

DOI: 10.5846/stxb201311042658

林晓燕, 王慧, 王浩, 陈诚, 吴启堂, 卫泽斌, 罗赢鹏, 陈晓红. 利用皇竹草处理城市污泥生产植物产品. 生态学报, 2015, 35(12): 4234-4240.

Lin X Y, Wang H, Wang H, Chen C, Wu Q T, Wei Z B, Luo Y P, Chen X H. Using hybrid giant napier to treat municipal sewage sludge and produce plant biomass. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 4234-4240.

## 利用皇竹草处理城市污泥生产植物产品

林晓燕<sup>1</sup>, 王慧<sup>1</sup>, 王浩<sup>1,2</sup>, 陈诚<sup>1</sup>, 吴启堂<sup>1,\*</sup>, 卫泽斌<sup>1</sup>, 罗赢鹏<sup>1</sup>, 陈晓红<sup>1</sup>

1 华南农业大学资源环境学院, 广东省高校土壤环境与废物资源农业利用重点实验室, 广州 510642

2 仲恺农业工程学院环境科学与工程系, 广州 510225

**摘要:** 利用大生物量植物——皇竹草 (*Pennisetum hybridum*), 处理城市污泥高效生产有用的植物产品。通过小型田间试验, 采用根兜分株移栽和直接扦插方式种植皇竹草, 比较土壤、新鲜污泥、土壤+新鲜污泥等体积混合、植物处理后的污泥 4 种介质的适应性, 测定了皇竹草的成活率和生长状况, 以及污泥自身性质的变化; 通过盆栽试验及田间试验进一步探讨育苗后移栽在新鲜污泥上的可行性。结果表明, 新鲜污泥上直接扦插的皇竹草无一存活, 即使是根兜分株移栽其成活率也仅为 16.67%, 生长较差。而对于土壤+污泥混合物或植物处理后的污泥, 采用直接扦插方式, 皇竹草的成活率也分别达 58.33%、75.00%, 两个月干草产量达 22.20、19.80 t/hm<sup>2</sup>, 为土壤上的 5.11、4.55 倍。皇竹草吸收 K 较明显, 3 个有污泥的处理皇竹草 K 含量接近 40 g/kg 干重, N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 的总含量大于 70 g/kg, 可作为有机 K 肥原料; 皇竹草重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 含量均符合国家饲料卫生标准 (GB 13078—2001), 作为饲料是安全的。盆栽试验及田间试验表明, 采用育苗后移栽的方式, 皇竹草在新鲜污泥上的成活率达 66.67% 以上。因此, 城市污泥直接种植皇竹草可以实现资源化利用。

**关键词:** 城市污泥; 皇竹草; 植物处理; 育苗

## Using hybrid giant napier to treat municipal sewage sludge and produce plant biomass

LIN Xiaoyan<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1,2</sup>, CHEN Cheng<sup>1</sup>, WU Qitang<sup>1,\*</sup>, WEI Zebin<sup>1</sup>, LUO Yingpeng<sup>1</sup>, CHEN Xiaohong<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Soil Environment and Waste Reuse in Agriculture of Guangdong Higher Education Institutes, College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2 Department of Environmental Science and Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China

**Abstract:** Sewage sludge production is increasing greatly in China with the development of municipal wastewater treatment, and agricultural application of municipal sewage sludge (MSS) has become one of the main outlets for MSS worldwide. However, direct application of MSS and its composts to agricultural lands can lead to heavy metal contamination of soil and food. Accordingly, application of MSS to plants that are not used for food is a better alternative. Therefore, this study was conducted to investigate the use of the hybrid giant napier (*Pennisetum hybridum*), which has a large biomass and can serve as animal feed or paper-making materials, to efficiently produce plant biomass while degrading MSS. To accomplish this, a field experiment composed of small plots with four treatments, soil, fresh sludge, soil-sludge mixture at a ratio of 1:1, and phyto-treated sludge, was conducted. Additionally, Giant Napier were cultivated following transplantation of ramets with roots or direct planting of cut stems. MSS was acquired from the Datansha Wastewater Treatment Plant in

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (41371308); 广东省科技计划项目 (2012A030700003, 2010B031800006); 广东省自然科学基金团队项目 (S2011030002882)

