

生活污水对滩涂土壤性质和苏丹草生长及重金属累积的影响

许光辉, 柏彦超, 汪莉, 赵海涛, 单玉华, 盛海君, 封克*

(江苏省扬州农业环境安全技术服务中心, 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘要: 滩涂盐土农业利用的主要障碍是盐分含量过高和缺乏有机质。施用生活污水可快速提高滩涂土壤有机质含量, 加快土壤熟化, 但由于担心污泥含有一定量的重金属, 其施用受到一定的限制。采用盆栽苏丹草的试验方法, 研究滩涂盐土施用不同量的生活污水后对土壤性质、植物生长和对重金属累积的影响。结果表明, 生活污水施用于滩涂盐土后降低了土壤 pH 值, 提高了 EC 值和总盐含量; 苏丹草的出苗率、株高和鲜重增加; 施用污泥提高了苏丹草植株中全氮、全磷及叶绿素的含量, 且随施用量的增加而增大, 但对植株中全钾的含量无显著影响; 苏丹草中 Zn、Cd 含量随着污泥施用量增加呈增长的趋势, 但 Pb、Ni、Cu 含量变化不大。在试验条件下, 所施用污泥中重金属向苏丹草体内转移的比例介于 0.13%~13.44% 之间。就这种土壤而言, 要更为注意含 Pb 量较高的污泥施用, 而 Cu 则是最为安全的。总体考虑, 一次性施用于污泥应控制在 $8 \text{ t} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$ 以下。

关键词: 滩涂盐土; 污泥; 苏丹草

中图分类号: X503.233 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2011)07-1321-07

Effects of Sewage Sludge Application on the Properties of Mudflat Saline Soil, the Growth and Heavy Metal Accumulation of Sudangrass(*Sorghum Sudanense*(Piper) Stapf)

XU Guang-hui, BAI Yan-chao, WANG Li, ZHAO hai-tao, SHAN Yu-hua, SHENG Hai-jun, FENG Ke*

(Yangzhou Technical Service Center for Agro-Environment Safety of Jiangsu Province/College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: The main obstacles of mudflat saline soil for agricultural use include high salt content and lack of organic matter. Sewage sludge can be applied to rapidly elevate organic matter content of mudflat saline soil, and to accelerate soil maturation. However, considering that sewage sludge may contain a certain amount of heavy metals, its safety in agricultural use is widely concerned. With sudangrass as material, a pot experiment was carried out to investigate the effects of sewage sludge application in mudflat saline soil on soil properties, plant growth and accumulation of heavy metals. The results showed that: application of sewage sludge decreased the soil pH, increased EC values and the total salt content; and elevated the emergence rate plant height and fresh weight of sudangrass. Sewage sludge also improved the contents of total nitrogen, total phosphorus and chlorophyll content in sudangrass plants. However, sewage sludge had no significant effect on the total potassium content of plants. The contents of Zn and Cd in the sudangrass tended to increase with the sewage sludge application rate, while Pb, Ni, Cu contents remained very low and changed little. In this experiment, approximately 0.13%~13.44% of heavy metals in sewage sludge applied to saline soil was transferred into the plant body of sudangrass. The content of Pb in the sewage sludge applied in this soil should be more concerned than that of Cu in the sludge. General considerations, one-time application of dry sludge per 667 m^2 should be less than 8 tons.

Keywords: mudflat saline soil; sewage sludge; sudangrass

沿海滩涂是在海岸线变迁的漫长自然过程中经海相和陆相交替形成的水陆交汇区域^[1], 我国现有滩

涂 217.09 万 hm^2 , 目前还在以一定的速度增长^[2-3], 随着可耕地面积的逐年递减和淡水资源的日益匮乏, 滩涂盐土的开发利用越来越受到人们的关注。滩涂盐土盐分偏高、土体发育弱、理化性状差、有机质含量低、肥力水平低下^[4-5], 因此其快速改良已成为迫切需要研究解决的重要课题。生活污水是生活污水处理后的次

收稿日期: 2010-12-28

基金项目: 江苏省环境材料与环境工程重点实验室基金

作者简介: 许光辉(1985—), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要从事农业环境安全研究。E-mail: M080999@163.com

