

天津农田土壤镉和汞污染及有效态提取剂筛选

王 婷, 王 静, 孙红文*, 张彦峰

(南开大学环境科学与工程学院, 教育部环境污染与基准重点实验室, 天津 300071)

摘 要:采集天津 3 条排污河污灌区重金属污染农田的 22 个土壤及油麦菜样品,测定镉(Cd)和汞(Hg)的浓度,筛选两种重金属生物有效性的最佳提取剂,并分析了混合提取剂(M_3)及 DTPA 对两种重金属生物有效性的预测能力。结果表明,22 个土壤采样点中有 9 个样点 Cd 超标,7 个样点 Hg 超标,60%以上的油麦菜受到 Cd 的污染,但大部分处于轻污染级别,且 M_3 、DTPA 都能够很好地表征油麦菜中 Cd 的生物有效性,相关系数分别为: $R_{M_3}=0.92(P<0.000\ 1)$, $R_{DTPA}=0.88(P<0.000\ 1)$,其中 M_3 预测能力强,提取用时短,可推广应用;100%的油麦菜都受到 Hg 污染,且都处于重污染级别,油麦菜中 Hg 与 M_3 、DTPA 提取结果具有显著负相关,相关系数分别为: $R_{M_3}=-0.82(P<0.000\ 1)$, $R_{DTPA}=-0.47(P<0.05)$,这可能是因为可提取态 Hg 的增加对植物吸收产生负面影响。

关键词:镉;汞;生物有效性;农田土壤;蔬菜;天津

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)01-0119-06

Contamination of Cadmium and Mercury in Farmland of Tianjin and Extration Methods for Predicting Their Bioavailability

WANG Ting, WANG Jing, SUN Hong-wen*, ZHANG Yan-feng

(MOE Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Irrigation of sewage water has been applied for agriculture production in Tianjin for over 50 years, since Tianjin is a city lacking water resource seriously. Heavy metals in soils could not be degraded, but accumulated, causing hazards to human beings though food-chain. Twenty-two sites of samples(including pairing soil and lettuce) were collected from seriously polluted areas along the three sewage rivers in Tianjin, and the contents of cadmium(Cd) and mercury(Hg) were measured. Moreover,different extraction methods were studied to check their applicability for predicting bioavailability of the two metals. Nine of the 22 soils exceeded the National Soil Quality Standard II for Cd ($0.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) and 7 exceeded the standard for Hg($1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Over 60% percent of Cd concentration in lettuce exceeded the National Food Quality and Safety Standard for Cd($0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), while the Hg concentrations of all the samples exceeded the standard for Hg($0.01\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Hence, the heavy metal pollution has threatened the safty of vegetable. The metal contents in lettuce did not correlate with those in soils, wich were influenced by soil physico-chemical properties. Of five extraction solvents tested (HCl, CaCl_2 , NH_4AC , diethylene-triamine-pentaacetic acid(DTPA) and M_3), M_3 and DTPA showed good capacity for predicting the bioavailability of Cd, with the correlative coefficients(R) being 0.92 and 0.88 respectively. M_3 showed better correlation, moreover, it cost shorter time for extraction. Hence, M_3 was a promising method for Cd bioavailability prediction. However, both M_3 and DTPA failed for the prediction of Hg bioavailability, showing a negative correlation for Hg ($R=-0.82$ and -0.47 , respectively). This might be because Hg has caused adverse effects on lettuce, hindering the transfer of Hg from root to the edible part of lettuce.

Keywords: cadmium; mercury; bioavailability; farmland; vegetable; Tianjin

有 3 条排污河流经天津,即北(塘)排污河、南(大

沽)排污河和北京排污河^[1]。天津市是重度缺水城市,为保证工业用水及生活用水需要,长期以来农业生产采用污水灌溉,从 1957 年开始已有 50 年历史,沿 3 条排污河形成了三大污灌区。

土壤中的重金属不能被微生物降解,且在土壤中不断积累,并被生物富集,最终通过食物链危害人类

收稿日期:2011-07-05

基金项目:天津市农村工作委员会资助重大国际合作项目(0604130)

作者简介:王 婷(1985—),女,天津市人,博士研究生,主要从事环境污染化学与生态修复研究。E-mail:christmaswt@mail.nankai.edu.cn

