

Cd 对小白菜萌发生理影响的 FTIR-ATR 研究

龚 宁¹, 李荣华¹, 孟昭福¹, 杨公明²

(1.西北农林科技大学理学院, 陕西 杨凌 712100; 2.华南农业大学食品科学与工程学院, 广东 广州 510642)

摘 要:应用傅立叶变换-衰减全反射红外光谱(FTIR-ATR)分析方法,用在一定浓度(0.0、0.1、0.5、1.0、5.0 mg·kg⁻¹)Cd 胁迫下萌发 3 d 的小白菜做试验材料,揭示了小白菜幼芽和幼根中蛋白质、碳水化合物的含量以及蛋白质二级结构对 Cd 胁迫的不同响应。结果表明,Cd 处理导致幼根和幼芽 1 632 cm⁻¹ 和 1 030 cm⁻¹ 吸收峰强度显著增强,且 1 632 cm⁻¹ 峰的波数降低,说明蛋白质、碳水化合物含量增高以及蛋白质二级结构保持稳定,是小白菜种子萌发过程中抵御 Cd 毒害的重要原因。幼根 FTIR 谱未出现 1 710 cm⁻¹ 峰,说明分泌有机酸螯合 Cd 并非种子萌发初期幼根抗 Cd 毒机制。幼根中碳水化合物吸收峰强度,随着 Cd 处理浓度的增加增大,而幼芽中则先减小后增大,说明幼芽(主要为子叶)中的糖类转运至根部,以提高对 Cd 的耐受性。FTIR 谱主要吸收峰强度与生理指标之间的相关性分析结果表明,小白菜幼根 FTIR 谱中主要吸收峰的强度与根长、超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)活性、丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量等指标之间显著相关。以上结果说明 FTIR-ATR 法可用于植物对 Cd 胁迫的适应过程的生理学研究。

关键词:FTIR-ATR; 小白菜; Cd; 蛋白质二级结构; 发芽率

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)01-0009-06

Physiological Response of *Brassica chinensis* L. Seeds in Germination to Cadmium Toxicity by FTIR-ATR Spectroscopy

GONG Ning¹, LI Rong-hua¹, MENG Zhao-fu¹, YANG Gong-ming²

(1.College of Science, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2.College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: A technique based on fourier transform infrared attenuated total reflection(FTIR-ATR)spectrometry was used to study the physiological changes in chemical composition of *Brassica chinensis* L. seeds under a wide range of cadmium(Cd) treatments. The results showed that, after 3 d of Cd stress, the absorption bands corresponding to carbohydrates, ester, proteins and protein secondary structure varied differently. The absorption peaks at 1 632 cm⁻¹ and 1 030 cm⁻¹ which were significantly higher than that of control group ($P<0.05$), suggesting the proteins and carbohydrates content increased. The shift of the band wavenumber from 1 632 cm⁻¹ to 1 626 cm⁻¹ after Cd stress indicates that the plant was able to maintain a higher ordered form of protein under the stress. These were the important reason against the harm of Cd in the process of *Brassica chinensis* L. seeds germination. The band of 1 710 cm⁻¹, which related with organic acid, doesn't appeared in the FTIR of radicle, indicated that the chelation of organic acids in exudation wasn't the detoxification mechanism in the plant radicle. The band height of carbohydrate of radicle increased with the increases of Cd concentration, while decreased in seedling, indicated that carbohydrate could be transported from seedling to radicle and mitigate the toxic effect of Cd. Furthermore, the height of peaks in the spectra of radicle has a correlation with the radicle length, Superoxide Dismutase (SOD) activity, Malondialdehyde (MDA) concent. As a results, FTIR-ATR technique could be accepted as rapid and simple way to study the physiological mechanism of plant for adapting the stress of Cd.

