zn含量的影响(mg·kg⁻¹)

Table 3 Effects of different Cd and Zn concentration treatments on Cd and Zn contents of *R. 'Spectra'* (mg·kg⁻¹)

重金属类型 Metal specy	处理 Treatment	叶 Leaf	枝 Branch	根 Root
Cd	CK	0.11±0.03c	0.03±0.01d	1.23±0.18c
	T ₁	0.32±0.04c	0.15±0.04cd	6.00±0.34c
	T ₂	0.21±0.08c	0.35±0.06bc	31.05±6.57b
	T ₃	0.59±0.18b	0.49±0.07b	41.26±11.26b
	T ₄	0.95±0.15a	1.19±0.27a	68.48±2.71a
Zn	CK	15.60±5.48c	12.38±2.07b	39.71±10.88d
	T ₁	28.15±4.00c	29.67±3.3b	265.24±14.12c
	T ₂	35.03±7.37c	34.66±10.19b	585.51±154.91b
	T ₃	77.96±13.87b	273.59±8.50a	822.84±86.00a
	T ₄	182.81±31.59a	276.93±40.05a	918.74±73.15a

2.3 不同Cd、Zn处理对‘光谱’月季体内富集与转运的影响

同一含量的Cd或Zn处理下,‘光谱’月季根系富集系数显著高于叶片和枝条,说明‘光谱’月季根系对Cd、Zn的吸收能力较叶片和枝条强。如表4所示,Cd处理下,‘光谱’月季各器官的Cd富集系数较对照组显著降低,其中T₁~T₄处理组间根系呈先升后降趋势,叶与枝无显著变化。随Cd处理含量的增加,‘光

谱’月季转移系数呈下降趋势,数值范围为0.01~0.06。Zn处理下,‘光谱’月季叶片富集系数显著低于对照组,枝条富集系数随处理含量的增加呈先下降后上升的特征,在1 000 mg·kg⁻¹ Zn处理时达最小值,根系的富集系数与对照组无显著差异。‘光谱’月季转移系数随Zn处理含量的增加呈先降后升的趋势,数值范围为0.06~0.36。

2.4 不同Cd、Zn处理下‘光谱’月季根系中Cd、Zn的化学形态

不同Cd、Zn处理下,‘光谱’月季出现不同程度的受胁迫症状,其中根系受重金属毒害作用最显著,且根系中Cd、Zn含量显著高于叶片和枝条,因此需对‘光谱’月季根系展开进一步研究。如图1所示,Cd处理下,‘光谱’月季根系中以移动性和毒性中等的NaCl提取态占比均值最多(25.19%~60.80%),且随着Cd处理含量的升高,‘光谱’月季根部NaCl提取态占比显著高于其他化学形态,在50 mg·kg⁻¹ Cd处理时占比达到最大值60.80%。Zn处理下,‘光谱’月季根系Zn主导形态是HAc提取态和去离子水提取态(HAc提取态:20.20%~46.65%,去离子水提取态:12.69%~29.33%),随Zn处理含量的增加,二者占比呈上升趋势,且均在2 000 mg·kg⁻¹ Zn处理时达最大值,分别为46.65%和29.33%。研究发现,随着Cd、Zn处理含量增加,‘光谱’月季根部分别显著提高了NaCl提取态的Cd分配比例和HAc提取态的Zn分配比例。

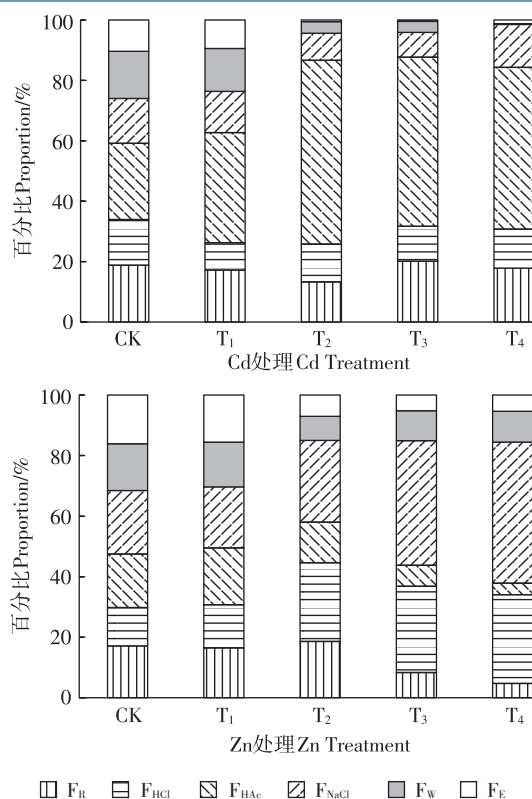
2.5 不同Cd、Zn处理下‘光谱’月季根系中Cd、Zn的亚细胞分布

如图2所示,不同Cd、Zn处理下,细胞碎屑组分在‘光谱’月季根系中的各亚细胞组分Cd、Zn的分配

表4 不同Cd、Zn处理对‘光谱’月季各器官中Cd、Zn富集系数和转移系数的影响

Table 4 Effects of different Cd and Zn concentration treatments on bioconcentration factors and transfer coefficient of *R. 'Spectra'*

重金属类型 Metal specy	处理 Treatment	富集系数 Bioconcentration factors			转移系数 Translocation factor
		叶 Leaf	枝 Branch	根 Root	
Cd	CK	0.54±0.23a	0.24±0.05a	5.84±0.86a	0.06±0.02a
	T ₁	0.01±<0.01b	0.01±<0.01b	0.24±<0.01b	0.04±0.01b
	T ₂	<0.01±<0.01b	0.01±<0.01b	0.62±0.13b	0.01±<0.01c
	T ₃	0.01±<0.01b	<0.01±<0.01b	0.41±0.11b	0.01±0.01c
	T ₄	<0.01±<0.01b	0.01±<0.01b	0.34±0.01b	0.02±<0.01bc
Zn	CK	0.20±0.07a	0.16±0.03ab	0.52±0.14a	0.36±0.03a
	T ₁	0.06±0.01b	0.06±0.01c	0.53±0.03a	0.11±0.01c
	T ₂	0.04±0.01b	0.03±0.01c	0.59±0.15a	0.06±0.01d
	T ₃	0.05±0.01b	0.18±0.01a	0.55±0.06a	0.21±0.02b
	T ₄	0.09±0.02b	0.14±0.02b	0.46±0.04a	0.25±0.02b



