

莼菜镉积累品种根际土壤 水溶性有机质的结构特征研究*

龚玉莲^{1,2}, 杨中艺², 陈爱葵¹, 曾小龙¹, 曾碧健¹, 王平洁¹, 汤域巍¹

- (1. 广东第二师范学院生物与食品工程学院//应用生态学实验室, 广东 广州 510303;
2. 中山大学生命科学学院//有害生物控制与资源利用国家重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 采用 FTIR 和¹H NMR、¹³C NMR 研究了莼菜 *Ipomoea aquatica* Forsk. 低 Cd 品种 (QLQ) 和高 Cd 品种 (T308) 根际土壤水溶性有机质 (dissolved organic matter, DOM) 的结构特征。结果显示莼菜两个品种根际土壤 DOM 均以碳水化合物为主要组成物质, 烷基链烃和芳香族物质较少。两个品种根际土壤 DOM 的结构特征存在明显差异。QLQ 根际土壤 DOM 中羧基 C 和长链脂肪 C 的相对含量较 T308 低, 但芳香族物质含量较 T308 高, 烷基链烃物质具有含量高、支链短、分支多的特征; QLQ 根际土壤 DOM 中碳水化合物 H 含量较 T308 低, 但碳水化合物 C 含量较 T308 高, 显示碳水化合物结构可能存在品种间差异。推测 QLQ 根际土壤 DOM 的结构特征可能影响根际土壤 Cd 的行为与有效性, 导致其对土壤 Cd 的活化能力较弱, 这可能与其低 Cd 积累特性有关。

关键词: 莼菜 *Ipomoea aquatica* Forsk. 低 Cd 品种; 根际土壤水溶性有机质; FTIR; ¹H NMR; ¹³C NMR

中图分类号: Q14; Q89 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2015) 04-0121-06

Structural Characteristics of Dissolved Organic Matter in the Rhizosphere Soil of Water Spinach Cultivars Differing in Cd Accumulation

GONG Yulian^{1,2}, YANG Zhongyi², CHEN Aikui¹, ZENG Xiaolong¹,
ZENG Bijian¹, WANG Pingjie¹, TANG Yuwei¹

- (1. Laboratory for Applied Ecology, Biology and Food Engineering Institute, Guangdong University of Education, Guangzhou 510303, China;

2. School of Life Sciences, Sun Yat-sen University//Skate Key Laboratory of Biocontrol, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and nuclear magnetic resonance spectroscopy (¹H NMR and ¹³C NMR) were used to investigate the structural characteristics of dissolved organic matter (DOM) in the rhizosphere soil of a low-Cd cultivar (QLQ) and a high-Cd cultivar (T308) of water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.). The results showed that carbohydrates were the main components of DOM in the rhizosphere soil of the two cultivars, and the contents of alkyl and aromatic substances were relatively low. There were obvious differences in the structural characteristics of DOM between the two cultivars. The relative contents of carboxylic C and long-chain aliphatic C of DOM in the rhizosphere soil of QLQ were lower than those of T308, but that of aromatic substance of QLQ was higher. Alkyl sub-

* 收稿日期: 2015-03-18

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (20877104); 广东省科技计划资助项目 (2013B020310014); 广州市科技计划资助项目 (201510010041); 广东省教育厅科技创新资助项目 (2013KJJCX0138); 广东第二师范学院教授博士专项基金资助项目 (2014ARF23); 国家级大学生创新训练资助项目 (201514278007)

作者简介: 龚玉莲 (1974年生) 女; **研究方向:** 污染生态学; **通讯作者:** 杨中艺; E-mail: adszy@mail.sysu.edu.cn

stance of DOM in the rhizosphere soil of QLQ possessed the characteristics of relatively high content, short branched chain and high branched chain. Although carbohydrate H content of DOM in the rhizosphere soil of QLQ was lower than that of T308, carbohydrate C content was higher than that of T308, which suggested that there might be differences in the structure of carbohydrates of DOM in the rhizosphere soil between the cultivars. The results indicated that the structural characteristics of DOM in the rhizosphere soil of the low-Cd cultivar might influence Cd behavior and bioavailability, leading to relatively low ability to activate soil Cd, which would be associated with its low Cd accumulation.

