

· 解析评价 ·

江苏省典型农田耕作层土壤——谷物籽粒中镉的迁移转化特征

陈谊¹ 吴春发², 汪俊峰²

(1. 扬州市环境监测中心站, 江苏 扬州 225007; 2. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044)

摘要:于2013年—2014年通过野外调查和盆栽试验的方法,采集江苏省境内典型农田耕作层(0~20 cm)土壤及其对应点位的水稻/小麦籽粒,分析其中的 $\omega(\text{Cd})$ (总量、0.01 mol/L CaCl_2 提取态含量和0.05 mol/L CaCl_2 提取态含量),及其Cd在土壤——谷物籽粒系统中的迁移转化特征。结果表明,水稻籽粒(糙米)中 $\omega(\text{Cd})$ 与土壤pH值呈负相关,与0.01 mol/L CaCl_2 提取态含量呈正相关,且相关性在0.01水平下显著,而糙米中 $\omega(\text{Cd})$ 与土壤中Cd总量以及土壤中的 $\omega(\text{有机质})$ 的相关性较弱;麦粉 $\omega(\text{Cd})$ 与0.01 mol/L CaCl_2 提取态含量、土壤中总 $\omega(\text{Cd})$ 和土壤 $\omega(\text{有机质})$ 呈显著正相关,而面粉中 $\omega(\text{Cd})$ 与土壤pH值的相关性较弱,说明淹水可以有效降低水稻对Cd的吸收。

关键词:耕作层土壤;谷物籽粒;镉;迁移转化;江苏省

中图分类号:X825

文献标志码:B

文章编号:1674-6732(2016)06-0046-06

Study on Cadmium Transition and Transformation Characteristics between Typical Cultivated Layer Soil and Cereal Grain in Jiangsu Province

CHEN Yi¹, WU Chun-fa², WANG Jun-feng²

(1. Yangzhou Environmental Monitoring Central Station, Yangzhou, Jiangsu 225000 China;

2. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

Abstract: In this paper, the typical cultivated layer soil (0-20 cm) and the rice/wheat grain from the corresponding points were gathered through field investigation and pot experiment in Jiangsu province from 2013 to 2014. The concentration of cadmium (total amount, 0.01 mol/L CaCl_2 extracting content and 0.05 mol/L CaCl_2 extracting content) were analyzed to find the cadmium transition and transformation characteristics between soil - cereal grain system. The results showed that cadmium content in rice grains (rice) was negatively correlated with the soil pH value, but positively correlated with the 0.01 mol/L CaCl_2 extracting content, and there was a significant correlation under the 0.01 level. The correlation between cadmium in coarse rice, the soil total cadmium and the soil organic matter was weak. And there was a significantly positive correlation between cadmium in wheat flour and 0.01 mol/L CaCl_2 extracting content, total cadmium and soil organic matter, but the correlation between cadmium in wheat flour and the soil pH was weak, which indicated that the flood could help rice reduce the absorption of cadmium effectively.

Key words: Typical cultivated layer soil; Cereal grain; Cadmium; Transition and transformation; Jiangsu

土壤是农产品生产的直接载体,土壤中的各种污染物,在农业生产中会被农作物吸收,在作物体中积累,并通过食物链进入人体,危害人体健康。然而,作物吸收土壤污染物不仅受污染来源、土壤基本性质和气候条件的影响,不同作物种类、甚至不同基因型的同种作物的富集特征都有明显差异^[1-2]。镉(Cd)是一种具有极强生理毒性的重金属元素,其潜在健康危害被人们广泛关注,与其他重金属不同,Cd在土壤中具有较高的植物有效性,

并且土壤中 $\omega(\text{Cd})$ 在达到毒害植物之前就可以使植物可食部分 $\omega(\text{Cd})$ 超过食用标准而危害人类健康。水稻和小麦是江苏省大多数人口的主食,种植面积大且分布广泛,现选取Cd为重金属代表物,

收稿日期:2015-09-25;修订日期:2016-08-14

基金项目:江苏省农业用地土壤环境质量标准研究基金资助项目(2012064)