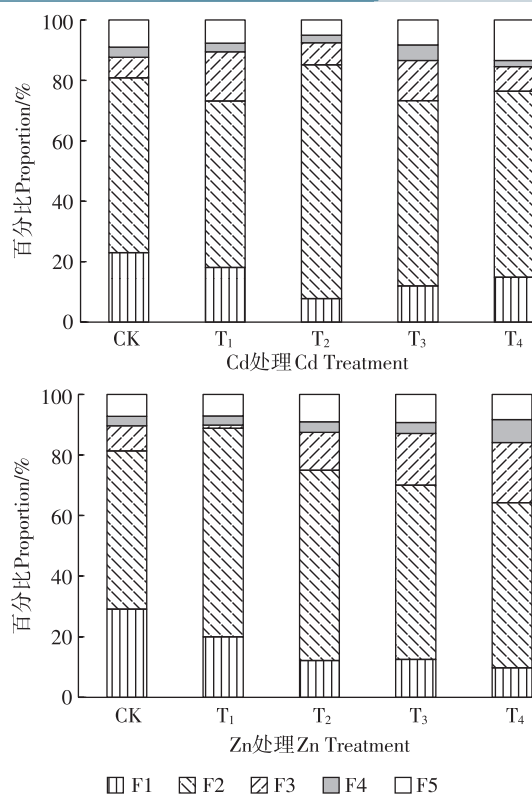
F_E , 硝酸盐、氯化物为主的无机盐及氨基酸等; F_W , 水溶性有机酸盐、重金属的一代磷酸盐 $[M(H_2PO_4)_2]$ 等; F_{NaCl} , 果胶酸盐、与蛋白质呈结合态或吸着态的重金属等; F_{HAc} , 难溶的金属磷酸盐; F_{HCl} , 草酸盐等; F_R , 残渣态。

F_E , Nitrate, chloride based inorganic salts and amino acids, etc.; F_W , Water-soluble organic acid salt, primary phosphate of heavy metals $[M(H_2PO_4)_2]$, etc.; F_{NaCl} , Pectinate, heavy metals in bound or adsorbed state with protein, etc.; F_{HAc} , Insoluble metal phosphates; F_{HCl} , Oxalate, etc.; F_R , Residual form.

图1 ‘光谱’月季根系中各化学形态Cd、Zn分配比例
Figure 1 Distribution ratio of Cd and Zn chemical forms in roots of *R. 'Spectra'*

比例均表现为最大(Cd:55.01%~77.38%, Zn:52.35%~63.17%)。随Cd处理含量的增加,‘光谱’月季根系Cd在热稳定蛋白组分和细胞器组分的分配比例呈上升趋势,金属富集颗粒组分的分配比例呈下降趋势,热敏感蛋白组分和细胞碎屑组分的分配比例变化趋势不明显。随Zn处理含量的增加,细胞器组分和热敏感蛋白组分的分配比例呈上升趋势,细胞碎屑组分和金属富集颗粒组分的分配比例呈下降趋势,热稳定蛋白组分的分配比例变化趋势不明显。由此可知,‘光谱’月季根系中活性较低的细胞壁发挥着主要的Cd和Zn积累作用,其次为可溶性组分,活性较高的细胞器中的含量较少。

2.6 不同Cd、Zn处理下‘光谱’月季根系细胞结构对比
植物受到重金属胁迫时,植物细胞组织结构会发



F1, 金属富集颗粒; F2, 细胞碎屑; F3, 细胞器; F4, 热敏感蛋白; F5, 热稳定蛋白。

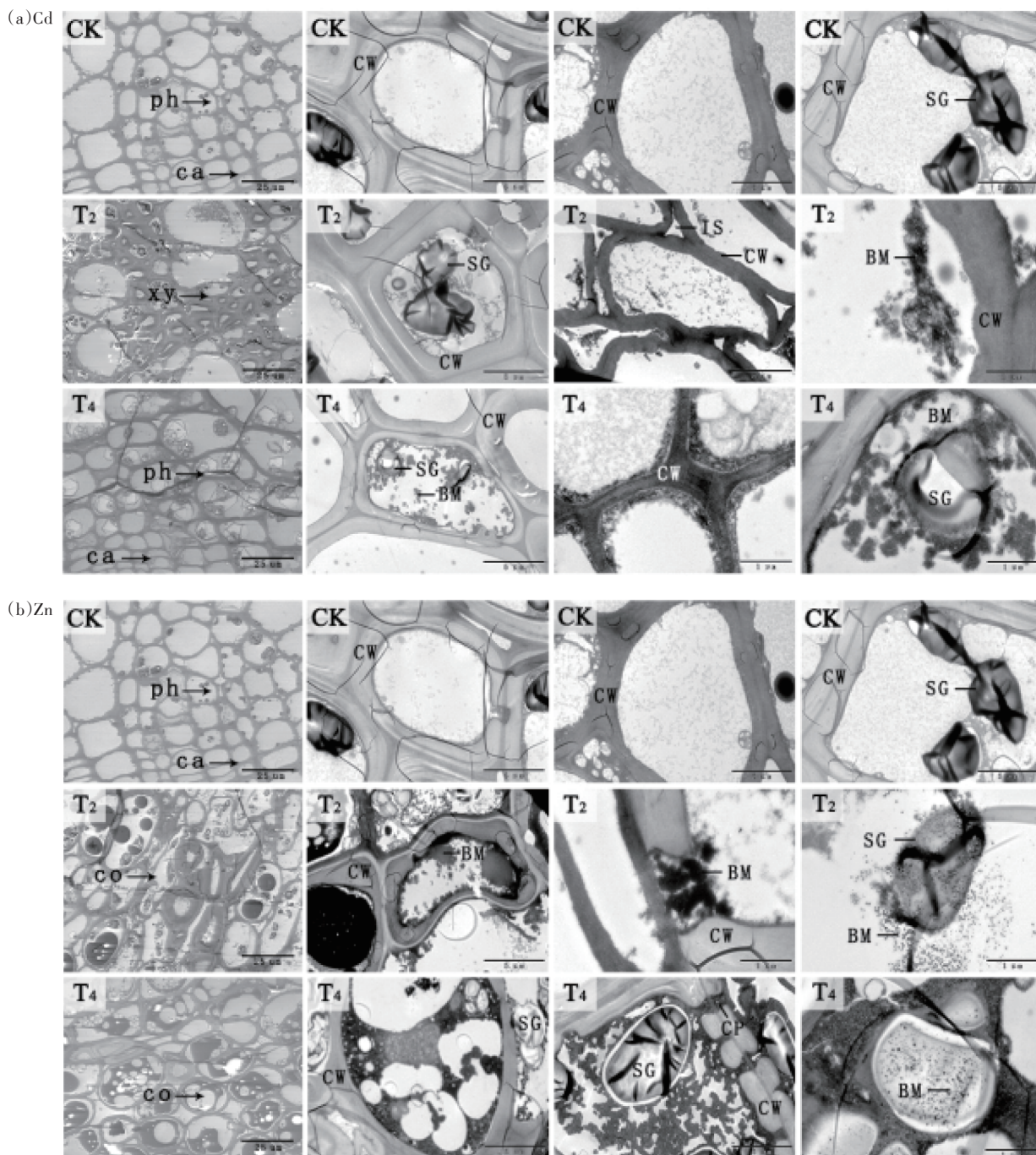
F1, Metal-enriched particles; F2, Cellular debris; F3, Organelle components; F4, Heat-sensitive protein; F5, Heat stabilized protein.

