

DOI: 10.5846/stxb201808191763

余顺慧, 张静, 陈华华, 张波, 胡超生, 邓洪平. 香根草对镉毒害生理响应的 FTIR 研究. 生态学报, 2019, 39(19): - .

Yu S H, Zhang J, Chen H H, Zhang B, Hu C S, Deng H P. Physiological Responses of *Vetiveria zizanioides* to Cadmium Stress by Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): - .

香根草对镉毒害生理响应的 FTIR 研究

余顺慧¹, 张 静², 陈华华¹, 张 波³, 胡超生¹, 邓洪平^{4,*}

1 重庆三峡学院, 三峡库区水环境演变与污染防治重庆高校市级重点实验室, 万州 404100

2 重庆市万州区生态环境监测站, 万州 404100

3 重庆市交通规划勘察设计院, 重庆 401121

4 西南大学生命科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715

摘要:为阐明香根草(*Vetiveria zizanioides*)对镉(Cd²⁺)胁迫的耐性机理及其对重金属 Cd²⁺的积累特征,通过水培试验,采用傅里叶变换红外光谱法(FTIR)研究在不同 Cd²⁺浓度处理时香根草根、茎、叶化学组分的变化,同时测定香根草叶 Cd²⁺的亚细胞分布和其重金属 Cd²⁺含量。结果表明,其根组织在 2 927 cm⁻¹处峰高先下降后上升,表明在低 Cd²⁺(Cd²⁺<3 mg/L)处理条件下香根草分泌的有机酸不断螯合 Cd²⁺,造成羧酸 O-H 的减少,但随着 Cd²⁺含量的升高,其羧酸螯合力变弱,有机酸含量渐渐升高;茎组织在 1 631 cm⁻¹峰高处先上升后下降,表明在低 Cd²⁺(Cd²⁺<3 mg/L)处理条件下香根草产生氨基酸、多肽和蛋白质等物质,通过渗透调节来增强抗逆性,但随着 Cd²⁺含量的升高,蛋白质二级结构中肽键间氢键的结合力受影响较大。当 Cd²⁺处理浓度为 7 mg/L 时,香根草生长 10 d 后,地上部分及根组织富集 Cd²⁺量分别高达 212.49 mg/kg 和 290.59 mg/kg。香根草地上部分的 Cd²⁺含量随 Cd²⁺处理浓度的增加而增加。香根草叶片富集的 Cd²⁺主要分布于细胞质中,其次为细胞壁,而在线粒体和叶绿体中含量最低。

关键词:香根草;镉胁迫;傅里叶变换红外光谱;镉富集

Physiological Responses of *Vetiveria zizanioides* to Cadmium Stress by Fourier Transform Infrared Spectroscopy

YU Shunhui¹, ZHANG Jing², CHEN Huahua¹, ZHANG Bo³, HU Chaosheng¹, DENG Hongping^{4,*}

1 Key Laboratory of Water Environment Evolution and Pollution Control in the Three Gorges Reservoir Region, Chongqing Three Gorges University, Wanzhou 404100, China

2 Chongqing Wanzhou District Ecological Environment Monitoring Station, Wanzhou 404100, China

3 Chongqing Communications Planning Survey & Design Institute, Chongqing 401121, China

4 Key Laboratory of Eco-environments in the Three Gorges Reservoir Region, School of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Heavy metal pollution caused by industrial sewage and agricultural production is becoming an increasingly serious problem. Cadmium(Cd) is one of the most phytotoxic heavy metal elements and is attracting increasing research attention. It easily enters the food chain and poses considerable threat to human health. *Vetiveria zizanioides* is a tall (1—2 m), fast-growing, and perennial tussock grass that is eurytopic in terms of habitat choice. It develops a long (3—4 m), massive, and complex root system that can penetrate the deeper layers of the soil. *V. zizanioides* has a strong tolerance for Cd, and it can adapt to tolerate Cd at low concentrations over a long period, or high Cd concentrations over a short period. The Cd can be absorbed and stored by *V. zizanioides* while retaining its stability. Healthy and equal-sized plants were chosen, cleared, and

基金项目:国家自然科学基金项目:三峡库区消落带种子库动态及多年生草本植物适应机制(31270451);三峡库区水环境演变与污染防治重庆高校市级重点实验室开放基金项目:外源物质缓解土壤、水体-植物系统重金属迁移转化机制研究(WEPKL2016LL-05)