* 通讯作者: 封克 E-mail: fengke@yzu.edu.cn

生产物,由有机残片、细菌菌体、无机颗粒、胶体等组成的极其复杂的非均质体^[6],富含有机质、氮、磷等矿物质元素,同时含有维持植物正常生长发育的多种微量元素^[7]。研究表明,生活污水可增加土壤的孔隙度并改善孔隙的大小比例,在降低土壤容重同时提高了土壤中团聚体的稳定性、持水能力和土壤的保水能力^[8-10],因此在快速、廉价改良滩涂盐土上具有广阔的应用前景。目前存在的问题是,对生活污水中所含的某些重金属是否会在植物体内积累以及其安全施用量的控制还缺少研究。

苏丹草(*Sorghum sudanense*(Piper) Stapf)是禾本科高粱属一年生高产优质牧草,它具有适应性广、再生力强、耐高温、耐旱、耐盐碱、抗病能力强等特点^[11-12],在我国中度盐渍土壤特别是滨海盐渍土壤上可以大面积种植^[12],作为优质耐盐牧草在滩涂土壤上种植能够产生很好的经济效益、社会效益和生态效益^[13-14]。本文探讨生活污水施用于滩涂盐土后对土壤性质、苏丹草生长和对重金属累积的影响,为利用生活污水快速改良滩涂方面的环境安全评价提供原始依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试滩涂盐土采自江苏省如东市兆盈农场,供试

污泥(含水率 82.01%)取自扬州市汤汪污水处理厂,供试苏丹草由扬州市种子公司提供。滩涂盐土及污泥的基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计

供试滩涂盐土风干后过 20 目筛,采用室内盆栽方法。在干重为 1.5 kg 滩涂盐土中加入鲜污泥,折合干重后的加入量分别为 0 g (CK)、20 g (S1)、40 g (S2)、60 g (S3)、80 g (S4)、100 g (S5)、150 g (S6),相当于每 666.7 m² 滩涂盐土表土(约 150 t)中施入干污泥 0、2、4、6、8、10、15 t,共 7 个不同施用量处理。将污泥和土壤搅拌均匀后装入直径 16 cm、高 13 cm 的圆形塑料盆,每个处理重复 4 次。装盆预培养 10 d 后播种,另留部分土样在室温下自然风干后用于有关性质的测定。每盆选 100 粒饱满的苏丹草种子均匀撒播后在表面覆盖 0.5 cm 厚土层。播种 4 d 出苗后进行间苗,每盆保留 30 株均匀分布、大小一致的植株。苏丹草生长期室温为 25~35 ℃,平均每日光照 10 h。每 2 d 用自来水浇灌 1 次,调节土壤含水率在最大持水量的 60%左右。2010 年 8 月 3 日进行刈割测定。

1.3 测定项目及方法

供试滩涂盐土及污泥理化性质的测定采用土壤农化常规分析法:pH 值采用 5:1 的水土比浸提、电极法测定,EC 采用 5:1 的水土比浸提、电导法测定,总

表 1 滩涂盐土及生活污水的基本理化性质
Table 1 Basic properties of mudflat saline soil and sewage sludge used in this study

项目 Items	滩涂盐土 Mudflat saline soil	污泥 Sewage sludge	污泥农用时污染物控制标准(GB 18918—2002, pH≥6.5) Control standard for pollutants in sludge from agricultural use
pH	8.30	6.32	
电导率, EC/mS·cm ⁻¹	2.53	3.32	
盐分/‰	7.17	14.5	
有机质, OM/g·kg ⁻¹	4.60	360.98	
全氮, TN/g·kg ⁻¹	0.20	28.90	
全磷, TP/g·kg ⁻¹	0.62	18.13	
全钾, TK/g·kg ⁻¹	5.02	2.41	
碱解氮, AN/mg·kg ⁻¹	0.00	1 836.57	
速效磷, AP/mg·kg ⁻¹	2.76	1 558.66	
水溶性钾/mg·kg ⁻¹	0.89	14.05	
水溶性钠/mg·kg ⁻¹	22.27	14.50	
总 Zn/mg·kg ⁻¹	50.31	1 078.87	3 000
总 Cr/mg·kg ⁻¹	28.99	690.54	1 000
总 Pb/mg·kg ⁻¹	11.80	58.80	1 000
总 Cd/mg·kg ⁻¹	0.48	4.39	20
总 Ni/mg·kg ⁻¹	23.05	80.53	200
总 Cu/mg·kg ⁻¹	31.96	733.13	1 500