图2 ‘光谱’月季根系中各亚细胞组分Cd、Zn分配比例

Figure 2 Distribution ratio of Cd and Zn in subcellular components of roots of *R. 'Spectra'*

生一定程度的变化。植物根系的生长和代谢水平影响植物地上部分的生长状态,为进一步探究Cd、Zn处理对‘光谱’月季根系细胞结构的影响,选取不同处理的3个组,分别为对照(CK)、低含量(T_2)和高含量(T_4)组,通过透射电镜对‘光谱’月季根系细胞结构进行对比分析。TEM图像显示(图3),Cd处理下,‘光谱’月季根系细胞中出现大量的黑色沉积物,且Cd含量提高时,黑色沉积物密度增大。总体而言,Cd胁迫下‘光谱’月季根系细胞尚能保持正常形态,除细胞壁和淀粉粒周围积聚黑色沉淀物外,其他器官无显著毒性症状。高含量Zn处理下,‘光谱’月季根系细胞形状发生变形,细胞内出现大面积的黑色块状以及颗粒状沉积物,其聚集在胞间连丝处以及淀粉粒周围,且根系细胞间隙变大。由此可知,‘光谱’月季根系细胞耐受Zn毒害的能力较弱。

2.7 不同Cd、Zn处理下‘光谱’月季根系细胞壁的傅里叶红外光谱分析



co, 皮层; ph, 韧皮部; ca, 形成层; xy, 木质部; SG, 淀粉粒; CW, 细胞壁; IS, 细胞间隙; CP, 胞间连丝; BM, 黑色沉积物。
co, Cortex; ph, Phloem; ca, Vcambium; xy, Xylem; SG, Starch grain; CW, Cell wall; IS, Intercellular; CP, Plasmodesmata; BM, Black sediment

图3 Cd、Zn处理下‘光谱’月季根系细胞超微结构观察

Figure 3 Ultrastructure of root cells of *R. 'Spectra'* under different Cd and Zn treatments

为进一步明确‘光谱’月季根系对重金属的耐性和解毒机制,选取对照(CK)、低含量(T₂)、高含量(T₄)组进行‘光谱’月季根系细胞壁官能团信息对比分析(图4、表5)。A/A₂₉₂₈为特征峰的吸光度与甲基—CH₃中C—H特征峰的吸光度的比值,可以通过该比值的变化来半定量分析参与重金属结合的官能团^[24]。Cd

处理下,‘光谱’月季根系细胞壁在T₂和T₄处理时偏移量较大,吸收峰均为羟基/氨基伸缩振动峰,分别向低频偏移了9、19 cm,其A/A₂₉₂₈值随处理含量的增加先增加后降低。Zn处理下,‘光谱’月季根系细胞壁在T₂和T₄处理时均为羟基/氨基吸收峰偏移明显,分别向低频偏移了17、21 cm,其A/A₂₉₂₈值随处理含量的增

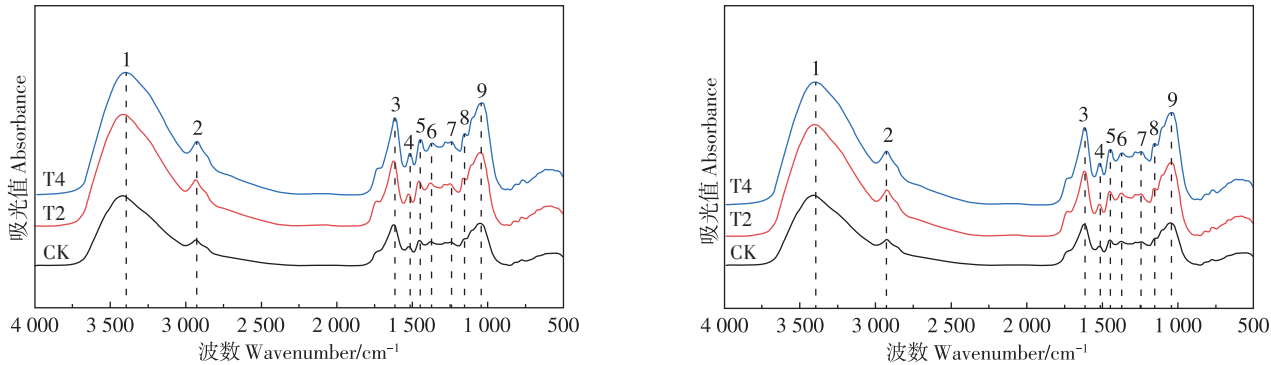


图4 Cd、Zn处理下月季根系细胞壁的红外光谱表征
Figure 4 Infrared spectrum characterization of root cell walls of R. 'Spectra' under different Cd and Zn treatments

表5 不同Cd、Zn处理下‘光谱’月季根细胞壁的红外光谱特征峰分析
Table 5 Analysis of infrared spectrum characteristic peaks in the root cell walls of R. 'Spectra' under different Cd and Zn concentration treatments

序号 Number	官能团 Function group	波数 Wavenumber/ cm ⁻¹	CK	Cd-T ₂		Cd-T ₄		Zn-T ₂		Zn-T ₄	
			A/A ₂₉₂₈	A/A ₂₉₂₈	偏移量 Offset/cm ⁻¹	A/A ₂₉₂₈	偏移量 Offset/cm ⁻¹	A/A ₂₉₂₈	偏移量 Offset/cm ⁻¹	A/A ₂₉₂₈	偏移量 Offset/cm ⁻¹
1	羟基/氨基—OH/—NH	3 418	1.65	1.85	-9	1.59	-19	1.60	-17	1.00	-21
2	甲基—CH ₃	2 928	1.00	1.00	0	1.00	0	1.00	1	0.67	1
3	酰胺 I 带—C=O	1 620	1.22	1.25	-2	1.20	-3	1.18	-1	0.77	-1
4	酰胺 II 带—N—H(Cd)	1 520	0.90	0.82	-1	0.90	-3				
	羧酸盐 C=O 不对称伸缩振动(Zn)	1 520	0.90					0.87	-2	0.59	0
5	碳氢键 C—H 或碳氧单键 C—O	1 449	0.99	0.99	0	1.02	0	0.99	0	0.67	0
6	羧基—COOH 或酰胺 III 带—C—N	1 375	0.97	0.96	0	1.00	0	0.95	-2	0.65	-2
7	硫酸酯 C—O—S 或羧基 C—O 或磷酸 C—O—P	1 242	0.96	0.95	-3	1.00	-4	0.94	1	0.66	1
8	多糖环结构 C—C 或 C—O	1 149	1.16	1.03	3	1.07	2	1.02	5	0.69	2
9	纤维素糖链—C—H 弯曲或—C—C、 —C—O	1 045	1.24	1.36	4	1.33	5	1.29	-4	0.84	1