收稿日期:2018-08-19; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: denghp@swu.edu.cn

cultured for 7 days in complete Hoagland nutrient solution. After the plants had grown buds, they were treated with different gradients of Hoagland's solution modified by adding Cd with cadmium sulfate (1:1) hydrate (3:8) ($3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) to create Cd concentrations of 0, 1, 3, 5, and 7 mg/L. The experiments were carried out separately in three different groups. The plants were harvested after 10 days. The whole plant was washed under tap water and rinsed with deionized water. The roots, stems, and leaves were separated, put into a cabinet dryer at 105°C for 30 min, further dried in a cabinet dryer at 80°C for another 48 h and finally milled into a fine powder (less than 200-mesh) with a stainless steel attritor. This study deals with the physiological response of the changes in chemical contents in the root, stem, and leaf of *V. zizanioides* seedlings stressed by excess cadmium ions (Cd^{2+}) using the Fourier transform infrared spectroscopy technique (FTIR). Cadmium (Cd) accumulation in plants and its subcellular distribution (determined by atomic absorption spectroscopy) were tested under the different Cd^{2+} concentrations to elucidate the mechanism of Cd^{2+} tolerance and the accumulation characteristics of Cd^{2+} in *V. zizanioides*. This result indicates that after an initial decline, absorbance in roots of the dominant infrared band (near $2,927\text{ cm}^{-1}$) exhibited an increase. At low Cd^{2+} concentrations ($<3\text{ mg/L}$), organic acids secreted by *V. zizanioides* were able to chelate Cd^{2+} , which leading to a decrease in carboxylic acid O—H. At high Cd^{2+} concentrations ($>3\text{ mg/L}$), chelating activity decreased, which was followed by an increase in organic acids. After an initial increase, absorbance changes in stems of the dominant infrared band (near $1,631\text{ cm}^{-1}$) exhibited a decline. This indicates that at low Cd^{2+} concentrations ($<3\text{ mg/L}$), osmosis of organic substances (e.g. amino acids, peptides, and proteins) occurred, improving Cd^{2+} tolerance. However, with the increase in Cd^{2+} concentrations, the binding force between peptide bonds and hydrogen bonds in protein secondary structure was significantly affected. In addition, the plant accumulated large amount of Cd^{2+} , up to the maximum of 212.49 mg/kg (shoot) and 290.59 mg/kg dry weight (root) after 10 days when the plant was treated with a Cd^{2+} concentration of 7 mg/L . The Cd^{2+} in the shoot (stem and leaf) usually increased with increasing Cd^{2+} concentrations. Cadmium accumulated in leaves was mainly distributed in the cytoplasm, followed by the cell wall, and was least distributed in the mitochondria and chloroplast. This study demonstrates the potential of the Fourier transform infrared spectroscopy as a non-invasive and rapid technique for monitoring of plants stressed with heavy metals.

Key Words: *Vetiveria zizanioides*; cadmium stress; Fourier Transform Infrared; cadmium accumulation

工业排污,农业耕作等生产活动造成的土壤重金属污染问题日益严重。目前,我国重金属污染土壤总面积已达 $2 \times 10^7\text{ hm}^2$, 占我国耕地总面积的 $1/5$ ^[1]。其中,重金属镉(Cd)是毒性最强的元素之一,易溶于水、通过食物链,对人体健康构成巨大威胁。如何去除土壤中的重金属 Cd 已成为人们关注的热点。传统的物理、化学修复方法存在成本高、破坏土壤理化性质、易造成二次污染等弊端。植物修复(Phytoremediation)是利用植物来转移、容纳或转化重金属污染物使其对环境无害的技术,具有成本低,不破坏生态环境等优点。这已经成为土壤、水体重金属污染研究领域的一项新兴技术。

高水平的重金属污染能引起植物细胞结构的伤害甚至致死。但在重金属胁迫早期,当胁迫没有产生生理症状时,在细胞和组织内的主要物质如蛋白质、糖含量、构象和分子内相互作用等方面都会发生变化,而这些变化一般通过测定可溶性糖、可溶性蛋白质含量及 SOD、POD 和 CAT 酶的活性等指标来进行研究。但测定这些生理指标的方法不但操作复杂、试剂花费较多,而且不能解析蛋白质等大分子物质结构上的变化^[2]。傅立叶变换红外光谱(FTIR)是一种基于化合物中官能团和极性键振动的结构分析技术^[3],其特点是操作简单、快速及灵敏度高。目前国内学者已经应用 FTIR 技术研究植物对重金属的耐性机制^[4-6]。薛生国等采用 FTIR 法探讨紫茉莉对 Pb 胁迫生理响应的影响,发现紫茉莉通过根系有机物含量的变化,将植物吸收的 Pb 大部分积累在根部,阻止 Pb 向地上部分运输,有效的保护了植物地上部分^[7]。付川等应用 FTIR 技术研究紫花苜蓿对 Cu 胁迫生理响应,认为植物化学组分的变化有助于揭示超富集植物的 Cu 耐性机理^[8]。但国内外研究多集中在生物量小,根系不够发达的植物类群^[9]。香根草(*Vetiveria zizanioides*)为禾本科多年生草本植物,是三

