

# FTIR-NIR 研究镉胁迫对构树试管幼苗生长的影响与机理

王 成<sup>1,2</sup>, 蒋泽平<sup>3\*</sup>, 李文青<sup>1</sup>, 邵文静<sup>2</sup>, 张 婷<sup>2</sup>, 季峻峰<sup>2</sup>

(1.南京市环境保护科学研究院, 南京 210013; 2.表生地球化学教育部重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093; 3.江苏省林业科学研究院, 南京 210018)

**摘要:**利用傅里叶变换漫反射红外光谱(FTIR)和近红外光谱(NIR)测定了构树幼苗在不同浓度镉胁迫下叶片的红外光谱,揭示了构树叶片中蛋白质、脂类等有机化合物合成对镉胁迫的生理响应。结果表明,构树幼苗在 Cd 胁迫下,鲜叶红边位置发生“蓝移”现象,红边蓝移程度与叶绿素含量呈正相关关系。近红外光谱的 710 nm 波长可作为是否受胁迫的红边位置界限。镉胁迫下构树幼苗的 FTIR 光谱 3010 cm<sup>-1</sup>、1720 cm<sup>-1</sup>、1636 cm<sup>-1</sup>、1468 cm<sup>-1</sup>、892 cm<sup>-1</sup> 处特征吸收峰强度随胁迫强度增加而增加,揭示了构树试管苗叶片通过合成更多的蛋白质、纤维素、羧酸以及部分酯类有机物来响应镉胁迫。FTIR-NIR 光谱分析可用于植物对 Cd 胁迫的生理学研究,并可作为一种快捷方法应用于植物重金属污染监测。

**关键词:**红外光谱;构树;镉胁迫;生理作用;叶绿素;化学组分

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)04-0673-07 doi:10.11654/jaes.2014.04.008

## FTIR-NIR Spectrum Study on Response and Mechanism of *Broussonetia papyrifera* Sprout Under Cadmium Stresses

WANG Cheng<sup>1,2</sup>, JIANG Ze-ping<sup>3\*</sup>, LI Wen-qing<sup>1</sup>, SHAO Wen-jing<sup>2</sup>, ZHANG Ting<sup>2</sup>, JI Jun-feng<sup>2</sup>

(1.Nanjing Research Institute of Environmental Protection, Nanjing 210013, China; 2.Key Laboratory of Surficial Geochemistry, Ministry of Education, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 3.Forestry Academy of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China)

**Abstract:** *Broussonetia papyrifera*, a popular tree in China, is tolerant to barren and drought soil conditions. It is also potential pollution-resistant. In this study, Fourier Transform Infrared Spectrometry (FTIR) and Near Infrared Spectrum (NIR) were applied to study the dynamics of protein and other organic components in test-tube *Broussonetia papyrifera* sprout under different Cd stresses. Chlorophyll contents in *Broussonetia papyrifera* sprout leaves were also analyzed. Cadmium concentrations in sprout leaves increased, but chlorophyll contents decreased with increasing Cd stresses. Under Cd stresses, The red edge position in fresh leaves of *Broussonetia papyrifera* sprout exhibited “blue-shift”, and the degree of the “blue-shift” showed a significant correlation with chlorophyll concentration. The red edge position of wavelength 710 nm in NIR can be used as an indicator of plant pollution by Cd. The intensities of absorption peaks 3010 cm<sup>-1</sup>, 1720 cm<sup>-1</sup>, 1636 cm<sup>-1</sup>, 1468 cm<sup>-1</sup> and 892 cm<sup>-1</sup> in FTIR increased with Cd stresses, implying that *Broussonetia papyrifera* sprout synthesized more protein, polysaccharide, ester and other organic components under Cd stresses. FTIR-NIR is a useful technique to study the mechanisms of plant responses to heavy metal stress and is also a potentially quick method for monitoring plant heavy metal pollution.

**Keywords:** infrared spectrum; *Broussonetia papyrifera*; Cd stress; physiological action; chlorophyll; chemical components

收稿日期:2013-09-10

基金项目:国家“十一五”科技支撑项目“耐盐经济林木良种选育”(2006BAD09A04-01-06);南京市环保科技项目“典型工农业交错区土壤镉生物有效性影响因素及污染防治措施研究”(201306)