Keywords: FTIR-ATR; *Brassica chinensis* L.; Cd; proteion secondary structure; germination percentage

Cd 是毒性非常强的污染物,是对人体危害较大的重金属之一。由于长期污水排放和施用各种含 Cd

的 P 肥或复混肥,使农田土壤中 Cd 含量常超标^[1]。Cd 进入植物体后随着食物链进入人体,对人体健康造成危害。Cd 也可使植物组织的生理生化特性发生改变,高浓度时 Cd 可使细胞结构受到明显的伤害,导致植株死亡,但在胁迫初期以及胁迫尚未产生生理症状时,植物细胞中蛋白质等构成细胞和组织的主要物质的含

收稿日期:2009-06-01

基金项目:国家自然科学基金(40301021)

作者简介:龚 宁(1970—),女,广西玉林人,副教授,在读博士,主要从事环境与食品安全研究。E-mail:gongningcn@163.com

通讯作者:孟昭福 E-mail:zfmeng1996@263.net

量、构象及分子内相互作用等方面都会发生变化^[2]。对于植物体内的上述变化,一般通过诸如可溶糖含量、可溶蛋白含量、MDA 含量、SOD 酶活性等指标来进行研究。目前测定这些指标的实验方法,操作繁琐费时,试剂花费不菲,而且对于蛋白质等大分子物质结构上的变化也无法解析。

傅立叶红外光谱(FTIR, Fourier transform infrared spectrometry)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,其作为一种分析生物高分子聚合物的方法,已广泛应用于大分子化合物结构分析以及蛋白质的二级结构解析,是获取分子结构信息的有力工具,而且只要各种化学成分质量和量相对稳定,样品的处理方法按统一要求进行,其红外光谱是相对稳定的^[3-4]。因此,利用 FTIR 技术表征蛋白质、糖类等大分子结构特性已被广泛应用于食品^[5-6]、医学^[7]等领域,在环境科学方面也有广泛应用,主要有活性炭吸附剂的研制^[8]、生态毒理学^[9]等。而傅立叶红外光谱仪的衰减全反射法(Attenuated Total Reflection, ATR),具有测试费用低廉,同时无需制样、不消耗试剂等优点,并克服了一般化学研究方法操作繁琐费时的缺点,具有广阔的应用前景。

目前,国内外运用傅立叶变换-衰减全反射红外光谱(FTIR-ATR)技术对植物重金属胁迫机理进行研究才刚刚开始^[10-11]。本试验运用 FTIR-ATR 技术对 Cd 胁迫下小白菜幼芽和幼根中的各种化学成分的变化进行测试,以便为研究 Cd 对植物的毒害作用提供新的研究方法。

1 材料与方法

1.1 试验材料及仪器

小白菜(*Brassica chinensis* L.)种子购自西北农林科技大学园艺学院。3CdSO₄·8H₂O(分析纯),西安化学试剂厂生产。所用仪器为 Nicolet 公司 Nexus 870 红外光谱仪,日立 U-3300 型紫外-可见光分光光度计。

1.2 试验方法

1.2.1 种子处理

Cd 以 3CdSO₄·8H₂O 的形式加入,设置 5 个 Cd 处理梯度(按 Cd 计算):0.0、0.1、0.5、1.0、5.0 mg·L⁻¹(蒸馏水做对照),每个处理用种子 100 粒,设 4 次重复。用 15% H₂O₂ 浸泡种子 40 min 后,再用蒸馏水冲洗种子 2~3 次,待用。将双层滤纸置于洁净的培养皿中,按照所设梯度用不同浓度的等量溶液将滤纸浸湿,再将消毒后的种子排放在浸湿的滤纸上。在种子

萌发过程中,每天用天平(精度 0.001 g)称量培养皿,补充蒸馏水至原来的重量,以保证种子顺利发芽和溶液的浓度尽可能不变。将培养皿置于 25 ℃培养箱中,避光培养 3 d 后,统计发芽种子数,并测量幼根和幼芽长度。计算发芽率=萌发种子数/种子总数;根长抑制率=(对照组根长-处理组根长)×100%/对照组根长;幼芽长抑制率=(对照组幼芽长-处理组幼芽长)×100%/对照组幼芽长。

