

# 污泥果肥利用中重金属迁移特征研究

明银安<sup>1,2</sup> 陶涛<sup>1</sup> 谢小青<sup>3</sup> 戴兰华<sup>3</sup> 冯晓东<sup>4</sup>

(1. 华中科技大学环境科学与工程学院, 武汉 430074; 2. 华中科技大学武昌分校, 武汉 430064;  
3. 厦门水务集团有限公司, 厦门 361000; 4. 华中科技大学远程与继续教育学院, 武汉 430074)

**摘要** 为了厦门城市污泥的安全利用, 将石渭头污水处理厂污泥经过好氧堆肥后施用于柚子树, 对重金属元素在土壤、树叶及果肉中的迁移特征进行了研究。结果表明: Cd 在土壤中的富集能力强; 重金属元素从土壤向树叶迁移累积能力比向果肉的大得多, 污泥肥料不能用于叶类食用植物的施用; Cr 向树叶、Ni 向果肉的迁移累积能力强; 泥肥的施用加重了土壤中 Cd 的污染, 提高了 Cr 向树叶、Ni 向果肉的迁移能力; 污泥果肥利用需降低 Ni 的浓度, 对污泥中含量较高的 Cu、Zn、Ni、Cr 和 Cd 需进行跟踪检测。

**关键词** 污泥 重金属 柚子树 迁移

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2008)12-1685-06

## Study on the transfer characteristic of heavy metals from sludge compost to grapefruit

Ming Yinan<sup>1,2</sup> Tao Tao<sup>1</sup> Xie Xiaoqing<sup>3</sup> Dai Lanhua<sup>3</sup> Feng Xiaodong<sup>4</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074;  
2. Wuchang Branch of Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430064;  
3. Xiamen Water Works Group Co. Ltd., Xiamen 361000;  
4. School of Distance and Continuing Education, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** To reuse municipal sludge safely, study on the transfer characteristic of heavy metals in soil, leaf and pulp of grapefruit was conducted after grapefruits were fertilized by sludge compost from Shiweitou wastewater treatment plant of Xiamen City. Results showed that the enrichment ability of cadmium in soil was the largest. The transfer and accumulation ability of heavy metals from soil to grapefruit leaves was much greater than that to pulp, so sludge compost can not be used for edible leafage plants directly. The transfer and accumulation ability of chromium to grapefruit leaves, nickel to pulp from soil was strongest, respectively. The pollution of cadmium in soil aggravated and the transfer ability of chromium to grapefruit leaves, nickel to pulp from soil was enhanced after grapefruits were fertilized by sludge compost. Concentration of nickel must be reduced before sludge application on grapefruit and concentration of copper, zinc, nickel, chromium and cadmium, content of which was very high in sludge, must be tracked and tested during the application.

**Key words** sludge; heavy metals; grapefruit; transfer

随着各地城市污水处理设施的兴建及污水处理率的提高, 国内污水厂污泥产量越来越大, 污泥成了多数污水处理厂亟待解决的问题<sup>[1,2]</sup>。厦门市污泥年增长率在 12% 以上, 大于全国平均增长率。2007 年污泥产量达到 95 000 m<sup>3</sup> (含水率为 76%)。如何安全地解决如此大量的污泥成为目前的紧迫任务。城市污泥既是污染物又是一种资源, 污泥的处理、处置与资源化利用相结合才是其最好的出路<sup>[3]</sup>。污泥除含有大量有机质、植物养分外, 同时也含有重金属、病原菌、寄生虫(卵)等有害物质, 如不妥善处理, 将造成二次污染<sup>[4]</sup>。特别是其中的重金属带来

的环境问题一直是被广泛关注的焦点之一<sup>[5-7]</sup>。本研究将厦门石渭头污水处理厂污泥经过适当处理后施用于柚子树, 对重金属在土壤、树叶及果肉中的迁移特征进行研究, 为厦门城市污泥的安全利用提供重要的理论指导和技术支持。

基金项目: 厦门市社会发展软科学研究计划项目(3502Z20041074)