Key words: low-Cd cultivar of water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.); dissolved organic matter in rhizosphere soil; FTIR; ^1H NMR; ^{13}C NMR

作为重金属从土壤进入植物根系的门户, 根际与重金属的吸收积累密切相关。根际土壤生物化学特征影响重金属的行为及有效性^[1]。水溶性有机质 (Dissolved organic matter, DOM) 虽然在土壤中的含量不到土壤总有机质的 1%, 但 DOM 含有大量的功能基团, 可影响土壤理化性质, 并通过络合、螯合等作用, 影响土壤对重金属的吸附, 从而改变重金属的行为与有效性^[2-4]。DOM 中不同结构特征的组分对土壤重金属行为的影响存在差异^[5]。目前对不同 Cd 积累能力植物根际土壤 DOM 结构特征的研究较少, 且集中在超积累植物上^[6]。Cd 低量积累植物在品种水平上的根际土壤 DOM 结构特征未见报道。

蕹菜 *Ipomoea aquatica* Forsk. 为 Cd 污染风险较高的叶类蔬菜^[7-8]。前期研究已筛选得到稳定的可食部分 (茎叶) 低 Cd 积累品种^[8-9]。蕹菜低 Cd 品种 (QLQ) 具有区别于高 Cd 品种 (T308) 的根系形态学、土壤微生物学和土壤化学等根际特征^[10-12]。QLQ 根际土壤有机质和 DOM 含量均高于 T308, 但属于 DOM 的低相对分子质量有机酸含量却低于 T308, 且低相对分子质量有机酸的组成亦存在品种间差异, 显示两个品种根际土壤 DOM 组成的差异^[12]。为进一步理解低 Cd 品种根际土壤 DOM 的作用机理, 本文采用广泛应用于土壤 DOM 研究的红外光谱和核磁共振技术, 比较研究蕹菜低 Cd 品种 (QLQ) 和高 Cd 品种 (T308) 根际土壤 DOM 的组成与结构特征, 为阐明低 Cd 积累的根际化学过程提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试蕹菜采用前期试验筛选并验证的两个 Cd 积累典型品种: 低 Cd 品种 QLQ, 高 Cd 品种 T308^[8-9]。

1.2 试验土壤

供试农田土壤取自广东省鹤山市。土壤 pH 值 6.8, 有机质 26.7 g/kg, 全氮 1.61 g/kg, 全磷 1.14 g/kg, 总 Cd 0.55 mg/kg。根据我国食用农产品产地环境评价标准 (HJ332-2006), 蔬菜地土壤 Cd 含量最大限值为 0.3 mg/kg, 因此供试土壤为 Cd 污染土壤。

1.3 试验设计

采用自制的根箱培养蕹菜。根箱设计参考 Wang 等^[13], 并适当修改 (图 1)。根箱的长 × 宽 × 高为 200 mm × 140 mm × 130 mm, 用 300 目尼龙网将根箱土壤分为根际区和非根际区。土壤风干, 粉碎, 过 1 mm 筛, 按照 N 300 mg/kg、P 124 mg/kg、K 156 mg/kg 的比例, 以 NH_4NO_3 、 KH_2PO_4 的形式施基肥, 混匀, 平衡 2 周。按照约 1.3 g/cm^3 的土壤容重装入根箱。植物栽培在广州市蔬菜科学研究所的大棚内进行。在根际区播种, 间苗, 每个根箱保留 3 株蕹菜。每个处理重复 3 次, 随机区组排列。生长 40 d 后采集根际土样、并立即保存 $-70 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱备用。