峡库区的原生物种,具有生物量大、根系发达、抗逆性强等特点,并且对重金属铅、镉具有较强的耐性和富集能力,可作为三峡库区土壤重金属污染修复的备选植物^[10]。由此,探讨不同 Cd 处理条件下其化学组成上的变化将有利于揭示其耐 Cd 机制。本研究拟利用 FTIR 技术,探讨不同 Cd 处理条件下,香根草根、茎、叶的化学组分变化和毒害机理,为三峡库区重金属 Cd 污染防治和土壤植物修复提供理论依据。

1 材料及方法

1.1 试验材料及方法

本研究以重庆三峡学院百安校区实验区的香根草为试验对象。2016 年 5 月随机选取健壮的、生长较为一致的香根草分蘖苗。先用水洗净,后移栽到含有 Hoagland 完全培养液的 200 mL 锥形瓶中进行水培纯化 7 d。当新芽长出后,将植株移入含有不同 Cd²⁺浓度(0、1.0、3.0、5.0、7.0 mg/L)的营养液中进行继续培养。Cd²⁺以 3CdSO₄·8H₂O 形式加入,每个浓度处理设 3 瓶。每 3 d 换一次培养液,24 h 连续通气,所有处理培养液的 pH 值维持在(6.5±0.1)。若瓶内液体量减少,则滴加含 Cd²⁺营养液至初始刻度线;若瓶内液体变浑浊,则更换带有 Cd²⁺的营养液。处理 10 d 后收获香根草植株。用自来水和去离子水洗净,再分成两部分,一部分取叶保存于液氮中备用,用于测定植株亚细胞组分。另一部分分别取根、茎、叶 3 部分于 105 °C 烘箱杀青 30 min,然后于 80 °C 烘箱烘中干燥 48 h,用钢磨碎机研磨成粉末,过 200 目筛。用于测定植株根、茎、叶样品的光谱信息。

1.2 傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析

来自于植物各部分的干粉用 KBr 混合(比例 1.5:100)。用傅里叶红外光谱仪(日本岛津制造 IRPrestige—21,光谱范围 4000—400 cm⁻¹,分辨率 16 cm⁻¹)测定香根草根、茎、叶样品的光谱信息。

1.3 Cd²⁺亚细胞分布的测定

提取各细胞器和细胞质组分参照汤惠华等^[11]方法。取嫩叶 2.000 g,按 1:10 的比例,加入预冷的匀浆液[250 mmol/L 蔗糖,50 mmol/L Tris-HCL(pH 7.4),1 mmol/L 二硫赤藓糖醇(C₄H₁₀O₂S₂)]在 4 °C 下研磨成匀浆。匀浆液先后在 798 rpm 离心 10 min,1336 rpm 离心 15 min,13361 rpm 离心 20 min,先后得沉淀为细胞壁、叶绿体、线粒体组分,最后上清液为细胞质组分(含液泡及核糖和蛋白质等)。各组分供 Cd²⁺含量测定。

1.4 微波消解样品测定其重金属 Cd²⁺含量

精确称取各样品 0.2000 g,加入酸液(浓 HNO₃:浓 H₂SO₄ = 4:1),同时做空白组;将以上溶液在 MARS240 微波消解系统消解后,冷却。过滤,滤液在 25 mL 容量瓶中定容,移入塑料瓶中保存,用 AA-6300 原子吸收分光光度计测定样品中 Cd²⁺含量(mg/Kg 干重)^[12]。