作者简介:王 成(1981—),安徽宿州人,博士,研究方向为环境地球化学。E-mail: wangcheng118@163.com

\* 通信作者:蒋泽平 E-mail: jiangzeping518@126.com

随着工业化的进程,土壤等地表端元重金属(尤其是镉)污染问题日益突出。土壤中的 Cd 进入植物体可通过食物链进入人体而造成危害。镉也可使植物组织的生理特性发生改变,高浓度的 Cd 可使细胞结构受到明显的伤害,导致植株死亡;而在胁迫初期,植物细胞中蛋白质等主要成分的含量、构象及分子内相互作用等方面都会发生变化<sup>[1-2]</sup>。对镉胁迫下植物器官组织中蛋白质等有机组分的变化,过去多通过分析可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、MDA 含量、SOD 酶活性等指标来研究<sup>[3]</sup>。但是目前这些指标的传统化学分析方法,操作复杂耗时,且对大分子有机物质结构上的变化无法解析<sup>[3]</sup>。探索简捷准确的分析方法应用于重金属胁迫下植物器官响应的定性研究,不仅可以推动环境分析检测技术的进步,而且有助于今后进一步定量研究植物对重金属胁迫的响应机制。

傅立叶转换红外光谱(FTIR)和近红外光谱(NIR)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,已广泛应用于大分子化合物结构分析,是获取分子结构信息的有力工具<sup>[4-7]</sup>。FTIR 技术在蛋白质、糖类大分子结构特性分析上已被广泛应用于食品、医学、环境科学等领域<sup>[3,8]</sup>。该技术具有制样简单、操作简捷、不消耗试剂、灵敏度高等优点。因此,光谱法也可作为监测植物重金属污染的一种快捷有效方法。

构树是我国东部地区常见乔木树种之一,广泛分布于黄河、长江和珠江流域。构树耐旱、耐瘠,且有较强的抗污染性和适应性,具有修复土壤生态环境的潜力。但目前对乔木重金属胁迫响应的研究较少,而利用红外光谱法研究植物重金属胁迫响应多集中于草本植物<sup>[7,9]</sup>。因此,本文利用 FTIR 联合 NIR 技术研究 Cd 胁迫对构树幼苗生理生化指标的影响,试图通过分析蛋白质等有机成分的红外光谱特征吸收峰强度的变化与叶片叶绿素含量,来研究构树器官组织对镉胁迫的响应机理,进一步为环境重金属污染监测提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料及仪器

构树(*Broussonetia papyrifera* L.)试管幼苗在江苏省林业科学研究院植物组织培养室内培养(培养温度 25~28 °C,光照强度 2000 lx,每日光照 10 h)。分析仪器有 Nicolet 6700 FT-IR 光谱仪(Thermo 公司,USA),Perkin Elmer Lambda 900 型紫外/可见光/近红外分光光度计(Perkin Elmer 公司,USA),SPAD-502 叶绿素

测定仪(日本柯尼卡美能达公司)和 ICP-AES(Thermo Element iCAP6000(Radial),Thermo 公司,Cambridge,BZ,UK)。3CdSO<sub>4</sub>·8H<sub>2</sub>O 等化学试剂均为分析纯。

### 1.2 植物培养和样品采集

实验在植物组织培养室中进行。构树试管幼苗采用 Murashige and Skoog(MS)固体培养基培养。MS 培养基的配制可分为配制母液、配制培养液、溶化琼脂、调节 pH、培养基的分装和高压灭菌 6 个步骤。培养基成分如表 1 所示。在此 MS 培养基的基础上加入不同量的 3CdSO<sub>4</sub>·8H<sub>2</sub>O 配制成 5 个浓度梯度的培养液(按 Cd 计算,浓度单位为 mg·L<sup>-1</sup>):0(对照组)、10、20、50 和 100。幼苗在镉胁迫下培养 6 周。采集位于培养基液面之上的新鲜叶片,用吸水纸吸去叶片表面的水,置于干净塑料袋内,在室温下晾干。待用光谱仪收集鲜叶的光谱信息后,用吸水纸包裹叶片并置于烘箱中,在 105 °C 条件下烘 15 min 杀青,然后置于 45 °C 烘箱内干燥。用玛瑙研钵将干燥后的叶片磨成粉末,过 200 目筛,收集粉末样品在纸质样品袋内,并在 45 °C 条件下再次干燥 24 h 去除水分以备光谱分析。

表 1 不同浓度 Cd 胁迫下构树试管幼苗的树叶 Cd 含量及叶绿素相对含量

Table 1 Cadmium concentrations and chlorophyll relative concentrations( $\delta$ ) of *Broussonetia papyrifera* sprout under different Cd stresses

培养液中 Cd <sup>2+</sup> 增加浓度/mg·L <sup>-1</sup>	叶片粉末样品 Cd 含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	叶绿素浓度 相对值 $\delta$	红边蓝移程度 S/nm
0	0.36±0.11	39.30±2.83	0.0
10	62.41±5.30	31.88±3.14	10.5
20	171.4±26.7	31.06±3.01	13.5
50	290.5±46.3	29.02±1.08	15.0
100	497.3±52.4	15.66±1.72	20.3

