

丘锦荣,易皓,刘清云,等.2013.不同玉米品种对新鲜城市污泥处理效果的初步研究[J].环境科学学报,33(11):2987-2992
Qiu J R, Yi H, Liu Q Y, et al. 2013. Effects of different cultivars of maize by planting on fresh municipal sewage sludge [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(11):2987-2992

不同玉米品种对新鲜城市污泥处理效果的初步研究

丘锦荣^{1,2}, 易皓¹, 刘清云¹, 卢文洲¹, 李基怀¹, 许振成¹, 吴启堂^{2,*}

1. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655

2. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642

收稿日期:2013-06-17 修回日期:2013-07-15 录用日期:2013-07-15

摘要:寻求城市污泥安全农用的方法是当前城市污泥处理处置的重要研究课题之一。采用小区试验,研究了 8 个玉米品种对新鲜城市污泥处理效果。结果表明:所选择的 8 个玉米品种均可以在污泥上生长,大丰 5 品种对锌的累积量最低,04 杂 1 品种对镉累积量最低,会单 4 品种对铜和铅累积量最低;玉米种植可显著降低城市污泥中的含水率,比不种玉米的对照处理(69.43%)水分去除率提高 9.05%~17.50%,有利于城市污泥的干化及后续利用;各玉米品种植株中的总养分(氮+五氧化二磷+氧化钾)均高于有机肥标准(NY525—2012)的总养分要求,而重金属镉和铅的质量浓度除赛田 3 品种外其他品种均低于农用有机肥标准(NY525—2012)的限量值;玉米种植后城市污泥中的总养分和锌、镉、铜、铅 4 种重金属质量浓度变化很小。可见,利用玉米处理新鲜的城市污泥既可降低城市污泥中的水分,又可以产生一定量优质的有机肥原料,为城市污泥的资源化利用提供新思路。

关键词:城市污泥; 农用; 玉米; 重金属

文章编号:0253-2468(2013)11-2987-06 中图分类号:X703 文献标识码:A

Effects of different cultivars of maize by planting on fresh municipal sewage sludge

QIU Jinrong^{1,2}, YI Hao¹, LIU Qingyun¹, LU Wenzhou¹, LI Jihuai¹, XU Zhencheng¹, WU Qitang^{2,*}

1. South China Institute of Environmental Sciences, MEP, Guangzhou 510655

2. College of Natural Resource and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642

Received 17 June 2013; received in revised form 15 July 2013; accepted 15 July 2013

Abstract: Exploring security methods for agricultural application of municipal sewage sludge (MSS) is an important research subject for the treatment and disposal of MSS. In this study, a pilot experiment was conducted and eight cultivars of maize (*Zea mays*) were planted on the fresh MSS directly. The results showed that all cultivars could grow normally on fresh MSS. The lowest accumulation of Zn and Cd was by cultivars Dafeng5 and 04Za1, respectively, while that of Cu and Pb was by cultivar Huidan4. Planting maize could reduce significantly the rate of water content of MSS. The loss of water content in the treatments with plants was higher by 9.05%~17.50% than the control (without plant), which was beneficial to drying and stabilization of MSS. The total nutrient (nitrogen + P₂O₅ + K₂O) in maize plants were higher than those required for organic fertilizer (NY525—2012). The concentrations of Cd and Pb in maize were below the lowest concentration limit of standard of agricultural organic fertilizer (except cultivar Saitian3). At the same time, the changes of N, P, and K concentrations in MSS were very small after planting maize. All results indicated that treating fresh sewage sludge by maize could reduce water content, and produce the materials of organic fertilizer at high quality. This study provided a new way for resource use of sewage sludge.

Keywords: municipal sewage sludge; agricultural application; maize; heavy metals

1 引言(Introduction)

卫生填埋、焚烧处理、堆肥处理和土地利用是

包括我国在内的许多国家常用的污泥处理处置方法(Fytli *et al.*, 2008; 马娜等, 2003)。污泥的处理和利用应同时考虑环境、经济、社会 3 方面的因素。堆

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(No. PM-zx021-201211-124); 国家科技支撑计划项目(No. 2007BAD89B14)

Supported by the Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. PM-zx021-201211-124) and the National Science and Technology Support Program (No. 2007BAD89B14)