盐采用残渣烘干-质量法,有机质采用重铬酸钾容量法-外加加热法,全氮采用半微量凯氏法,全磷采用硫酸-高氯酸消煮法,全钾采用氢氧化钠熔融-火焰光度法,碱解氮采用碱解扩散法,速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,水溶性钾钠采用 5:1 的水土比浸提、火焰光度法测定,重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的含量采用 HCl-HNO₃-HClO₄ 消煮,原子吸收法测定^[15]。

苏丹草种植后,记录每个处理的出苗日期及出苗个数;在刈割前 1 d 测量株高,以植株基部到生长点的高度为准。苏丹草刈割后去离子水洗净,用吸水纸吸干后直接称鲜重,然后置于 105 ℃ 烘箱中杀青 30 min,在 65 ℃ 条件下烘干至恒重,粉碎。植物样品用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,采用靛酚蓝比色法测全氮,钼锑抗比色法测全磷,火焰光度法测全钾^[16];叶绿素含量测定采用乙醇丙酮混合液法^[17];植株体内的 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的含量采用 HNO₃-HClO₄ 消煮,原子吸收法测定^[16]。

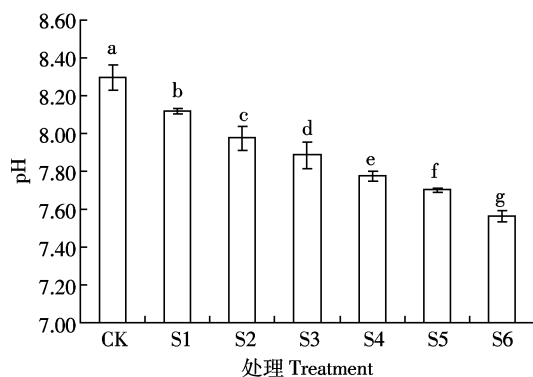
实验数据用 SPSS13 软件处理分析。

2 结果与分析

2.1 施用生活污水对滩涂盐土 pH、EC 及总盐的影响

本试验中所用的污泥中主要重金属的含量均未超出国家污泥农用控制标准(GB 18918—2002)中所规定的含量(见表 1)。

图 1 显示,随着污泥施用量的增加,土壤 pH 值不断降低,且各处理间差异显著。与 CK 相比,处理 S6 的 pH 值由 8.30 降到 7.56,降低了 0.74 个 pH 单位。可见生活污水的施用有利于滩涂盐土的碱性降低,使



柱上不同字母表示处理间差异显著($P < 5\%$)。下同。

Different letters above the bars among treatments indicate significant difference at 5% level. The same below.

图 1 污泥施用量对滩涂盐土 pH 值的影响

Figure 1 Effect of sewage sludge application on pH of mudflat saline soil

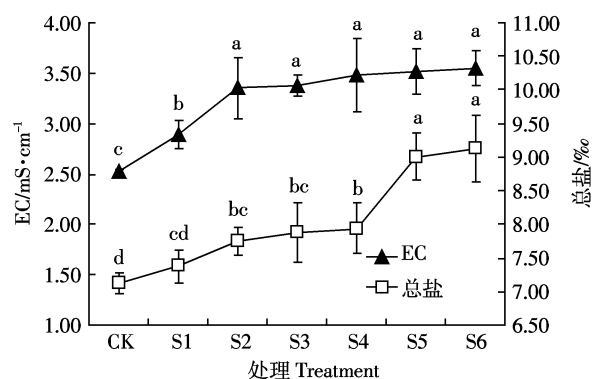


图 2 污泥施用量对滩涂盐土电导率及总盐含量的影响

Figure 2 Effects of sewage sludge application on EC and total salt content of mudflat saline soil

土壤趋于中性。这是由于生活污水为弱酸性(pH6.32),两者混合可明显降低土壤 pH 值。

图 2 表明,土壤的总盐含量及电导率(EC)随着污泥施用量的增加而增加,这主要是由于污泥的总盐含量(14.5‰)和电导率(3.32 mS·cm⁻¹)高于滩涂盐土的总盐含量(7.17‰)和电导率(2.53 mS·cm⁻¹)。