### 1.3 光谱数据采集与处理

用 Perkin Elmer Lambda 900 光谱仪提取鲜叶片近红外光谱信息,波段范围 400~2500 nm,步长为 2 nm。中红外光谱测量范围 400~4000 cm<sup>-1</sup>,步长 2 cm<sup>-1</sup>。每组样品分别测量 5 次,取其平均值。光谱图谱用红外光谱专用软件 OMNIC 8.0(美国 Thermo Nicolet 公司开发)处理。

### 1.4 树叶叶绿素含量测定

用 SPAD-502 叶绿素仪测量构树叶片的叶绿素含量。每组镉胁迫浓度下分别测量 5 片不同的叶片样品,且在每件叶片不同位置测量 5 次,然后计算出叶绿素含量( $\delta$ )的平均值。

### 1.5 叶片 Cd 含量的测定

取适量的粉末样品用浓硝酸-高氯酸消化处理,用 ICP-AES 分析消化液中 Cd 浓度。分析测试过程采取全程空白对照,并采用中国国家标准物质茶叶样品(GBW08505)进行质量控制,同条件下进行 3 组平行测试并计算出算术平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 构树试管幼苗叶片 Cd 含量及叶绿素相对含量

不同浓度 Cd 胁迫下构树试管幼苗的树叶 Cd 含量及叶绿素相对含量如表 1 所示。叶片 Cd 含量随培养液 Cd 浓度的增加而增加,构树试管幼苗在受到 Cd 胁迫后,叶片叶绿素含量均低于对照组,并且随叶片 Cd 含量增加而降低(图 1)。叶绿素是植物进行光合作用的重要色素,其含量高低在一定程度上反映了光合作用水平,可以作为植物污染胁迫、光合作用能力和植被发育状况的指示<sup>[10]</sup>。植物吸收过量 Cd 能使叶

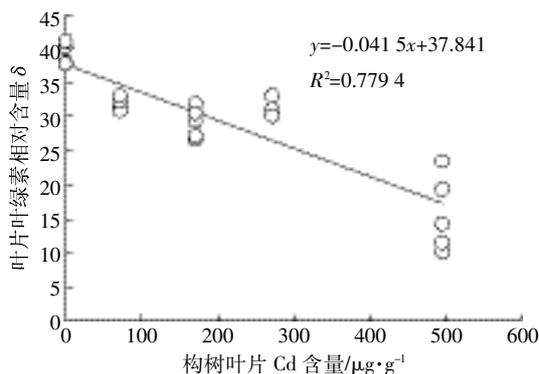


图 1 构树试管幼苗叶片 Cd 含量与叶绿素相对含量  $\delta$  对应关系  
Figure 1 Relationship between chlorophyll relative concentrations ( $\delta$ ) and Cd concentrations in the leaves of test-tube *Broussonetia papyrifera* sprout

绿体膜脂过氧化,叶绿体内膜结构遭到破坏,叶绿素的氧化分解速度加快;同时,Cd 可与叶绿体中蛋白质功能基团-SH 结合或取代其中的  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等离子,致使叶绿素蛋白中心离子组成发生变化而失活,从而使叶绿素含量降低<sup>[11]</sup>。植物叶绿素含量降低会减弱植物的光合作用,进而导致植物植株生长受到抑制。

### 2.2 近红外光谱分析

#### 2.2.1 构树试管幼苗鲜叶可见光-近红外光谱分析

图 2 为不同浓度 Cd 胁迫下的构树试管幼苗鲜叶可见-近红外光谱曲线(400~2500 nm)。总的说来,鲜叶的可见光-近红外光谱反射率为 5%~45%。所有样品的光谱反射率在 680 nm 左右达到极小值,750 nm 左右达到极大值。在 700 nm 附近树叶光谱反射率与培养基中的 Cd 浓度值的相关性发生了正负置换。在 700 nm 之前,树叶光谱反射率与培养基中的 Cd 浓度值呈正相关;在 800 nm 之后,树叶光谱反射率与培养基中的 Cd 浓度值呈负相关。

鲜叶叶片光谱反射率在可见光波段(400~670 nm)随 Cd 的胁迫强度增加而呈现出升高趋势,其中在 550 nm 附近的反射率极大值为叶绿素的绿色强反射峰区,而此处反射率的升高恰表明构树在 Cd 胁迫作用下,叶片中叶绿素含量发生明显减少。680~740 nm 为反射率陡增区,反射率由 10%~15% 迅速上升到 32%~45%;另外,光谱红边位置发生蓝移现象(向短波方向飘移),而植物可见光波段光谱和“红边”区域是描述植物叶片色素状态和健康状况的重要指示波段<sup>[11]</sup>。在可见光波段,植物光谱反射率主要被叶绿素等色素控制<sup>[12]</sup>,叶绿素含量减少会导致光谱图中叶绿素吸收峰减弱、吸收波段变窄、红光范围变小,使植物在可见光波段吸收率降低而反射率升高,同时发生“红边”蓝移现象<sup>[13]</sup>。在 750~2350 nm 波段,鲜叶反射