**收稿日期:** 2013-11-04; **网络出版日期:** 2014-08-28

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wuqitang@scau.edu.cn

Guangzhou, placed in plots with a height of 20 cm on the ground and covered with permeable plastic nets. The survival and growth rate of the Giant Napier were then followed and the main characteristics of the sludge were investigated. A pot experiment and a field experiment were also conducted to investigate the feasibility of transplanting hybrid Giant Napier directly into fresh MSS using seedlings generated from stem cuttings in normal growth medium. The results showed that the hybrid Giant Napier could not survive directly in fresh MSS when cultivated from stem cuttings, as indicated by a survival rate of only 16.67%, even when transplanted ramets with roots were included in the plot. However, the plants survived and grew well in the soil-sludge mixture and phyto-treated sludge. The survival rates of stem cuttings planted in the soil-sludge mixture and phyto-treated sludge were 58.33% and 75.00%, respectively, and the yield of biomass of these two treatments ranged from 19.80 t/hm<sup>2</sup> to 22.20 t/hm<sup>2</sup> on a dry weight basis over two months, which was 4.55 to 5.11 times higher than that of the soil only treatment. Additionally, the hybrid Giant Napier absorbed K well, as indicated by the K content in the plant biomass reaching about 40 g/kg on a dry weight basis in the three sludge treatments. The total N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O content also reached 70 g/kg, indicating that the harvested plant biomass can be used as organic potassium fertilizer. The levels of Cu, Zn, Pb and Cd in the hybrid giant napier were below the tolerance limits of heavy metals according to the Chinese standards of feeds (GB 13078—2001), indicating that the produced biomass was safe for use as animal feed. The pot experiment and field experiment showed that the survival rate of the hybrid Giant Napier transplanted into fresh MSS with seedlings generated from stem cuttings in normal growth medium reached more than 66.67% and the plants grew to an average of 2.6 m after 6 months. Overall, the results of this study indicate that the hybrid Giant Napier can be directly planted in fresh MSS and produce a high yield.

**Key Words:** municipal sewage sludge (MSS); *Pennisetum hybridum*; phyto-treatment; seedling

随着经济的发展及城市化进程的加快,我国污水处理率日益提高,城市污泥作为污水处理的必然附属产物其产量也与日剧增<sup>[1]</sup>。到2015年,全国每年约产生脱水污泥3359万t<sup>[2]</sup>。城市污泥数量巨大,增长迅速,其安全、合理处理处置是目前环境领域急需解决的问题之一。城市污泥一般富含N、P、有机质等<sup>[3]</sup>,通过各种形式将其土地利用,使污泥重新参与生态系统的物质循环,不仅成本低,而且可以有效利用污泥中有用的营养物质,符合可持续发展战略。因此,污泥农业资源化利用已成为当今研究的热点。但是城市污泥中也含有重金属、有机污染物、病原体等有毒有害物质,在土地利用过程中容易对土壤、地下水和作物造成二次污染,有潜在的生态风险,并可能经食物链富集和传递对人体健康产生危害<sup>[1]</sup>。虽然中国城市污泥的重金属含量总体呈下降趋势,但超标率仍较高<sup>[4]</sup>,仍是目前限制其大规模土地利用的主要因素。因此,寻求经济有效的污泥无害化和资源化处理途径具有重要意义。

目前,国内外许多研究将污泥或污泥堆肥应用于蔬菜、粮食作物、花卉、草坪草等的生产,并表明,城市污泥经过合理方式农用可以显著提高农产品的产量和品质<sup>[5-8]</sup>,促进花卉的生长并改善花卉的观赏品质<sup>[9]</sup>,提高草坪草的生物量<sup>[10-11]</sup>,增强草坪草的抗逆性<sup>[12]</sup>。另有研究表明,皇竹草(*Pennisetum hybridum*)为大生物量植物,具有适应性强、分蘖性强、生长快、产量高、营养丰富、可多年收获等特点,经常被用作饲喂牛、羊、兔等草食动物的主要青贮饲料,还被广泛应用于造纸、食品等领域;同时,鉴于皇竹草须根系发达,抗旱性强,对土壤要求低等,近年来也逐渐被应用于绿化荒山、保持水土、改善土壤结构等生态环境治理和保护方面<sup>[13]</sup>。因此,若能利用皇竹草处理城市污泥高效生产植物产品,不仅可以变废为宝,同时实现生态、环境、社会、经济效益。目前,对皇竹草的栽培与利用主要是基于以土壤为基质进行种植的<sup>[14-16]</sup>,以污泥为基质种植皇竹草的相关研究则未见报道,对皇竹草是否能在污泥上生长、皇竹草的产量和品质及栽种皇竹草后污泥本身性质的变化等有待查明。因此,本研究试图回答以上问题,以便更好地实现污泥资源化和无害化。