2.2 滩涂盐土施用生活污水对苏丹草生长的影响

表 2 显示,污泥的施用量会对苏丹草的出苗有一定的影响。处理 S1、S2、S3、S4 种植的苏丹草与 CK 在同一天出苗,而处理 S5、S6 出苗日期比其他处理晚 1 d,表明过多施用污泥会推迟苏丹草的出苗时间。从出苗率看,处理 S3 和 S4 明显高于其他处理,而处理 S5 和 S6 显著低于其他处理,特别是处理 S6 的出苗率仅为 CK 的 59.2%。在施用污泥的各处理中,苏丹草株高及鲜重均比 CK 有显著的提高,随着污泥施用量增加,株高增加最多的是处理 S3 和 S4,处理 S4 比对照增高 87.1%,增高最少的是处理 S1 和 S6。鲜重增加最多的也是处理 S3 和 S4,处理 S4 的鲜重达到 CK 鲜重的 4.23 倍,鲜重增加最少的是处理 S1 和 S2。由此可见,在本试验的范围内,较多的污泥施用对苏丹草的出苗有一定抑制作用,但对其生长均有促进,只是促进的程度上有所差异。污泥之所以能促进苏丹草的生长是由于污泥中含有大量的 N、P 等有利于植物生长的营养物质(见表 1)。若以鲜重作为指标并同时考虑出苗率,就污泥施用量而言,每 667 m² 施用 8 t 污泥(处理 S4)可以获得最大的生物学产量。

2.3 施用生活污水对苏丹草养分吸收及叶绿素含量的影响

表 3 显示,施用生活污水处理的苏丹草中全氮含量比对照有显著的提高,其中处理 S4 的全氮含量

最高,但与处理 S3、S5、S6 之间的差异不显著。苏丹草的全磷含量随着污泥施用量的增加而增加,最大用量处理 S6 的含量是 CK 含量的 2.85 倍。施用污泥后苏丹草中全钾的含量有所降低,但处理间差异不显著。

苏丹草生长期间,CK 的植株呈淡绿色,生长矮小,下部叶片发黄并干枯,叶柄短,叶子小而纤弱,明显生长不良,施用污泥后这种现象得到改善。从表 3 看,污泥处理的苏丹草叶绿素含量均显著高于 CK,但处理 S3、S4、S5、S6 之间差异不显著。

2.4 施用生活污水对苏丹草体内重金属积累的影响

由表 4 可以看出,苏丹草中 Zn、Cd 的含量随着污泥施用量的增加而增加,大部分施用污泥处理与 CK 间的差异达到显著性水平。而施用不同量的污泥对苏丹草中 Pb、Ni、Cu 含量影响不大,各处理间差异不显著,即施用生活污水对苏丹草中 Zn、Cd 的积累影响较大,而对 Pb、Ni、Cu 的积累无明显影响。

2.5 施用生活污水对重金属向苏丹草体内转移的影响

将生长在施有污泥土壤上的苏丹草所吸收的重

表 2 污泥施用量对苏丹草生长的影响

Table 2 Effects of sewage sludge application on the growth of sudangrass

处理 Treatment	出苗时间/d Emergence time	出苗率/% Seedling emergence	株高/cm Height	鲜重/g Fresh weight
CK	3	76.0±3.14ab	33.3±0.63e	3.5±0.29d
S1	3	69.5±6.50c	47.3±1.03d	10.0±0.71c
S2	3	71.7±2.60bc	54.3±3.14bc	10.5±0.65c
S3	3	78.0±1.68a	59.0±2.73ab	13.3±0.85ab
S4	3	79.0±1.47a	62.3±2.28a	14.8±0.63a
S5	4	69.8±3.5c	56.2±1.30ab	13.0±0.41b
S6	4	45.0±1.15d	47.3±2.10cd	12.5±0.29b

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters following the figures in the same column indicate significant differences($P<0.05$). The same below.