收稿日期: 2008-04-08; 修订日期: 2008-07-22

作者简介: 明银安(1975~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事污水处理和污泥资源化研究。E-mail: myafx@163.com

## 1 材料与方法

### 1.1 污泥肥料的制取与施用

石渭头污水处理厂来水主要为居民生活污水,实验污泥取其脱水污泥,为生污泥,泥饼含水率为77%,有机质含量约占干物质的65%。每吨污泥中加入50 kg石灰、125~150 kg烟末、50~75 kg糠粉、50~100 kg蘑菇渣,将调理后的污泥进行15 d好氧堆肥处理,在堆肥的第7 d测温度,要求温度达到70℃,通过堆肥消除臭味,杀死病原菌和寄生虫卵,使灭菌率达95%;石灰作为固定剂,提高堆料的pH值,重金属在嗜热阶段形成不可溶的碳酸盐,并吸附到碱性材料上,可有效降低重金属的水溶态和交换态,从而达到固定重金属和降低金属有效性的目的。通过堆肥,污泥物理性状得到改善,含水率低于40%,外观呈现较松散,达到腐熟程度,能提高其肥效。将污泥成品肥(以下简称泥肥)施用于成年柚子树,每棵施用5~10 kg成品泥肥,1年2次,分别在催肥和挂果时期施用。

### 1.2 样品采集

#### 1.2.1 污泥

在堆肥前分别采集污泥样品试样1和试样2,将其自然风干,平铺于硬质白纸上,用玻璃棒压散,除去沙子和动植物残体等异物,用四分法缩分,至所需量样品。用玛瑙研钵磨至样品全部通过80~100目尼龙筛,混匀装入称量瓶中,放置在干燥器中备用。

#### 1.2.2 土壤、树叶和果实采样

(1) 采样点的布设:采用对比试验,对照柚子树林和试验柚子树林在同一个山坡上,相距2 m,土壤理化性质相似。对照柚子树施用普通肥料,试验柚子树施用泥肥。1年后,从对照和试验柚子树林中分别取样。取样方法:从柚子树山坡的上、中、下部分别取3个样,混合得到一个样,按此方法,分别从对照果林得到3个平行样本,编号C1、C2、C3;从试验果林得到3个平行样本,编号S1、S2、S3。

(2) 土壤采样:在树冠的滴水线上清除表面杂物,取0~15 cm土壤样本,将山坡上、中、下3个表层土壤混合得到一个(0~15 cm)样本;取15~30 cm土壤样本,将上、中、下3个深层土壤混合得到一个(15~30 cm)样本。

(3) 树叶、果实采样:在土壤采样树的同一个方向(东南方向)采摘一支长度约30 cm树枝和一个

柚子。

### 1.3 分析方法

#### 1.3.1 污泥和土壤中重金属微波消解方法

采用美国CEM公司Mars-5密闭微波消解系统,根据其SW 846-3051方法,采用逆王水(容积比为盐酸:硝酸=1:4)进行微波消解。汞的消解:采用硫酸-高锰酸钾消解法。

#### 1.3.2 树叶和果肉中重金属的消解

取样品5~10 g,于100 mL高型硬质玻璃烧杯中,加少许水湿润,加逆王水40 mL,于电热板上加热保持微沸,至有机物剧烈反应后,加高氯酸2~10 mL,继续加热至冒白烟,强火加热至样品溶解及呈灰白,小心赶去高氯酸,过滤,定容待测。

#### 1.3.3 重金属测定方法及使用仪器

总镉、总铅、总铜、总锌采用原子吸收分光光度法,总镍采用火焰原子吸收分光光度法,总铬采用文献[8]中的方法,以上均采用Aanalyst 400原子吸收分光光度计;总汞采用冷原子吸收分光光度法,上海华光F732-V智能型测汞仪;总砷采用原子荧光光度法,瑞利AFS610型原子荧光光度计。