## 1 材料与方

### 1.1 供试材料

(1) 供试污泥和土壤 新鲜污泥 I、新鲜污泥 II、新鲜污泥 III 均取自广州市大坦沙污水处理厂未消化污泥,三者取样时间不同,理化性质略有不同,除前两者污泥 Cd 含量均超过《城镇污水处理厂污泥处置-农用泥质标准》A 级标准但低于 B 级标准外,其余重金属指标均符合 A 级标准,可用于种植饲料作物;供试土壤为广东赤红壤,供试污泥和土壤的主要理化性质见表 1。

表 1 供试污泥和土壤主要理化性质

Table 1 Main characteristics of the studied municipal sewage sludge (MSS) and soil

指标 Indexes	新鲜污泥 I <sup>①</sup> Fresh MSS <sup>②</sup> I	新鲜污泥 II Fresh MSS II	新鲜污泥 III Fresh MSS III	植物处理 后的污泥 Phyto-treated MSS	土壤 Soil	农用污泥污染物浓度限定值 <sup>④</sup> Limits of pollutants in sludge for agricultural use	
						A 级 Class A	B 级 Class B
pH	5.73 ± 0.12 <sup>③</sup>	5.68 ± 0.05	6.73 ± 0.06	6.09 ± 0.02	7.70 ± 0.10		
含水量 Water content / (g/kg)	833.4 ± 5.00	807.4 ± 2.00	795.0 ± 24.0	412.1 ± 1.50	233.3 ± 1.0		
有机质 OM / (g/kg)	430.7 ± 13.7	347.6 ± 7.40	366.1 ± 5.30	334.5 ± 5.09	3.75 ± 0.41		
全 N Total N / (g/kg)	46.60 ± 1.48	36.03 ± 1.61	38.80 ± 0.40	28.36 ± 0.21	0.25 ± 0.13		
全 P Total P / (g/kg)	34.34 ± 0.18	17.58 ± 3.03	23.40 ± 0.40	40.09 ± 1.19	0.24 ± 0.01		
全 K Total K / (g/kg)	6.88 ± 0.65	10.79 ± 0.65	10.30 ± 0.20	8.83 ± 0.00	7.22 ± 0.35		
全 Cu Total Cu / (mg/kg)	389.9 ± 32.7	245.1 ± 10.4	192.3 ± 9.89	666.5 ± 14.3	17.43 ± 0.16	<500	<1500
全 Zn Total Zn / (mg/kg)	1106.0 ± 52.2	1005.0 ± 73.1	833.2 ± 61.2	1532 ± 26.8	40.76 ± 6.04	<1500	<3000
全 Pb Total Pb / (mg/kg)	64.41 ± 2.38	114.0 ± 11.2	98.03 ± 2.01	107.1 ± 6.91	46.76 ± 0.72	<300	<1000
全 Cd Total Cd / (mg/kg)	4.43 ± 0.14	3.11 ± 0.18	2.71 ± 0.26	5.51 ± 0.23	0.11 ± 0.03	<3	<15

①新鲜污泥 I 用于田间小型试验,新鲜污泥 II 用于盆栽育苗实验,新鲜污泥 III 用于田间中试试验,均取自广州大坦沙污水处理厂;②MSS: municipal sewage sludge;③数据为平均值±标准差, n=3;④中华人民共和国城镇建设行业标准. 城镇污水处理厂污泥处置-农用泥质标准. CJ/T 309—2009.

(2) 供试皇竹草 选取粗壮较一致的皇竹草老茎,一半截成 2 节茎段,一半连根挖出,将根兜按大小一致进行分株,然后将皇竹草茎段直接扦插或根兜分株后移栽至污泥和土壤中。