1.5 计算和数据分析

$$\text{富集系数}(BF) = \text{植物地上或地下部分镉含量} / \text{营养液中镉含量} \quad (1)$$

$$\text{转运系数}(TF) = \text{植物地上部分镉含量} / \text{根中镉含量} \quad (2)$$

实验数据采用 IBMSPSS20 进行统计分析和处理,并应用 Origin (8.0) 进行红外光谱数据图谱处理。

2 结果与讨论

2.1 Cd²⁺胁迫对香根草重金属分布的影响

与对照相比,随着 Cd²⁺浓度的增大,香根草地下部分、地上部分 Cd²⁺的含量逐渐增加;Cd²⁺处理后香根草的地下部分 Cd²⁺含量明显大于地上部分(表 1)。当用最高 Cd²⁺浓度 7 mg/L 处理时,此时香根草出现受害症状,表现为幼苗矮化,根长、根体积减小等。按照李东旭等提出的^[13]参考值,超富集植物的转运系数和富集系数都大于 1。本实验香根草的转运系数和富集系数都小于 1,说明香根草不属于超富集植物。但香根草生物量大、根系发达、抗逆性强。且具有较强的 Cd 耐性,可长时间适应低浓度 Cd 胁迫,甚至是短时间的高浓度 Cd 胁迫^[14]。香根草能吸收 Cd 并储存在体内,具有较强的稳定能力,在 Cd 污染土壤的修复方面有一定应用潜

力^[1],香根草作为一种植物修复的候选物种。

表 1 Cd²⁺胁迫对香根草植物体内的积累和分布情况¹

Table 1 Accumulation and distribution of cadmium in *V. zizanioides* tissues and translocation factor in cadmium-treated solutions for 10 days

Cd ²⁺ 的处理 Treatment of cadmium	地上部分 Shoots/mg/kg		地下部分 Roots/mg/kg		TF
	Cd	BF	Cd	BF	
Ck	1.60±0.02 ^e	—	4.93±0.12 ^e	—	0.32
t1	30.39±0.24 ^d	0.86	35.18±0.13 ^d	0.83	0.28
t2	65.51±0.25 ^e	0.91	108.91±0.30 ^e	0.40	0.60
t3	119.03±0.35 ^b	0.75	255.68±0.47 ^b	0.32	0.47
t4	212.49±0.71 ^a	0.58	290.59±0.98 ^a	0.64	0.73

1) 同列具有不同字母上标者为差异显著($P<0.05$); 2) Ck: 对照 (0 mg/L); t1: 1 mg/L; t2: 3 mg/L; t3: 5 mg/L; t4: 7 mg/L; 3) Cd: 镉; BF: 富集系数; TF: 转运系数

2.2 Cd²⁺在香根草叶片内的亚细胞分布

Cd²⁺在香根草叶片内的亚细胞组分间分布不均匀,其中分配比例最高的是在细胞质,细胞壁次之,含量最少的是在叶绿体和线粒体(表 2)。随着 Cd²⁺浓度的增高,叶片 Cd²⁺总含量及各组分含量增加。当 Cd²⁺浓度 <3 mg/L 时, Cd²⁺在细胞壁和细胞质中的分配比随 Cd²⁺处理浓度升高而升高,而当 Cd²⁺浓度 >3 mg/L 时, Cd²⁺在细胞壁中的分配比例随 Cd²⁺处理浓度增高而降低,在细胞质中 Cd²⁺的分配比例升高幅度也渐渐减少。可能是细胞质贮存 Cd²⁺的能力有限。

表 2 Cd²⁺在香根草叶片的亚细胞分布

Table 2 Subcellular distribution of cadmium in the leaf of *V. zizanioides*

Cd ²⁺ 的浓度 Concentration of cadmium/(mg/L)	Cd ²⁺ 在香根草叶片的亚细胞分布 Subcellular distribution of cadmium in leaf of <i>V. zizanioides</i> mg/kg				
	细胞壁 cell wall	叶绿体 chloroplast	线粒体 mitochondria	细胞质 cytoplasm	总量 total
0	0.28±0.01 ^e (25.93)	0.06 ±0.00 ^e (5.56)	0.13 ±0.00 ^e (12.04)	0.61 ±0.02 ^e (56.48)	1.08 ±0.01 ^e (100)
1	6.11±0.04 ^d (27.29)	0.31 ±0.04 ^d (1.38)	0.42±0.00 ^d (1.88)	15.55 ±0.33 ^d (69.45)	22.39 ±0.16 ^d (100)
3	9.16±0.02 ^e (25.54)	0.47±0.02 ^e (1.31)	0.67±0.17 ^e (1.87)	25.57 ±0.24 ^e (71.29)	35.87 ±0.17 ^e (100)
5	13.16±0.10 ^b (21.41)	0.73 ±0.10 ^b (1.19)	0.97±0.05 ^b (1.58)	46.60 ±0.35 ^b (75.82)	61.46±0.57 ^b (100)
7	15.20±0.25 ^a (21.33)	0.98 ±0.14 ^a (1.38)	1.48 ±0.12 ^a (2.08)	53.59±0.41 ^a (75.21)	71.25 ±0.72 ^a (100)

1) 同列具有不同字母上标者为差异显著($P<0.05$); 2) 在括号里的数据为分配比例(%)