1.2.2 傅立叶红外光谱(FTIR)采集

分别取小白菜幼芽和幼根于 105 ℃杀青,80 ℃烘箱中干燥 24 h,用玛瑙研钵研碎。将粉末样品分置于 FTIR 光谱仪的 Avater Smart Miracle ATR Accessory 采样器下,按照所设定的测试条件,在室温下直接测定样品的 FTIR,每次上样量为 2 mg。测试条件:光谱范围 4 000~650 cm⁻¹,分辨率 4 cm⁻¹,扫描累加次数 32 次,阈值 0.003,灵敏度 50,动镜速度 0.632 9,采用 OMNIC Version 6.1 智能操作软件进行谱图数据处理。

1.2.3 SOD 活性及 MDA 含量的测定方法

分别取幼芽和幼根的新鲜样品进行超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性和丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量的测定,其中 SOD 活性测定用氮蓝四唑光化还原法^[12],MDA 含量测定用硫代巴比妥法^[13]。

1.2.4 数据分析

所有实验数据用 SPSS12.0 软件统计分析,结果用平均值±标准差(means±S.D.)表示。

2 结果与分析

2.1 FTIR 光谱分析

2.1.1 幼根的 FTIR 分析

图 1 为不同 Cd 浓度处理小白菜幼根的红外光谱图。3 289 cm⁻¹左右是有机酸或碳水化合物的典型缔合羟基 O-H 伸缩振动和蛋白质、氨基酸的 N-H 伸缩振动的叠加,这部分吸收主要反映幼根中碳水化合物(纤维素、果胶、半纤维素、多糖)、脂肪酸、蛋白质和核酸等对光谱的贡献^[3,14]。表 1 所示为 FTIR 谱特征吸收峰强度,由表 1 可知,Cd 处理组 3 289 cm⁻¹峰强度(A₃₂₈₉)大于对照组,说明小白菜幼根对 Cd 胁迫产生了应激性反应,一些富含-OH 和-NH 的小分子有机物含量增加。有研究表明,植物细胞对重金属离子的束缚和络合,有效提高植物对 Cd 的耐性,其中植物细胞壁对重金属离子的结合能力主要取决于细胞壁

所含果胶中游离 COOH 细胞壁通过物质代谢的适应性变化,降低果胶的甲基化程度,使 COOH 含量增加,细胞壁阳离子交换能力提高,从而吸附更多的 Cd^[15],这一点从图 1 也可得到间接印证。图 1 中随 Cd 处理浓度增加,A₃₂₈₉ 呈现先升后降的趋势,说明小白菜幼根在低浓度 Cd 处理下,通过提高所含的自由羧基数量参与结合重金属离子,减少 Cd 的毒害。高浓度 Cd 胁迫已对小白菜幼根造成伤害,导致果胶甲基化程度升高,该吸收峰强度下降。

2 922 cm⁻¹ 附近是饱和 CH₂ 上 C-H 的伸缩振动吸收峰。由表 1 可知,Cd 处理导致 A₂₉₂₁ 大于对照组,A₂₉₂₁ 值随 Cd 处理浓度增加呈现先升高再降低的趋势,与蛋白质的 1 632 cm⁻¹ 特征吸收峰及碳水化合物 1 030 cm⁻¹ 特征吸收峰强度变化趋势一致,说明此吸收峰主要是蛋白质和碳水化合物中亚甲基的吸收^[4],但处理组与对照组相比,该峰波数并未发生明显位移,说明 Cd 胁迫下,小白菜根中的蛋白质等分子骨架结构中的 CH₂ 基团没有产生显著改变。