(3) 供试育苗基质 购自广州市园林基质厂,为枯枝落叶经堆肥处理后的育苗专用基质土。

(4) 供试塑料盆 采用规格为长×宽×高=44 cm×31.5 cm×16 cm 的塑料盆。

### 1.2 实验设计

#### 1.2.1 不同污泥基质种植皇竹草小型田间试验:

试验设置 4 处理,分别为 I 土壤, II 新鲜污泥, III 土壤+新鲜污泥等体积混合(将新鲜污泥直接与土壤等体积混合), IV 植物处理后的污泥(新鲜污泥种植玉米一季后的污泥),每处理设 3 个重复。试验用地约 2.50 m×7.00 m,阳光辐照程度均一。将试验地分成 4 个 2.00 m×1.20 m 的小区,每个小区间距 40 cm,用 PVC 板将每个小区均匀隔成 3 列。在地面上每一列铺一层黑网,然后将污泥或土壤平铺于黑网上,规格为长×宽×高=1.80 m×0.40 m×0.15 m。每一列种植 6 棵皇竹草,行距为 30 cm。设置 2 种植方式,即根兜分株移栽和直接扦插,其中第 1、2 行采用根兜分株移栽方式进行种植,其他 4 行采用直接扦插方式。试验起始时间为 2012 年 3 月 3 日,在皇竹草生长期按常规方法进行管理,但种植过程不施任何肥料,5 月 16 日将皇竹草刈割。

#### 1.2.2 育苗移栽盆栽试验

为进一步研究、提高在新鲜污泥上种植皇竹草的成活率,试验设置两个处理,每处理重复 3 次。

(1) 直接扦插 将皇竹草茎段直接扦插种植在新鲜污泥中,放置在室内。

(2) 育苗移栽 皇竹草茎段在基质杯(上口口径 9.5 cm,底径 5.3 cm,高 12.7 cm)中扦插育苗两周后,连同基质和苗移栽到新鲜污泥中,放置在室内。

实验开始时,在塑料盆内铺上一层黑网,在黑网上放入 24 kg 的新鲜脱水污泥,然后将准备好的扦插茎和

苗直接种植在新鲜污泥中,每盆种植 3 棵皇竹草。种植期间水分管理按照污泥含水量进行适时调整,确保植物能正常生长。试验在室内进行,时间为 2012 年 5 月—6 月。

### 1.2.3 育苗移栽田间中试试验

为进一步验证育苗后移栽皇竹草在新鲜污泥上的成活率,在试验用地约 18.00 m×8.00 m,阳光辐照程度均一的露天环境开展田间中试试验,设置 4 个重复。将试验地分成 4 个 8.00 m×3.00 m 的小区,每个小区间距 40 cm。在地面上每一小区铺一层黑网,然后将污泥平铺于黑网上,规格为长×宽×高=8.00 m×3.00 m×0.20 m。试验开始时,将经过在基质杯(上口径 13 cm,底径 9 cm,高 11 cm)中扦插育苗两周后的皇竹草苗及基质移栽到新鲜污泥中,每个小区种植 65 棵皇竹草,行株距均为 60 cm。试验时间为 2012 年 11 月—2013 年 5 月,种植期间按常规方法进行管理,但不施任何肥料,1 个月时观测皇竹草的成活率,刈割前测定株高,收割后称得产量。

### 1.3 样品分析测定

(1)植物样品分析测定 收获时,调查皇竹草的成活率、株高、分蘖数和生物量。将皇竹草茎叶用自来水和去离子水洗净,吸水纸吸干表面水,测定鲜重。将样品置于烘箱内 105 ℃杀青 30 min,然后 65 ℃、48 h 烘干,记录干重。干样用万能粉碎机磨细,过 0.25 mm 的尼龙筛,备测 N、P、K 和重金属含量。植物全 N、全 P、全 K 采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮法,重金属含量测定采用干灰化-原子吸收光谱法,其具体测定方法参照《土壤农业化学分析方法》<sup>[17]</sup>。

(2)污泥、土壤样品分析测定 在刚种植植物和收获植物时,均采污泥样、土样,室内风干,去除根系,并研磨过 20、100 目尼龙筛,包装登记后保存备测,重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 全量均采用 HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>消煮-原子吸收光谱测定法(GB/T 17138—1997)测定。

### 1.4 数据处理与分析

数据用 Excel 2003 处理,采用 SAS 8.1 软件对数据进行多重比较。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同污泥基质种植皇竹草小型田间试验结果

#### 2.1.1 不同处理对皇竹草生长的影响

从表 2 可知,在皇竹草生长期间,将皇竹草茎段直接扦插于新鲜污泥上,皇竹草无一存活;采用根兜分株移栽,皇竹草生长也较差,成活率仅为 16.67%,生物量干重也仅为 38.55 g/株,这可能是新鲜污泥中水分含量较高,且为雨季,污泥厌氧发酵,产生的有机酸等物质不利于皇竹草幼苗生长,另外污泥中盐分含量较高<sup>[18]</sup>,