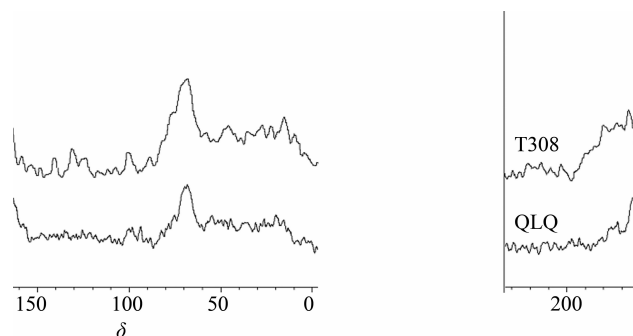


图 1 根箱剖面示意图

Fig. 1 Diagram of rhizobox

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤性质和 Cd 含量的测定 土壤样品风干, 过 2 mm 筛。土壤 pH 用 pH 计测定, 水土比 1:2.5。有机质含量用湿消化法测定, 总氮含量用凯氏定氮法测定, 全磷用钼锑抗显色法测定, 土壤 Cd 含量采用 $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4 - \text{HF}$ 消解、原子吸收分光光度计测定^[14]。

1.4.2 土壤 DOM 的提取与分析 采用水浸提法提取 DOM^[15]。取根际土壤 200 g, 加入 300 mL 超纯水, 于室温下振荡充分提取, 离心取上清液, 上清液过 0.45 μm 微孔滤膜, 冷冻干燥, 得到的 DOM 干燥样品用于红外光谱 (FTIR) 和核磁共振 (NMR) 的分析。用 KBr 压片法在 EQUINOX 55 型傅里叶红外光谱仪上测定红外光谱。在 Bruker AVANCE II 400 仪器上进行核磁共振测定,¹H 的共振频率为 79.5 Hz, 溶剂为 $\text{DMSO}-d_6$; ¹³C 的共振频率为 100.5 Hz。

2 结果与分析

2.1 FTIR 图谱分析

两个蕹菜品种根际土壤 DOM 的 FTIR 图谱相似 (图 2), 表明含有相同类型的官能团。两个品种的 DOM 均在约 3 400 cm^{-1} 处出现强而宽的吸收峰, 这是 H 键键合的 -OH 的伸缩振动的特征吸收, 这个峰宽同时也掩盖了芳香环上 C—H 的伸缩振动; 1 650 ~ 1 600 cm^{-1} 处的吸收峰显示了酮、酰胺中 C=O 的伸缩振动或芳香基上的 C=C 伸缩振动; 在 1 450 ~ 1 400 cm^{-1} 处和 1 370 ~ 1 350 cm^{-1} 处亦有较强的吸收峰, 分别显示了羧基中 O—H 的变形振动、脂肪族 CH_3 和 CH_2 中 C—H 的不对称振动, 以及醚和酯中 C—O—C 的伸缩振动、酚的 C—O 伸缩振动; 1 150 ~ 1 120 cm^{-1} 处的吸收峰归属于多糖类物质的 C—O 振动; 1 080 ~ 1 000 cm^{-1} 是酚类或醇类上的 C—O 不对称伸缩振动; 690 ~ 600 cm^{-1} 显示了苯环面外弯曲振动^[6,16-19]。结果表明蕹菜两个品种根际土壤 DOM 含有酚类、醇类、羧酸类、糖类、脂肪族、酰胺、芳香族等物质; 主要组成物质为碳水化合物, 芳香类物质含量较少。

2.2 ¹H NMR 分析

两个蕹菜品种根际土壤 DOM 的¹H NMR 谱形基本一致 (图 3), 表明具有相似的结构单元。但某些吸收峰在强度上有明显差异, 显示两个品种的 DOM 中某些类型 H 的相对含量存在差异。根据土

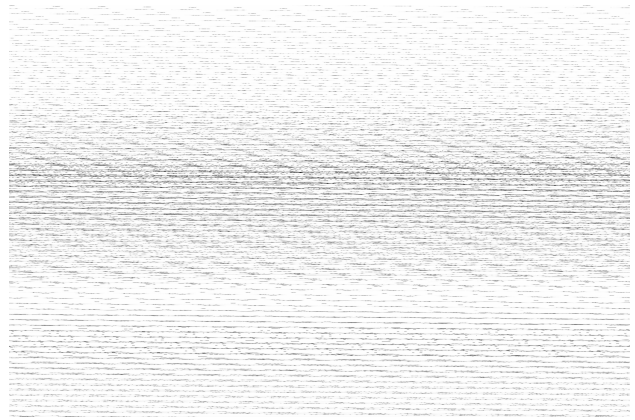


图 2 蕹菜 Cd 积累典型品种根际土壤 DOM 的傅里叶变换红外光谱

Fig. 2 FTIR curves of DOM in the rhizosphere soil of different typical cultivars of water spinach