作者简介: 丘锦荣(1979—), 男, E-mail: qiujinrong@scies.org; * 通讯作者(责任作者), E-mail: wuqitang@scau.edu.cn

Biography: QIU Jinrong (1979—), male, E-mail: qiujinrong@scies.org; * Corresponding author, E-mail: wuqitang@scau.edu.cn

肥化是国内外污泥稳定化的主要手段 (Jayara *et al.*, 2010; 陈同斌等, 2009), 而稳定化的污泥的土地利用是主要的污泥处置方法 (张增强等, 2004; NRC, 2002). 农用资源化是一种具有广阔前景的污泥处置方法, 但是我国污泥中的重金属超标是限制其资源化的主要因素 (陈同斌等, 2003), 而目前对污泥中过量重金属的去除仍然存在困难 (何东等, 2010; Singh *et al.*, 2008). 因此寻求既可以避免重金属的危害 (主要是避免进入食物链), 又可以达到资源化目的的方法显得尤为重要. 玉米除了作为粮食、饲料作物之外还是一种能源植物 (李刚等, 2011; 丘锦荣等, 2010a; Wu *et al.*, 2007; 黑亮等, 2007; 王丽红等, 2006), 具有广泛的应用前景; 而且玉米的生物量大, 又是旱作作物, 对污泥干燥和稳定处理效果较为有利, 所以选择玉米作为研究对象之一.

本试验通过直接在新鲜污泥上种植玉米, 研究

玉米在新鲜污泥上的生长状况及对污泥理化性质的影响, 进一步分析玉米地上部分作为有机肥原料的潜力. 试图通过该方法处理污泥, 达到使污泥干化和稳定化的效果, 同时生产一定量可作为有机肥原料的附加产品 (玉米地上部分), 将高风险的城市污泥转化为低风险的有机肥料原料, 避免重金属直接进入食物链, 为城市污泥的更广泛的资源化利用提供参考.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 供试材料

试验所用的材料包括城市污泥和玉米.

城市污泥: 污泥 I、污泥 II 和污泥 III 分别于不同时间取自广州大坦沙污水处理厂未消化的脱水污泥, 基本理化性质见表 1. 本实验采用的污泥样品为污泥 III.

表 1 城市污泥的理化性质

Table 1 Main physico-chemical properties of municipal sludge

污泥类型	含水量	全氮	全磷	全钾	容重 /(g·cm ⁻³)	大肠杆菌 /(10 ³ MPN·g ⁻¹)
污泥 I	78.72% ± 1.21%	3.37% ± 0.05%	2.06% ± 0.04%	1.44% ± 0.05%	—	—
污泥 II	80.61% ± 0.65%	3.18% ± 0.12%	2.27% ± 0.02%	1.99% ± 0.03%	1.0035 ± 0	1100 ± 59
污泥 III	83.70% ± 0.78%	3.33% ± 0.08%	0.52% ± 0.01%	0.83% ± 0.02%	—	—

供试玉米: 本试验选用了 8 个玉米品种, 其中, TN502、TN506、天塔 3、04 杂 1、北育 203 和大丰 5 号均为来自北方的品种, 具有抗旱抗病的特性; 会单 4 号, 种子购买于云南农科院育种中心; 赛田 3 号, 属于甜玉米品种, 购于广东农科院.

育苗过程中, 先用自来水浸泡玉米种子, 将浮在水面的干瘪的种子去掉, 滤干水分后, 再用蒸馏水冲洗 3~4 次, 吸干水分. 各品种挑选约 30 颗外观相近的玉米种子均匀撒至育苗板的基质土上, 再盖上约 1 cm 厚的营养土, 不使种子露出, 育苗板的土层约 8 cm 厚. 玉米种子播种后在培育过程中每天都用去离子水浇淋, 保持土壤湿润. 待玉米出苗长至 10 cm 左右, 便挑选大小、高度均匀的玉米苗用于移栽.

2.2 试验设计

试验在华南农业大学资环学院环境科学与工程系网室进行, 在试验地上搭制一个通风的塑料棚, 以达到防雨露效果. 本研究设置 8 个玉米品种处理, 同时设置空白对照 (不种植物), 共 9 个处理, 每

个处理 3 个重复 (图 1). 各处理体积约为 0.12 m³ (长、宽、高分别为 0.3、0.3、0.4m), 各处理间用砖块和 PVC 板隔开, 每处理放置新鲜城市污泥厚度为 0.3 m, 重量约为 90 kg, 各处理种植玉米 9 株, 种植时间为 3~4 个月, 期间不施肥、不浇水.