表 3 污泥施用量对苏丹草中全氮、全磷、全钾及叶绿素含量的影响

Table 3 Effects of sewage sludge application on total nitrogen, phosphorus, potassium and chlorophyll content of sudangrass

处理 Treatment	全 N/mg·g ⁻¹ TN	全 P/mg·g ⁻¹ TP	全 K/mg·g ⁻¹ TK	叶绿素/mg·g ⁻¹ Chlorophyll
CK	12.19±0.62c	1.70±0.10f	26.54±0.80a	1.70±0.05c
S1	29.21±0.73b	2.69±0.17e	23.72±2.19a	2.39±0.15b
S2	29.42±0.46b	3.55±0.18d	23.45±1.27a	2.58±0.07b
S3	30.87±0.80ab	3.77±0.06cd	24.91±0.90a	2.87±0.08a
S4	32.97±1.25a	4.12±0.28bc	24.25±0.37a	2.89±0.04a
S5	30.59±0.70ab	4.57±0.13ab	22.86±0.67a	2.91±0.11a
S6	30.79±1.82ab	4.84±0.18a	22.42±0.05a	2.98±0.04a

表 4 污泥施用量对苏丹草中重金属含量的影响

Table 4 Effects of sewage sludge application on heavy metals content of sudangrass

处理 Treatment	Zn/mg·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Ni/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹
CK	24.85±0.65e	0.40±0.01e	24.25±0.25a	7.10±0.20a	13.59±0.60a
S1	29.04±0.95d	0.43±0.02de	24.29±0.32a	7.12±0.20a	13.84±0.40a
S2	30.45±0.60cd	0.48±0.00cd	24.91±0.78a	7.17±0.09a	14.73±0.45a
S3	31.91±0.67c	0.49±0.02c	24.70±0.44a	7.58±0.04a	14.52±0.51a
S4	33.13±0.64c	0.50±0.02c	25.19±1.16a	7.56±0.18a	13.53±0.29a
S5	38.17±1.24b	0.70±0.02b	24.31±0.67a	7.23±0.21a	13.94±0.27a
S6	41.24±1.77a	0.77±0.04a	25.88±1.40a	7.36±0.06a	14.89±0.03a

金属总量减去对照吸收的该重金属的量,其多余的部分可以认为是来自于污泥带入的重金属。将这部分重金属的量除以施入污泥中重金属的量即可得到本试验条件下污泥中某重金属向苏丹草体内转移的比例。结果表明,就同一种重金属来说,随着污泥施用量的增加,总的吸收量是增加的,但吸收量占施用量的比例均呈减小趋势(图3)。就不同的重金属来说,其转移比例有较大差异,其中Pb的转移比例最高,按施用量从小到大该比例范围在13.44%~2.71%之间,Cu的转移比例最低,处于0.62%~0.13%之间。

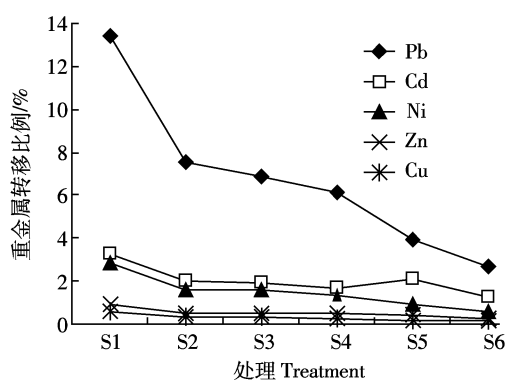


图3 施用生活污水对重金属向苏丹草体内转移的影响

Figure 3 Effects of sewage sludge application on the rate of heavy metals transferred into the sudangrass body

3 讨论

合适的土壤容重、孔隙度和导水率是植物生长的必要条件^[18]。对江苏滩涂土壤改造来说,除降低盐分含量外,重要的是增加其有机质含量和改善相应的理化性质,如增加其水稳性团粒结构和适当降低其pH等。就污泥改善土壤的物理性状方面,已有研究报道施用污泥堆肥会导致沙土总孔隙度增高^[19],在降低土壤容重的同时可提高土壤中团聚体的稳定性、持水能力和土壤的保水能力^[9]。Cheng等^[8]认为,滩涂土壤的pH值为偏碱性,污泥pH值为偏中性,所以污泥施用于土壤可使土壤pH降低,本试验的结果证实了这一论断(图1)。因此适量施用污泥对调整沿海滩涂土壤较高的pH值是可行的。

苏丹草可抗旱,较耐盐碱,在0~30 cm土层全盐量6.55‰条件下,可以正常出苗和生长,在总盐量8.36‰的耕作土壤上则出苗和生长会受到抑制^[20]。本试验采用的滩涂土壤的含盐量为7.17‰,CK的出苗率在70%以上(表2),尚处于正常。但随着污泥施用量的增加,出苗率呈现下降趋势,如处理S5和处理