研究重金属的亚细胞分布是为了确定该元素对细胞活动的影响^[12]。本试验中,细胞质是 Cd²⁺主要贮存部位。细胞质包含液泡、细胞液、蛋白质等成分,大量贮存在香根草细胞质中的 Cd²⁺是否被隔离在液泡中,以减少其毒性,提高香根草对 Cd²⁺的耐受性,还有待进一步研究。细胞壁是重金属进入细胞内部的第一道屏障,细胞壁中的糖、蛋白质及有机酸等可与金属离子结合而贮存部分重金属,减少重金属对植物的毒害^[12],这与后面 FTIR 研究中根、茎一致。Cd²⁺在叶绿体和线粒体含量最少,降低了 Cd²⁺与有生命活性的原生质部分的接触机会,使酶的活性不受影响,保证了光合作用和呼吸作用的正常进行,这可能是香根草对 Cd²⁺具有一定耐受性的原因^[15]。

2.3 不同浓度 Cd²⁺处理对香根草根、茎和叶的 FTIR 分析

在不同浓度 Cd²⁺胁迫下,应用 FTIR 对香根草的根、茎、叶测定,分别得到红外光谱图(见图 1)。主要红外谱带是:3380—3429 cm⁻¹处的谱带是分子间氢键 O—H 自由羟基的伸缩振动峰,主要来自于纤维素、半纤维素、多糖等碳水化合物^[16];2920—2927 cm⁻¹附近是羧酸 O—H 与甲基饱和 C—H 键的伸缩振动重叠峰,主要来自于维生素和生物膜及细胞壁的组织等成分^[16];1631—1645 cm⁻¹附近是 N—H 酰胺的弯曲振动峰,其中 1645 cm⁻¹左右的峰值为酰胺化合物的吸收 I 带(包括—CONH—中的 C=O 伸缩振动)^[17],是蛋白质的特征红外光谱;1395—1415cm⁻¹处是含油脂化合物(各种膜和细胞壁)的组织中甲基 C—H 的变形振动

峰^[17]。1030—1064 cm^{-1} 附近是醇、酯基、醚基或酚类等化合物 C—O 键的伸缩振动吸收峰^[18-19]。

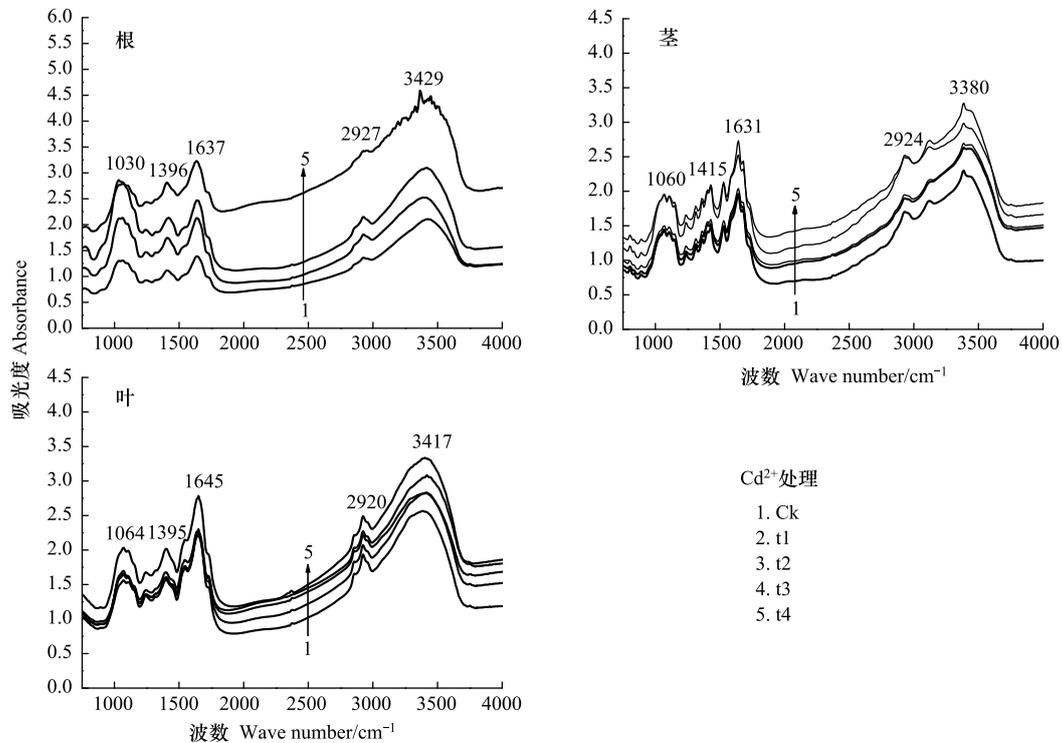


图1 Cd^{2+} 处理下香根草根、茎、叶的红外光谱图

Fig.1 Fourier Transform Infrared spectra of root, stem, leaf of *V. zizanioides* by cadmium treatment