## 2 结果与分析

### 2.1 污泥中重金属含量分析及堆肥产品质量控制

根据福建省土壤大多呈酸性至微酸性反应<sup>[9]</sup>,污泥重金属含量评价标准采用《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)中污泥农用时污染物控制标准(土壤pH<6.5)。如表1所示,试验污泥中Hg、As和Pb的含量远低于污泥农标准,Cu、Zn和Ni的含量很高,试样1的Cu和Ni分别超标1.8倍和3倍,试样2的Zn超标2倍,Cr和Cd的含量也有超标。

表1 试验污泥中重金属的含量

Table 1 Content of heavy metals in tested sludge

项目	(mg/kg)							
	Hg	As	Cr	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni
试样1	0.71	6.42	569	8.12	70	2 240	4 440	405
试样2	1.2	3.49	1 000	7.37	96.2	1 460	6 050	327
农用标准 (pH<6.5)	5	75	600	5	300	800	2 000	100

通过混合堆肥,污泥中重金属的生物有效性降低,有机成分的可利用率提高。因无污泥堆肥产品质量控制标准,参照垃圾标准《城镇垃圾农用控制

标准》(GB8172-87)规定的限值(见表 2),堆肥产品呈褐色,无臭味。

表 2 堆肥产品质量控制标准

Table 2 Quality control standard of compost product

编号	项目	标准限值*
1	杂物(%)	≤ 3
2	粒度(mm)	≤ 12
3	蛔虫卵死亡率(%)	95 ~ 100
4	大肠菌值	$10^{-1} \sim 10^{-2}$
5	总镉(以 Cd 计)(mg/kg)	≤ 3
6	总汞(以 Hg 计)(mg/kg)	≤ 5
7	总铅(以 Pb 计)(mg/kg)	≤ 100
8	总铬(以 Cr 计)(mg/kg)	≤ 300
9	总砷(以 As 计)(mg/kg)	≤ 30
10	有机质(以 C 计)(%)	≥ 10
11	总氮(以 N 计)(%)	≥ 0.5
12	总磷(以 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 计)(%)	≥ 0.3
13	总钾(以 K <sub>2</sub> O 计)(%)	≥ 1.0
14	pH	6.5 ~ 8.5
15	水分(%)	25 ~ 35
16	好氧呼吸速率(mg O <sub>2</sub> /(kg 挥发性物料 · h))	≤ 150
17	堆肥周期(d)	15
18	堆肥温度(℃)	65 ~ 70

注: \* 表中除 2、3、4 项外,其余各项均以干基计算

## 2.2 柚子树生长情况

施用泥肥后柚子树生长得很好,与对照样相比:枝叶更加茂盛;对照样柚子的最大平均直径分别为 524、560 和 543 mm,实验样的分别为 563、555 和 570 mm,直径最大差值达 8.8%,果实增大;果肉含水率提高;果期在原有基础上延长 20 ~ 30 d,增加了经济效益。这些现象都表明泥肥有益于柚子树的生长。

## 2.3 土壤中重金属的迁移特征

### 2.3.1 土壤的重金属污染状态

用富集因子来反映果树土壤中重金属的污染状态,其为土壤中重金属含量对福建省土壤背景值的比值<sup>[10]</sup>。对照样和试验样各富集因子见表 3。对照样 0 ~ 15 cm 土层重金属富集因子平均值为: Cd (18.130) > As (4.181) > Hg (2.839) > Ni (1.158) > Zn (1.125) > Cu (1.080) > Pb (0.919) > Cr (0.348);其 15 ~ 30 cm 土层平均值为: Cd (17.451) > As (4.101) > Hg (3.169) > Zn (2.092) > Ni (1.148) > Pb (0.985) > Cu (0.532) > Cr (0.342)。试验样 0 ~ 15 cm 土层富