表 2 田间小型实验皇竹草生物量和生物学指标

Table 2 Hybrid giant napier biomass and other biological indexes of field experiment

处理 Treatments	成活率 Survival rate/%		株高 Plant height/cm		分蘖数 Tiller number		单株干重 Dry weight per plant/(g/株)	
	根兜分株移栽 Transplanting by ramet with roots	直接扦插 Direct cutting						
	土壤 Soil	100.0±0.00	91.67±14.4	137.0±19.3	96.78±19.0	7.00±1.73	2.91±1.81	225.7±38.6
新鲜污泥 Fresh MSS	16.67±28.9	0.00±0.00	95.00±0.00	0.00±0.00	4.00±0.00	0.00±0.00	38.55±0.00	0.00±0.00
土壤+新鲜污泥等体积 混合 Soil-MSS mixture	100.0±0.00	58.33±14.4	206.2±14.7	196.3±4.97	6.67±3.14	6.67±2.66	300.3±47.7	266.0±31.8
植物处理后的污泥 Phyto-treated MSS	83.33±28.9	75.00±0.00	213.5±17.5	176.4±15.7	7.67±1.15	3.50±1.60	472.5±23.2	236.9±35.6

数据为平均值±标准差

对皇竹草根系有一定毒害作用,因此,不适合在新鲜污泥上直接种植皇竹草。新鲜污泥与土壤等体积混合后,直接扦插皇竹草茎段,有一半皇竹草能成活,根兜分株移栽皇竹草全部成活。而将皇竹草栽种于植物处理后的污泥上,根兜分株移栽和直接扦插的皇竹草的成活率均较高,分别达 83.33%、75.00%,尤其是植物处理后的污泥处理根兜分株移栽的皇竹草生物量干重高达 472.5 g/株,高于其他处理。

土壤+新鲜污泥等体积混合处理根兜分株移栽或直接扦插皇竹草产量以干重计分别为 25.05、22.20 t/hm<sup>2</sup>,分别是土壤处理的 1.33、5.11 倍,处理 1 t 该种污泥可分别生产皇竹草干物质 16.68 kg 和 14.78 kg。植物处理后的污泥根兜分株移栽或直接扦插皇竹草产量以干重计分别为 39.30、19.80 t/hm<sup>2</sup>,分别是土壤处理的 2.09、4.55 倍,处理 1 t 该种污泥可分别生产皇竹草干物质 26.25 kg 和 13.16 kg,产量可观。此实验再次表明,皇竹草单株分蘖能力强,株高高容易获得较高的单株产量<sup>[15]</sup>,因此为了更好的利用皇竹草处理城市污泥生产植物产品,可在皇竹草生长一段时间后,将皇竹草刈割,让其继续生长,增加皇竹草的分蘖数,从而进一步提高生物量。

### 2.1.2 不同处理对皇竹草重金属和营养元素含量的影响

皇竹草重金属含量测定结果表明(表 3),土壤+新鲜污泥等体积混合处理、植物处理后的污泥处理皇竹草中 Cu 含量均明显低于新鲜污泥处理,而高于土壤处理。新鲜污泥处理、土壤+新鲜污泥等体积混合处理和植物处理后的污泥处理皇竹草 Pb 含量均无明显差异,且均低于土壤处理。对于皇竹草 Zn、Cd 的含量,植物处理后的污泥处理虽高于新鲜污泥处理,但差异不明显,这可能是植物处理后的污泥中有效态 Zn、有效态 Cd 含量仍较高所致。而土壤+新鲜污泥等体积混合处理由于在污泥中混入了低 Zn、低 Cd 的土壤,使得污泥中 Zn、Cd 含量明显降低,植物吸收的 Zn、Cd 含量也减少,所以土壤+新鲜污泥等体积混合处理皇竹草 Zn、Cd 含量显著低于新鲜污泥处理和植物处理后的污泥处理。