2.4 香根草特征峰吸光度变化的定量分析

对不同浓度重金属处理前后的香根草幼苗的根、茎、叶进行了红外光谱分析,结果显示各组分在重金属处理前后的峰形基本保持不变。

由香根草的特征峰吸光度变化图2可见,香根草幼苗根、茎、叶红外光谱特征峰的吸收强度随 Cd^{2+} 浓度的升高而表现出不同的趋势。根的特征峰吸光度变化为先降后升(见图2)。在3380—3429 cm^{-1} , 2920—2927 cm^{-1} , 1631—1645 cm^{-1} , 1395—1415 cm^{-1} , 1030—1064 cm^{-1} 等处,香根草幼苗根在 Cd^{2+} 浓度低于3.0 mg/L 时,该峰的吸光度下降,可能根外表皮细胞壁的羟基吸附结合 Cd^{2+} 形成稳定的化合物,使细胞表面的羟基减少^[7]、植物根系不断分泌有机酸螯合 Cd^{2+} ,致使羧酸谱带下降、蛋白质二级结构中,肽键间氢键的结合力随着 Cd^{2+} 浓度的升高而变弱、细胞壁通过降低果胶甲基化程度,使CEC(阳离子交换能力)提高,从而吸收更多的 Cd^{2+} ,即通过细胞壁中积累 Cd^{2+} 来增强抗逆性等。当 Cd^{2+} 浓度大于3.0 mg/L 时,峰值又呈上升趋势,原因是高浓度的 Cd^{2+} 可能破坏了根外表皮细胞壁的羟基吸附结合 Cd^{2+} 的机制,导致根外表皮细胞壁的羟基无法结合 Cd^{2+} ,随着 Cd^{2+} 对香根草毒害的进一步加重,其羧酸螯合力变弱,频带开始上升、此外不断增加的 Cd^{2+} 诱导富脯氨酸蛋白、病害相关蛋白和富甘氨酸蛋白等一些蛋白合成^[7], Didierjean 等^[20] 还认为这些重金属胁迫诱导蛋白可能具有保护植物细胞免受重金属毒害的作用,出现的显著吸收峰可能与香根草根中氨基酸、多肽和蛋白质类物质含量升高等有关^[7]。

香根草茎的特征峰吸光度变化为先升后降趋势(图2)。在低浓度时,所有香根草茎的特征峰吸光度随着 Cd^{2+} 浓度的升高,先升高(图2),原因是低 Cd^{2+} 下促进了有机物如纤维素、半纤维素、多糖等的分泌和运输及氨基酸、多肽和蛋白质等物质的产生,通过渗透调节来增强抗逆性,而在低浓度 Cd^{2+} 刺激下,对峰值变化的主要贡献是膜脂过氧化作用,随着 Cd^{2+} 浓度的升高,膜过氧化程度加深,脂肪族酮类化合物(过氧化产物)在根部积累,引起峰值升高,当 Cd^{2+} 浓度大于3.0 mg/L 时,吸光度下降,表明随着 Cd^{2+} 毒的加剧,碳水化合物等物

质的合成和运输都降低、蛋白质二级结构中肽键间氢键的结合力受影响较大。

香根草叶的特征峰吸光度变化也是先升后降趋势(图2)。由图2看出,在低 Cd^{2+} 浓度时,所有香根草叶的特征峰吸光度随着 Cd^{2+} 浓度的增加而上升,先上升的原因是低 Cd^{2+} 刺激下促进了碳水化合物及有机物的分泌和运输,通过渗透作用来加强叶对 Cd^{2+} 的抗逆性、由根系输送来的羧酸盐较多,并以该形式积累在叶片和叶中蛋白质、氨基酸和多肽类物质含量增加。当 Cd^{2+} 浓度大于 3.0 mg/L 时,吸光度降低,表明随着 Cd^{2+} 毒的加剧, Cd^{2+} 阻碍了这些碳水化合物、有机物及叶中蛋白质、氨基酸和多肽类物质的合成和运输、根系羧酸螯合力变弱,其羧酸盐的运输能力也变弱等,曲线下降。