作者简介:陈谊(1965—),女,高级工程师,大学本科,从事环境监测与管理工。

通过野外调查和盆栽试验方式,研究作物和耕作层土壤中 $\omega(\text{Cd})$,研究其迁移转化规律。

1 研究方法

1.1 样品采集

样品采集点位以扬州市为主,兼顾苏南苏北,于2013年—2014年分别选取苏南的宜兴、常熟、苏中的扬州、泰州和苏北淮安、连云港等地具有代表性的连片农田,采集耕作层土壤及其对应点位的谷物籽粒样品,采样及样品保存按有关规范进行。2013年10月共采集44组水田土壤和水稻籽粒样品,其中扬州市26组;2014年6月共采集99组旱田土壤和小麦籽粒样品,其中扬州市30组。

1.2 盆栽试验

采集典型农业区亚表层水稻土和潮土,选择无污染的土壤作为供实验土壤,分别进行水稻(水稻土)和小麦(潮土)盆栽试验,调整盆栽土壤的pH值,使土壤pH值为6.5~7.5。

盆栽试验各种重金属污染物浓度(全量)分别设置7个浓度梯度(分别为《土壤环境质量标准》(GB 15618—2008)二级标准的0.5,0.75,1,1.5,2,3,5倍),每个浓度梯度设置3个平行。

盆栽试验中水稻品种为镇稻88,小麦品种为徐麦31。

水稻盆栽试验:2013年4月23日采用直播种植,分别于2013年4月21日和7月26日采用直接施用和溶于水添加方式向每盆盆栽中添加1.04 g和0.52 g复合肥(相当于每公顷添加900 kg和450 kg复合肥),水稻整个生长期均用自来水浇灌,并参照水稻田间种植的管理模式进行水分管理,于2013年10月4日完成取穗收割。

小麦盆栽试验:2013年10月22日种植,分别于2013年10月20日和2014年2月21日采用直接施用和溶于水添加方式向每盆盆栽中添加1.08 g和0.54 g复合肥(相当于每公顷添加900 kg和450 kg复合肥),小麦整个生长期均用自来水浇灌,

并参照小麦田间种植的管理模式进行水分管理,于2014年5月23日完成取穗收割。所有盆栽试验均在南京信息工程大学农气站中完成。

1.3 样品分析与处理

1.3.1 样品预处理

土壤样品:将土壤样品自然风干,用孔径为2 mm筛网筛去土壤中的植物根茎和杂质,然后选取500 g装袋。

谷物籽粒样品:采集回来的水稻/小麦籽粒样品在室外太阳下自然干燥约5 d,剪下籽粒,用去离子水冲洗秸秆和稻穗/麦穗上面的土壤及其他可能污染样品的物质,水稻在室温下干燥,将干燥的稻穗脱粒去壳、粉碎。

1.3.2 样品分析

土壤pH值的测定参照《土壤pH的测定》(NY/T 1377—2007),土壤有机质的测定参照《重铬酸钾容量法》(GB/T 9834—1988),土壤和植物中Cd全量的测定参照《土壤质量铅镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/T 17141—1997)。

1.3.3 质量控制

Cd分析过程中均以国家标准物质土壤标准参考样(GSS系列)作内标,每批次消煮都设置3个标准物样品,标样检测结果都在实际值的90%~110%范围内;土壤样品设置10%的平行样,小麦和水稻样品设置了20%的平行样,土壤样品中总Cd的相对误差为 $\pm 6.3\%$,水稻和小麦平行样中镉的相对误差分别为 $\pm 7.6\%$ 和 $\pm 6.9\%$ 。水稻样品设置11%的平行样,平行样相对误差0.72%~13.12%(未检出样品结果不参与统计);小麦样品设置13%的平行样,平行样相对误差为1.42%~27.87%(未检出样品结果不参与统计)。