壤 DOM 已有的图谱解析^[20-21], 化学位移主要分为 3 个区域。

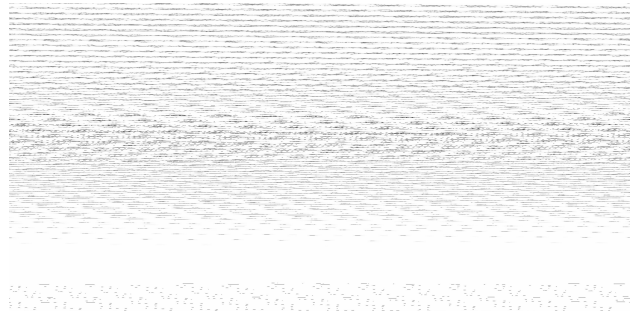


图 3 蕹菜 Cd 积累典型品种根际土壤 DOM 的¹H NMR 图谱

Fig. 3 ¹H NMR spectra of DOM in the rhizosphere soil of different typical cultivars of water spinach

1) δ 为 0.5 ~ 2.8 时, 信号主要归属于脂肪族物质中甲基或亚甲基中 H 的吸收, 两个品种的 DOM 均呈现很多强弱不等的尖锐信号峰, 其中 δ 为 0.5 ~ 1.0 归属于多支链脂肪族结构和聚亚甲基链的末端甲基中 H 的吸收, 为 γ -H; δ 为 1.0 ~ 1.9 归属于脂肪族结构中亚甲基 H 的吸收, 为 β -H; δ 为 2.0 ~ 2.8 时主要归属于与各官能团连接的脂肪族 α -H; 其中, $\delta = 2.5$ 为 $\text{DMSO}-d_6$ 的溶剂吸收峰, 掩蔽了其他一些信号。此区域的信号峰强度均为 $\text{QLQ} > \text{T308}$ 。与其他组分比较, 蕹菜根际土壤 DOM 中烷基链烃 H 的相对含量较低。QLQ 的烷基链烃 H 相对含量较 T308 高, 但 n 值较小 (表 1)。

2) δ 为 2.8 ~ 5.5 时, 信号主要归属于连氧 (或氮) 碳上的 H (主要为碳水化合物、有机胺、

含甲氧基类物质) 与脂环族 H 的吸收, 两个品种的 DOM 均呈现出宽而强的信号峰 (图 2)。溶剂中残余水的吸收峰 ($\delta = 3.3$) 也在此段出现, 可能夸大了碳水化合物的相对含量, 但不影响品种间相对比例的比较。两个品种根际土壤 DOM 的此信号峰所占比例约为 90%, 均远高于其他组分 (表 1), 表明蕹菜根际土壤 DOM 主要由碳水化合物组成, 这与 FTIR 的结果一致。QLQ 的碳水化合物 H

含量比 T308 低 6.06% (表 1)。

3) δ 为 6.0 ~ 10.0 时, 信号主要归属于芳香结构中的 H 及连氧 H 的贡献, 两个品种 DOM 均有宽而弱的共振信号 (图 2)。与其他组分比较, 蕹菜根际土壤 DOM 中芳香族物质含量相对较低 (表 1), 这也与 FTIR 的结果相符。QLQ 的芳香族物质含量较 T308 高 (表 1)。

表 1 蕹菜 Cd 积累典型品种根际土壤 DOM 中各类质子的相对含量¹⁾

Table 1 The relative contents of various protons in DOM in the rhizosphere soil of different typical cultivars of water spinach %