* 通讯作者:孙红文 E-mail:sunhongwen@nankai.edu.cn

健康。大量文献表明,土壤中重金属总量并不能很好地评估其生物有效性及环境风险度^[2],可被植物吸收的重金属很大程度上来源于土壤溶液,而与土壤颗粒物紧密结合的部分一般是不能被植物所利用的。重金属的生物有效性是多个过程(重金属从土壤颗粒的解吸、溶液中的形态过程、植物吸收、在植物体内的运输)共同作用的结果,受多种因素(重金属性质及浓度、土壤质地、环境条件、及植物品种等)影响。

重金属的生物有效性是评价其风险的重要基础。Cambrell^[3]、Tiesser^[4]等将土壤中的重金属元素按照活动性和与土壤颗粒的结合能力大小分为多种形态,在此基础上欧共体标准物质局(European Community Bureau of Reference)提出了3步萃取法^[5],将土壤中重金属形态分为水溶态、可交换态与碳酸盐结合态,铁锰氧化物结合态,有机物和硫化物结合态,残渣态。但是多级提取法操作复杂,而且还没有得到某一个形态可表征重金属生物有效性的统一结论。

因此,一步化学提取法成为预测重金属生物有效性的热点^[6]。常用的单一提取剂有HCl、CaCl₂、NH₄AC等,复合提取剂有二乙烯三胺五乙酸(DTPA),DTPA能迅速与金属离子生成水溶性络合物,有效预测生物有效的形态^[7-8]。1984年,Mehlich提出了一种新型提取剂(M₃),M₃是一种成分较复杂的溶液:0.2 mol·L⁻¹ HAc、0.25 mol·L⁻¹ NH₄NO₃、0.05 mol·L⁻¹ NH₄F、0.013 mol·L⁻¹ HNO₃、0.001 mol·L⁻¹ EDTA。其中HAc +

NH₄NO₃形成了一个pH 2.5的强缓冲体系,可浸提出交换态金属阳离子;NH₄F+HNO₃可调控磷从Ca、Al、Fe等无机磷源的解吸;EDTA可浸提出螯合态的重金属^[9]。Jones等^[10]主张将M₃浸提剂用于美国各类土壤的测试,甚至可以作为全球各类土壤的通用提取剂,但目前M₃只是广泛用于评价土壤营养元素的生物有效性,在土壤重金属方面的应用还比较少。

本文调查了天津受重金属污染的三大污灌区内21个采样点蔬菜农田土壤及所生长的油麦菜样品重金属(镉和汞)的污染状况,比较了5种提取剂对重金属的提取效果,筛选出与蔬菜可食部分中重金属含量具有显著相关性的提取剂,从而有效预测重金属的生物有效性。希望为重金属的生物有效性预测提供标准方法,为科学防控污染危害提供工具,以促进城市郊区农业的和谐可持续发展。