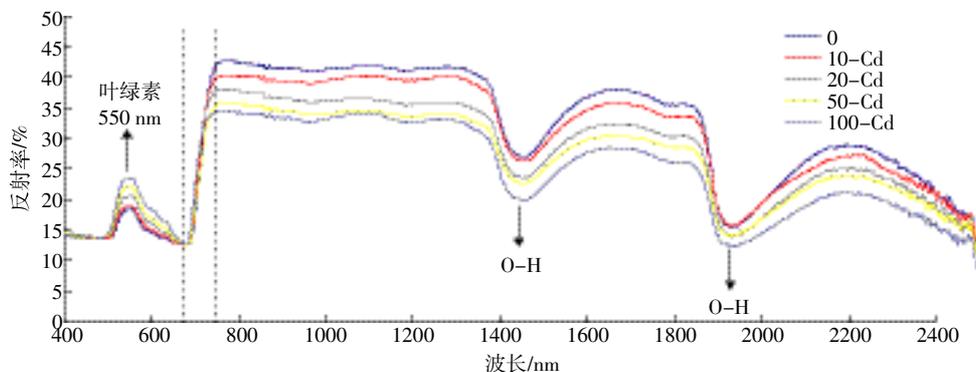


图 2 不同浓度 Cd 胁迫下的构树试管幼苗鲜叶片可见-近红外光谱  
Figure 2 NIR spectra of fresh leaves of test-tube *Broussonetia papyrifera* sprout under Cd stresses

光谱呈现出高原区(反射率为20%~50%),并在750~1400 nm形成区域反射坪,这主要是由于植物叶片内部组织对光多次反射散射的原因。在750~2350 nm波段,鲜叶反射率随Cd胁迫强度的增加而显著降低,反映了增加Cd的胁迫使叶片色素组织数量减少。在光谱曲线1400~1480 nm和1900~1960 nm附近出现的两个吸收峰则是O-H键的特征吸收峰区<sup>[14]</sup>,主要反映O-H键的吸收作用<sup>[15]</sup>,暗示了在Cd胁迫作用下某种富含O-H键物质的显著增加。

### 2.2.2 Cd胁迫作用引起的构树鲜叶的光谱红边蓝移

上文可见光-近红外光谱分析表明,Cd胁迫除对植物叶绿素造成影响外,还会对光谱的红边位置有一定影响。以样品的可见光谱反射率的一阶导数最大值处的波长值作为红边位置,去除每组中的极大值后得到红边位置统计图(图3)。可以看出,未受Cd胁迫组的红边位置都位于710 nm以外,受胁迫的红边位置都位于710 nm以内,且随着Cd胁迫程度的增加,红边位置大致向短波方向(690 nm)逐渐漂移,即红边蓝移。根据红边蓝移程度量化计算公式与方法<sup>[16]</sup>,本文计算了红边蓝移强度S,结果见表1。在100 mg·L<sup>-1</sup> Cd处理时,构树试管幼苗叶片红边蓝移程度出现最大值,漂移20.3 nm,与刘素红等报道的白菜铜胁迫下红边蓝移程度与重金属浓度成正相关的结果一致<sup>[1]</sup>。从本实验数据结果来看,710 nm可作为构树是否受胁迫的红边位置界限。

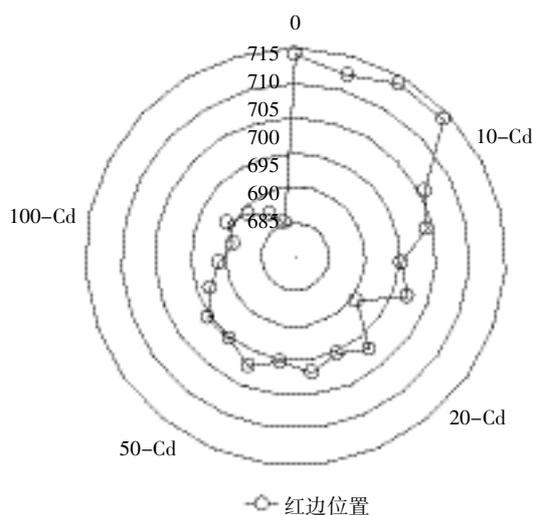


图3 不同浓度Cd胁迫下红边位置统计图

Figure 3 Statistics on the red edge positions

刘素红等<sup>[1]</sup>指出可见光波段和红边区域可以开发用于野外地物光谱数据定量估算和分析植物叶片叶绿素浓度。前人曾发现小麦叶片在铜胁迫下,红边

“蓝移”程度与培养液中铜浓度呈正比关系<sup>[16]</sup>。本文则发现红边蓝移与鲜叶中叶绿素含量有正相关关系(如图4所示),说明叶绿素的合成量对红边位置有重要影响作用。将红边位置回归到叶片叶绿素相对含量 $\delta$ 时,可得到下面的回归方程( $R^2=0.838, n=23$ ):