集因子平均值为: Cd (20.611) > As (2.831) > Zn (1.987) > Hg (1.769) > Cu (1.736) > Ni (1.452) > Pb (0.998) > Cr (0.366);其 15 ~ 30 cm 土层平均值为: Cd (20.062) > As (2.820) > Zn (2.386) > Hg (2.181) > Ni (1.195) > Pb (0.824) > Cu (0.452) > Cr (0.286)。Cd 的富集因子高于其他因子 1 ~ 2 个数量级,达到 20,说明土壤中 Cd 的污染最严重,这是由于 Cd 的化学性质很活泼,其有机螯合物最不稳定,从而 Cd 的移动性可能高于其他离子,使其具有强烈的表聚性,30 cm 以上土壤易被污染<sup>[11]</sup>;As、Hg、Zn 和 Ni 的污染居其次;表层土壤中的 Cr 和 Pb,深层土壤中的 Cr、Pb 和 Cu 的富集因子均小于 1,说明土壤未受到它们的污染;Cr 的富集因子最小,这是因为 Cr 元素在土壤中以铬酸根阴离子的形式存在,不易受到土壤粘粒吸附作用的影响<sup>[11]</sup>。试验样与对照样相比,施用泥肥后的各元素富集因子大的趋势没有改变,只有个别排序有变化,如 Zn 排序前移两位, Ni 后移一位。因此从平均值角度:短时间内表层土壤中 Cd、Zn、Cu、Ni、Pb 和 Cr 的富集因子有增加,As 和 Hg 的富集因子有下降;深层土壤中 Cd、Zn 和 Ni 的富集因子有增加,其他元素富集因子有下降。这说明,泥肥施用短时间内重金属主要在表层土壤中积累,使表层土壤受到污染。

进一步对试验土壤与对照土壤各重金属实际含量进行差异显著性分析。由于属小样本分析,为增加结果的可靠性,采用两种方法进行分析,比较结果是否一致。首先,对 0 ~ 30 cm 土层 Cd 进行独立样本总体均值之差的假设检验,利用实测的对照组和试验组数据,运用 Microsoft Excel 软件的 *t*-检验(双样本等方差假设)进行数据分析。分析结果: $t = -3.950$ ,“*t* 双尾临界”为 2.228,有  $t < -2.228$ ,因此在 5% 的显著性水平下有理由认为泥肥施用后土壤中的 Cd 有显著增加。同理进行其他元素的差异显著性分析,结果为 Hg 和 As 显著减少,其他重金属变化不显著。

其次,对这 8 种重金属分表层和深层分别进行差异显著性分析: Cd 在深层显著增加,但在表层增加不显著; Hg 在表层和深层均显著减少; As 在表层显著减少,但在深层减少不显著;其他金属在表层与深层差异均不显著。由此可见,两种分析结果基本一致。

表3 柚子树土壤中重金属的富集因子

Table 3 Enrichment factor of heavy metals in soil of grapefruit

项目	土层 (cm)	C1	C2	C3	平均值	S1	S2	S3	平均值
Hg	0~15	2.469	2.963	3.086	2.839	1.852	1.975	1.481	1.769
	15~30	2.963	3.086	3.457	3.169	2.469	1.605	2.469	2.181
As	0~15	4.585	3.875	4.083	4.181	3.131	2.578	2.785	2.831
	15~30	4.931	3.599	3.772	4.101	3.356	2.491	2.612	2.820
Cu	0~15	1.389	0.63	1.222	1.080	1.065	1.829	2.315	1.736
	15~30	0.625	0.456	0.514	0.532	0.4	0.462	0.495	0.452
Pb	0~15	0.779	1.003	0.974	0.919	0.928	1.063	1.003	0.998
	15~30	0.868	1.029	1.057	0.985	0.814	0.834	0.825	0.824
Zn	0~15	0.967	1.318	1.089	1.125	1.245	1.427	3.289	1.987
	15~30	2.237	2.479	1.56	2.092	2.636	2.684	1.838	2.386
Cr	0~15	0.31	0.329	0.404	0.348	0.414	0.402	0.283	0.366
	15~30	0.305	0.327	0.395	0.342	0.271	0.334	0.254	0.286
Cd	0~15	18.889	17.241	18.259	18.130	18.315	21.852	21.667	20.611
	15~30	16.722	17.704	17.926	17.451	20.926	19.815	19.444	20.062
Ni	0~15	0.926	1.17	1.378	1.158	1.459	1.533	1.363	1.452
	15~30	0.911	1.096	1.437	1.148	1.37	1.119	1.096	1.195