1 材料与方法

1.1 采样点布设

采集位于天津市三大污灌区的北辰区、武清区、东丽区、津南区、西青区共22个蔬菜田表层土及蔬菜样品(图1)。

1.2 土壤及蔬菜样品的采集和前处理

所有土壤采用五点布点法取样,使用木铲以避免重金属污染。用于提取实验的新鲜土样立即用提取剂提取,剩余土壤风干,测定土壤理化性质。

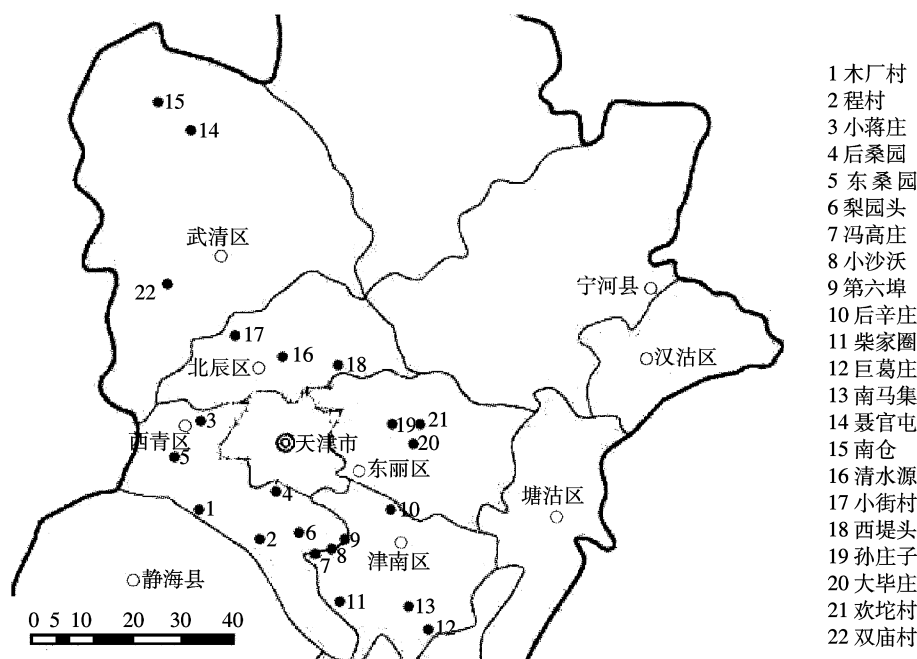


图1 采样点分布图

Figure 1 Sampling sites in the suburbs of Tianjin, China

本文选择天津种植广泛、且对重金属有较高富集能力的油麦菜,既可反映污染状况,又避免使用多种蔬菜品种带来的不确定性。采集时,选择生长均一良好的油麦菜,并保持油麦菜根、茎、叶的完整。先用自来水清洗,再用蒸馏水清洗,烘干至恒重。

1.3 提取剂的筛选

选择 3 种单一提取剂 (HCl 、 CaCl_2 、 NH_4AC 溶液) 和 2 种复合提取剂即 M_3 、 DTPA 复合液 ($0.005 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{DTPA} + 0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{CaCl}_2 + 0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ TEA , $\text{pH} = 7.3$), 对双庙村、大毕庄、柴家圈表层土 3 种理化性质差异比较大的土壤中重金属进行提取。前期调查获得数据可知,天津市三大污灌区主要超标重金属为 Cd 和 $\text{Hg}^{[1]}$, 并且对人体健康也有极大的危害^[11-13], 因而选取为主要研究对象。按照表 1 所示实验方法进行提取。

表 1 五种提取剂提取方法

Table 1 Extraction methods of five extraction solvents

提取剂 种类	土样质量/ g	土液比	反应时间/ min	反应温度/ ℃	转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$
$0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CaCl}_2$	2	1:10	60	25	200
$1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{AC}$	2	1:10	60	25	200
$0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{HCl}$	5	1:5	90	25	200
$\text{M}_3^{[1]}$	2	1:10	3	25	200
$\text{DTPA}^{[2]}$	5	1:2	120	25	200

1.4 土壤理化性质的测定

采用标准方法测定土壤若干理化性质, pH : CaCl_2 浸提法; 有机质: 重铬酸钾氧化-外加热法 (GB 7857—1987); 阳离子交换容量: BaCl_2 交换法。

1.5 重金属含量的测定

采用 WX-4000 型微波消解仪 (上海屹尧微波化学技术有限公司) 对干化土壤和蔬菜样品进行消解, 土壤样品中加入 5 mL HNO_3 、2 mL HCl 和 2 mL HF , 在 200°C 、25 atm 条件下消解 15 min; 植物样品加入 5 mL HNO_3 , 在 180°C 、20 atm 下消解 5 min。采用 WFX-210 型石墨炉原子吸收分光光度计 (北京瑞利分析仪器公司) 测定 Cd ; 采用 AFS 2201 原子荧光光谱 (北京海光分析仪器公司) 测定 Hg 。

1.6 数据分析

所有实验均设 3 个重复, 所获数据利用 Origin 7.5 软件进行统计分析 & 差异显著性检验。

2 结果与讨论

2.1 土壤理化性质

采集土壤均为农田土, 有机质含量大部分在 3%

~5% 之间, CEC 为 $7 \sim 15 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 在 $7.3 \sim 7.9$ 之间 (具体数据略)。