1 636~1 236 cm⁻¹ 区域内有蛋白质吸收的 3 个区域:1 636 cm⁻¹ 左右的酰胺 I 区(Amide I)、1 542 cm⁻¹ 左右的酰胺 II 区(Amide II)和 1 236 cm⁻¹ 左右的酰胺 III 区(Amide III)^[15],这些吸收峰反映了蛋白质二级结构的变化趋势。A₁₆₃₂ 随 Cd 处理浓度增大而增大,对其求二阶导数(Second derivative)及去卷积(FSD, Fourier self-deconvolution)处理,结果仅发现一个峰,但该峰波数从对照组的 1 633 cm⁻¹ 降低到 5.0 mg·L⁻¹ 处理组的 1 627 cm⁻¹,表明蛋白质分子结构中氢键数目的增加^[16]。蛋白质二级结构中肽链上氢键的多少决定了蛋白质结构的稳定性,蛋白质分子结构中氢键数目的增加说明 Cd 处理导致小白菜幼根中蛋白质的结构稳定性增强,这是小白菜对 Cd 胁迫应激性的表现。

表 1 小白菜 FTIR 谱图中的吸收峰强度						
Table 1 The band height of FTIR absorption spectral of <i>Brassica chinensis</i> L.						
吸收峰强度/A	波数/cm ⁻¹	Cd 处理浓度/mg·L ⁻¹				
		0.0	0.1	0.5	1.0	5.0
幼根	3 289	0.025 0	0.039 4	0.038 3	0.029 6	0.029 3
	2 921	0.023 2	0.030 5	0.029 2	0.023 5	0.023 0
	1 627	0.029 0	0.046 5	0.043 9	0.034 9	0.033 2
	1 525	0.020 1	0.032 0	0.030 0	0.022 4	0.023 3
	1 027	0.070 8	0.102 2	0.098 4	0.080 5	0.079 5
幼芽	3 294	0.045 7	0.040 0	0.039 6	0.034 6	0.046 6
	2 922	0.108 0	0.107 0	0.111 0	0.093 4	0.090 7
	1 742	0.073 3	0.075 0	0.074 6	0.065 3	0.058 6
	1 710	0.033 0	0.036 0	0.035 7	0.044 1	0.040 0
	1 649	0.094 9	0.085 6	0.074 7	0.083 9	0.096 8
	1 542	0.067 5	0.061 2	0.052 7	0.058 8	0.070 4
	1 054	0.142 0	0.128 0	0.122 0	0.128 0	0.141 0
	1 099	0.118 0	0.106 0	0.102 0	0.109 0	0.115 0

1 030 cm⁻¹ 附近为碳水化合物 C-O 键的伸缩振动吸收峰^[16],A₁₀₃₀ 随着 Cd 处理浓度的增加先增大后减小,且均高于对照。说明小白菜通过增加幼根中碳水化合物含量,保持蛋白质的水合度,防止原生质脱水,而且还起到平衡细胞质与液胞间的渗透势等多种作用来增强其耐 Cd 性。但植物耐受重金属胁迫是有一定限度的,超过这个限度,随着 Cd 浓度的增加,毒害加剧,碳水化合物的产生略受抑制,碳水化合物含量反而下降^[10]。

2.1.2 幼芽的 FTIR 分析

图 2 为不同 Cd 浓度处理下,小白菜幼芽(主要为子叶)的 FTIR 谱图。由图 2 看出,幼芽部分的 FTIR 吸收峰较幼根丰富,这与子叶部分是小白菜种子萌发的主体,大量贮藏营养物质有关。与幼根的 FTIR 谱