玉米种植 100 d 后收获玉米和取污泥样品进行分析.

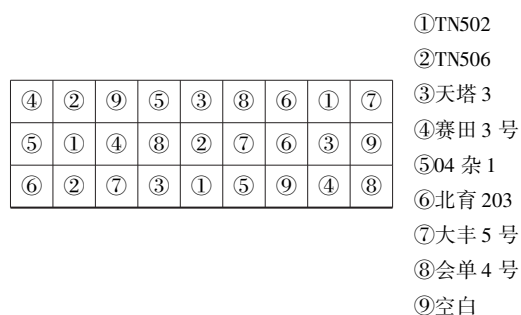


图 1 各品种排列位置图

Fig. 1 Distribution of corn cultivars in the experiment

2.3 样品分析测定

2.3.1 污泥样品分析测定 污泥的含水量、有机

质、全 N、全 P、pH 值均采用常规分析测定方法,主要参照《土壤农业化学分析法》(鲁如坤,2000),污泥的全钾、全锌、全铜、全镉采用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 消煮-原子吸收测定法,参照国家标准方法(GB/T 17138—1997)。

2.3.2 植物样品分析测定 玉米收获时,将植物从根部剪开,收获地上部分,并记录生物量。每处理选取其中 3 株用自来水和去离子水洗净,吸水纸吸干表面水,测定鲜重。首先将样品置于烘箱内 105 °C 杀青 30 min,然后 70 °C,48 h 烘干,记录干重。干样用玛瑙粉碎机粉碎过 0.25 mm 的尼龙网筛,备测 N、P、K 和重金属。植物全氮、全磷、全钾测定采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法,重金属质量浓度测定采用干灰化-原子吸收光谱法,其具体测定参照《土壤农业化学分析法》(鲁如坤,2000)。

2.3.3 水堇 (*Lepidium sativum* L) 种子发芽系数 (Germination Index, GI) 的具体测定 新鲜污泥样品用去离子水按土水比 1:10 (以干质量计) 浸提 1h 后在 4 °C 低温条件下,12000 r·min⁻¹ 离心 15 min,过 0.45 μm 纤维树脂滤膜,收集其滤液。培养皿内垫 1 张滤纸,均匀放入 10 颗水堇种子,加入浸提滤液 5.0 mL,在 25 °C 黑暗的培养箱中培养 48h 后,计算发芽率并测定根长,每个样品做 3 个重复,同时以去离子水作空白试验,然后用公式(1) 计算种子的发芽系数。

$$GI(\%) = \frac{\eta_T \times L_T \times 100\%}{\eta_B \times L_B} \quad (1)$$

式中: η_T 为处理的发芽率, η_B 为空白发芽率, L_T 为处理的根长, L_B 为空白的根长。

2.4 数据处理

采用 Excel 软件进行数据输入和简单处理,并用 SAS8.1 软件进行数据统计和分析。

3 结果和讨论 (Results and discussion)

3.1 玉米生长情况及生物量

玉米种植 100 d 后,取玉米地上部分,进行烘干后称重,得出不同玉米品种的地上部分生物量(干重)如图 2 所示。

从图 2 可以看出,各玉米品种生物量由大至小依次为:赛田 3 > 天塔 3 > 04 杂 1 > 会单 4 > 大丰 5 > TN502 > TN506 > 北育 203。生物量是反映植物生长最直接的指标,根据试验测定所选用的 8 个玉米品种的生物量初步推测,赛田 3、天塔 3 和 04 杂 1 品种在污泥上生长获得的生物量较大,推测它们在

新鲜城市污泥上生长的适应能力较强。

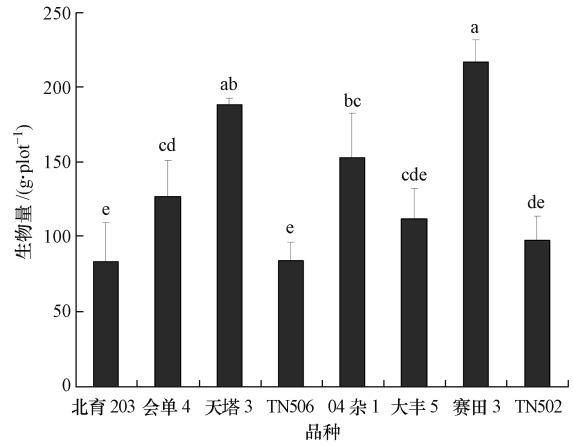


图 2 各玉米品种的生物量

Fig. 2 Biomass of different maize cultivars

(注:根据 Duncan 检验($p=0.05$),带有相同字母的处理间无显著差异, $n=3$.)