2.2 样品 Cd 和 Hg 含量

2.2.1 土壤中 Cd 和 Hg 的含量

调查结果表明, 土壤中重金属超标不太严重。

22 个采样点表层土 Cd 和 Hg 含量见表 2。9 个样品 Cd 含量超标, 超标率达 43%, 污染最严重的小蒋庄表层土 Cd 浓度是国家土壤环境质量二级标准 ($0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 9 倍。7 个点 Hg 超标, 超标率 33%, 其中污染最严重的是东桑园, 是国标 ($1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 2.2 倍。但是虽然目前污水处理厂的剩余污泥施用已经废弃, 很多地方已经改用地下水浇灌。但是由于重金属不可被降解, 其污染恢复需要一个长期过程。

表 2 土壤中 Cd 和 Hg 含量 ($\times 10^{-1} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 Cd and Hg concentrations of soil samples ($\times 10^{-1} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

地点	Cd	Hg	地点	Cd	Hg	地点	Cd	Hg
孙庄子	4.1	8.9	梨园头	2.7	14.0	程村	3.9	9.9
南马集	9.4	19.0	巨葛庄	10.0	6.1	小沙沃	7.1	2.9
东桑园	35.0	22.0	西堤头	8.2	8.1	清水源	0.9	1.7
冯高庄	5.7	13.0	小蒋庄	54.0	13.0	小街村	1.3	27.0
聂官屯	4.9	2.3	欢坨村	2.4	2.8	南仓	1.2	1.7
大毕庄	2.1	17.0	第六埠	1.0	1.8	木厂村	8.9	14.0
柴家圈	6.0	6.7	后辛庄	4.1	5.5	后桑园	3.2	5.5

2.2.2 蔬菜中的 Cd 和 Hg 浓度

油麦菜可食部分中 Cd 和 Hg 的含量见表 3。根据国家食品安全限量标准, 有 13 个样品 Cd 含量超标 ($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 超标率 61.9%, 但大部分处于轻污染级别。油麦菜中 Hg 全部超标 ($0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 浓度范围在 $1.3 \times 10^{-1} \sim 4.8 \times 10^{-1} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 且污染情况都比较严重, 污染最严重的是巨葛庄, 达到国标的 48 倍。可见, 天津农田的重金属污染已经对蔬菜的安全产生影响。最近, 天津市政府已经规划城郊的发展, 一些严重污染的场地已经不再继续用作农田。对于那些继续用作农田的污染场地, 我们建议种植经济作物或者种植对重金属蓄积少的蔬菜品种, 以保证农产品安全。

2.3 提取剂的筛选

试验选取 5 种提取剂 HCl 、 CaCl_2 、 NH_4AC 、 DTPA 、 M_3 对 3 个样点土壤中 Cd 和 Hg 进行提取 (表 4)。 HCl 提取的 Cd 和 Hg 浓度都太低, 测试时峰形不好, 造成结果不可靠。用 CaCl_2 和 NH_4AC 提取时, 有的样品 Hg 检测不出, 并且可提取出的 Cd 与蔬菜中的含量不具有显著相关性 (具体数据略)。因此, 3 种单一提取剂

表 3 油麦菜可食部分中 Cd 和 Hg 的含量($\times 10^{-1} \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 干重)

Table 3 Cd and Hg concentrations in edible part of lettuce samples($\times 10^{-1} \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ dry weight)					
地点	Cd	Hg	地点	Cd	Hg
西堤头	2.3	3.8	第六阜	0.1	1.8
程村	0.2	3.7	巨葛庄	4.5	4.8
孙庄子	2.6	3.7	清水源	0.2	1.2
梨园头	0.1	3.0	南仓	0.1	1.3
木厂村	3.5	3.0	小沙沃	2.6	1.5
后桑园	0.2	2.5	小街村	0.1	1.3
后辛庄	0.2	4.0	聂官屯	2.7	1.4

都不能用作重金属生物有效性的预测手段。

DTPA 和 M_3 提取的 Cd 和 Hg 的浓度均较高,而且提取出的 Cd 与蔬菜中的 Cd 具有较好相关性。大量文献选用 DTPA 作为标准提取剂表征重金属的生物有效性,而 M_3 是一种新型提取剂。因此,本文针对 DTPA 同 M_3 进行深入比较研究。