品种	质子含量/%						烷基链烃 H	n
	$\delta = 0.5 \sim 1.0$	$\delta = 1.0 \sim 1.9$	$\delta = 1.9 \sim 2.8$	$\delta = 2.8 \sim 4.0$	$\delta = 4.0 \sim 5.5$	$\delta = 6.0 \sim 10.0$		
QLQ	0.94	2.66	1.09	86.24	3.50	5.57	4.69	4.02
T308	0.58	2.17	0.75	91.81	2.44	2.25	3.50	4.41

1) 烷基链烃 H 为 $\delta = 0.5 \sim 2.8$ 积分面积之和占总 H 的%; n 由 γ -H、 β -H 和 α -H 的相对含量计算, 即 $n = [(\gamma/3 + \beta/2) / (\alpha/2)] + 1$

2.3 ¹³C NMR 分析

蕹菜两个品种根际土壤 DOM 的 ¹³C NMR 图谱具有几个相似的特征峰 (图 4): 低位移处 (0 ~ 30) 显示出脂类烷基峰; $\delta = 70$ 和 $\delta = 100$ 附近是不同碳水化合物 C 的特征峰; $\delta = 130$ 附近是芳香环的特征峰; $\delta = 170$ 附近显示出羧基 C 的特征峰^[15-16, 22-23]。

对 ¹³C NMR 谱峰进行区域积分, 根据积分面积计算出不同类型 C 占总 DOM 的相对百分含量 (表 2)。两个品种根际土壤 DOM 均以碳水化合物 C、长链脂肪 C 为主要成分; 碳水化合物 C 含量最高, 约占 DOM 总量的 30%; 其次是羧基 C、蛋白质 C 和芳香 C, 酚 C 占的比例最低。这与 FTIR 和 ¹H NMR 的结果基本吻合。

与 T308 相比, QLQ 根际土壤 DOM 中长链脂肪 C 和羧基 C 含量较低, 分别比 T308 低 15.40%

和 21.31%; 而蛋白质 C、碳水化合物 C、芳香 C 和酚 C 的含量较高。芳香度亦为 QLQ 高于 T308 (表 3), 这与 ¹H NMR 的结果基本一致。



图 4 蕹菜 Cd 积累典型品种根际土壤 DOM 的 ¹³C NMR 图谱

Fig. 4 ¹³C NMR spectra of DOM in the rhizosphere soil of different typical cultivars of water spinach

表 2 蕹菜 Cd 积累典型品种根际土壤 DOM 的化学组成¹⁾

Table 2 Chemical composition of DOM in the rhizosphere soil of different typical cultivars of water spinach

品种	w(C)/%						芳香度 ($\delta = 110 \sim 160$) ($\delta = 0 \sim 160$)
	长链脂肪 ($\delta = 0 \sim 40$)	蛋白质 ($\delta = 40 \sim 60$)	碳水化合物 ($\delta = 60 \sim 110$)	芳香碳 ($\delta = 110 \sim 150$)	酚 ($\delta = 150 \sim 160$)	羧基碳 ($\delta = 160 \sim 190$)	
QLQ	21.48	14.33	30.77	13.48	4.25	15.69	21.03
T308	25.39	13.03	29.39	9.51	2.74	19.94	15.30

1) 芳香度 = $\frac{\text{芳香} - C(\delta = 110 \sim 160)}{\text{脂肪} - C + \text{芳香} - C(\delta = 0 \sim 160)} \times 100\%$