3.2 玉米植株的氮磷钾和重金属质量浓度

从表 2 可以看出,不同玉米品种植株中的氮、磷、钾等营养元素的质量浓度有较大的差异。从植株中氮元素的质量浓度分布看,赛田 3 品种显著高于大丰 5、TN506 和北育 203 品种,其余品种间氮的质量浓度并无明显差异;从植株中磷元素的质量浓度分布看,赛田 3、会单 4、TN502 和 04 杂 1 品种植株中磷元素的质量浓度较高,且显著高于大丰 5 和

表 2 不同玉米品种茎叶的 N、P、K 质量浓度

Table 2 Concentrations of N, P and K in the shoots of different maize cultivars

品种	N 质量浓度 /(g·kg ⁻¹)	P 质量浓度 /(g·kg ⁻¹)	K 质量浓度 /(g·kg ⁻¹)	总养 分 [#]
北育 203	43.99 ± 11.50 ^b	2.83 ± 0.57 ^{cd}	9.87 ± 0.64 ^b	6.24%
会单 4	50.07 ± 8.90 ^{ab}	3.45 ± 0.49 ^{abc}	12.62 ± 1.56 ^a	7.32%
天塔 3	48.01 ± 9.60 ^{ab}	2.53 ± 0.25 ^d	8.96 ± 0.81 ^b	6.46%
TN506	39.71 ± 6.95 ^b	2.97 ± 0.38 ^{bed}	8.42 ± 1.91 ^b	5.67%
04 杂 1	46.13 ± 7.83 ^{ab}	3.52 ± 0.24 ^{ab}	10.65 ± 1.16 ^{ab}	6.71%
大丰 5	44.49 ± 7.20 ^b	2.69 ± 0.15 ^d	10.02 ± 0.87 ^b	6.28%
赛田 3	60.6 ± 6.22 ^a	3.35 ± 0.22 ^{abc}	10.59 ± 0.47 ^{ab}	8.11%
TN502	51.78 ± 3.51 ^{ab}	3.73 ± 0.15 ^a	9.66 ± 1.33 ^b	7.20%
标准 (NY525—2012)				≥5%

注:根据 Duncan 检验($p=0.05$),带有相同字母的同一列数据间无显著差异, $n=3$; #根据有机肥标准(NY525—2011)中定义,总养分分为“氮+五氧化二磷+氧化钾”的质量分数(以烘干基计)。

天塔 3 品种;钾元素在各品种中的质量浓度大小依次为:会单 4 > 04 杂 1 > 赛田 3 > 大丰 5 > 北育 203 > TN502 > 天塔 3 > TN506。综合 3 种养分总含量,赛田

3、会单 4、TN502 总养分较高,较适合作为有机肥原料。

与国家有机肥料新标准(NY525—2012)对有机肥总养分的最低要求相比,本试验选用的 8 个玉米品种的地上部分总养分(氮 + 五氧化二磷 + 氧化钾)均高于有机肥料新标准中总养分的最低限值(5%),因此,从养分角度分析,本试验所选用的 8 个玉米品种植株地上部分均可作为优质的有机肥原料。

从表 3 可得,不同玉米品种中锌、镉、铜、铅的质量浓度有一定的差异,但总体来说,玉米品种对锌、镉、铜、铅 4 种重金属敏感性较低,这与有关学者的研究结果基本一致(Lei *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2007; 黑亮等, 2007; 郭晓方等, 2010)。