2.4 生物有效性预测和表征

2.4.1 Cd 的提取及生物有效性表征

采用 M_3 及 DTPA 提取剂提取土壤中 Cd 结果见表 5。 M_3 和 DTPA 对 Cd 的提取效果基本相近。

将油麦菜可食部分 Cd 含量同提取剂提取部分含量做相关分析(图 2)。 M_3 、DTPA 的提取结果与油麦菜可食部分 Cd 含量都具有显著相关,相关系数分别为 $R=0.92(P<0.000\ 1)$ 和 $R=0.88(P<0.000\ 1)$ 。因而两种提取剂都可以用来做 Cd 生物有效性的评价,预测重金属 Cd 的生态风险。但是两者比较而言, M_3 提取结果的相关性较 DTPA 好一些,与其他研究结果一致,并且 M_3 提取时间较短,只需 3 min。Michaelson^[14]、陆文

表 4 不同提取剂提取结果($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 4 Cd and Hg concentrations of different extraction methods($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)			
地点	提取剂	Hg	Cd
双庙村	CaCl_2	ND*	1.5×10^{-2}
	NH_4AC	ND*	1.0×10^{-4}
	HCl	5.1×10^{-4}	9.1×10^{-4}
	M_3 提取液	2.8×10^{-3}	1.3×10^{-4}
	DTPA 混合液	1.0×10^{-3}	6.3×10^{-2}
大毕庄	CaCl_2	ND*	8.1×10^{-2}
	NH_4AC	1.9×10^{-3}	1.3×10^{-4}
	HCl	6.4×10^{-4}	4.9×10^{-2}
	M_3 提取液	2.0×10^{-3}	3.3×10^{-4}
	DTPA 混合液	1.6×10^{-3}	1.8×10^{-4}
柴家圈	CaCl_2	ND*	4.2×10^{-2}
	NH_4AC	1.3×10^{-3}	7.6×10^{-2}
	HCl	7.3×10^{-4}	2.3×10^{-2}
	M_3 提取液	4.3×10^{-3}	2.1×10^{-1}
	DTPA 混合液	1.6×10^{-3}	8.8×10^{-2}

*ND 表示未检出。

利等^[15]将 M_3 试剂与 EDTA 和 DTPA 进行比较,发现 M_3 试剂提取的土壤中重金属元素的含量与植物中的相应含量显著相关,而且 M_3 浸提剂适用于酸性、中性、碱性及石灰性等各类土壤。因此, M_3 是一种非常具有潜力的重金属生物有效性预测试剂,应针对不同的重金属以及我国各种土壤类型检测其适用性,以便建立一种标准化方法。

2.4.2 Hg 的提取及生物有效性表征

用 M_3 与 DTPA 对土壤中的 Hg 进行提取(表 5)。DTPA 提取 Hg 的能力高于 M_3 。

表 5 两种提取剂提取 Cd、Hg 提取结果($\times 10^{-2} \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 5 Cd and Hg concentrations of M_3 and DTPA extration($\times 10^{-2} \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)				
地点	Cd		Hg	
	M_3	DTPA	M_3	DTPA
小街村	1.3	4.0	1.5	3.3
南仓	1.2	1.0	2.2	2.7
清水源	4.6	7.3	1.5	3.3
第六埠	4	5.0	2.2	3.6
柴家圈	5.3	5.9	0.6	0.6
梨园头	7.0	13.0	0.5	1.2
后桑园	6.5	6.2	1.0	2.2
南马集	6.4	6.5	1.1	2.1
后辛庄	6.3	7.1	0.5	1.0
大毕庄	26.0	25.0	0.4	3.6
东桑园	40.0	29.0	0.6	1.5

地点	Cd		Hg	
	M_3	DTPA	M_3	DTPA
程村	6.5	11.0	0.6	3.3
小蒋庄	8.0	6.5	0.7	5.2
冯高庄	8.0	15.0	2.1	3.2
西堤头	1.0	14.0	0.8	1.3
孙庄子	11.0	14.0	0.6	0.9
欢坨村	5.5	6.7	0.7	1.2
小沙沃	10.0	17.0	2.0	3.2
聂官屯	19.0	13.0	2.0	2.9
木厂村	20.0	19.0	0.6	1.8
巨葛庄	21.0	27.0	0.7	0.9