$$\text{红边位置波长 } y = 0.0298\delta^2 - 0.752\delta + 696.9$$

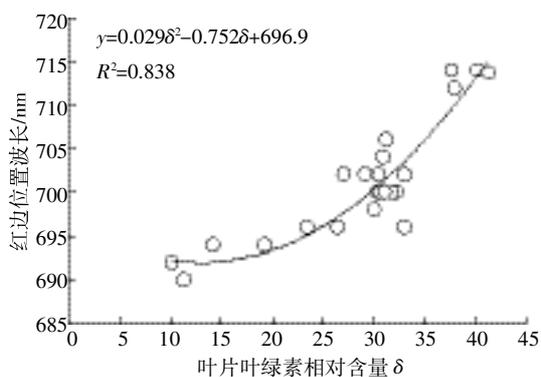


图4 红边位置与叶片叶绿素含量对应关系

Figure 4 Relationship between red edge positions in NIR and chlorophyll relative concentrations ( $\delta$ )

### 2.2.3 构树树叶粉末可见光-近红外光谱分析

植物鲜样反射率在可见光-近红外波段主要受叶绿素等色素和水分的影响<sup>[12]</sup>。为排除叶片中水分对反射率的影响,本文采集了鲜叶对应样品干燥制成粉末后的光谱数据,如图5所示。与鲜叶的反射率相比,粉末样品在400~2500 nm大部分波长位置的反射率明显高很多,为5%~97%。本实验中树叶粉末样品在近红外区域的反射率于1160 nm左右处达到最大值(97%)。通常叶绿素等色素的吸收/反射峰只限于较窄的特定波长范围内<sup>[12]</sup>,本文杀青干燥后粉末样品呈现出近乎全波长范围内的反射率增高,说明导致反射率升高的主要因素是粉末样品去除了原鲜叶中的水分,致使样品在近红外区域的反射率非常高。

从构树鲜样与粉末样品光谱的对比可看出(图5),粉末样品除了有与鲜叶样品相同的峰值位置(550、1430 nm和1920 nm左右),还比鲜样多出至少4个峰(1220、1740、2108 nm和2316 nm左右)。多出的这4个峰除2108 nm峰主要与蛋白质有关外<sup>[14]</sup>,其余3个峰皆是与C-H有关的<sup>[14]</sup>。出现新增峰的可能性有两个:一是鲜样杀青、烘干变成粉末样品的过程中产生了新物质;二是去除水的影响后,某些物质的光谱特性得以表现。由于利用近红外光谱分析重金属胁迫下植物化学成分变化的研究较少<sup>[17]</sup>,也很难仅凭近红

外光谱特征来断定杀青烘干或镉胁迫对植物器官有机成分变化的影响。

### 2.3 FTIR 分析

中红外光谱是分析植物中有机成分的一种重要手段。近年来,国内外学者开始探索利用 FTIR 来分析重金属胁迫下草本植物中有机成分的变化<sup>[6,9,17-18]</sup>。根据不同有机物的特征吸收/反射峰强度,FTIR 光谱法可以定性甚至半定量分析蛋白质、氨基酸、多糖等常见有机物含量的变化以及结构的变化<sup>[3,9,19]</sup>。图 6 为本实验获得的不同浓度 Cd 胁迫下构树试管幼苗树叶粉末样品的 FTIR 红外光谱曲线,图中 3010  $\text{cm}^{-1}$  处是脂类中 -CH 强而宽的特征吸收峰<sup>[4,9]</sup>,该吸收峰随 Cd 胁迫强度的增加而增加,表明构树幼苗叶片合成了更多的脂类化合物来响应 Cd 胁迫。1720  $\text{cm}^{-1}$  处吸收峰是由羧酸脂类化合物及酮类化合物中羰基的 C=O 键伸缩振动引起的,主要反映羧酸脂和酮类的存在<sup>[19]</sup>;图 6 中该峰强度的增加暗示了构树试管幼苗叶片在 Cd 胁迫下合成了更多的羧酸脂和酮类化合物。1636  $\text{cm}^{-1}$  左右的吸收峰为酰胺化合物的吸收 ix 带,为蛋

白质的特征峰<sup>[9]</sup>,反映了构树试管幼苗叶片重可溶性蛋白含量随 Cd 胁迫强度的增加而增加。羧酸根离子 ( $\text{COO}^-$ ) 的特征吸收峰 1468  $\text{cm}^{-1}$  的强度随 Cd 胁迫强度的增加明显增加,是由于羧酸中 C-O 键伸缩振动引起的,主要反映果胶质成分的增加<sup>[19]</sup>。而 892  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰是由于羧酸中 O-H 面外变形振动引起的,其峰强的变化主要反映羧酸量的变化<sup>[20]</sup>,图 6 中该峰的强度随 Cd 胁迫强度的增加略微增加,表明 Cd 胁迫后构树幼苗合成了更多的羧酸。