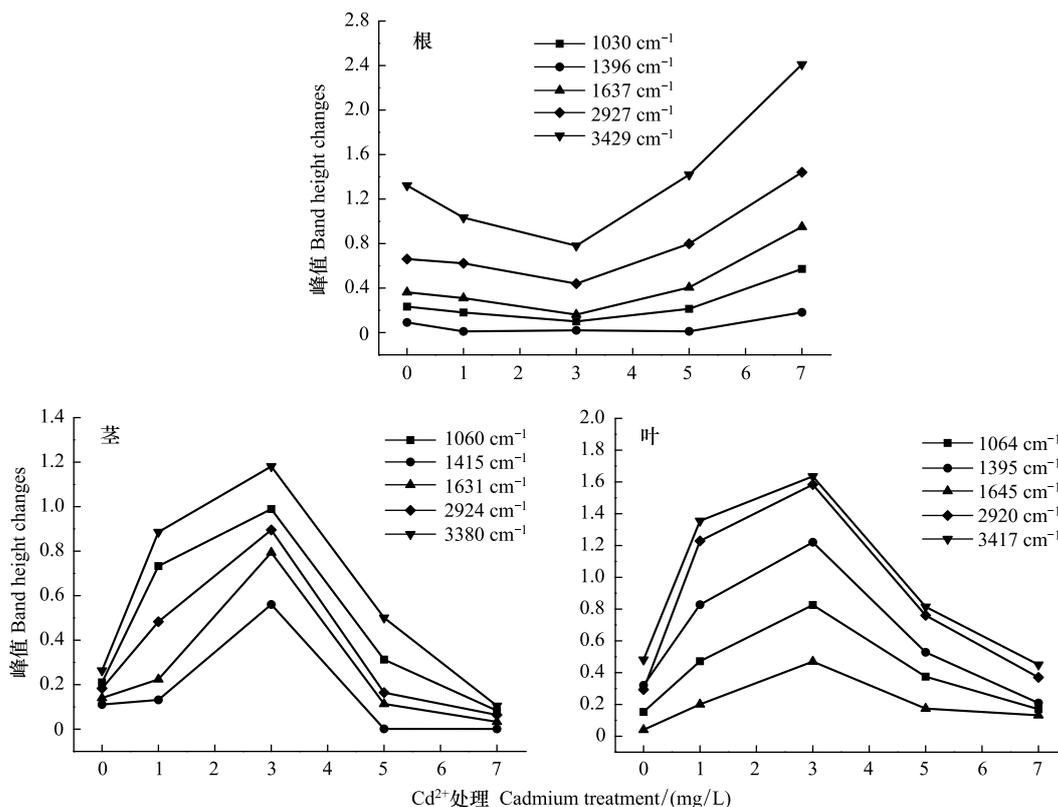


图2 Cd^{2+} 处理下香根草根、茎、叶的特征峰吸光度变化图

Fig.2 The band height changes of root, stem and leaf in *V. zizanioides* by cadmium treatment

$1030\text{—}1064 \text{ cm}^{-1}$: 醇、酯基、醚基或酚类等化合物的 C—O 键的伸缩振动吸收峰; $1395\text{—}1415 \text{ cm}^{-1}$: 甲基的吸收带; $1631\text{—}1645 \text{ cm}^{-1}$: N—H 酰胺的弯曲振动峰; $2920\text{—}2927 \text{ cm}^{-1}$: 羧酸 O—H 与甲基饱和 C—H 键的伸缩振动重叠峰; $3380\text{—}3429 \text{ cm}^{-1}$: 分子间氢键 O—H 自由羟基的伸缩振动峰

3 结论

(1) 香根草根组织在 2927 cm^{-1} 处峰高先下降后上升,表明在低 Cd^{2+} ($\text{Cd}^{2+} < 3 \text{ mg/L}$) 处理条件下香根草分泌的有机酸不断螯合 Cd^{2+} ,造成羧酸 O—H 的减少,但随着 Cd^{2+} 含量的升高,其羧酸螯合力变弱,有机酸含量渐渐升高。

(2) 香根草茎组织在 1631 cm^{-1} 峰高处先上升后下降,表明在低 Cd^{2+} ($\text{Cd}^{2+} < 3 \text{ mg/L}$) 处理条件下香根草产生氨基酸、多肽和蛋白质等物质,通过渗透调节来增强抗逆性,但随着 Cd^{2+} 含量的升高,蛋白质二级结构中肽键间氢键的结合力受影响较大