加而降低。综上说明‘光谱’月季细胞壁的羟基、氨基均是结合 Cd、Zn 的主要官能团,其参与了细胞壁与 Cd、Zn 的吸附过程。

3 讨论

3.1 Cd、Zn 处理对‘光谱’月季生物量的影响分析

植物受重金属毒害通常表现为根系受损伤及地上部生长缓慢,生物量下降^[25-26]。本研究中,一定含量范围内的 Cd、Zn 处理能刺激‘光谱’月季的生长,当重金属含量超过一定值时则会抑制‘光谱’月季的生长。当土壤中外源 Cd 含量为 25 mg·kg⁻¹ 时,‘光谱’月季各器官生物量均较对照组升高;Cd 含量>25 mg·kg⁻¹ 时,‘光谱’月季总生物量有所降低,但较对照组差异不显著。Zn 处理下,当土壤中外源 Zn 含量为 500、1 000 mg·kg⁻¹ 时,‘光谱’月季生物量随 Zn 处理含

量的增加而呈上升趋势;Zn 含量>1 000 mg·kg⁻¹ 时,‘光谱’月季总生物量陡然下降,与对照组差异显著。这与张小茜等^[27]的研究结果一致,低含量 Cd、Zn 单一胁迫促进长梗白菜各组织生物量干质量提高,而高含量下则产生抑制作用。造成这一现象的原因可能是低含量 Cd 处理下植物体内活性氧自由基含量升高,激活细胞因子在新陈代谢中的酶,调节合成以及诱导基因表达等,加速植物的生长。由于 Cd 不是植物生长的必需元素,当其积累量超过一定阈值后会对植物产生毒害作用而抑制植物生长发育^[28]。与之类似,Zn 在低含量时参与植物光合作用等代谢活动,而过量的 Zn 造成离子稳态系统紊乱,从而影响植物正常代谢活动,导致生长减少^[29]。

3.2 Cd、Zn 处理下‘光谱’月季 Cd、Zn 富集特征分析

树木利用发达根系吸收积累重金属,并在根压和

蒸腾作用下将部分重金属转移、贮存到地上部分,降低土壤中有毒金属的迁移性和毒性,从而降低重金属污染地下水和向周围环境扩散的风险^[30-31]。本研究中,Cd、Zn在‘光谱’月季各器官中的含量均随处理含量的升高而增大,其中,根系Cd、Zn含量和富集系数均显著高于叶片和枝条,表明根系为‘光谱’月季主要的富集器官。这与大部分木本植物表现相似。柳树(*Salix spp*)中的Cd主要分布在根中,且根据Cd含量的不同,根部的Cd含量可高达枝条的10倍^[32-33];Zn在根中含量也显著高于地上部^[34]。施翔等^[35]通过盆栽试验研究发现5种栎树幼苗根系Cd、Zn含量均大于其叶、茎。植物根系吸收、富集重金属能力最强,主要原因可能是根系对重金属的固定作用有效限制了重金属转运至地上部,这被认为是植物应对重金属毒害的一种防御机制,称为避性^[36]。Cd的T₁~T₄处理组间,‘光谱’月季根系富集系数随处理含量的增加呈先上升后下降的趋势,这可能是由于较低Cd含量增强酶系统活性,刺激根系组织代谢水平的提高,从而促进重金属的富集,超过一定范围后,Cd对植物根系产生了毒害,根系活力和富集能力受到抑制^[37-38]。有研究认为,木本植物富集系数>0.4可被认为修复能力强,富集系数在0.1~0.4之间则对重金属污染有一定的修复能力,富集系数<0.1称为低修复能力植物^[39]。因此,‘光谱’月季可作为修复Cd、Zn污染土壤的潜力树种。

3.3 Cd、Zn处理对‘光谱’月季耐性机制的影响分析

不同化学形态的重金属在植物体内的活性、毒性以及迁移性有显著差异。一般以乙醇、去离子水、NaCl、HAc、HCl等极性不同的提取剂顺序性逐级提取出植物组织内不同形态的重金属^[40]。有研究发现,Cd在续断菊(*Sonchus asper*)、海雀稗(*Paspalum vaginatum* Sw.)、小飞扬草(*Euphorbia thymifolia* L.)根系中均以NaCl提取态为主^[41-43];Zn在马缨丹根系中以NaCl提取态和HAc提取态形式为主,在旱柳(*Salix matsudana*)和爆竹柳(*Salix fragilis*)中则以乙醇提取态和去离子水提取态为主^[44-45]。当外界重金属含量不断增加时,植物体内通过降低高毒性和高移动性的化学形态分配比例,以减少重金属对植物正常生命活动的影响。如,低含量Zn处理时,皖景天(*Sedum jinianum*)根中Zn以移动性强、毒性较高的乙醇提取态占比最高,当Zn含量提高时,根中Zn以移动性较弱、毒性较低的NaCl提取态和HAc提取态占比为主^[46]。以上研究结果与本研究类似,低含量处理时,‘光谱’月季根系Cd以NaCl提取态为主导形态,Zn以去离子水提取

态和HAc提取态为主导形态。当处理含量提高时,‘光谱’月季根在Cd处理下NaCl提取态占比显著提高,Zn处理下HAc提取态占比提高,这两种化学形态的活性较低且毒性较弱。研究表明,HAc提取态和NaCl提取态的重金属元素增加会限制重金属在植物体内的转运^[47]。‘光谱’月季根系内Cd、Zn向迁移能力和毒性较低的化学形态转化可能是植物应对Cd、Zn胁迫的重要策略,这有利于减弱Cd、Zn对植物根系的毒害作用,增强植物对重金属的耐性。