从锌在不同玉米品种植株中的质量浓度分布看,大丰 5 品种植株中锌的质量浓度最低,显著低于天塔 3、TN506、04 杂 1、赛田 3、TN502 品种,而 TN502 品种植株中锌的含量显著高于其余品种;从镉在不同玉米品种植株中的质量浓度分布看,04 杂 1 品种的质量浓度最低,显著低于赛田 3 和天塔 3,而其余品种之间植株中镉的质量浓度没有显著差异;从铅在不同玉米品种植株中的质量浓度分布看,会单 4 品种的质量浓度最低,显著低于 TN502、04 杂 1、大丰 5、TN502 品种,而 TN502 品种中的质量浓度最高;从铜在不同玉米品种植株中的质量浓度分布看,会单 4 中的质量浓度最低,显著低于 TN502、04 杂 1、TN502 品种,而 TN506 品种中的质量浓度最高。综合以上分析,选用的 8 个玉米品种中,会单 4 品种植株中铜和铅的质量浓度最低,表明该品种是重金属铜和铅的低累积量品种,与卫泽斌等(2005)的研究结果一致,大丰 5 和 04 杂 1 品种植株中锌和镉的质量浓度最低,可能是重金属锌和镉的低累积品种。

与国家有机肥料中重金属(镉和铅)质量浓度限制标准(NY525—2012)相比,对于重金属镉,上述在污泥上种植的 8 个玉米品种的地上部分镉的质量浓度除赛田 3 号品种外其他均低于有机肥料镉的最低限值;对于重金属铅,上述在污泥上种植的 8 个玉米品种的地上部分铅的质量浓度均远低于有机肥料铅的最低限值;因此,除赛田 3 品种外,其他品种的地上部分均可以作为有机肥料的原料进行安全的农用。

表 3 不同玉米品种植株中 Zn、Cd、Cu、Pb 质量浓度

品种	mg·kg ⁻¹			
	Zn	Cd	Cu	Pb
北育 203	142.2 ± 24.6 ^{cd}	1.69 ± 0.49 ^{ab}	9.68 ± 2.76 ^{cd}	1.56 ± 0.19 ^{abc}
会单 4	163.1 ± 26.7 ^{bcd}	1.75 ± 0.18 ^{ab}	7.20 ± 3.42 ^d	0.81 ± 0.33 ^c
天塔 3	194.9 ± 31.9 ^{abc}	2.89 ± 0.21 ^a	11.66 ± 2.39 ^{bcd}	1.24 ± 0.48 ^{abc}
TN506	214.9 ± 41.2 ^{ab}	1.66 ± 1.09 ^{ab}	14.02 ± 2.03 ^{abc}	2.00 ± 0.39 ^a
04 杂 1	211.5 ± 22.3 ^{ab}	1.16 ± 0.39 ^b	15.53 ± 2.15 ^{ab}	1.75 ± 0.50 ^{ab}
大丰 5	133.9 ± 20.0 ^d	2.18 ± 0.54 ^{ab}	13.72 ± 3.05 ^{abc}	1.06 ± 0.29 ^{bc}
赛田 3	197.2 ± 30.5 ^{ab}	3.25 ± 0.95 ^a	11.30 ± 3.33 ^{bcd}	1.37 ± 0.68 ^{abc}
TN502	240.5 ± 29.8 ^a	1.89 ± 0.71 ^{ab}	17.95 ± 1.43 ^a	2.06 ± 0.47 ^a
标准(NY525—2011)	-	≤3	-	≤50

注:根据 Duncan 检验($p=0.05$),带有相同字母的同一列数据间无显著差异, $n=3$ 。

3.3 玉米种植后污泥生物学性质变化

由表 4 可知,在种植玉米前,污泥的含水率 83.7%。种植玉米 50 d 后,各处理后的污泥含水率明显下降,其含水率减少量比对照(69.43%)高 9.05% ~ 17.50%,而且多数玉米品种处理后含水率低于污泥填埋 60% 含水率的要求。对污泥水分去除效果最明显的是天塔 3(51.93%),污泥含水率比处理前降低了 30% 以上,处理效果明显高于对照,可见,玉米种植可明显促进新鲜城市污泥中水分的去除,丘锦荣等(2009)的研究也得出了相似结果。这种差异可能是由于植物(玉米)生长的蒸腾作用促进了污泥中水分的去除。