2 结果分析

2.1 土壤、水稻籽粒(糙米)中相关项目结果分析

盆栽实验土壤的pH值和 ω (有机质)的变化并不大,见表1。

表1 野外调查和室内栽培水稻取样点土壤基本理化性质

样品类别	监测指标	最大值	最小值	平均值	标准差
野外调查点 (n=44)	pH值	8.06	5.13	6.31	0.81
	$\omega(\text{有机质})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	59.07	19.52	36.06	10.24
室内栽培取样 (n=42)	pH值	7.99	6.55	7.4	0.46
	$\omega(\text{有机质})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	41.29	26.93	33.48	5.71

野外调查和室内栽培各取样点土壤和糙米中 $\omega(\text{Cd})$ 统计见表2。由表2可见,调查区有1个糙米样品 $\omega(\text{Cd})$ 超过0.2 mg/kg 的标准限值^[3],而室

内栽培实验由于 Cd 添加剂量较大,糙米 $\omega(\text{Cd})$ 较高,大部分糙米样品中 $\omega(\text{Cd})$ 都超过0.2 mg/kg 的标准。

表2 野外调查和室内栽培取样点土壤和糙米中 $\omega(\text{Cd})$ $\mu\text{g}/\text{kg}$

样品类别和监测指标	最大值	最小值	平均值	标准差
野外调查点 ($n=44$)	0.01 mol/L CaCl_2 提取态含量	67.5	1.56	14.42
	0.05 mol/L CaCl_2 提取态含量	105.9	2.00	43.07
	土壤中 $\omega_{\text{总}}(\text{Cd})$	491	128	274
	糙米中 $\omega(\text{Cd})$	316	11	63
室内栽培取样 ($n=42$)	0.01 mol/L CaCl_2 提取态含量	344.5	10.75	103.5
	0.05 mol/L CaCl_2 提取态含量	451.2	82.43	249.0
	土壤中 $\omega_{\text{全量}}(\text{Cd})$	3 351	194	1 070
	糙米中 $\omega(\text{Cd})$	1 572	117	498

2.2 土壤、小麦(麦粉)中相关项目分析结果

盆栽实验土壤的 pH 值和 $\omega(\text{有机质})$ 的变异性明显小于野外调查点,见表3。野外调查和室内栽培各小麦取样点土壤和麦粉中 $\omega(\text{Cd})$ 统计结果

见表4。

室内栽培实验由于 Cd 的添加剂量较大,麦粉中 $\omega(\text{Cd})$ 较高,大部分处理中麦粉中 $\omega(\text{Cd})$ 都超过0.1 mg/kg 的标准。

表3 野外调查和室内栽培小麦取样土壤基本理化性质

品类别和监测指标	最大值	最小值	平均值	标准差
野外调查点 ($n=99$)	pH 值	7.95	4.27	6.66
	$\omega(\text{有机质})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	53.83	14.26	29.98
室内栽培取样 ($n=42$)	pH 值	7.62	6.74	7.25
	$\omega(\text{有机质})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	39.72	28.08	32.84

表4 野外调查和室内栽培各小麦取样点土壤和麦粉中 $\omega(\text{Cd})$ $\mu\text{g}/\text{kg}$

样品类别和监测指标	最大值	最小值	平均值	标准差
野外调查点 ($n=99$)	0.01 mol/L CaCl_2 提取态含量	103.9	2.88	13.05
	土壤中 $\omega_{\text{总}}(\text{Cd})$	1 871	52	232
	麦粉中 $\omega(\text{Cd})$	337	13	54
室内栽培取样 ($n=42$)	0.01 mol/L CaCl_2 提取态含量	240	15.0	81.1
	土壤中 $\omega_{\text{总}}(\text{Cd})$	2501	172	877
	麦粉中 $\omega(\text{Cd})$	617.4	60.3	242.7

3 Cd 在土壤—作物籽粒中迁移分配规律

3.1 在土壤—水稻籽粒(糙米)中迁移分配特征

野外调查结果见表5。由表5可见,糙米中 $\omega(\text{Cd})$ 与土壤 pH 值呈负相关,与 0.01 mol/L CaCl_2 提取态呈正相关,而糙米中 $\omega(\text{Cd})$ 与土壤中 $\omega(\text{Cd})$ 以及土壤中的 $\omega(\text{有机质})$ 的相关性较弱,说明在淹水状态下, Cd 活性降低,减少了水稻对 Cd 的吸收。