重金属经吸收、转移后,通常会选择性地分布在亚细胞的不同组分中,重金属的迁移性和毒性与其亚细胞分布密切相关^[48]。本研究中‘光谱’月季根系大部分Cd、Zn存在于以细胞壁为主的细胞碎屑组分中,其次是金属富集颗粒组分和热稳定蛋白组分,细胞器组分和热敏感蛋白组分中含量较少。有研究表明,细胞壁是Cd、Zn在植物根系细胞内的主要分布位点^[49-51],这与本研究结果一致。细胞壁是植物细胞抵御重金属的第一道屏障,细胞壁上含有大量多糖、果酸和蛋白质等物质,可与重金属离子结合,从而阻止或延缓重金属在细胞内的跨膜运输,这种作用被称为细胞壁的固定作用^[52]。但细胞壁对重金属的阻隔作用通常存在阈值,当细胞壁中阳离子结合位点达到饱和状态时,植物体内的重金属离子通过跨膜运输进入细胞质中^[53]。如低含量Cd处理时,桉树根部吸收的Cd主要积累在细胞壁组分中,当处理水平提高时,Cd在可溶性组分中的比例增加^[54]。本研究中,随处理含量的增加,月季根系内的可溶性组分Cd、Zn的分配比例呈上升趋势。可溶性组分由液泡和细胞质组成,其中液泡起着重要的储存作用,液泡含有的多种蛋白质、有机碱和有机酸等物质能与重金属结合而实现重金属离子区隔化,从而降低重金属毒性^[55-56]。芥菜(*Brassica juncea*)、蜀葵(*Alcea rosea*)、红麻(*Hibiscus cannabinus*)和旱柳(*Salix matsudana*)根系细胞内Cd或Zn均主要贮存在细胞壁和可溶性组分^[57-60]。而热敏感蛋白主要是一些有特定功能的酶,是细胞新陈代谢的关键,对重金属胁迫响应敏感^[61]。本研究发现,随处理含量的增加,‘光谱’月季根系中热敏感蛋白Cd占比呈下降趋势,而Zn占比呈上升趋势,说明Zn处理下月季根系热敏感蛋白酶也发挥了一定的解毒作用,但热敏感蛋白组分占比远低于细胞壁和可溶性组分含量占比。因此,细胞壁固定作用协同液泡区隔化作用,可能是植物抵御Cd、Zn毒害的两个重要机制。

植物的根系直接与土壤接触,是受重金属毒害时间最早、持续时间最长的器官。耐性植物为提高自身对重金属的适应性,可以通过根系结构或根际环境改变的方式来抵御逆境,其中植物根系细胞壁在重金属产生耐性,甚至解毒作用过程中起到较为重要的作用^[62-63]。本研究中,透射电镜分析表明,Cd胁迫下‘光谱’月季根系细胞形状保持良好,但细胞壁附着大量黑色沉积物,且密度随着处理含量的增加而增大;Zn胁迫下,‘光谱’月季根系细胞形状发生变形,在细胞壁、胞间连丝处及淀粉粒周围出现大量黑色沉积物,且根系细胞间隙变大。许多研究表明植物根系结构在重金属胁迫下表现出相似的性状,泡桐在Pb、Cd、Zn胁迫下根、茎、叶的微观结构发生变化,细胞中富集大量黑色颗粒,推测大部分可能为重金属颗粒沉淀^[64]。地被菊(*Dendranthema morifolium*)在Cd胁迫下细胞壁会增厚、皱缩以及积累大量层状黑色物质,同时细胞器受到不同程度损伤,线粒体几乎完全解体^[65]。栌树(*Koeleria paniculata*)在较高重金属含量的铅锌尾矿胁迫下,细胞膜发生扭曲变形,细胞壁上出现大量细小黑色颗粒,研究表明植物会改变根系结构以减轻重金属的毒害作用^[20]。

植物细胞壁除果胶、半纤维素、蛋白酶等组分参与重金属胁迫的生理应答,还含有大量羟基、氨基、羧基、醛基等带负电荷的官能团,它们与进入植物细胞中的重金属离子结合形成沉淀,从而减少金属离子通过细胞膜上的离子转运蛋白进入细胞质中,降低了金属胁迫对植物正常生理活动的干扰^[66-67]。本研究中‘光谱’月季根系细胞壁上羟基、氨基是结合Cd、Zn的主要官能团,这一结果与前人研究相似,如番茄(*Solanum lycopersicum*)细胞壁上的羟基、羧基官能团是Cd的主要结合位点^[68]。在蓖麻(*Ricinus communis*)根细胞壁吸附Zn的过程中,羟基、氨基、酰胺和羧基是Zn的主要结合位点^[69]。

4 结论

(1)土壤Cd含量 $\leq 25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 或Zn含量 $\leq 1\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时对‘光谱’月季的生长有促进作用,超过这个含量范围就表现为抑制作用,但均未导致植物死亡。Cd、Zn处理时,‘光谱’月季根系细胞内细胞壁、液泡和胞间连丝处出现大量黑色沉积物,且Zn处理下‘光谱’月季根系细胞形状变形程度大于Cd处理。通过对生物量和细胞细微结构观察,本研究发现‘光谱’月季耐土壤Cd污染的能力较强,耐土壤Zn污染

的能力较弱。

(2)‘光谱’月季各器官中Cd、Zn含量均随处理含量的增加呈增长趋势,其中‘光谱’月季根系Cd、Zn含量最高。根系中的Cd主要以活性较低的NaCl提取态存在,Zn主要以去离子水提取态和HAc提取态存在。随处理含量的增加,Cd、Zn处理组都提高了毒性较低的提取态占比,以减弱Cd、Zn对植物根系的毒害作用,增强植物对重金属的耐性。

(3)‘光谱’月季根系Cd、Zn均主要富集在细胞碎屑组分,其次是金属富集颗粒组分和热稳定蛋白组分,随处理含量的增加,‘光谱’月季根系内的Cd、Zn表现出向可溶性组分转移的特征,说明细胞壁固持与液泡区隔化作用可能是‘光谱’月季积累与耐受Cd、Zn的重要机制。

(4)通过根系细胞壁吸附Cd、Zn前后的傅里叶红外光谱表征结果得出,‘光谱’月季根系细胞壁上结合Cd、Zn的主要官能团均是羟基、氨基,其通过参与细胞壁与Cd、Zn的吸附过程来减轻Cd和Zn的毒害。

参考文献:

- [1] 黄益宗,郝晓伟,雷鸣,等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 409-417. HUANG Y Z, HAO X W, LEI M, et al. The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3): 409-417.
- [2] 潘秀,石福臣,刘立民,等. Cd、Zn及其交互作用对互花米草中重金属的积累、亚细胞分布及化学形态的影响[J]. 植物研究, 2012, 32(6): 717-723. PAN X, SHI F C, LIU L M, et al. Effects of Cd, Zn and their interactions on accumulation, subcellular distribution and chemical forms of heavy metals in *Spartina alterniflora*[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2012, 32(6): 717-723.
- [3] 白雪,陈亚慧,耿凯,等. 镉在三色堇中的积累及亚细胞与化学形态分布[J]. 环境科学学报, 2014, 34(6): 1600-1605. BAI X, CHEN Y H, GENG K, et al. Accumulation, subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Viola tricolor* L.[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(6): 1600-1605.
- [4] JAMALI N, GHADERIAN S M, KARIMI N. Effects of cadmium and zinc on growth and metal accumulation of *Mathiola flava* Boiss[J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2014, 13(12): 2937-2944.
- [5] 李霁,李书鹏,刘渊文,等. 基于文献计量的土壤生物修复技术研究现状及进展分析[J]. 土壤通报, 2022, 53(5): 1237-1247. LI F, LI S P, LIU Y W, et al. Soil bioremediation technologies: bibliometric analysis, research status and progress[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(5): 1237-1247.
- [6] 郭松明,余海波,袁龙义. 近20年我国重金属超积累植物种质资源筛选研究进展[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(2): 96-108. GUO S M,

- YU H B, YUAN L Y. Research progress of screening of germplasm resources of heavy metal hyperaccumulator in recent 20 years in China [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2022, 17(2):96–108.
- [7] 任军, 石遥, 刘方, 等. 贵州锰矿废渣堆场重金属污染风险评价及草本植物重金属吸收特征[J]. 草业学报, 2021, 30(8):86–97. REN J, SHI Y, LIU F, et al. An assessment of heavy metal absorption patterns in herbaceous plants and pollution risks in manganese mining areas in Guizhou Province[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(8):86–97.
- [8] 孟楠, 王萌, 陈莉, 等. 不同草本植物间作对Cd污染土壤的修复效果[J]. 中国环境科学, 2018, 38(7):2618–2624. MENG N, WANG M, CHEN L, et al. Remediation efficiency of Cd polluted soil by intercropping with herbaceous plants[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(7):2618–2624.
- [9] 康薇, 鲍建国, 郑进, 等. 湖北铜绿山古铜矿遗址区木本植物对重金属富集能力的分析[J]. 植物资源与环境学报, 2014, 23(1):78–84. KANG W, BAO J G, ZHENG J, et al. Analysis on heavy metal enrichment ability of woody plants at ancient copper mine site in Tonglushan of Hubei Province[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2014, 23(1):78–84.
- [10] 曾俊, 汪有良, 王国良, 等. 镉、铅胁迫对月季生长及生理生化特性影响[J]. 林业科技开发, 2010, 24(5):60–63. ZENG J, WANG Y L, WANG G L, et al. Effects of Pb, Cd stress in soil on the growth and physiological and biochemical characteristics of rose[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2010, 24(5):60–63.
- [11] 徐持平, 周卫军, 徐庆国. 月季‘金玛丽’对土壤镉污染的修复研究[J]. 分子植物育种, 2018, 16(8):2741–2746. XU C P, ZHOU W J, XU Q G. Study on the remediation of cadmium pollution in soil by ‘Golden Marie’ in Chinese rose[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(8):2741–2746.
- [12] 唐敏, 张欣, 王美仙. 北京道路绿地十种花灌木对四种重金属的富集能力评价[J]. 北方园艺, 2019(13):87–93. TANG M, ZHANG X, WANG M X. Accumulation of four heavy metals in ten species of flower shrubs in Beijing road green space[J]. *Northern Horticulture*, 2019(13):87–93.
- [13] 余铭杰, 傅小霞, 温志, 等. 藤本月季光谱的扦插繁殖试验[J]. 热带农业科学, 2021, 41(6):44–49. YU M J, FU X X, WEN Z, et al. Propagation of climbing Rose ‘Spectra’ via cutting[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2021, 41(6):44–49.
- [14] 孙春媛, 赵文吉, 郑晓霞, 等. 北京城区土壤重金属空间分布及与降尘的关联性分析[J]. 中国科技论文, 2016, 11(9):1035–1040. SUN C Y, ZHAO W J, ZHENG X X, et al. Analysis on the spatial distribution of heavy metal in surface soil and the relationships to atmospheric dust in Beijing urban area[J]. *China Science Paper*, 2016, 11(9):1035–1040.
- [15] 董袁媛, 孙竹, 杨洋, 等. 镉胁迫对黄麻光合作用及镉积累的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(8):1640–1646. DONG Y Y, SUN Z, YANG Y, et al. Effect of cadmium of photosynthesis and Cd accumulation of *Corchorus capsularis* L.[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(8):1640–1646.
- [16] 王威, 闫广新, 王立发, 等. 北京平谷西部矿集区附近土壤重金属特征[J]. 矿产勘查, 2019, 10(2):344–351. WANG W, YAN G X, WANG L F, et al. The characteristics of heavy metals near the western mining area in Pinggu district, Beijing[J]. *Mineral Exploration*, 2019, 10(2):344–351.
- [17] 杜理华, 江浩, 薛良义, 等. ICP-OES法测定坛紫菜中重金属元素[J]. 浙江林学院学报, 2010, 27(5):790–793. DU L H, JIANG H, XUE L Y, et al. Analysis of metallic elements in *Porphyra haitanensis* by ICP-OES[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2010, 27(5):790–793.
- [18] LAN P Y, JIAN Z, PING W, et al. Effect of Cd on growth, physiological response, Cd subcellular distribution and chemical forms of *Koeleria paniculata*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 160:10–18.
- [19] 舒婉钦, 陈光才, 王树凤, 等. 杞柳4个品种Cd的亚细胞分布、化学形态及其对Cd转运的影响[J]. 植物生理学报, 2022, 58(9):1766–1778. SHU W Q, CHEN G C, WANG S F, et al. Subcellular distribution, chemical forms of cadmium and the effects on cadmium transportation in four cultivars of *Aslix integra*[J]. *Plant Physiology Journal*, 2022, 58(9):1766–1778.
- [20] 谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 等. 改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制[J]. 环境科学, 2022, 43(10):4687–4696. XIE T Z, CHEN Y H, SU R K, et al. Mechanism of lead–zinc enrichment and resistance of spent mushroom compost to lead–zinc slag in *Koeleria paniculata*[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(10):4687–4696.
- [21] 张虹, 罗洁文, 胡华英, 等. 基于细胞壁吸附固定特性的小飞蓬耐Cd机制研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5):980–990. ZHANG H, LUO J W, HU H Y, et al. Cadmium tolerance mechanism of *Conyza canadensis* based on cell wall adsorption and fixation characteristics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(5):980–990.
- [22] 周晓声, 娄厦, LARISA D R, 等. 植物对土壤重金属富集特性研究进展[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(3):400–410. ZHOU X S, LOU X, LARISA D R, et al. Advances in heavy metal accumulation characteristics of plants in soil[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2022, 17(3):400–410.
- [23] KOBRA M, SEYED M G, MASOUD T. Accumulation and phytoremediation of Pb, Zn, and Ag by plants growing on Koshk lead–zinc mining area, Iran[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(5):1310–1320.
- [24] 王梦, 段德超, 徐辰, 等. 茶树根细胞壁不同组分对铅的吸附性能及其功能团的傅里叶红外光谱学研究[J]. 生态学报, 2015, 35(6):1743–1751. WANG M, DUAN D C, XU C, et al. Adsorption ability of cell wall (CW) components in roots of tea plant (*Camellia sinensis* L.) to Pb and FTIR spectra of their functional groups[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(6):1743–1751.
- [25] 牟祚民, 姜贝贝, 潘远智, 等. 重金属胁迫对天竺葵生长及生理特性的影响[J]. 草业科学, 2019, 36(2):434–441. MU Z M, JIANG B B, PAN Y Z, et al. Effect of heavy metal stress on the growth and physiological characteristics of *Pelargonium hortorum*[J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(2):434–441.
- [26] 侯晓龙. 铅超富集植物金丝草对Pb胁迫的响应机制研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013. HOU X L. Response mechanism of Pb