表 3 皇竹草重金属含量

Table 3 Heavy metal contents in the plant of hybrid giant napier

处理 Treatments	Cu/ (mg/kg DW)	Zn/ (mg/kg DW)	Pb/ (mg/kg DW)	Cd/ (mg/kg DW)
土壤 Soil	5.54±0.25c	21.04±0.87b	0.65±0.08a	0.06±0.01c
新鲜污泥 Fresh MSS	10.3±0.59a	45.17±0.40a	0.59±0.01ab	0.34±0.02a
土壤+新鲜污泥等体积混合 Soil-MSS mixture	6.29±0.24c	30.69±2.27b	0.55±0.04ab	0.22±0.04b
植物处理后的污泥 Phyto-treated MSS	7.26±0.44b	49.45±12.0a	0.49±0.07b	0.38±0.00a
饲料卫生标准 Chinese standards of feeds(GB 13078—2001)			≤5	≤0.5

数据为平均值±标准差,根据 Duncan 氏检验( $P<0.05$ ),同一列中不同字母表示处理间差异显著, $n=3$ ; DW: 干重

4 个处理皇竹草中,Pb、Cd 含量均低于国家饲料卫生标准(GB 13078—2001)限值,Pb 含量更为明显,远低于标准限值。而国家饲料卫生标准,对植物中 Cu、Zn 含量均无限制,各污泥处理的皇竹草可作为饲养牛、羊、兔等草食动物的青贮饲料。

从表 4 可知,由于污泥含有丰富的有机质和氮磷钾等营养元素,将皇竹草栽种于污泥上,皇竹草 N、P、K 含量都相对较高,除土壤+新鲜污泥等体积混合处理 P 含量略高于土壤处理外,新鲜污泥处理、土壤+新鲜污泥等体积混合处理、植物处理后的污泥处理皇竹草 N、P、K 的含量均显著高于土壤处理,这可能是由于土壤中 P 的含量较低,与新鲜污泥混合后,虽有所升高,但含量仍较低,以致植物可吸收的 P 含量较少。污泥 3 个处理皇竹草中 K 的含量均达干重的 4%,N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 的总含量均达 7%,所以栽种于污泥上的皇竹草非常适合作有机肥料,生产有机 K 肥。而污泥 3 个处理中,新鲜污泥处理皇竹草 K 含量高达 46.87 g/kg(DW),N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 的总含量高达 9%,后期进一步加强研究直接在新鲜污泥上种植皇竹草具有一定意义。

### 2.1.3 不同处理污泥重金属含量的变化

对污泥样品重金属含量进行分析测定表明(表 5),处理后新鲜污泥由于水分含量明显减小,污泥浓缩,使得污泥中重金属含量明显升高。而将新鲜污泥与土壤混合,不但可以大大降低污泥中重金属的含量,处理后

的混合污泥,重金属 Cu、Zn、Cd 的含量也均降低,Pb 含量虽升高,但不明显,这可能是由于皇竹草吸收的重金属 Cu、Zn、Cd 含量较多,从而导致即使经过浓缩,处理后的混合污泥 Cu、Zn、Cd 含量均降低。植物处理后的污泥本身水分含量较低,重金属含量较高,但重金属有效态含量较低,生物稳定性较高,即使再通过种植皇竹草,污泥重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 的含量仍处于高水平。

表 4 皇竹草水分和氮磷钾含量

Table 4 Water and nutrient contents of hybrid giant napier

处理 Treatments	含水量/(g/kg) Water content	N/ (g/kg DW)	P/ (g/kg DW)	K/ (g/kg DW)
土壤 Soil	807.2±25.6b	13.19±1.58c	2.46±0.33c	25.17±2.83c
新鲜污泥 Fresh MSS	857.2±2.10a	34.84±2.60a	5.22±0.18a	46.87±3.29a
土壤+新鲜污泥等体积混合 Soil-MSS mixture	841.2±21.5a	20.55±1.61b	2.61±0.48c	39.27±1.39b
植物处理后的污泥 Phyto-treated MSS	845.6±4.81a	19.25±1.92b	3.89±0.40b	38.66±3.46b

数据为平均值±标准差,根据 Duncan 氏检验 ( $P < 0.05$ ),同一列中不同字母表示处理间差异显著,  $n = 3$

表 5 种植植物后污泥重金属含量变化

Table 5 Changes of heavy metal content in MSS after planting

处理 Treatments	Cu/(mg/kg DW)		Zn/(mg/kg DW)	
	处理前 Before planted	处理后 After planted	处理前 Before planted	处理后 After planted
土壤 Soil	17.43±0.16 dB	24.83±2.88 cA	40.76±6.04 dB	54.19±2.22 dA
新鲜污泥 Fresh MSS	389.9±32.7 bB	552.9±15.7 bA	1106.0±52.2 bB	1481.0±37.7 bA
土壤+新鲜污泥等体积混合 Soil-MSS mixture	57.71±3.55 cA	45.80±0.98 cB	176.4±14.0 cA	164.3±24.7 cA
植物处理后的污泥 Phyto-treated MSS	666.5±14.3 aA	692.1±47.2 aA	1532.0±26.8 aA	1555.0±39.1 aA