由上所述,土壤原本受到 Cd 的污染很严重;泥肥施用后短时间内重金属主要在表层土壤中积累,但含量增加不显著;Cd 在深层增加显著;Hg 在表层和深层均显著减少;As 在表层显著减少;其他变化不显著。

### 2.3.2 土壤重金属污染评价

要较准确评价土壤受重金属污染的程度,需要用污染指数来说明。污染指数有单项污染指数 ( $P_i$ ) 和综合污染指数 ( $P$ ),计算公式如下:

$$P_i = \rho_i / S_i \quad (1)$$

式中: $\rho_i$  为土壤中重金属  $i$  的实测浓度 (mg/kg);  $S_i$  为土壤中重金属  $i$  的评价标准<sup>[12]</sup>。

污染指数能够很清楚的表示污染物的超标倍数和污染程度。若  $P_i > 1$ , 则该单项污染指数超标,表示土壤已受到污染,  $P_i$  越大表明土壤的受污染程度

越高;若  $P_i \leq 1$ , 则该单项污染指数符合安全标准,表示土壤未受污染。

经计算,土壤中重金属污染指数只有 Cd 的各项污染指数和 Zn 的个别指数超过 1, 列于表 4; 其他重金属的污染指数均小于 1, 说明他们未对土壤造成污染。由表 4 可知, 各样点土壤中 Cd 的单项污染指数均大于 3, 说明该地区的土壤原本受到 Cd 的重度污染, 施用泥肥后, Cd 的污染加重。其次是 S3 (0~15 cm) 的 Zn 的单项污染指数略大于 1, 说明该采样点土壤中 Zn 有超标; 但污泥的施用使 Zn 的污染指数提高了, 接近于 0.9, 因此, 后面应对锌给予更多的关注。

综上所述, 土壤原本受到 Cd 的重度污染; 泥肥施用后短时间内重金属主要在表层土壤中积累, 除 Cd 的污染加重外, 其他重金属未对土壤造成污染。

表4 土壤重金属污染指数

Table 4 Pollution index of heavy metals in soil

项目	土层 (cm)	$P_i$ (C1)	$P_i$ (C2)	$P_i$ (C3)	$P_i$ (S1)	$P_i$ (S2)	$P_i$ (S3)
Cd	0~15	3.400	3.103	3.287	3.297	3.933	3.9
	15~30	3.010	3.187	3.227	3.767	3.567	3.5
Zn	0~15	0.320	0.436	0.360	0.412	0.472	1.088
	15~30	0.740	0.820	0.516	0.872	0.888	0.608

### 2.4 土壤-柚子树系统重金属迁移与积累

植物迁移累积率 ( $\beta_i$ ) 即转移因子, 可较好地反映植物对土壤重金属的富集能力和重金属从土壤向植物的迁移累积强度<sup>[13]</sup>。重金属迁移累积率的计

算公式为:

$$\beta_i = w_i / \rho_i \quad (2)$$

式中: $\beta_i$  为重金属  $i$  的植物迁移累积率;  $w_i$  为植物中重金属  $i$  的质量分数, 即重金属  $i$  的含量 (mg/kg);