据有关研究,作物的 $\omega(\text{Cd})$ 一般与土壤 pH 值呈负相关,土壤 pH 值越低,则 Cd 的溶解性越高,

其活度就越强,有效性也越强^[4-5]。

野外调查糙米中镉与 0.01 mol/L CaCl_2 提取态相关性好于与 0.05 mol/L CaCl_2 提取态的相关性,原因是本项目 CaCl_2 提取态震荡时间是 4 h,提取剂 CaCl_2 浓度越高, Cd 提取量就越大,达到平衡所需的时间也越长,在 0.01 mol/L CaCl_2 浸提下,酸性水稻土在 3 h 达到平衡^[6],所以,在 0.05 mol/L CaCl_2 浸提下 4 h 未达平衡,所取得的提取态量不是最大值。

盆栽试验结果见表6。盆栽试验糙米中 Cd 与

土壤中各种提取态 Cd 都成显著正相关,而与土壤 pH 值和有机质相关性较弱,可能与人为添加的 Cd 活性较大且其活性受 pH 值和 ω (有机质) 影响小有关。

而糙米中 ω (Cd) 与土壤中 $\omega_{\text{总}}$ (Cd) 的相关性高,可能与土壤添加水溶性 Cd (CdCl_2) 后不久就种

植水稻有关。

盆栽试验 CaCl_2 提取态量与稻米中 Cd 相关性明显好于野外调查结果,主要原因可能与调查时水稻品种多样且各采样点土壤基本理化性质 [pH 值、 ω (有机质)、CEC] 变异性明显大于盆栽试验。

表5 野外调查点稻米 ω (Cd) 与土壤基本理化性质、各种提取态 ω (Cd) 的非参数相关性^①

参数	土壤 pH 值	ω (有机质)	0.01 mol/L CaCl_2 提取	0.05 mol/L CaCl_2 提取	土壤中 $\omega_{\text{总}}$ (Cd)	稻米中 ω (Cd)
土壤 pH 值	1.00	0.10	-0.56 **	-0.24	0.08	-0.63 **
ω (有机质)	0.10	1.00	0.05	0.01	0.63 **	-0.09
0.01 mol/L CaCl_2 提取	-0.56 **	0.05	1.00	0.19	-0.12	0.75 **
0.05 mol/L CaCl_2 提取	-0.24	0.01	0.19	1.00	-0.14	0.11
土壤中 $\omega_{\text{总}}$ (Cd)	0.08	0.63 **	-0.12	-0.14	1.00	-0.08
稻米中 ω (Cd)	-0.63 **	-0.09	0.75 **	0.11	-0.08	1.00

① **:相关性在 $P < 0.01$ 水平下显著; *:相关性在 $P < 0.05$ 水平下显著。

表6 盆栽试验稻米 ω (Cd) 与土壤基本理化性质、各种提取态 ω (Cd) 的非参数相关性^①

参数	土壤 pH 值	ω (有机质)	0.01 mol/L CaCl_2 提取	0.05 mol/L CaCl_2 提取	土壤中 $\omega_{\text{总}}$ (Cd)	稻米中 ω (Cd)
土壤 pH 值	1.00	0.90 **	0.08	0.17	0.28	0.04
ω (有机质)	0.90 **	1.00	0.06	0.07	0.29	0.12
0.01 mol/L CaCl_2 提取	0.08	0.06	1.00	0.84 **	0.96 **	0.86 **
0.05 mol/L CaCl_2 提取	0.17	0.07	0.84 **	1.00	0.83 **	0.78 **
土壤中 $\omega_{\text{总}}$ (Cd)	0.28	0.29	0.96 **	0.83 **	1.00	0.82 **
稻米中 ω (Cd)	0.04	0.12	0.86 **	0.78 **	0.82 **	1.00