  

处理 Treatments	Pb/(mg/kg DW)		Cd/(mg/kg DW)	
	处理前 Before planted	处理后 After planted	处理前 Before planted	处理后 After planted
土壤 Soil	46.76±0.72 dB	60.37±2.42 cA	0.11±0.03 dA	0.15±0.04 bA
新鲜污泥 Fresh MSS	64.41±2.38 bB	90.94±1.59 bA	4.43±0.14 bB	5.6±0.53 aA
土壤+新鲜污泥等体积混合 Soil-MSS mixture	54.66±1.41 cA	55.76±2.39 cA	1.08±0.35 cA	0.65±0.28 bA
植物处理后的污泥 Phyto-treated MSS	107.1±6.91 aB	129.1±10.9 aA	5.51±0.23 aA	6.12±0.69 aA

数据为平均值±标准差,根据 Duncan 氏检验 ( $P < 0.05$ ),同一列中不同小写字母表示处理间差异显著,同一行中不同大写字母表示同一处理处理前后差异显著,  $n = 3$

## 2.2 盆栽育苗实验结果

在新鲜污泥上种植的皇竹草,不仅可作青贮饲料,而且可生产有机 K 肥,但皇竹草的成活率低,因此,为了更好的利用皇竹草处理城市污泥生产植物产品,须进一步研究以提高新鲜污泥上直接种植皇竹草的成活率。

从表 6 可知,采取育苗移栽方式种植皇竹草,刚种植的皇竹草幼苗可利用植物根系所带的基质的保护作用 and 营养元素度过适应期,皇竹草成活率达 66.67%,且采用育苗移栽方式种植 60d 后,皇竹草株高、分蘖数及生物量均明显高于室内直接扦插处理,每盆污泥可收获皇竹草以干重计为 70.59 g。而室内直接扦插处理皇竹草的成活率(44.44%)虽低于室内育苗移栽处理,但也解决了田间新鲜污泥上直接种植皇竹草其成活率为 0 的难题,这主要与污泥中的水分含量有关,雨季采取室内种植可以控制污泥中的水分含量,以避免污泥厌氧发酵影响皇竹草生长。

## 2.3 育苗后移栽皇竹草田间试验结果

盆栽育苗试验已证明皇竹草在室内可以经过育苗后移栽至新鲜污泥上生长,但对于皇竹草是否也能够经育苗后移栽在室外新鲜污泥上正常生长仍不确定。在露天大田试验结果表明,育苗后移栽的皇竹草也能在新鲜污泥上生长,皇竹草的成活率高达(96.54±0.77)% (标准差),约 6 个月后平均株高达到(2.60±0.68) m,单

棵干重达  $(1.42 \pm 0.23)$  kg (相当于  $38.54 \text{ t/hm}^2$ )。田间试验的成活率比前一盆栽试验较高的原因可能在于本次育苗的基质杯较大,起到了更好的保护幼嫩根系的作用。

表 6 盆栽育苗皇竹草的生物量和生物学指标

Table 6 Biomass and other biological indexes of hybrid giant napier in pot experiment

处理 Treatments	成活率 Survival rate/%	株高 Plant height/cm	分蘖数 Tiller number	生物量 Biomass/(g/盆 DW)
直接扦插 Direct cutting	44.44±19.3a	63.67±5.13b	1.67±1.15b	13.13±4.45b
育苗移栽 Transplanting with seedling	66.67±33.3a	78.50±4.95a	9.00±2.83a	70.59±15.8a

数据为每盆皇竹草的平均统计量,为平均值±标准差,根据 Duncan 氏检验 ( $P < 0.05$ ),同一列中不同字母表示处理间差异显著,  $n = 3$

### 3 结论

(1) 在新鲜污泥上直接种植皇竹草,直接扦插的皇竹草难于存活,即使是根兜分株移栽皇竹草成活率也仅为 16.67%,而在土壤+新鲜污泥等体积混合、植物处理后的污泥上,即使采用直接扦插方式,皇竹草成活率分别可达 58.33%、83.33%,两个月干草产量分别达 22.20、19.80  $\text{t/hm}^2$ ,为土壤上的 5.11、4.55 倍。