$\rho_i$  为土壤中重金属  $i$  的质量分数,即重金属  $i$  的实测浓度(mg/kg)。表 5 列出了柚子树对土壤中重金属

表 5 土壤-柚子树系统重金属迁移累积率

Table 5 Transfer ratio of heavy metals in soil-grapefruit system

项目	土层			树叶					果肉								
	(cm)	$\beta_i(C1)$	$\beta_i(C2)$	$\beta_i(C3)$	平均值	$\beta_i(S1)$	$\beta_i(S2)$	$\beta_i(S3)$	平均值	$\beta_i(C1)$	$\beta_i(C2)$	$\beta_i(C3)$	平均值	$\beta_i(S1)$	$\beta_i(S2)$	$\beta_i(S3)$	平均值
Hg	0~15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15~30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
As	0~15	0.007	0.015	0.006	0.009	0.006	0.008	0.004	0.006	/	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0004	0.0002	0.0002
	15~30	0.007	0.016	0.007	0.010	0.006	0.008	0.005	0.006	/	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0004	0.0002	0.0002
Cu	0~15	0.517	1.279	0.417	0.738	1.017	0.197	0.202	0.472	/	0.0341	0.0238	0.0290	0.0186	0.0119	0.0124	0.0143
	15~30	1.148	1.766	0.991	1.302	2.705	0.781	0.944	1.477	/	0.0471	0.0565	0.0518	0.0495	0.0473	0.0579	0.0516
Pb	0~15	0.211	0.197	0.1	0.169	0.124	0.072	0.057	0.084	/	0.0037	0.0009	0.0023	0.001	0.0005	0.0011	0.0009
	15~30	0.189	0.192	0.092	0.158	0.141	0.091	0.069	0.100	/	0.0036	0.0008	0.0022	0.0012	0.0007	0.0014	0.0011
Zn	0~15	0.17	0.109	0.113	0.131	0.065	0.036	0.025	0.042	/	0.0117	0.0088	0.0103	0.0069	0.0052	0.0023	0.0048
	15~30	0.074	0.058	0.079	0.070	0.031	0.019	0.046	0.032	/	0.0062	0.0061	0.0062	0.0032	0.0028	0.0042	0.0034
Cr	0~15	2.047	2.897	1.695	2.213	2.035	2.084	4.265	2.795	/	0.0045	0	0.0023	0.0013	0.001	0.0013	0.0012
	15~30	2.079	2.919	1.736	2.245	3.107	2.507	4.752	3.455	/	0.0046	0	0.0023	0.002	0.0012	0.0014	0.0015
Cd	0~15	0.03	0.118	0.062	0.070	0	0	0.032	0.011	/	0	0	0	0	0	0	0
	15~30	0.034	0.115	0.063	0.071	0	0	0.036	0.012	/	0	0	0	0	0	0	0
Ni	0~15	0.297	0.141	0.091	0.176	0.148	0.099	0.139	0.129	/	0.114	0	0.0570	0.086	0.07	0	0.0520
	15~30	0.302	0.15	0.087	0.180	0.158	0.135	0.172	0.155	/	0.122	0	0.0610	0.091	0.095	0	0.0620

注:对照样 C1 果肉样品由于某些原因,未能进行检测

从表 5 可以看出:柚子树对不同重金属的富集能力不同;土壤中重金属向树叶的迁移累积率比向果肉的大得多,如 Cr 大 3 个数量级,其他元素一般大 2 个数量级;树叶和果肉中的 Hg、果肉中的 Cd 含量低,未检出,说明 Hg 向柚子树和 Cd 向果肉的迁移能力极弱,可能由于它们不是植物生长的必需元素,不利于植物吸收<sup>[14]</sup>;除 Zn 外,大部分元素 15~30 cm 土层比 0~15 cm 土层的迁移率大,这可能与柚子树的根系较深有关,也可能与重金属易在表层土壤中富集有关。对照样 0~15 cm 土层重金属向树叶的平均迁移累积率为: $\beta_{Cr} > \beta_{Cu} > \beta_{Ni} > \beta_{Pb} > \beta_{Zn} > \beta_{Cd} > \beta_{As}$ ,其 15~30 cm 土层中除 Cd 和 Zn 位置交换外,迁移累积率的大小顺序没有大的变化;试验样两土层的平均迁移累积率顺序均与对照样 0~15 cm 层相同。这表明,对照样和试验样中,树叶对 Cr 的吸收能力均为最强,其次是 Cu,对 As、Cd 和 Zn 的吸收能力较弱;泥肥的施用提高了 Cr 和 15~30 cm 土层 Cu 的迁移率,其余各元素的迁移率均下降。树叶对土壤中不同土层、不同试样的重金属的富集能力虽有一定的差异,但趋势却基本一致。进行对照样和试验样树叶中重金属含量的差异显著性分析,结果为泥肥的施用使树叶中 Zn 的含量显著减少,其他 7 种元素含量变化差异不显著,说明泥肥的