① **:相关性在 $P < 0.01$ 水平下显著; *:相关性在 $P < 0.05$ 水平下显著。

3.2 在土壤—小麦籽粒(麦粉)中迁移分配特征

野外调查中,麦粉中 Cd 与 0.01 mol/L CaCl_2 提取态 Cd、土壤中总 Cd 和土壤有机质呈显著正相关,说明有机质较高有利于土壤 Cd 活化。影响土壤 Cd 有效性的另一个主要因素是有机质,土壤 ω

(有机质)影响着自身与 Cd^{2+} 的吸附和螯合能力,从而影响到土壤中 Cd 的移动性及其生物有效性,这与文献[7-8]研究结果一致,见表7。

表7 野外调查点麦粉中 ω (Cd) 与土壤基本理化性质、 ω (Cd) 的非参数相关性^①

参数	土壤 pH 值	ω (有机质)	0.01 mol/L CaCl_2 提取	土壤中 $\omega_{\text{总}}$ (Cd)	麦粉中 ω (Cd)
土壤 pH 值	1.00	-0.12	0.29 **	0.49 **	-0.10
ω (有机质)	-0.12	1.00	0.03	-0.02	0.25 *
0.01 mol/L CaCl_2 提取	0.29 **	0.03	1.00	0.76 **	0.53 **
土壤中 $\omega_{\text{总}}$ (Cd)	0.49 **	-0.02	0.76 **	1.00	0.22 *
麦粉中 ω (Cd)	-0.10	0.25 *	0.53 **	0.22 *	1.00

① **:相关性在 $P < 0.01$ 水平下显著; *:相关性在 $P < 0.05$ 水平下显著。

盆栽试验麦粉中 ω (Cd) 与土壤中各种提取态 Cd 都成显著正相关,而与土壤 pH 值和有机质相关性较弱,可能与人为添加的 Cd 活性较大且其活性受 pH 值和 ω (有机质) 影响小有关;麦粉中 ω

(Cd) 与土壤中 $\omega_{\text{总}}$ (Cd) 的相关性高的原因可能与土壤添加水溶性 Cd (CdCl_2) 后不久就种植小麦有关。见表8。

表8 栽培试验麦粉中 $\omega(\text{Cd})$ 与土壤基本理化性质、 $\omega(\text{Cd})$ 的非参数相关性^①

参数	土壤 pH 值	ω (有机质)	0.01 mol/L CaCl_2 提取	土壤中 $\omega_{\text{总}}(\text{Cd})$	麦粉中 $\omega(\text{Cd})$
土壤 pH 值	1.00	-0.71	-0.14	-0.12	-0.13
ω (有机质)	-0.71	1.00	0.21	0.19	0.20
0.01 mol/L CaCl_2 提取	-0.14	0.21	1.00	0.87 **	0.92 **
壤中 $\omega_{\text{总}}(\text{Cd})$	-0.12	0.19	0.87 **	1.00	0.62 **
麦粉中 $\omega(\text{Cd})$	-0.13	0.20	0.92 **	0.62 **	1.00

① **: 相关性在 $P < 0.01$ 水平下显著; * : 相关性在 $P < 0.05$ 水平下显著。

4 农业用地土壤镉标准限值的讨论

4.1 基于非致癌风险的农田土壤镉环境质量标准

非致癌风险评估采用美国环保署 (USEPA) 的商值计算方法^[9]。评估过程中假设:(1) 摄入量吸收剂量;(2) 烹饪过程中对稻米和面粉中 Cd 含量没有影响;(3) 稻米和面粉 Cd 摄入效应分别为非致癌效应和致癌效应;(4) 居民常食用稻米和麦粉均为本地生产。风险商为暴露剂量与参考剂量比值:

$$HQ_{\text{life}} = \frac{EF \times ED_{\text{child}}}{BW_{\text{child}}} \times \frac{IFR_{\text{child}} \times C_{\text{crop}}}{RfD \times AT} \times$$

$$\frac{EF \times ED_{\text{adult}} \times IFR_{\text{adult}} \times C_{\text{crop}}}{BW_{\text{adult}} \times RfD \cdot AT}$$

式中: HQ_{life} ——终生平均风险商, EF 为暴露频率,365 d/a;

ED ——暴露持续时间(儿童: $ED = 6$ a;成人: $ED = 64$ a),等于平均寿命^[10];