表 4 玉米种植后城市污泥含水率、水莖种子发芽系数的变化

品种	含水率度	种子发芽系数
北育 203	60.38% ± 7.91% ^c	37.1% ± 5.43% ^e
会单 4	59.58% ± 4.12% ^c	77.2% ± 4.56% ^b
天塔 3	51.93% ± 3.68% ^c	60.1% ± 3.98% ^c
TN506	56.88% ± 3.82% ^c	27.6% ± 5.82% ^f
04 杂 1	56.00% ± 3.80% ^c	44.7% ± 3.12d% ^e
大丰 5	57.97% ± 2.69% ^c	49.7% ± 2.77% ^d
赛田 3	54.10% ± 11.13% ^c	75.0% ± 2.40% ^b
TN502	57.23% ± 1.38% ^c	83.2% ± 7.66% ^{ab}
CK	69.43% ± 1.23% ^b	91.2% ± 3.42% ^a
初始值	83.70% ± 0.56% ^a	92.7% ± 1.28% ^a

注:根据 Duncan 检验($p=0.05$),带有相同字母的同一列数据间无显著差异, $n=3$ 。

由表 4 可知玉米种植后城市污泥的种子发芽系数的变化,对照处理的种子发芽系数(91.2%)和初始值(92.7%)很接近,而经过玉米处理后城市污泥对水莖种子发芽系数均有较明显的变化,发芽系数

不同程度的偏低. 这可能与玉米在生长期根系分泌的一些有机酸类物质(黑亮等, 2007; 强承魁等, 2006)有关, 污泥在厌氧条件下产生的有毒害物质也对水堇种子发芽产生抑制作用. 但种植大丰 5、赛田 3、TN506、04 杂 1 4 个品种城市污泥的水堇种子发芽系数均高于国际上的 50% 的可接受水平(Barale *et al.*, 1981).

3.4 玉米种植后污泥理化性质变化

由表 5 可知, 种植玉米后城市污泥中的养分(N、P、K)含量有一定的变化, 种植不同玉米品种后城市污泥中全氮的变化较大, 赛田 3、天塔 3 和北育 203 品种种植后的城市污泥中氮的含量要显著低于其他品种, 这可能是因为赛田 3 和天塔 3 品种具有较大的生物量, 需要吸收更多的氮营养元素, 从而造成种植玉米后污泥中氮的含量较低; 而城市污泥中的全 P 含量在种植玉米前后不同处理中没有显著差异; 对于全 K 含量, 种植玉米后, 大丰 5 和北育 203 品种种植后城市污泥中钾的含量明显高于新鲜污泥中钾的含量, 其余各处理之间没有显著差异. 总体来说, 各营养元素经过各玉米品种种植后质量浓度并没有大幅度地减少(丘锦荣等, 2010b; 黑亮等, 2007).

表 5 玉米种植后污泥中 N、P、K 含量的变化

Table 5 Concentration changes of N, P and K in MSS after planting maize $g \cdot kg^{-1}$

品种	N	P	K
北育 203	32.43 ± 0.82 ^{bc}	5.24 ± 0.05 ^a	9.05 ± 0.51 ^{ab}
会单 4	34.49 ± 1.32 ^{ab}	5.41 ± 0.17 ^a	8.71 ± 0.04 ^{abc}
天塔 3	32.59 ± 0.50 ^{bc}	5.22 ± 0.40 ^a	8.73 ± 0.03 ^{abc}
TN506	34.25 ± 2.29 ^{abc}	5.06 ± 0.30 ^a	7.12 ± 0.14 ^{abc}
04 杂 1	35.33 ± 0.58 ^a	5.47 ± 0.30 ^a	8.53 ± 0.31 ^{bc}
大丰 5	34.90 ± 1.39 ^a	5.41 ± 0.60 ^a	9.18 ± 0.74 ^a
赛田 3	32.14 ± 0.74 ^c	5.22 ± 0.41 ^a	8.72 ± 0.39 ^{abc}
TN502	34.16 ± 0.67 ^{abc}	5.04 ± 0.13 ^a	8.64 ± 0.18 ^{abc}
CK	32.66 ± 0.67 ^{bc}	5.14 ± 0.18 ^a	8.81 ± 0.18 ^{abc}
初始值	33.31 ± 0.76 ^{abc}	5.57 ± 0.07 ^a	8.29 ± 0.09 ^c

注: 根据 Duncan 检验 ($p=0.05$), 带有相同字母的同一列数据间无显著差异, $n=3$.