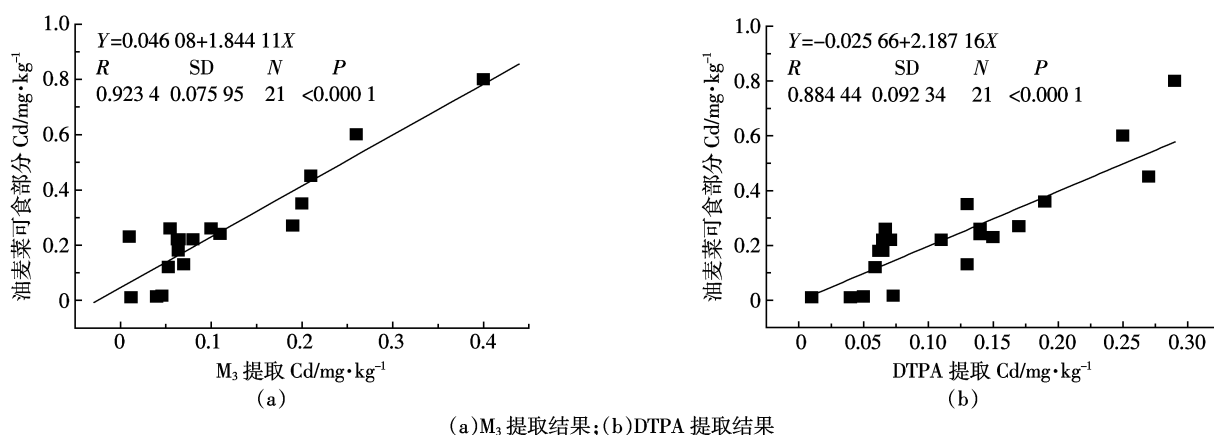


图2 油麦菜可食部分 Cd 含量与提取结果相关性

Figure 2 Correlation between Cd concentration in edible parts of lettuce and extraction parts

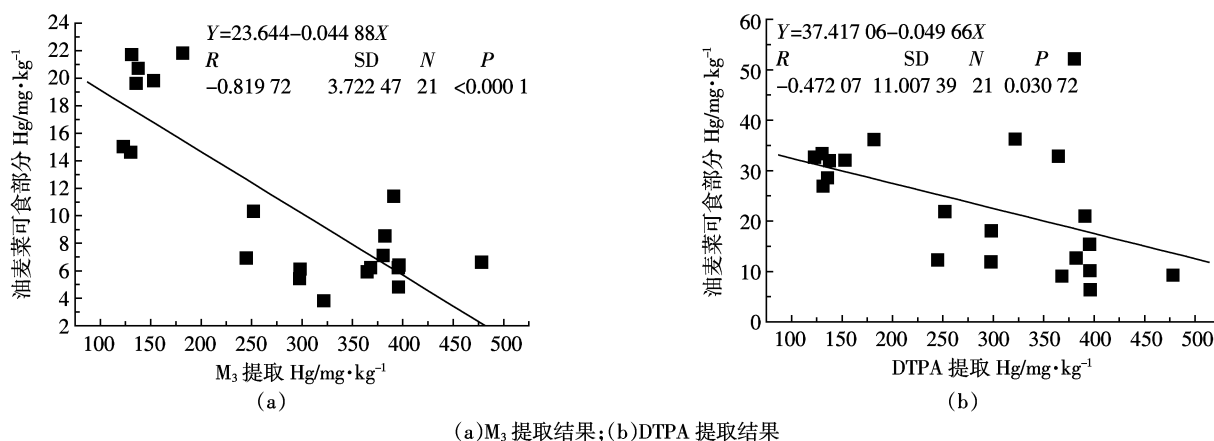


图3 油麦菜可食部分 Hg 含量与提取结果相关性

Figure 3 Correlation between Hg concentration in edible parts of lettuce and extraction parts

将油麦菜可食部分 Hg 含量同提取剂提取部分含量做相关分析(图3)。M₃ 提取结果与油麦菜可食部分达到显著负相关 ($R=-0.82, P<0.000\ 1$), 而 DTPA 的提取结果相关性则稍差, 但也与油麦菜可食部分 Hg 含量负相关 ($R=-0.47, P<0.05$)。

两种提取剂与油麦菜可食部分 Hg 含量都具有负的相关性, 可能是因为蔬菜根部对 Hg 具有“屏蔽”作用, 一般会在根部积累, 当土壤总浓度增大时, 对根部毒害作用加强, 影响 Hg 向茎、叶迁移。另外, Hg 具有一定的挥发性, 植物其吸收模式比较复杂, 也是造成蔬菜中 Hg 与可提取态呈负相关的一个原因。