施用未引起重金属对树叶的污染。

各土层中重金属向果肉的平均迁移累积率比树叶的小得多,对照样和试验样两土层的平均迁移能力均为  $\beta_{Ni} > \beta_{Cu} > \beta_{Zn} > \beta_{Cr} > \beta_{Pb} > \beta_{As}$ (除对照样 0~15 cm 层  $\beta_{Cr} = \beta_{Pb}$  外),这表明,虽然果肉对不同土层、不同试样的重金属的富集能力大小有区别,但趋势也是一致的;果肉对 Ni 吸收的吸收能力较强,其次是 Cu 和 Zn,对 As、Pb 和 Cr 的吸收能力较弱;泥肥的施用提高了 As 和 15~30 cm 土层 Ni 的迁移率;由于 As 的含量很低,所以泥肥的施用不会造成 As 的危害;Ni 的迁移率提高幅度很小;其余各元素的迁移率均下降。

由表 6 可知,树叶样品中 Cr、Ni、Cu、Pb 和 2/3 的 Cd 浓度很高,均超出国家食品卫生标准,其中 Cr 和 Ni 分别超出标准达 99 倍和 18 倍,污肥的施用导致树叶中 Cr(S1、S3)和 Ni(S3)的含量增加,因此,污泥肥料不能用于叶类食用植物的施用。在果肉中:As、Cr、Pb、Cu 和 Zn 远低于国家食品卫生标准,但 Ni 的含量远超出食品卫生标准。Ni 的毒性有急性和慢性,也有致癌和致畸形作用<sup>[15]</sup>,污泥利用前必须对 Ni 的浓度进行控制。Cu 和 Zn 对生物体来说是营养素,Cu 在果肉中含量很低;Zn 向植物迁移的能力弱,柚子树叶和果肉中 Zn 的含量低,泥肥的

施用使树叶中 Zn 的含量显著减少。因此,泥肥的施用短期内不会造成 Cu 和 Zn 的危害。但浓度太高时,会对植物的生长产生抑制作用,所以,长期施用泥肥时,必须对 Cu 和 Zn 的浓度进行监控。土壤中 Cd 的浓度很高,为重度污染,但 Cd 向树叶的迁移率小,果肉中浓度未检出,说明 Cd 在土壤中的富集能力最强。

表6 树叶和果肉中重金属的含量

Table 6 Content of heavy metals in leaf and pulp

		(mg/kg)							
项目	Hg	As	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Ni	
食品卫生标准	0.01	0.5	10	1	20	0.5	0.03	0.2	
树叶	C1	0	0.193	15.5	5.74	13.6	26.2	0.03	3.71
	C2	0	0.328	17.4	6.88	11.9	39.4	0.031	2.22
	C3	0	0.144	11	3.39	10.2	28.3	0.11	1.69
	S1	0	0.113	23.4	4.01	6.73	34.8	0.061	2.92
	S2	0	0.114	7.79	2.66	4.24	34.6	0	2.04
	S3	0	0.0704	10.1	1.99	6.92	49.9	0	2.55
果肉	C1	/	/	/	/	/	/	/	
	C2	0	0.0028	0.464	0.13	1.28	0.0617	0	1.8
	C3	0	0.00169	0.627	0.03	0.789	0	0	0
	S1	0	0.00208	0.428	0.034	0.706	0.0221	0	1.69
	S2	0	0.00563	0.472	0.019	0.613	0.0164	0	1.44
	S3	0	0.00322	0.619	0.039	0.638	0.0147	0	0