总的说来,构树试管幼苗叶片的上述各光谱吸收峰的强度随镉胁迫强度增加而增加(图 6),表明构树幼苗叶片通过合成更多的蛋白质、纤维素、羧酸以及一些酯类酮类等有机成分来响应镉胁迫强度的增加。这与本文近红外光谱分析结论以及龚宁等<sup>[3]</sup>报道的小白菜幼芽中脂类、蛋白质、碳水化合物含量随镉胁迫强度(0~5.0  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )增大而增加的结果一致。但是本研究结果与顾艳红等<sup>[9]</sup>利用 FTIR 研究镉胁迫(0~5.0  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )对果灰藓影响的结果略有差异:果灰藓可溶性蛋白质和糖类含量随镉胁迫强度的增加呈先上升

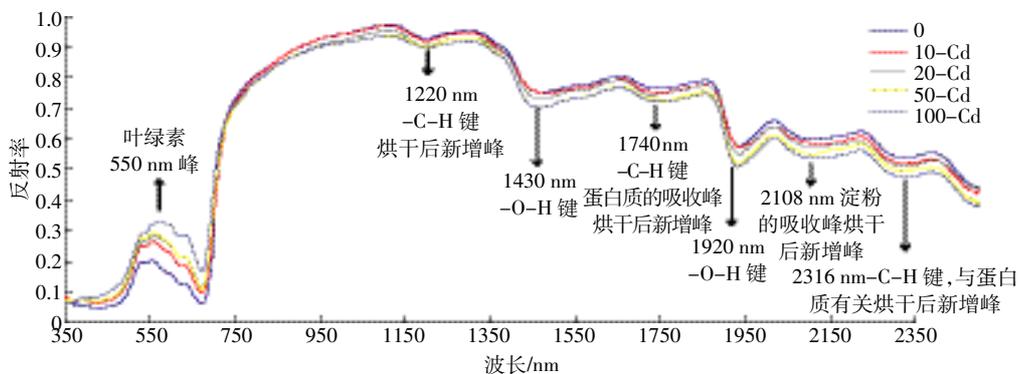


图 5 构树试管幼苗叶片粉末样品可见光-近红外光谱

Figure 5 NIR spectra of leaves of test-tube *Broussonetia papyrifera* sprout under different Cd concentrations

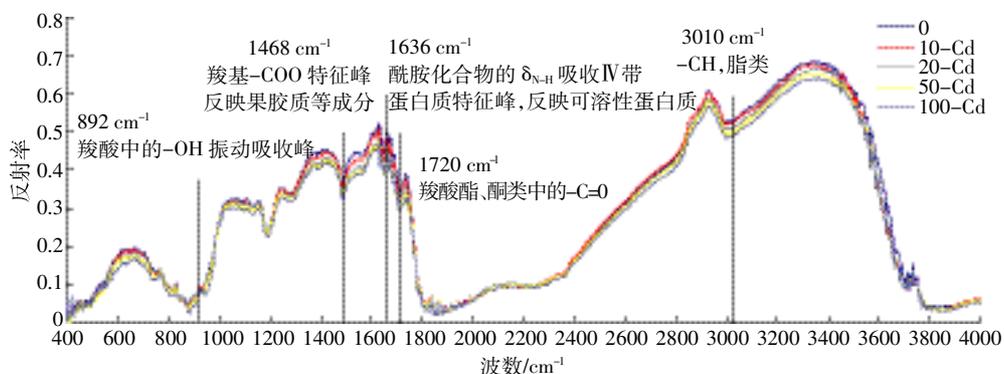


图 6 不同浓度 Cd 处理下构树试管幼苗树叶粉末 FTIR 红外光谱图

Figure 6 FTIR spectra of leaves of test-tube *Broussonetia papyrifera* sprout under different Cd concentrations

后下降的趋势,即出现饱和峰值。构树试管幼苗叶片通过合成更多的蛋白质等有机成分来响应镉胁迫可能是植物生理反映的体现,蛋白质等是植物中重金属离子的主要载体或螯合体<sup>[9]</sup>。当重金属的浓度处于植物耐性范围内时,植物会通过脂类、蛋白质、碳水化合物的代谢对胁迫作出响应,保持蛋白质二级结构稳定,抵御 Cd 等毒害<sup>[3,6]</sup>,但是一旦重金属含量超过植物耐性范围,植物蛋白质组织即受到破坏。构树试管幼苗在  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 Cd 胁迫强度下仍未出现主要有有机物合成量的饱和现象。另外,本文在开展 Cd 胁迫构树幼苗实验的同时,也对桑树幼苗进行了胁迫实验,发现桑树在  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 Cd 胁迫强度时出现了明显的植株生长不良,而在  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时出现了生长明显受到抑制以至于枯萎现象。植物对镉胁迫的响应和耐性与其体内新陈代谢和植物种属有关<sup>[9]</sup>,相对于桑树、小白菜<sup>[3]</sup>、果灰藓<sup>[9]</sup>、苜蓿<sup>[21]</sup>,构树试管幼苗能忍受  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 Cd 胁迫强度,也说明其具有较强的耐镉性。