3.5 玉米种植后污泥重金属含量变化

由表 6 可知, 种植玉米前后, 各处理城市污泥中全 Zn、Cd、Cu、Pb 的含量都有一定变化. 与污泥的本底值相比较, 处理后(包括不种植物的空白处理), 锌、镉、铜、铅 4 种重金属的质量浓度都有所上升, 其中锌质量浓度和污泥本底相比较达到显著水平, 这

主要是由于经过植物处理后, 污泥水分降低, 体积缩小, 污泥浓缩, 而玉米品种对重金属累积效果并不明显(丘锦荣等, 2010b; 许田芬等, 2012).

表 6 玉米种植前后污泥中重金属含量的变化

Table 6 Concentration changes of heavy metals in MSS after planting maize $mg \cdot kg^{-1}$

品种	Zn	Cd	Cu	Pb
北育 203	1125 ± 18 ^{ab}	6.03 ± 0.23 ^{ab}	356.1 ± 6.2 ^a	103.5 ± 0.8 ^{ab}
会单 4	1111 ± 37 ^{ab}	5.86 ± 0.22 ^{ab}	354.5 ± 4.1 ^{ab}	104.4 ± 2.0 ^{ab}
天塔 3	1134 ± 25 ^{abc}	5.88 ± 0.19 ^{ab}	352.2 ± 8.8 ^{ab}	101.9 ± 2.4 ^{ab}
TN506	1076 ± 32 ^{bc}	5.82 ± 0.42 ^{ab}	342.5 ± 2.1 ^b	103.9 ± 0.0 ^b
04 杂 1	1153 ± 7 ^a	5.95 ± 0.08 ^{ab}	350.9 ± 8.2 ^{ab}	103.6 ± 0.7 ^{ab}
大丰 5	1114 ± 4 ^{ab}	6.08 ± 0.36 ^a	347.8 ± 5.2 ^{ab}	105.4 ± 4.1 ^{ab}
赛田 3	1105 ± 29 ^{abc}	5.60 ± 0.14 ^b	344.4 ± 4.2 ^{ab}	104.4 ± 2.0 ^{ab}
TN502	1097 ± 18 ^{abc}	5.57 ± 0.12 ^b	346.5 ± 4.1 ^{ab}	107.2 ± 8.7 ^a
CK	1109 ± 6 ^{ab}	6.00 ± 0.36 ^{ab}	349.6 ± 0.4 ^{ab}	101.8 ± 0.7 ^{ab}
初始值	1055 ± 51 ^c	5.79 ± 0.03 ^{ab}	353.3 ± 1.0 ^{ab}	100.5 ± 0.4 ^{ab}

注: 根据 Duncan 检验 ($p=0.05$), 带有相同字母的同一列数据间无显著差异, $n=3$.

3.6 玉米种植处理新鲜城市污泥的可行性分析

新鲜的城市污泥一般含水率在 80% 左右, 且含有丰富的氮、磷、钾营养元素, 具有一定的肥效(王绍文, 2007; 马娜等, 2003), 可为植物生长提供充足的养分和水分. 而玉米具有生物量大、根系发达、在新鲜的城市污泥上可良好生长, 对重金属的累积量较低, 玉米的地上部分可作为有机肥料的原料, 可实现在处理城市污泥的同时收获一定量的植物产品等特点, 具有经济效益. 因此, 采用玉米种植处理城市污泥具有一定的可行性(王芳等, 2008).

但是, 由于玉米生长周期较长, 且需要较大的处理场地, 所以对于没有处理场地的地区使用本方法处理城市污泥具有一定局限性.

4 结论(Conclusions)

1) 玉米在新鲜城市污泥中生长良好, 试验所选用的 8 个玉米品种中, 会单 4 品种对铜和铅的累积量最低, 04 杂 1 品种对镉累积量最低.

2) 玉米种植后对城市污泥干燥有一定的促进作用, 而且城市污泥中的营养物质(N、P、K)质量浓度变化很小, 具备进一步作为园林肥料或者填埋处置的条件.

3) 收获的玉米地上部分中总养分(氮 + 五氧化二磷 + 氧化钾)均高于有机肥料新标准中总养分的最低限值(5%), 除赛田 3 品种外其他品种中镉和

铅的质量浓度均符合农用有机肥标准的限值(NY525-2012),可将高风险的城市污泥转为低风险的有机肥原料,在处理污泥的同时产生一定的经济效益,为城市污泥更广泛的资源化提供新的途径。

责任作者简介: 吴启堂(1962—),男,博士,教授,博士生导师,从事土壤重金属污染防治研究,主持完成省部级以上课题20多项。发表学术论文150多篇。E-mail: wuqitang@scau.edu.cn.