### 3 结论

(1) 厦门石渭头污水处理厂城市污泥中 Cu、Zn、Ni 含量很高,均超过农用标准,Cr 和 Cd 也有超标。

(2) Cd 在土壤中的富集能力强,土壤原本受到 Cd 的重度污染;泥肥施用后短时间内重金属主要在表层土壤中积累,除深层 Cd 的含量显著增加,污染加重外,其他重金属含量变化不显著,未对土壤造成污染。

(3) 重金属向树叶迁移累积能力比向果肉的大得多,泥肥不能用于叶类食用植物的施用。Cr 向树叶迁移累积能力最强,其次是 Cu;泥肥的施用提高了 Cr 和 Cu 向树叶的迁移率,但未引起重金属对树叶的污染。Ni 向果肉迁移累积能力最强,其次是 Cu 和 Zn;泥肥的施用提高了 Ni 和 As 向果肉的迁移率,但幅度很小。

(4) 污泥果肥利用时,其含量较高的 5 种元素中,Zn 和 Cu 是植物生长需要的营养元素,短期内不会造成危害,但长期施用时必须进行监控;果肉中 Ni 的含量超标,污泥果肥利用前必须降低 Ni 的浓度;泥肥的施用加重了土壤中 Cd 的污染、提高了 Cr

向树叶、Ni 向果肉的迁移能力,因此污泥果肥利用时这 3 种元素均存在较大的潜在危害,需进行长期跟踪检测。

### 参考文献

- [1] 杜欣,金宜英,张光明,等. 城市生活污泥烧结制陶粒的两种工艺比较研究. 环境工程学报, 2007, 1(4): 109 ~ 114
- [2] 余杰,田宁宁,王凯军,等. 中国城市污水处理厂污泥处理、处置问题探讨分析. 环境工程学报, 2007, 1(1): 82 ~ 86
- [3] 杨小文,杜英豪. 污泥处理与资源化利用方案选择. 中国给水排水, 2002, 18(4): 31 ~ 33
- [4] 罗柏华,高广忠. 污水厂污泥快速干化焚烧及制肥新工艺. 环境工程, 2006, 24(5): 64 ~ 66
- [5] 张玮,傅大放. 不同污泥处置方法中重金属的迁移规律. 中国给水排水, 2007, 23(12): 22 ~ 25
- [6] Towers E., Paterson W. Sewage sludge application to land: A preliminary assessment of the sensitivity of Scottish soils to heavy metal inputs. Soil Use and Management, 1997, 13(3): 149 ~ 155
- [7] Richard B. K., Steenhuis T. S. Effect of sludge processing mode, soil texture and soil pH on metal mobility in undisturbed soil columns under accelerated loading. Environ. Pollut., 2000, 109: 327 ~ 346
- [8] 宋仁元,张亚杰,王维一,等. 水和废水水柱检验法. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985. 126 ~ 127, 168
- [9] 樊后保. 福建土壤对酸沉降的相对敏感性评价与区划. 福建林学院学报, 2001, 21(3): 198 ~ 202
- [10] 郑娜,王起超,郑冬梅. 锌冶炼厂周围重金属在土壤-蔬菜系统中的迁移特征. 环境科学, 2007, 28(6): 1349 ~ 1354
- [11] 李亮亮,张大庚,依艳丽,等. 葫芦岛市连山区·龙港区土壤重金属垂直分布与迁移特征. 安徽农业科学, 2007, 35(13): 3916 ~ 3918, 3978
- [12] 林芎华. 福建漳州菜园土壤重金属污染评价及防治. 亚热带植物科学, 2007, 36(2): 45 ~ 47
- [13] 韩晋仙,马建华. 污灌区土壤-小麦系统重金属污染、迁移和积累——以开封市化肥河污灌区为例. 生态环境, 2004, 13(4): 578 ~ 580, 591
- [14] 朱志良,梁栋也,张荣华,等. 污泥堆肥土地利用中重金属在几种观赏植物中富集作用的研究. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 690 ~ 693
- [15] 傅逸根,胡欣,俞苏霞. 食品中镍限量卫生标准研究. 浙江省医学科学院学报, 1999, 10(1): 9 ~ 11