### 3 结论

(1)化学分析和近红外光谱分析研究表明,随着 Cd 胁迫强度的增加( $0 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),构树试管苗叶片 Cd 含量增加而叶绿素含量降低。

(2)构树试管苗鲜叶光谱  $550 \text{ nm}$  附近叶绿素的绿色强反射峰的增强和飘移表明,构树在 Cd 胁迫下,叶片叶绿素含量发生明显减少;同时,红边位置发生“蓝移”现象(向短波方向飘移)。

(3)近红外光谱的  $710 \text{ nm}$  波长为构树试管苗叶片是否受胁迫的红边位置界限。红边蓝移程度与鲜叶叶绿素相对含量  $\delta$  呈正相关关系,并符合回归方程:红边位置波长  $y=0.0298^2-0.752\delta+696.9$ 。

(4)构树试管苗树叶粉末样品的近红外光谱比鲜样多出 4 个与 C-H 键和蛋白质有关的吸收峰( $1220$ 、 $1740$ 、 $2108 \text{ nm}$  以及  $2316 \text{ nm}$ )。构树具有较强的耐镉性。镉胁迫下构树幼苗叶片的 FTIR 光谱  $3010$ 、 $1720$ 、 $1636$ 、 $1468$ 、 $892 \text{ cm}^{-1}$  处吸收峰强度随胁迫强度增加而增加,说明构树试管苗叶片通过合成更多的蛋白质、纤维素、羧酸以及部分酯类有机物来响应镉胁迫。

### 参考文献:

[1] 张 军,束文圣.植物对重金属镉的耐受机制[J].植物生理与分子生物学学报,2006,32(1):1-8.  
ZHANG Jun, SHU Wen-sheng. Mechanisms of heavy metal cadmium tolerance in plants[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biol-*

*gy*, 2006, 32(1):1-8.  
[2] Carter G A, Knapp A K. Leaf optical properties in higher plants: Linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration[J]. *American Journal of Botany*, 2001, 88(4):677-684.  
[3] 龚 宁,李荣华,孟昭福,等. Cd 对小白菜萌发生理影响的 FTIR-ATR 研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1):9-14.  
GONG Ning, LI Rong-hua, MENG Zhao-fu, et al. Physiological response of *Brassica chinensis* L. seeds in germination to cadmium toxicity by FTIR-ATR spectroscopy[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1):9-14.  
[4] Bosch A, Serra D, Prieto C, et al. Characterization of *Bordetella pertussis* growing as biofilm by chemical analysis and FT-IR spectroscopy[J]. *Applied Microbiology Biotechnology*, 2006, 71:736-747.  
[5] Card D H, Peterson D L, Matson P A, et al. Prediction of leaf chemistry by the use of visible and near infrared reflectance spectroscopy[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 26:123-147.  
[6] Papageorgiou S K, Kouvelos E P, Favvas E P, et al. Metal-carboxylate interactions in metal-alginate complexes studied with FTIR spectroscopy[J]. *Carbohydrate Research*, 2010, 345:469-473.  
[7] 吴 迪,黄凌霞,何 勇,等.作物和杂草叶片的可见-近红外反射光谱特性[J]. 光学学报, 2008, 28(8):1618-1622.  
WU Di, HUANG Ling-xia, HE Yong, et al. Visible-Near infrared reflection spectroscopy for crop-weed discrimination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(8):1618-1622.  
[8] 薛生国,黄艳红,王 钧,等.采用 FTIR 法研究酸模叶蓼对锰胁迫生理响应的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(6):1528-1532.  
XUE Sheng-guo, HUANG Yan-hong, WANG Jun, et al. Physiological response of *Polygonum lapathifolium* to manganese stress by FTIR spectroscopy[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2011, 42(6):1528-1532.  
[9] 顾艳红,刘 鹏,蔡琪敏,等. FTIR 结合生理特性研究镉胁迫对果灰藓的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(3):620-623.  
GU Yan-hong, LIU Peng, CAI Qi-min, et al. Effects of Cd stress on FTIR spectra and physiological traits of *Hypnum fertile* Sendtn[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(3):620-623.  
[10] Madeira A C, Mendonca A, Ferreira M E, et al. Relationship between spectroradiometric and chlorophyll measurements in green beans *Communcation*[J]. *Soil Science and Plant Nutrient*, 2000, 31(5-6):631-643.  
[11] 刘素红,刘新会,侯 娟,等.植物光谱应用于白菜铜胁迫响应研究[J]. 中国科学 E 辑, 2007, 37(5):693-699.  
LIU Su-hong, LIU Xin-hui, HOU Juan, et al. Study on response to Cd stress of *Brassica Campestris* with reflectance spectroscopy[J]. *Science China Technological Sciences*, 2007, 37(5):693-699.  
[12] Broge N H, Vmortensen J. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat remote spectral reflectance data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81:45-57.  
[13] Danidl A S, Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,

81;337-354.