IFR ——谷物的摄入量,kg/d,成人0.41 kg/d,儿童(0~6岁)0.20 kg/d

; C_{crop} ——谷物中 Cd 的质量比,mg/kg;

BW ——人体质重,kg,成人平均为60 kg,0~6岁儿童平均为13.6 kg^[3];

AT ——平均寿命(25 550 d);

RfD ——Cd 参考剂量 (1×10^{-3} mg/kg/d)^[11]。

当 $HQ_{\text{life}} > 1$ 时,暴露剂量超过参考剂量会给人类带来非致癌健康危害。因此假定 $HQ_{\text{life}} = 1$ 时,对应的谷物中 $\omega(\text{Cd})$ 就为谷物中 Cd 的非致癌风险临界值,具体计算公式如下:

$$C_{\text{crop}} = \frac{AT \times RfD \times BW_{\text{child}} \times BW_{\text{adult}}}{(BW_{\text{adult}} \times ED_{\text{child}} \times IFR_{\text{child}} \times BW_{\text{child}} \times ED_{\text{adult}} \times IFR_{\text{adult}})}$$

代入上述各参数,可计算出谷物中 Cd 的非致癌风险临界值为 0.133 mg/kg。

考虑到室内栽培试验土壤中的 Cd 是人为添加的,盆栽土壤中 Cd 的生物有效性不能反映农田土壤 Cd 实际生物有效性。在推算基于非致癌风险的农田土壤 Cd 临界值(0.01 mol/L CaCl_2 提取态)时,选用基于野外调查数据建立起的稻米和麦粉 $\omega(\text{Cd})$ 预测模型,采用逆向计算得出。通过统计野外调查土壤样品中 0.01 mol/L CaCl_2 提取态 $\omega(\text{Cd})$ 占土壤中 $\omega_{\text{总}}(\text{Cd})$ 的百分比,44 个稻田土壤调查样品中 0.01 mol/L CaCl_2 提取态 $\omega(\text{Cd})$ 占土壤中 $\omega_{\text{总}}(\text{Cd})$ 的百分数的平均值为 5.70%,99 个麦田调查样品中 0.01 mol/L CaCl_2 提取态 $\omega(\text{Cd})$ 占土壤中 $\omega_{\text{总}}(\text{Cd})$ 的百分数的平均值为 5.76%,推导和确定农田土壤中 Cd 环境质量标准(全量)。野外调查稻田和麦田土壤 ω (有机质)平均值分别取 36.06 g/kg 和 29.98 g/kg;pH 值参考江苏省实际分别取 5.0,6.0,7.0,8.0,见表 9。

表9 基于非致癌风险的农田土壤中 Cd 环境质量标准

农田土壤中 Cd 环境质量标准		土壤 pH 值			
		5.0	6.0	7.0	8.0
$\omega_{\text{总}}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	单种水稻	0.34	0.48	0.69	0.99
	单种小麦	0.59	0.70	0.82	0.97

4.2 江苏省农田土壤 Cd 环境质量标准建议值

江苏省农田土壤中 Cd 环境质量标准建议值见表 10。由于仅考虑了 Cd 的非致癌风险,所给出的农田土壤中 Cd 环境质量标准建议值是基于非致癌风险反推土壤 Cd 临界含量的最小值(也就是

最严格的标准),因此表 10 所列出的不同土壤 pH 值下土壤 Cd 的临界含量普遍低于文献[12]的结果。

上述方法推导结果的准确性和适用范围受到重金属有效性、土壤理化性质、作物品种等多

种因素的影响,而文献和文章研究所基于的土壤类型、理化性质〔(pH值、 ω (有机质))、重金

属有效性都不尽相同,因而推算结果有一定的差别。

表10 江苏省农田土壤中Cd环境质量标准建议值

农田土壤中Cd环境质量标准		土壤pH值			
		5.0	6.0	7.0	8.0
$\omega_{\text{总}}/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	单种水稻	0.34	0.48	0.69	0.99
	单种小麦	0.59	0.70	0.82	0.97
	稻麦轮作	0.34	0.48	0.69	0.97

[参考文献]

[1] 贺心然,宋晓娟,逢勇,等. 连云港市典型蔬菜基地土壤中重金属和有机氯污染调查与评价[J]. 环境监控与预警,2014,6(4):43-46.