(2) 采用育苗后移栽的方式可以在新鲜污泥上使皇竹草的成活率达 66.67% 以上。

(3) 皇竹草吸收 K 较明显,污泥上种植的皇竹草 K 的含量可达 4% (干重), N、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  的总含量大于 7% (干重),可作为有机 K 肥原料。另外,皇竹草重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 含量均符合国家饲料卫生标准 (GB 13078—2001),也可作为饲养牛、羊、兔等草食动物的饲料。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 陈同斌, 郑国砥, 高定, 刘洪涛, 杜伟, 杨军. 城市污泥堆肥处理及其产业化发展中的几个关键问题. 中国给水排水, 2009, 25(9): 104-108.
- [ 2 ] 覃文圣. 污泥行业将迎来春天. 中国水网, 2014-1-17 [2014-1-19]. [http://news.h2o-china.com/html/2014/01/124689\\_1.shtml](http://news.h2o-china.com/html/2014/01/124689_1.shtml).
- [ 3 ] 郭广慧, 杨军, 陈同斌, 郑国砥, 高定, 宋波, 杜伟. 中国城市污泥的有机质和养分含量及其变化趋势. 中国给水排水, 2009, 25(13): 120-121.
- [ 4 ] 杨军, 郭广慧, 陈同斌, 郑国砥, 高定, 杨苏才, 宋波, 杜伟. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势. 中国给水排水, 2009, 25(13): 122-124.
- [ 5 ] 黄雅曦, 李季, 李国学, 杨合法, 高巍, 黄妍. 施用污泥堆肥对玉米产量及土壤性质的影响. 东北农业大学学报, 2010, 41(9): 43-49.
- [ 6 ] 宋凤敏. 城市污泥土地利用对菠菜生长的影响. 安徽农业科学, 2010, 38(31): 17669-17670.
- [ 7 ] Singh R P, Agrawal M. Variations in heavy metal accumulation, growth and yield of rice plants grown at different sewage sludge amendment rates. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2010, 73(4): 632-641.
- [ 8 ] Singh R P, Agrawal M. Biochemical and physiological responses of rice (*Oryza sativa* L.) grown on different sewage sludge amendments rates. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2010, 84(5): 606-612.
- [ 9 ] 马达, 高定, 刘洪涛, 陈同斌, 郑国砥, 杜伟. 城市污泥堆肥用作花卉栽培基质的效果评价. 中国给水排水, 2009, 25(15): 115-116.
- [ 10 ] 高定, 刘洪涛, 陈同斌, 徐伟朴, 郑国砥, 杜伟. 城市污泥堆肥用于草坪基质的生物与环境效应. 中国给水排水, 2009, 25(15): 119-121.
- [ 11 ] 赵晓莉, 徐德福, 李泽宏, 陈建军, 董斌, 吴荣涛. 城市污泥的土地利用对黑麦草理化指标和品质的影响. 农业环境科学学报, 2010, 29(S1): 59-63.
- [ 12 ] 闫双堆, 卜玉山, 刘利军. 污泥复混肥对早熟禾草坪草生长性状及土壤酶活性的影响. 中国生态农业学报, 2008, 16(5): 1104-1108.
- [ 13 ] Mutegi J K, Mugendi D N, Verchot L V, Kung'u J B. Combining napier grass with leguminous shrubs in contour hedgerows controls soil erosion without competing with crops. Agroforestry Systems, 2008, 74(1): 37-49.
- [ 14 ] 李德明, 刘金祥, 孙进武. 刈割频率对皇竹草产量及其光合生理生态的影响. 广东农业科学, 2010, (5): 39-41.
- [ 15 ] 马崇坚, 刘发光, 陈敬超, 何俊梅. 不同种植年限皇竹草产量与生物学性状关系分析. 草业科学, 2011, 28(8): 1473-1478.
- [ 16 ] 王成刚, 钱排峰. 不同施氮量对皇竹草生长的影响. 安徽农业科学, 2012, 40(33): 16169-16170.
- [ 17 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [ 18 ] Gascó G, Lobo M C. Composition of a Spanish sewage sludge and effects on treated soil and olive trees. Waste Management, 2007, 27(11): 1494-1500.