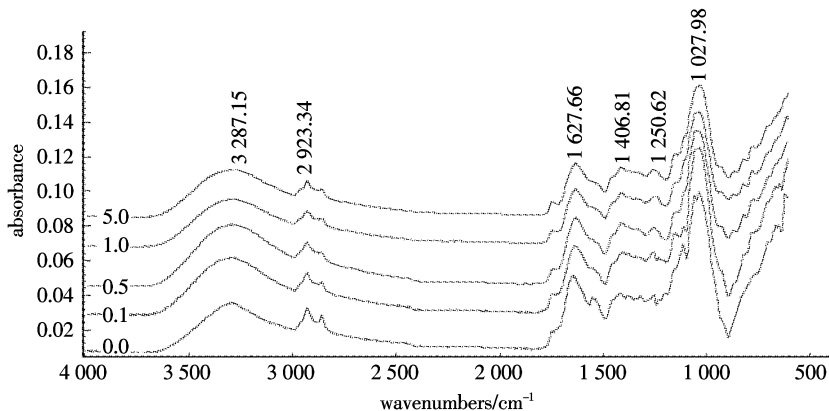


图 1 小白菜幼根的 FTIR 光谱图
Figure 1 FTIR spectral of *Brassica chinensis* L. radicle

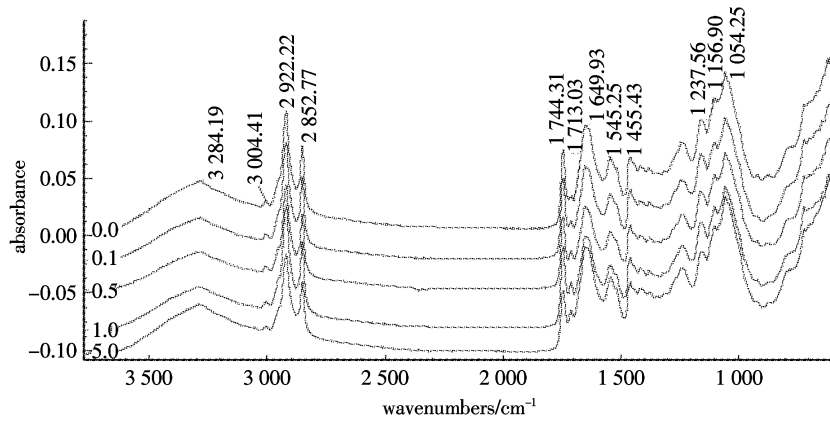


图2 小白菜幼芽的 FTIR 光谱图

Figure 2 FTIR spectral of *Brassica chinensis* L. seedling

不同, A_{3294} 随着 Cd 浓度的升高, 呈先降低后升高的趋势, 结合幼根该吸收峰的变化规律, 说明 Cd 处理浓度低于 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 子叶中一些富含 O-H 和 N-H 的小分子有机物质(如: 氨基酸、有机酸、碳水化合物等), 首先被运输到幼根与 Cd^{2+} 形成螯合物以减少 Cd^{2+} 的毒害, 致使幼芽部位的该类化合物含量降低, A_{3294} 降低。而当 Cd 处理浓度高于 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 则会刺激子叶中其他物质转化为富含 O-H 和 N-H 的小分子有机物, 如: 果胶去甲基化提高幼芽自身细胞壁的阳离子交换能力, 以减少 Cd 的毒害, 使 A_{3294} 增高。

1742 cm^{-1} 附近为脂类的 C=O 伸缩振动的吸收峰, 该峰强度随着 Cd 处理浓度的增加而减弱, 说明小白菜幼芽中的酯类物质对 Cd 胁迫极敏感, 酯类物质被迅速转化为其他物质, 以提高对 Cd 的耐性。 1710 cm^{-1} 处的小峰为有机酸的 C=O 振动吸收, 其强度随 Cd 处理浓度的增加而增大, 说明 Cd 刺激了有机酸的形成。而小白菜幼根的 FTIR 谱中没有此峰, 说明分泌有机酸螯合 Cd^{2+} 并非小白菜萌发过程中幼根抗 Cd 毒的机制。

1632 cm^{-1} 、 1525 cm^{-1} 和 1221 cm^{-1} 3 个属于蛋白质的吸收峰强度先降低后升高, 对其进行二阶导数及 FSD 处理, 结合 FTIR 光谱, 确定酰胺 I 区可以分成 1659 cm^{-1} 和 1633 cm^{-1} 两个主要波峰。 $A_{1659} \text{ cm}^{-1}$ 代表 α 螺旋结构, $A_{1633} \text{ cm}^{-1}$ 代表 β 折叠结构, 其强度比 A_{1659}/A_{1633} 值可指示出整个蛋白质结构的变化^[17]。 A_{1659}/A_{1633} 值为: $2.04(0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 、 $2.16(0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 、 $2.83(0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 、 $2.43(1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 、 $2.35(5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1})$, 说明蛋白质无规则结构的组成随 Cd 处理浓度的增大先增加后减少, 维持蛋白质二级结构之间稳定的氢键数量先减少