[2] 张琪,沈志群,江峰琴. 钢丝绳产业区重金属对土壤-农产品的复合污染及生态风险评价[J]. 环境监控与预警,2013,5(6):49-52.

[3] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会. 食品安全国家标准食品中污染物限量:GB 2762—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012.

[4] 张富强,岳振华,王翠红,等. 邵阳市郊菜园土及部分蔬菜重金属和氟污染状况的研究[J]. 湖南农学院学报,1993,19(2):143-150.

[5] TESSIER A, CAMPBELL P G C, BISSON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry, 1979, 51:844-850.

[6] 颜世红,吴春发,胡友彪,等. 典型土壤中有效态镉CaCl₂提取

条件优化研究[J]. 中国农学通报,2013,29(9):99-104

[7] 焦文涛,蒋新,余贵芬,等. 土壤有机质对镉在土壤中吸附-解吸行为的影响[J]. 环境化学,2005,24(5):545-549.

[8] 张亚丽,沈其荣,姜洋. 有机肥料对镉污染土壤的改良效应[J]. 土壤学报,2001,38(2):212-218.

[9] U. S. Environmental Protection Agency (USEPA). Risk Assessment Guidance for Superfund. Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part A), Interim Final. EPA/540/1-89/002[S]. Washington, DC, 1989.

[10] MCLAUGHLIN M J, PARKER D R, CLARKE J M. Metals and micronutrients - food safety issues [J]. Field Crop Res, 1999, 60:143-163.

[11] US EPA. Exposure Factors Handbook, EPA/600/P-95/002Fa[S]. Washington, DC, 1997.

[12] 范中亮,季辉,杨菲,等. 不同土壤类型下Cd和Pb在水稻籽粒中累积特征及其环境安全临界值[J]. 生态环境学报,2010,19(4):792-797.

(上接第45页)

略高,相对误差为4%~18%;对于悬浮物较多且浓度较高的废水,机器采样较手工采样COD检测结果略低,相对误差 $\leq 3\%$;

(5) 在正常情况下,管路及采样头的污染,对NH₃-N和TP的监测结果影响不大;

(6) 样品留于采样器内开盖保存较长时间容易引起NH₃-N结果的偏低,因此采样完成后尽量不要让样品在采样器内存放过长时间;

(7) 妥善的维护保养是保障采样成功率的基本手段,也是保证采样准确性的重要手段。因此,专业的维护保养、细致的管路清洗以及严格的考核标准能在一定程度上降低机器采样和手工采样之间的偏差^[7-8]。

[参考文献]

[1] 王勇. 基层环境监测技术存在的问题及对策[J/OL]. 城市建

设理论研究(电子版),2015(20). <http://www.doc88.com/p-9079716916188.html>.

[2] 张建军,殷伟庆,董铮. 新型现场自动监控系统的构建与应用[J]. 环境监控与预警,2015,7(1):26-28,48.

[3] 国家环境保护总局. 水质自动采样器技术要求与检测方法:HJ/T 372—2007[S]. 北京:中国环境科学出版社,2008.

[4] 徐亮,钟声,曹军,等. 新形势下江苏省地表水自动监测站运行管理模式对策建议[J]. 环境监控与预警,2015,7(5):61-64.

[5] 于月平. 交流采样量测量误差来源及解决方法[J]. 电力自动化设备,2008,28(11):118-121.

[6] 王建国. COD水质在线监测仪运行管理问题与对策[J]. 中国资源综合利用,2011,29(2):42-44.

[7] 刘京. 国家地表水水质自动监测网建设与运行管理的探索与思考[J]. 环境监控与预警,2014,6(1):10-13.

[8] 史箴,段慧,张丹. 环境水质自动监测系统质量控制指标框架[J]. 四川环境,2013(1):35-38.

栏目编辑 胡伟 周立平