(3) 香根草叶片富集的 Cd^{2+} 主要分布于细胞质中,其次为细胞壁,而在线粒体和叶绿体中含量最低。

(4) 虽然香根草对 Cd^{2+} 的积累还未到达超富集植物的范围,但从耐 Cd^{2+} 能力、地上部分对 Cd^{2+} 的富集量、

高生物量、生长快等多方面综合考虑,香根草在遭受 Cd²⁺污染的土壤中植物修复技术领域,拥有潜在的利用价值。

致谢:东南大学王大勇教授对写作给予指导,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] 马文超,刘媛,孙晓灿,陈锦平,魏虹. 镉在土壤-香根草系统中的迁移及转化特征. 生态学报, 2016, 36(11): 3411-3418.
- [2] 龚宁,李荣华,孟昭福,杨公明. Cd 对小白菜萌发生理影响的 FTIR-ATR 研究. 农业环境科学学报, 2010, 29(1): 9-14.
- [3] 薛生国,黄艳红,王钧,田守祥,雷杰,何哲祥. 采用 FTIR 法研究酸模叶蓼对锰胁迫生理响应的影响. 中南大学学报:自然科学版, 2011, 42(6): 1528-1532.
- [4] Synytsya A, Čopiková J, Matějka P, Machovič V. Fourier transform Raman and Infrared spectroscopy of pectins. Carbohydrate Polymers 2003, 54(1): 97-106.
- [5] Fellah A, Anjukandi P, Waterland M R, Williams M A K. Determining the degree of methylesterification of pectin by ATR/FTIR: Methodology optimisation and comparison with theoretical calculations. Carbohydrate Polymers 2009, 78(4): 847-853.
- [6] Szymanska-Chargot M, Zdunek A. Use of FTIR spectra and PCA to the bulk characterization of cell wall residues of fruits and vegetables along a fraction process. Food Biophysics 2013, 8(1): 29-42.
- [7] 薛生国,朱锋,叶晟,王钧,吴雪娥. 紫茉莉对铅胁迫生理响应的 FTIR 研究. 生态学报, 2011, 31(20): 6143-6148.
- [8] 付川,余顺慧,黄怡民,邓洪平. 紫花苜蓿对铜胁迫生理响应的傅里叶变换红外光谱法研究. 生态学报, 2014, 34(5): 1149-1155.
- [9] Pulford D I, Watson C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees—a review. Environment International, 2003, 29(4): 529-540.
- [10] 韩露,张小平,刘必融,许迪楼. 香根草对土壤中几种重金属离子富集能力的比较研究. 生态学杂志, 2005, 22(5): 20-23.
- [11] Ni T H, Wei Y Z. Subcellular distribution of cadmium in mining ecotype *Sedum alfredii*. Acta Botanica Sinica, 2003, 45(8): 925-928.
- [12] 王裕玲. 铅胁迫对双穗雀稗生理特性及铅积累的影响. 西南农业学报, 2015, 28(3): 1062-1066.
- [13] 李东旭,文雅. 超积累植物在重金属污染土壤修复中的应用. 图书情报导刊, 2011, 21(1): 177-181.
- [14] 高伟,魏虹,贾中民,田晓峰. 香根草对镉胁迫的光合响应. 西南师范大学学报:自然科学版, 2012, 37(10): 59-64.
- [15] Hayens R J. Ion exchange properties of roots and ionic interactions within the root apoplasm; their role in ion accumulation by plants. Botanical Review, 1980, 46(1): 75-99.
- [16] Zavoï S, Fetea F, Ranga F, Pop M R, Baciú A, Socaciú C. Comparative fingerprint and extraction yield of medicinal herb phenolics with hepatoprotective potential, as determined by UV-Vis and FT-MIR spectroscopy. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 2011, 39(2): 82-89.
- [17] Dean A P, Sigeo D C, Estrada B, Pittman J K. Using FTIR spectroscopy for rapid determination of lipid accumulation in response to nitrogen limitation in freshwater microalgae. Bioresource Technology, 2010, 101(12): 4499-4507.
- [18] Kacurakova M, Capek P, Sasinkova V, Wellner N, Ebringerova A. FT-IR study of plant cell wall model compounds: pectic polysaccharides and hemicelluloses. Carbohydrate Polymers, 2000, 43(2): 195-203.
- [19] Shivshankar S, Rai A, Ahmad A, Sastry M. Rapid synthesis of Au, Ag, and bimetallic Au core-Ag shell nanoparticles using Neem (*Azadirachta indica*) leaf broth. Journal of Colloid and Interface Science, 2004, 275(2): 496-502.
- [20] Didier J L, Frenedo P, Nasser W, Genot G, Marivet J, Burkard G. Heavy-metal-responsive genes in maize: Identification and comparison of their expression upon various forms of abiotic stress. Planta, 1996, 199(1): 1-8.