后增加。结合幼根的试验结果, 说明当 Cd 浓度达到危害程度时, 小白菜幼芽和幼根通过增加自己蛋白质二级结构中的氢键以维持蛋白质结构和功能的稳定, 在其他胁迫下, 植物和真菌都产生类似应激性反应^[16, 18]。

图 2 中 1054 、 1097 和 1158 cm^{-1} 吸收峰属于碳水化合物如糖类、纤维素的 C-O 键特征振动峰, 其中 1158 cm^{-1} 为环上 C-O 吸收峰, $1097 \sim 1054 \text{ cm}^{-1}$ 为 -OH 的变角振动吸收峰^[19]。这几处峰强度均低于对照组, 随着 Cd 浓度的增加峰强度先降低后升高, 而幼根此区间吸收峰的强度变化与此规律相反, 其中 A_{1054} 与幼根的 A_{3289} 、 A_{1632} 和 A_{1525} 的相关系数分别为: -0.901^* 、 -0.899^* 、 -0.894^* , 说明 Cd 刺激下, 幼芽(主要成分为子叶)中贮存的部分碳水化合物输送向根部, 并转化为幼根部蛋白质, 以减少 Cd 对根部的毒害, 这与幼芽 A_{3294} 随着 Cd 浓度的升高, 呈现先降低后升高的趋势相一致。

2.2 FTIR 光谱吸收峰强度与种子萌发生理指标之间的关系

2.2.1 不同浓度 Cd 处理对小白菜萌发的影响

对所测各项生理指标实验数据进行方差分析, 结果见表 2。由表 2 看出, 小白菜幼根和幼芽的各项生理指标不同浓度 Cd 处理组间的差异达显著水平 ($P < 0.05$)。SOD 酶活性均高于对照, 说明小白菜种子萌发时, 为减少自身伤害, 其防御系统对 Cd 毒害产生了应激性响应。Cd 浓度大于 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的情况下, 各处理组小白菜的发芽率和幼根长显著降低, 幼根及幼芽的 MDA 含量也高于对照组, 说明 Cd 浓度增大到 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 后会显著抑制小白菜种子萌发, 并抑制幼根的生长, 但 Cd 浓度为 $5.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 才对幼芽生长抑

表 2 不同浓度 Cd 处理 3 d 小白菜种子萌发的生理指标

Table 2 The physiological index of *Brassica chinensis* L. seed germination with different Cd concentration

Cd 处理浓度/mg·L ⁻¹	0.0	0.1	0.5	1.0	5.0
发芽率/%	72.13±3.88ab	76.75±5.12a	66.75±1.71bc	63.38±0.48c	57.75±1.71d
幼芽长/cm	6.13±0.69c	7.62±1.80a	7.38±3.11a	6.15±1.57c	5.94±1.33c
幼根长/cm	20.88±3.48ab	23.69±5.61a	19.47±6.57b	19.37±4.51b	15.53±5.19c
幼芽长抑制率/%	0	-24.69	-20.39	-0.33	3.10
幼根长抑制率/%	0	-13.46	6.75	7.23	25.62
SOD 活性(幼芽)/U·g ⁻¹ ·h ⁻¹	122.0±4.9d	177.6±13.3c	167.8±10.5c	241.3±11.1a	221.8±17.9b
MDA 含量(幼芽)/μmol·g ⁻¹	10.57±1.32c	8.45±0.96d	11.68±0.50bc	12.25±0.49b	14.61±0.99a
SOD 活性(幼根)/U·g ⁻¹ ·h ⁻¹	249.5±17.6c	357.8±23.9a	337.8±13.5a	272.5±6.8bc	282.0±27.4bc
MDA 含量(幼根)/μmol·g ⁻¹	15.93±1.51a	10.24±1.32b	11.63±1.41b	17.60±2.45a	16.96±2.10a