3 结论

本次调查采样中发现, 虽然土壤中重金属超标不严重。但是油麦菜重金属超标严重, 60%以上的油麦菜受到 Cd 的污染, 但大部分处于轻污染级别, 且 M₃、

DTPA 都能够很好的来表征油麦菜中 Cd 的生物有效性; 但 M₃ 的表征结果要好些, 并且 M₃ 的提取时间较短, 能够快速准确的表征重金属的生物有效性。

本次调查采样 100% 的油麦菜都受到 Hg 污染, 且都处于重污染的情况, 油麦菜中 Hg 与 M₃、DTPA 提取结果达到显著负相关。

重金属生物有效性的正确表征是开展污染诊断、评估环境健康风险及开展重金属污染土壤修复的重要依据。

参考文献:

- [1] 王 静, 张彦峰, 姜春晓, 等. 天津市污灌区重金属在土壤-蔬菜体系中的迁移积累[J]. 城市环境与城市生态, 2008, 21(2): 38-41.
WANG Jing, ZHANG Yan-feng, JIANG Chun-xiao, et al. Transfer and accumulation of heavy metals in soil-vegetable system at sewage irrigated areas in Tianjin [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2008, 21(2): 38-41.

- [2] Meyer J S. The utility of the terms " bioavailability " and "bioavailable fraction "for metals[J]. *Marine Environmental Research*, 2002, 53:417–423.
- [3] Gambrell R P. Trace and toxic metals in wetland: A review[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23:883–889.
- [4] Tessier A, Campbell P G C, Blosson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7):844–850.
- [5] Querauviller P H, Rauret G, Griepiuk B. Single and sequential extraction in sediments and soils[J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1993, 51:231.
- [6] 杨金燕, 杨肖娥, 何振立, 等. 平衡时间及含水量对红壤有效态铅提取量的影响[J]. 土壤通报, 2005, 36(4):595–597.
YANG Jin-yan, YANG Xiao-e, HE Zhen-li, et al. Effect of equilibrium time and water content on Pb availability in red soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(4):595–597.
- [7] Feng M H, Shan X Q, Zhang S, et al. A comparison of the rhizosphere-based method with DTPA, EDTA, CaCl_2 , and NaNO_3 extraction methods for prediction of bioavailability of metals in soil to barley [J]. *Environmental Pollution*, 2005, 137: 231–240.
- [8] Gupta A K, Sinha S. Assessment of single extraction methods for the prediction of bioavailability of metals to *Brassica juncea* L. Czern (var. Vaibhav) grown on tannery waste contaminated soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 149: 144–150.
- [9] Mehlich A. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1984, 15: 1409–1416.
- [10] Jones J J, Benton. Universal soil extractants: Their composition and use [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1990, 21(13–16):1091–1101.
- [11] 孙 华, 孙 波, 张桃林. 江西省贵溪冶炼厂周围蔬菜地重金属污染状况评价研究[J]. 农业环境科学报, 2003, 22(1):70–72.
SUN Hua, SUN Bo, ZHANG Tao-lin. Assessment of pollution of heavy metals on vegetable field around Guixi Smelter, Jiangxi Province[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2003, 22(1):70–72.
- [12] McLaughlin M J, Parker D R, Clarke J M. Metals and micro-nutrients—food safety issues[J]. *Field Crops Research*, 1999, 60:143–163.
- [13] Gorell J M, Johnson C C, Rybicki B A. Occupational exposure to manganese, copper, lead, iron, mercury and zinc and the risk of Parkinson's disease[J]. *Neurotoxicology*, 1999, 20(2–3):239–247.
- [14] Michaelson G J, Peng C L, Mitchell G A. Correlation of mehlich 3, bray l, and ammonium acetate extractable phosphorus, potassium, cadmium, and magnesium for Alaska agricultural soils[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1987, 18:1003–1015.
- [15] 陆文利, 聂俊华, 周 琨. 土壤重金属元素测定方法比较[J]. 农业环境与发展, 2004: 44–46.
LU Wen-li, NIE Jun-hua, ZHOU Kun. Comparison of several methods for soil heavy metal determination[J]. *Agro-environment and Development*, 2004: 44–46.