3 讨 论

FTIR、 ^1H NMR、 ^{13}C NMR 的图谱分析均表明薤菜两个品种根际土壤 DOM 的主要组成物质为碳水化合物, 烷基链烃类物质和芳香族物质含量较少。周江敏等^[21]、王帅等^[24]、Li 等^[6]也报道土壤 DOM 的 FTIR 图谱在约 $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 处吸收峰最强, DOM 的主要组成物质为碳水化合物。应用 ^1H NMR 和 ^{13}C NMR 技术分析不同重金属积累特性的植物种或品种根际土壤 DOM 结构特征的研究还未见报道。水稻土 DOM 中烷基链烃 H 相对含量为 3.90%, 在 δ 为 6.0 ~ 10.0 时的信号峰相对含量为 5.27%, 在 δ 为 2.8 ~ 4.0 时的信号峰相对含量为 93.86%^[17,21]。倪进治等^[15]亦发现土壤 DOM 中碳水化合物 C 含量最高, 约为 DOM 总量的 1/3。Liang 等^[25]报道不同施肥处理的土壤 DOM 主要由碳水化合物、长链脂肪族化合物和蛋白质组成。水稻土 DOM 的芳香度为 19.9%^[15], 不同肥料处理下土壤 DOM 芳香度的范围为 5.8% ~ 21.8%^[25]。薤菜根际土壤 DOM 芳香度的范围与此基本一致。

与非超积累生态型比较, 超积累生态型东南景天根际土壤 DOM 中亲水性组分含量较高^[26], 官能团 C=O、O—H、C=C 和 C—O 的含量也较高, 超积累生态型根际土壤 DOM 结构显示出较强的酸性特征^[6]; 因此超积累生态型根际土壤 DOM 与 Zn/Cd 形成可溶性 DOM—重金属复合物的能力较非超积累生态型强, 从而使其抑制土壤吸附 Zn/Cd、促进土壤 Zn/Cd 解吸、提高 Zn/Cd 溶解性和移动性的能力较非超积累生态型强^[6,26-27], 这是超积累生态型东南景天根际活化重金属的重要化学机理。QLQ 根际土壤 DOM 中羧基 C 相对含量低于 T308 (表 2)。与此一致的是, QLQ 根际土壤低相对分子质量有机酸含量低于 T308, 低相对分子质量有机酸的组成也存在差异^[12]。且 QLQ 根际土壤 DOM 中疏水 C/亲水 C 比值高于 T308。因此推测 QLQ 根际土壤 DOM 相对较弱的酸性结构特征, 可能使其抑制土壤 Cd 吸附的能力较弱, 从而导致其对根际土壤 Cd 的活化能力较低。薤菜低 Cd 品种根际土壤 DOM 与 Cd 的络合能力、对土壤 Cd 吸附解吸的影响及其与低 Cd 积累特性的关系有待进一步研究。

芳香度可以反映有机碳分子结构的复杂程度, 芳香度越大表明芳香核结构越多, 分子结构越复杂。QLQ 根际土壤 DOM 的芳香族 H 和 C 相对含量均高于 T308, 芳香度大于 T308。不仅如此, 值得

注意的是, 两个品种 DOM 中芳香类物质相对含量的品种间差异最大, 高于其他组分的品种间差异。 ^1H NMR 结果显示两个品种根际土壤 DOM 的各类质子相对含量差异最大的是芳香族 H (表 1), QLQ 的芳香族 H 含量是 T308 的 2.46 倍。 ^{13}C NMR 结果亦显示品种间差异最大的组分为酚 C 和芳香 C (表 2), 芳香 C 和酚 C 分别比 T308 高 41.75% 和 55.11%。表明 QLQ 根际土壤 DOM 中芳香结构较多、脂肪族侧链较少、缩合程度较高、分子结构相对较复杂, 而 T308 根际土壤 DOM 的分子结构则相对较简单。在土壤环境中相对分子质量较低、结构简单的有机酸与金属离子形成的络合物具有比结构复杂的大分子有机酸与金属离子形成的络合物更高的生物有效性^[28]。研究表明, 土壤 DOM 主要成分之一的腐殖酸^[29], 以芳香族物质为主、芳香度较高, 其对重金属的吸附能力较强; 芳构化程度高的腐殖酸对重金属 Cd、Zn 有较强的络合固定作用, 而芳构化程度低的腐殖酸能增加土壤中 Cd、Zn 的移动性^[30]。据此推测 QLQ 根际土壤 DOM 较高的芳香度可能导致土壤 Cd 的移动性与有效性较 T308 低。薤菜低 Cd 品种根际土壤 DOM 中较多芳香结构物质的特征与土壤 Cd 有效性及低 Cd 积累的关系值得进一步研究。