注:表中同行数据后字母相同者表示差异不显著(P<0.05),Duncan 法。

制,此时 MDA 含量最大,而 SOD 活性也略有下降。
2.2.2 小白菜 FTIR 谱中特征吸收峰的强度与生理指标间的相关分析

小白菜幼根 FTIR 谱中主要特征峰强度与发芽率等主要指标之间的相关关系见表 3。由表 3 看出, FTIR 谱中的特征峰强度与幼根中根长、SOD 酶活性以及 MDA 含量之间显著相关,但是与发芽率、幼芽抑制率、幼根长抑制率等相关性不显著,另外幼芽 FTIR 谱中各吸收峰强度与生理指标之间的相关性也不显著,故均未在表中列出。这也说明在 Cd 胁迫下小白菜种子萌发过程中,幼根中化合物含量变化与种子的萌发没有直接关系,但其防御系统的生理生化响应主要在受害较严重的根部,而与幼芽(主要为子叶)中所贮存物质的含量关系不密切,这可能是幼根的防御减少了幼芽受 Cd 毒害的程度。值得注意的是,计算表明,幼芽 A₁₀₉₉ 与幼根 A₃₂₈₇ 的相关系数为-0.928*,再次说明幼芽中的碳水化合物可能是输送至根部以减小 Cd 毒害的主要化合物。

3 结论

本试验采用 FTIR-ATR 法研究了小白菜萌发时对 Cd 毒的生理响应,得出以下结论:

(1)在浓度较低的 Cd 胁迫下(5.0 mg·L⁻¹),小白菜幼芽和幼芽中脂类、蛋白质、碳水化合物的代谢对胁迫的响应积极,以及保持蛋白质二级结构稳定,是小白菜种子萌发过程中抵御 Cd 毒害的重要原因。

(2)小白菜种子在萌发阶段,为了提高根部对 Cd 的耐受性,将幼芽(主要为子叶)中的碳水化合物运输到根部,并转化为蛋白质。

(3)幼根 FTIR 谱中各主要吸收峰强度与根长、SOD 活性及 MDA 含量三项生理生化指标之间显著相关。

本研究表明,FTIR-ATR 法所测得各种光谱数据可以用来分析植物组织中各种化合物的变化,检测重金属胁迫对蛋白质等大分子的影响,且具有快速高效(检测过程仅需 1~2 min)、耗样量少、无损伤、重现性

表 3 小白菜幼根的 FTIR 谱中的峰强度与幼根长、SOD 酶活性和 MDA 含量之间的相关性

Table 3 The correlation with FTIR's band height,radicle length,SOD activity and MDA concent of *Brassica chinensis* L. radicle

幼根部分	幼根长/cm	SOD 活性/U·g ⁻¹ ·h ⁻¹	MDA 含量/μmol·g ⁻¹	A _{3 287}	A _{2 923}	A _{1 632}	A _{1 406}	A _{1 027}
幼根长/cm	1.000							
SOD 活性/U·g ⁻¹ ·h ⁻¹	0.943*	1.000						
MDA 含量/μmol·g ⁻¹	-0.978**	-0.914*	1.000					
A _{3 282}	0.939*	0.991**	-0.887*	1.000				
A _{2 921}	0.998**	0.963**	-0.977**	0.956*	1.000			
A _{1 633}	0.947*	0.988**	-0.888*	0.996**	0.964**	1.000		
A _{1 406}	0.948*	0.992**	-0.895*	0.999**	0.963**	0.999**	1.000	
A _{1 027}	0.945*	0.993**	-0.893*	0.999**	0.961**	0.998**	0.999**	1.000

注:* 在 0.05 水平上双侧相关,** 在 0.01 水平上双侧相关。

好的优势,不但避免了繁琐的生理生化试验操作,而且弥补了传统植物生理生化方法研究高等植物对重金属胁迫的适应过程中蛋白质等大分子物质变化方面的不足。

参考文献:

- [1] 曹志洪. 施肥与土壤健康质量—论施肥对环境的影响(3)[J]. 土壤, 2003, 35(6):450-455.
CHAO Zhi-hong. Effect of fertilization on soil health quality—Effect of fertilization on environment quality(3)[J]. *Soil*, 2003, 35(6):450-455.
- [2] 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 Biology*, 2006, 32(1):1-8.
- [3] Surewicz W K, Mantsch H H. New insight into protein secondary structure from resolution-enhanced infrared spectra[J]. *Biochim et Biophys Acta*, 1988, 952(2):115-130.
- [4] Bosch A, Serra D, Prieto C, et al. Characterization of *Bordetella pertussis* growing as biofilm by chemical analysis and FT-IR spectroscopy[J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2006, 71:736-747.
- [5] Bureau S, Ruiz D, Reich M, et al. Application of ATR-FTIR for a rapid and simultaneous determination of sugars and organic acids in apricot fruit[J]. *Food Chemistry*, 2009, 115:1133-1140.
- [6] Boulet J C, Williams P, Doco T. A fourier transform infrared spectroscopy study of wine polysaccharides[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2007, 69:79-85.
- [7] Komatsu H, Liu L, Murray Ian V J, et al. A mechanistic link between oxidative stress and membrane mediated amyloidogenesis revealed by infrared spectroscopy[J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2007, 1768:1913-1922.
- [8] Tajar A F, Tahrh K, Soleimani M. Adsorption of cadmium from aqueous solutions on sulfurized activated carbon prepared from nut shells[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 165:1159-1164.
- [9] Mauro M, Marco P, Mento R D. Application of FTIR spectroscopy in ecotoxicological studies supported by multivariate analysis and 2D correlation spectroscopy[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2007, 44:228-235.
- [10] 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.
- [11] 任立民, 成则丰, 刘 鹏, 等. 美洲商陆对锰毒生理响应的 FTIR 研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(3):582-585.
REN Li-min, CHENG Ze-feng, LIU Peng, et al. Studies on the physiological response of *Phytolacca americana* to manganese toxicity by FTIR spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(3):582-585.
- [12] 郝再彬, 苍 晶, 徐 仲. 植物生理实验[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2004:137-138.
HAO Zai-bin, CANG Jing, XU Zhong. Experimental of plant physiology[M]. Haerbin: Haerbin Industry University Press, 2004:137-138.
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000:164-169.
LI He-sheng. Principle and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: High Education Press, 2000:164-169.
- [14] Synytsya A, Copikova J, Matejka P, et al. Fourier transform Raman and infrared spectroscopy of pectins[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2003, 54:97-106.
- [15] Clemens S. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis[J]. *Planta*, 2001, 212:475-486.
- [16] Szeghalmi A, Kaminskyj S, Gough K M. A synchrotron FTIR microspectroscopy investigation of fungal hyphae grown under optimal and stressed conditions[J]. *Anal Bioanal Chem*, 2007, 387:1779-1789.
- [17] Yang J, Hungchen E Y. Early salt stress effects on the changes in chemical composition in leaves of Ice Plant and Arabidopsis. A fourier transform infrared spectroscopy study[J]. *Plant Physiology*, 2002, 130:1032-1042.
- [18] 赵 昕, 盛芬玲, 赵敏桂, 等. NaCl 胁迫下盐芥和拟南芥化合物含量与蛋白质结构变化比较——傅立叶红外光谱法[J]. 应用与环境生物学报, 2008, 14(3):371-377.
ZHAO Xin, SHENG Fen-ling, ZHAO Min-gui, et al. Effects of salt stress on chemical composition and protein conformation changes in *thellungiella* and *arabidopsis* seedlings [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2008, 14(3):371-377.
- [19] Sang Y O, Dong II Yoo, Younsook Shin, et al. FTIR analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide[J]. *Carbohydrate Research*, 2005, 340:417-428.