- hyperaccumulator *Pogonatherum crinitum* to Pb stress[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013.
- [27] 张小茜, 张富贵, 董祥林, 等. Zn和Cd胁迫作用对长梗白菜形态和生理性能的生态毒理影响[J]. 环境化学, 2022, 41(1): 22–30. ZHANG X Q, ZHANG F G, DONG X L, et al. Ecotoxicological effects of Zn and Cd stress on the morphology and physiological properties of long-stalk cabbage[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(1): 22–30.
- [28] LIU Z, BAI Y, YANG T M. Effect of Cd on the uptake and translocation of Pb, Cu, Zn, and Ni in potato and wheat grown in sieroze[m]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2019, 28(7): 650–669.
- [29] 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 等. Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(1): 470–479. GUO J M, YANG J X, YANG J, et al. Interaction of Cd and Zn affecting the root morphology and accumulation of heavy metals in *Sedum aizoon*[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(1): 470–479.
- [30] URAGUCHI S, MORI S, KURAMATA M, et al. Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(9): 2677–2688.
- [31] 徐剑锋, 王雷, 熊瑛, 等. 土壤重金属污染强化植物修复技术研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2017, 7(3): 366–373. XU J F, WANG L, XIONG Y, et al. Research progress on strengthening phytoremediation technologies for heavy metals contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2017, 7(3): 366–373.
- [32] ALEXANDER L, ANNA S, JANA O, et al. Differences in structure of adventitious roots in *Salix* clones with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity[J]. *Physiologia Plantarum*, 2004, 120(4): 537–545.
- [33] LIU Y, CHEN G C, ZHANG J, et al. Uptake of cadmium from hydroponic solutions by willows (*Salix* spp.) seedlings[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10: 16209–16218.
- [34] 杨卫东, 陈益泰. 不同品种杞柳对高锌胁迫的忍耐与积累研究[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1182–1186. YANG W D, CHEN Y T. Tolerance of different varieties *Salix intergra* to high zinc stress[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(6): 1182–1186.
- [35] 施翔, 王树凤, 陈益泰, 等. 5种栎树幼苗对铅锌尾矿砂的耐性与植被恢复前景[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4091–4098. SHI X, WANG S F, CHEN Y T, et al. Tolerance and vegetation restoration prospect of seedlings of five *Oak* species for Pb/Zn mine tailing[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(12): 4091–4098.
- [36] SARAH C R D S, SARA A L D A, LUCAS A D S, et al. Lead tolerance and phytoremediation potential of Brazilian leguminous tree species at the seedling stage[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 110: 299–307.
- [37] 洪晓曦, 袁静, 郑现明, 等. 油菜对Cs胁迫的响应及其对Cs富集规律的研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12): 2394–2400. HONG X X, YUAN J, ZHENG X M, et al. Accumulation and physio-biochemical responses of *Brassia campestris* L. to Cs stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(12): 2394–2400.
- [38] 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.
- [39] 王广林, 张金池, 庄家尧, 等. 31种园林植物对重金属的富集研究[J]. 皖西学院学报, 2011, 27(5): 83–87. WANG G L, ZHANG J C, ZHUANG J Y, et al. Accumulation research of 31 species of ornamental plants on heavy metal[J]. *Journal of West Anhui University*, 2011, 27(5): 83–87.
- [40] YU Y, FU P N, HUANG Q Q, et al. Accumulation, subcellular distribution, and oxidative stress of cadmium in *Brassica chinensis* supplied with selenite and selenate at different growth stages[J]. *Chemosphere*, 2018, 216: 331–340.
- [41] 秦丽, 何永美, 李元, 等. Cd胁迫对续断菊Cd吸收分配及有机酸代谢的影响[J]. 环境化学, 2016, 35(8): 1592–1600. QIN L, HE Y M, LI Y, et al. Effects of Cd stress on uptake and distribution of Cd and the low molecular weight organic acid metabolism in *Sonchus asper* L. Hill[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(8): 1592–1600.
- [42] 吴朝波, 王蕾, 郭建春, 等. 镉在海雀稗体内的分布及化学形态特征[J]. 环境化学, 2016, 35(2): 330–336. WU C B, WANG L, GUO J C, et al. Distribution and chemical forms of Cd in *Paspalum vaginatum* SW[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(2): 330–336.
- [43] 钟海涛, 潘伟斌, 张太平, 等. 小飞扬草(*Euphorbia thymifolia* L.)中镉的亚细胞分布及化学形态[J]. 环境保护科学, 2013, 39(3): 50–54. ZHONG H T, PAN W B, ZHANG T P, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Euphorbia thymifolia* L.[J]. *Environmental Protection Science*, 2013, 39(3): 50–54.
- [44] 谢倚慧, 张明华, 熊瑞, 等. 马缨丹在镉、铅、锌复合胁迫下的耐性和解毒机制[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(9): 1209–1217. XIE Y H, ZHANG M H, XIONG R, et al. Study on the tolerance and detoxification mechanisms of *Lantana camara* under the combined stress of cadmium, lead and zinc[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(9): 1209–1217.
- [45] 庞璐. 柳属(*Salix*)植物对镉和锌重金属胁迫的耐受差异及机理研究[D]. 南京: 南京大学, 2021. PANG L. Difference and mechanism for Cd and Zn tolerance in *Salix* species[D]. Nanjing: Nanjing University, 2021.
- [46] 周守标, 徐礼生, 吴龙华, 等. 镉和锌在皖景天细胞内的分布及化学形态[J]. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2515–2520. ZHOU S B, XU L S, WU L H, et al. Subcellular distribution and chemical forms of Cd and Zn in *Sedum jinianum*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(11): 2515–2520.
- [47] 彭秋, 李桃, 徐卫红, 等. 不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异[J]. 环境科学, 2019, 40(7): 3347–3354. PENG Q, LI T, XU W H, et al. Differences in the cadmium-enrichment capacity and subcellular distribution and chemical form of cadmium in different varieties of pepper[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(7): 3347–3354.
- [48] 冯亚娟, 李廷轩, 蒲勇, 等. 不同镉积累类型小麦各器官镉积累分布规律及机理分析[J]. 作物学报, 2022, 48(7): 1761–1770. FENG Y J, LI T X, PU Y, et al. Characteristics of cadmium accumulation