烷基链烃物质可能降低重金属的移动性^[17]。QLQ 根际土壤 DOM 中烷基链烃 H 比 T308 高 32.95%, 但 n 值较 T308 低 8.87% (表 1), 表明与 T308 相比, QLQ 根际土壤 DOM 的烷基链烃物质具有含量高、支链短、分支多的特征, 该特征可能与 QLQ 根际土壤 Cd 的移动性较低有关。薤菜低 Cd 品种根际土壤 DOM 中烷基链烃的结构特征与 Cd 等重金属的行为和生物有效性的关系尚需研究。QLQ 根际土壤 DOM 碳水化合物 H 的相对比例较 T308 低 (表 1), 但碳水化合物 C 的相对比例较 T308 高 (表 2), 显示两个品种根际土壤 DOM 中碳水化合物结构组成可能存在差异。

4 结 论

薤菜两个品种根际土壤 DOM 均以碳水化合物为主要组成物质, 烷基链烃和芳香族物质较少。两个品种根际土壤 DOM 的结构特征存在明显的差异。与高 Cd 品种 T308 比较, 低 Cd 品种 QLQ 根际土壤 DOM 中羧基 C 和长链脂肪 C 的相对含量较低; 芳香族物质含量较高; 烷基链烃物质具有含量高、支链短、分支多的特征。QLQ 根际土壤 DOM 中碳水化合物 H 含量较 T308 少, 但碳水化合物 C

含量较 T308 多, 显示碳水化合物结构可能存在品种间差异。推测 QLQ 根际土壤 DOM 的结构特征可能影响根际土壤 Cd 的行为与有效性, 导致其对土壤 Cd 的活化能力较弱, 这可能与低 Cd 积累特性有关。

致谢: 感谢中山大学测试中心对红外光谱和核磁共振等测试提供的帮助。

参考文献:

- [1] KIDD P, BARCELO J, BERNAL M P, et al. Trace element behaviour at the root-soil interface: Implications in phytoremediation[J]. *Eviron Exp Bot*, 2009, 67: 243 – 259.
- [2] 黄泽春, 陈同斌, 雷梅. 陆地生态系统中水溶性有机质的环境效应[J]. *生态学报*, 2002, 22(2): 259 – 269.
- [3] 黄泽春, 陈同斌, 雷梅. 污泥中的 DOM 对中国土壤中 Cd 吸附的影响. I 纬度地带性差异[J]. *环境科学学报*, 2002, 22(3): 349 – 353.
- [4] WENG L P, TEMMINGHOFF E J M, LOFTS S, et al. Complexation with dissolved organic matter and solubility control of heavy metals in a sandy soil[J]. *Environ Sci Technol*, 2002, 36: 4804 – 4810.
- [5] 郭微, 戴九兰, 王仁卿. 溶解性有机质影响土壤吸附重金属的研究进展[J]. *土壤通报*, 2012, 43(3): 761 – 768.
- [6] LI T Q, XU Z H, HAN X, et al. Characterization of dissolved organic matter in the rhizosphere of hyperaccumulator *Sedum alfredii* and its effect on the mobility of zinc[J]. *Chemosphere*, 2012, 88: 570 – 576.
- [7] 辛俊亮, 黄白飞, 杨中艺, 等. 蔬菜吸收和积累 Cd 和 Pb 能力的品种间差异[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2011, 50(3): 79 – 84.
- [8] GONG Y L, YUAN J G, YANG Z Y, et al. Cadmium and lead accumulation by typical cultivars of water spinach as responding to different soil conditions[J]. *Fresen Environ Bull*, 2010, 19(2): 190 – 197.
- [9] WANG J L, YUAN J G, YANG Z Y, et al. Variation in cadmium accumulation among 30 cultivars and cadmium subcellular distribution in 2 selected cultivars of water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.) [J]. *J Agr Food Chem*, 2009, 57: 8942 – 8949.
- [10] 龚玉莲, 杨中艺. 蔬菜典型品种的根系形态学特征及与 Cd 吸收积累的关系[J]. *华南师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 51(3): 100 – 106.
- [11] 龚玉莲, 曾小龙, 曾碧健, 等. 蔬菜镉积累典型品种根际微生物群落特征研究[J]. *生态科学*, 2014, 33(1): 25 – 31.
- [12] 龚玉莲, 杨中艺. 蔬菜不同镉积累品种的根际土壤化学特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2377 – 2384.
- [13] WANG Z W, SHAN X Q, ZHANG S Z. Comparison between fractionation and bioavailability of trace elements in rhizosphere and bulk soils[J]. *Chemosphere*, 2002, 46: 1163 – 1171.
- [14] 中国科学院南京土壤所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [15] 倪进治, 徐建民, 谢正苗, 等. 不同施肥处理下土壤水溶性有机碳含量及其组成特征的研究[J]. *土壤学报*, 2003, 40(9): 724 – 730.
- [16] 顾志忙, 王晓蓉, 顾雪元, 等. 傅里叶变换红外光谱和核磁共振法对土壤中腐殖质的表征[J]. *分析化学*, 2000, 28(3): 314 – 317.
- [17] 周江敏, 代静玉, 潘根兴. 土壤中水溶性有机质的结构特征及环境意义[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(6): 731 – 735.
- [18] 张玉兰, 孙彩霞, 陈振华, 等. 红外光谱法测定肥料施用 26 年土壤的腐殖质组分特征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(5): 1210 – 1213.
- [19] 康根丽, 杨玉盛, 司友涛, 等. 米楮人促更新林与杉木人工林叶片及凋落物溶解性有机物的数量和光谱学特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(8): 1946 – 1955.
- [20] WILSON M A, COLLIN P J, TATE K R. ¹H nuclear magnetic resonance study of a soil humic acid[J]. *Journal of Soil Science*, 1983, 34: 297 – 304.
- [21] 周江敏, 代静玉, 潘根兴. 应用光谱分析技术研究土壤水溶性有机质的分组及其结构特征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2004, 24(9): 1060 – 1065.
- [22] BALDOCK J A, OADES J M, VASSALLO A M, et al. Solid state CP/MAS ¹³C NMR analysis of particles size and density fractions of a soil incubated with uniformly labelled ¹³C-glucose[J]. *Aust J Soil Res*, 1990, 28: 193 – 212.
- [23] SCHNITZER M, PERSTON C M. Analysis of humic acids by solution and solid-state carbon¹³ nuclear magnetic resonance[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1986, 50: 326 – 331.
- [24] 王帅, 窦森, 刘艳丽, 等. 微生物对黑土添加麦秸后腐殖质结构特征影响的红外光谱研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(9): 2409 – 2413.
- [25] LIANG B C, MACKENZIE A F, SCHNITZER M, et al. Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils [J]. *Biol Fertil Soils*, 1998, 26: 88 – 94.
- [26] LI T Q, DI Z Z, YANG X E, et al. Effects of dissolved organic matter from the rhizosphere of the hyperaccumulator *Sedum alfredii* on sorption of zinc and cadmium by different soils[J]. *J Hazard Mater*, 2011, 192: 1616 – 1622.
- [27] LI T Q, LIANG C F, HAN X, et al. Mobilization of cadmium by dissolved organic matter in the rhizosphere of hyperaccumulator *Sedum alfredii* [J]. *Chemosphere*, 2013, 91: 970 – 976.
- [28] 华路, 陈世宝, 白玲玉, 等. 土壤腐殖酸与¹⁰⁹Cd、⁶⁵Zn 及其复合存在的络合物稳定性研究[J]. *中国农业科学*, 2001, 34(2): 187 – 191.
- [29] 杨佳波, 曾希柏. 水溶性有机物在土壤中的化学行为及其对环境的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(5): 206 – 211.
- [30] 白玲玉, 陈世宝, 华路, 等. 腐殖酸对 Cd、Zn 的络合特性研究[J]. *核农学报*, 2000, 14(1): 2 – 5.