参考文献(References):

- Barale R, Zucconi D, Loprieno N. 1981. A mutagenicity methodology for assessing the formation of N-dimethylnitrosamine *in vivo* [J]. *Mutation Research*, 85(2): 57-70
- 陈同斌,黄启飞,高定,等. 2003. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势[J]. *环境科学学报*, 23(5):561-569
- 陈同斌,郑国砥,高定,等. 2009. 城市污泥堆肥处理及其产业化发展中的几个关键问题[J]. *中国给水排水*, 25(9):104-108
- Fytilli D, Zabaniotou A. 2008. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12:116-140
- 郭晓方,卫泽斌,丘锦荣,等. 2010. 玉米对重金属累积与转运的品种间差异[J]. *生态与农村环境学报*, 26(4):367-371
- 何东,蒲贵兵. 2010. 城市污泥的重金属处理机理探讨[J]. *安徽农业科学*, 38(24): 13345-13346, 13390
- 黑亮,吴启堂,龙新宪,等. 2007. 东南景天和玉米套种对 Zn 污染污泥的处理效应[J]. *环境科学*, 28(4): 852-858
- Jayara D C, Tamara T B, Ademir S F, *et al.* 2010. Effect of different tannery sludge compost amendment rates on growth, biomass accumulation and yield responses of Capsicum plants [J]. *Waste Management*, 30:1976-1980
- Lei J, Liu C, Li F, *et al.* 2006. Photodegradation of orange I in the heterogeneous iron oxide-oxalate complex system under UVA irradiation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 137(2):1016-1024
- 李刚,李东亮,王许涛,等. 2011. 玉米秸秆蒸汽爆破用于厌氧发酵的技术评价[J]. *农业工程学报*, 27(1):286-290
- 马娜,陈玲,熊飞. 2003. 我国城市污泥的处置与利用[J]. *生态环境*, 12(1): 92-95
- NRC. 2002. *Biosolids Applied to Land: Advancing Standards and Practices* [M]. Washington: National Academy Press. 13-79
- 强承魁,杨兆芬,杜予州,等. 2006. 黄粉虫防御性分泌物抑菌活性的研究[J]. *生物技术*, 16(1): 22-24
- 丘锦荣,刘雯,郭晓方,等. 2010a. 城市污泥植物处理对地表径流和地下层土壤的影响[J]. *环境工程学报*, 4(8):1897-1902
- 丘锦荣,刘雯,郭晓方,等. 2010b. 植物处理后的城市污泥农用对玉米生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 29(5):990-994
- 丘锦荣,刘雯,卫泽斌,等. 2009. 利用城市污水厂脱水污泥直接生产草坪的研究[J]. *中国给水排水*, 25(13):52-54
- 鲁如坤. 2000. *土壤农业化学分析方法* [M]. 北京:中国农业出版社
- Singh R P, Agrawal M. 2008. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge [J]. *Waste Management*, 28:347-358
- 王丽红,柏雪源,易维明,等. 2006. 玉米秸秆热解生物油特性的研究[J]. *农业工程学报*, 22(3):108-111
- 王芳,吴启堂,卫泽斌,等. 2008. 城市污泥植物处理系统与污泥中转处理场建设[J]. *生态环境*, 17(3):1309-1313
- 王绍文,秦华. 2007. *城市污泥资源利用与污水土地处理技术* [M]. 北京:中国建筑工业出版社
- 卫泽斌,吴启堂,龙新宪. 2005. 利用套种和混合添加剂修复重金属污染土壤[J]. *农业环境科学学报*, 24(6):1262-1263
- Wu Q T, Hei L, Wong J W C, *et al.* 2007. Co-cropping for phyto-separation of zinc and potassium from sewage sludge [J]. *Chemosphere*, 68: 1954-1960
- 许田芬,谢方文,丘锦荣,等. 2012. 污泥植物处理后对玉米生长及土壤重金属含量的影响[J]. *中国环境科学*, 32(9):1640-1646
- 张增强,殷宪强. 2004. 污泥土地利用对环境的影响[J]. *农业环境科学学报*, 23(6):1182-1187