- and distribution in different organs of wheat with different cadmium-accumulating type[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(7): 1761–1770.
- [49] 李会合, 杨肖娥. 硫对超积累东南景天镉累积、亚细胞分布和化学形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 395–402. LI H H, YANG X E. Effects of sulfur on accumulation, subcellular distribution and chemical forms of cadmium in hyperaccumulator—*Sedum alfredii* Hance[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(2): 395–402.
- [50] 李红婷, 董然. 2种萱草对铅、镉的吸收累积及其在亚细胞的分布和化学形态特征[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(4): 59–64. LI H T, DONG R. Pb & Cd absorption and accumulation characteristics, subcellular distribution and chemical forms in two types of *Hemerocallis* plants[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2015, 36(4): 59–64.
- [51] WANG L, LI R, YAN X X, et al. Pivotal role for root cell wall polysaccharides in cultivar-dependent cadmium accumulation in *Brassica chinensis* L.[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 194: 110369.
- [52] 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 absorption of copper on root cell wall of *Elsholtzia splendens*[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(2): 514–523.
- [53] 黄蕊, 辛建攀, 田如男. 镉胁迫下大藻生长的变化及镉积累、分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9): 2033–2042. HUANG R, XIN J P, TIAN R N. Growth changes and characteristics of cadmium accumulation and distribution in *Pistia Stratiotes* under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(9): 2033–2042.
- [54] 韦月越, 蒙敏, 黄雪芬, 等. 桉树对矿区污染土壤中Cu和Cd的耐受机制[J]. 基因组学与应用生物学, 2016, 35(1): 227–234. WEI Y Y, MENG M, HUANG X F, et al. Tolerance mechanisms of Cu and Cd by *Eucalyptus* in mine contaminated soil[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2016, 35(1): 227–234.
- [55] HE S Y, WU Q L, HE Z L. Effect of DA-6 and EDTA alone or in combination on uptake, subcellular distribution and chemical form of Pb in *Lolium perenne*[J]. *Chemosphere*, 2013, 93(11): 2782–2788.
- [56] LI C C, DANG F, CANG L, et al. Integration of metal chemical forms and subcellular partitioning to understand metal toxicity in two lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars[J]. *Plant & Soil*, 2014, 384(1/2): 201–212.
- [57] LIAO Y M, LI Z R, YANG Z C, et al. Response of Cd, Zn translocation and distribution to organic acids heterogeneity in *Brassica juncea* L.[J]. *Plants*, 2023, 12(3): 479–479.
- [58] 段亚萍. 铅、锌污染下蜀葵的生长生理响应和富集转运特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022. DUAN Y P. Study on growth, physiological response and accumulation, transport characteristics of *Alcea roesa* (linn.) Cavan. Under lead and zinc pollution[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- [59] 龚紫薇, 陈永华, 陈基权, 等. 2个红麻品种在改良铅锌矿渣下的耐性研究[J]. 中国麻业科学, 2018, 40(4): 175–182. GONG Z W, CHEN Y H, CHEN J Q, et al. Study on the tolerance of two kenaf varieties under improved lead-zinc slag[J]. *Plant Fiber Sciences in China*, 2018, 40(4): 175–182.
- [60] 杨卫东, 陈益泰, 屈明华. 镉在旱柳中亚细胞分布及存在的化学形态[J]. 西北植物学报, 2009, 29(7): 1394–1399. YANG W D, CHEN Y T, QU M H. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Salix matsudana*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(7): 1394–1399.
- [61] 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 等. 两种油菜不同铅富集能力差异机理[J]. 中国环境科学, 2020, 40(10): 4479–4487. MENG X F, GUO J M, YANG J X, et al. Mechanism of the two cultivars of rapeseeds with different Pb enrichment ability[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(10): 4479–4487.
- [62] 罗洁文, 黄玫英, 殷丹阳, 等. 类芦对铅镉的吸收动力特性及亚细胞分布规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1451–1457. LUO J W, HUANG M Y, YIN D Y, et al. Uptake kinetic characteristics and subcellular distribution of Pb²⁺ and Cd²⁺ in *Neyraudia reynaudiana*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8): 1451–1457.
- [63] 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 International*, 2013, 20(8): 5665–5672.
- [64] 张倩妮. 泥炭土改良下铅锌矿渣对泡桐重金属富集特性的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019. ZHANG Q N. Study on the accumulation effect *Paulownia fortunei* to heavy metal in lead-zinc slag with *Peat amended*[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2019.
- [65] 孙婕妤. 镉胁迫对不同地被菊品种生理特性及超微结构的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018. SUN J Y. Effects of cadmium stress on the physiological characteristics and ultrastructure of different ground-cover chrysanthemum varieties[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018.
- [66] 徐劫, 保积庆, 于明革, 等. 茶树根细胞壁对铅的吸附作用[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 427–432. XU J, BAO J Q, YU M G, et al. Lead absorption by the root cell wall of tea plant[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2): 427–432.
- [67] 张旭红, 高艳玲, 林爱军, 等. 植物根系细胞壁在提高植物抵抗金属离子毒性中的作用[J]. 生态毒理学报, 2008, 3(1): 9–14. ZHANG X H, GAO Y L, LIN A J, et al. A review on the effects of cell wall on the resistance of plants to metal stress[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2008, 3(1): 9–14.
- [68] 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. ZHOU R. Study of mechanism for cadmium accumulation by pectin in tomato cell wall[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2018.
- [69] HE C Q, ZHAO Y P, WANG F F, et al. Phytoremediation of soil heavy metals (Cd and Zn) by castor seedlings: tolerance, accumulation and subcellular distribution[J]. *Chemosphere*, 2020, 252: 126471.