- [14] 陆婉珍,袁洪福,徐广通,等.现代近红外光谱分析技术[M].北京:中国石化出版社,2000:19-26.

LU Wan-zhen, YUAN Hong-fu, XU Guang-tong, et al. NIR spectra analysis[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2000: 19-26.

- [15] 韩小平,左月明,李灵芝.水培番茄施氮量近红外光谱预测模型的研究[J].光谱学与光谱分析,2010,30(9):2479-2483.

HAN Xiao-ping, ZUO Yue-ming, LI Ling-zhi. Study on a model predicting fertilization nitrogen content in hydroponic cultivation of tomato by near infrared spectrum[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(9): 2479-2483.

- [16] 迟光宇,刘新会,刘素红,等.Cu污染与小麦特征光谱相关关系研究[J].光谱学与光谱分析,2006,26(7):1272-1276.

CHI Guang-yu, LIU Xin-hui, LIU Su-hong, et al. Studies of relationships between Cu pollution and spectral characteristics of *Triticum Aestivum* L.[J]. 2006, 26(7): 1272-1276.

- [17] Paul J J L, Bruce A M, Stephen E P, et al. Reflectance spectroscopy of fresh whole leaves for the estimation of chemical concentration[J]. *Re-*

*mote Sensing of Environment*, 1992, 39(2): 153-166.

- [18] 李国新,张丹丹,颜昌宙,等.轮叶黑藻对铅的吸附特征及生物吸附机理研究[J].中国环境科学,2011,31(8):1327-1333.

LI Guo-xin, ZHANG Dan-dan, YAN Chang-zhou, et al. Characterization and mechanism studies on biosorption of lead onto *Hydrilla verticillata*[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(8): 1327-1333.

- [19] 李星,刘鹏,张志祥.两种水生植物处理重金属废水的FTIR比较研究[J].光谱学与光谱分析,2009,29(4):945-949.

LI Xing, LIU Peng, ZHANG Zhi-xiang. Comparative research on wastewater treatment with two hydrophytes by FTIR[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(4): 945-949.

- [20] 程存规.有机波谱学[M].北京:科学出版社,2002:87.

CHEN Cun-gui. *Organic spectroscopy*[M]. Beijing: Science Press, 2002: 87.

- [21] Wei Z L, Dong L, Tian Z H. Fourier transform infrared spectrometry study on early stage of cadmium stress in clover leaves[J]. *Pakistan Journal Botany*, 2009, 41(4): 1743-1750.



## 新书推介



### 大气污染控制工程案例教程

本书列举了常规工业锅炉、电厂锅炉、水泥生产、有色金属行业、钢铁行业、玻璃制造、喷漆行业、海洋石油废气、化肥生产、陶瓷行业及实验室废气等 11 个生产项目过程中的废气产生的过程,废气污染的理论知识、主要产排污环节和排放情况,废气的收集情况及典型净化系统案例介绍,选取目前成熟的常用大气污染控制技术为主,以其基本理论为起点,强调工程设计原理、方法、主要工艺和设备选型,突出工程应用的特点。

※书号:9787122182814

※定 价:58.0 元

※开本:16

※出版日期:2014年3月



### 煤矿区三废治理技术及循环经济

本书从技术层面系统地介绍了煤矿区三废治理技术及循环经济发展模式。全书共分成两篇:上篇是末端治理技术,包括煤矿区废水(矿井水、生活污水、洗煤废水)来源及处理技术,煤矿区固体废物(煤矸石、粉煤灰、生活垃圾、煤泥)来源及处理、处置技术,煤矿区废气(瓦斯气、粉尘、烟气)来源及治理技术,及煤矿区生态治理与修复技术等内容;下篇为清洁生产及循环经济,包括煤炭开采、加工及利用过程中的清洁生产技术和煤矿区循环经济发展模式、实例等。

※书号:9787122191236

※定 价:68.0 元

※开本:16

※出版日期:2014年3月

如需更多图书信息,请登录 [www.cip.com.cn](http://www.cip.com.cn)

服务电话:010-64518888,64518800(销售中心)

网上购书可登录化学工业出版社天猫旗舰店:<http://hxgyCBS.tmall.com>

邮购地址:(100011)北京市东城区青年湖南街13号化学工业出版社

如要出版新著,请与编辑联系,联系电话:010-64519525。