S6的土壤总盐含量已高达9.00‰以上(图2),显然污泥中较高的含盐量对苏丹草的出苗造成了抑制。Casado-vela等的研究表明,施用大于20%的污泥使得土壤的总盐及EC有明显提高,进而抑制了种子萌发^[10]。本试验的结果提示,滩涂土壤施用污泥时,在更低的污泥用量下这种情况就有可能发生,如处理S6的施用量是每666.7 m²施干污泥15 t,相当于表层土壤10%的用量,导致出苗率已降至45%,这可能是由于与一般土壤相比,滩涂土壤的缓冲性能更差,对污泥所带入土体的盐分的吸附能力小,使土壤水分中盐分的含量提高较多,故对种子出苗和生长的影响更大。

污泥中含有较高的有机质和丰富的氮、磷等矿物质元素,同时含有维持植物正常生长发育的多种微量元素^[7],因此会促进植物的生长。肖玲等^[21]用污水处理厂的消化污泥对小麦的生长影响进行了盆栽试验,结果表明随着污泥施用量的增加小麦植株产量较对照有明显增加,而且茎叶增长幅度较大。张增强等^[22]研究表明污泥堆肥可明显促进黑麦草的分蘖能力,其鲜重和总干重随污泥堆肥施用量的增加而增大。本试验施用污泥后的苏丹草中全氮、全磷元素比对照有显著提高,说明污泥中的这些营养元素有效性很高,能够被植物迅速吸收利用。但施用污泥后苏丹草体内的钾含量并没有明显增加(表3),这是因为尽管污泥中的水溶性钾高于滩涂土壤,但就土壤全钾含量(表1)来说,后者(5.02 g·kg⁻¹)高于前者(2.41 g·kg⁻¹),加之滩涂土壤中较高的钠离子含量(表1)也会通过离子间的拮抗作用对钾离子的吸收形成抑制,所以施用污泥对苏丹草中全钾含量影响不大。本试验随着污泥施用量的增加株高和鲜重呈现先增加后降低的趋势,处理S4的苏丹草株高和鲜重均达到最高,表明一次性的污泥施用量在8 t·667 m⁻²及以下较为合适。

生活污水中重金属是限制其大规模土地利用的重要因素^[23]。污泥施入土壤的同时重金属元素也随之进入土壤,随着污泥施用量的增加,土壤中重金属元素含量也会增加^[24]。但重要的是这些重金属是否会向植物体内转移以及转移的量有多少。李国学等^[25]的研究结果表明,随着污泥施用量的增加,青菜中重金属(包括Cu、Cd、Zn、Ni、Pb)含量也呈增加趋势,当污泥施用量>5%时,Cu、Zn超过国家标准允许范围,当施用量在10%以上时,Cd超标。本试验中,随着污泥施用量的增加,苏丹草中Zn、Cd含量呈增加趋势,而与对照相比,施用污泥对苏丹草中Pb、Ni、Cu含量影响

不大,说明苏丹草对不同重金属的富集作用效果不同。重金属向植物体内的转移比例可以用来衡量特定土壤条件下重金属的活性和有效程度。本实验结果显示,污泥中几种重金属向植物体内的转移比例均在15%以下,因此只要污泥中重金属含量不是很高,对当季作物是安全的。但应该注意的是,不同重金属的转移能力相差较大,在所试土壤中,Pb向苏丹草体内的迁移能力最强,Cd、Ni、Zn次之,Cu的转移能力最弱,说明就该种土壤而言,要更为注意含Pb量较高的污泥的施用,而Cu则是最为安全的;同时也要注意,生活污水中重金属即便符合《农用污泥中污染物控制标准》,但也远远大于土壤背景值,如果长期施用脱离科学监控,必将给环境造成不良影响,甚至产生二次污染^[26-27]。

4 结论

(1)生活污水施用于滩涂盐土,降低了土壤pH值,但提高了土壤EC值和总盐含量。

(2)施用生活污水提高了苏丹草中的全氮、全磷及叶绿素含量,对全钾的含量无显著影响。

(3)苏丹草中Zn、Cd含量随着污泥施用量增加呈增长的趋势,但对Pb、Ni、Cu含量影响不大;在本试验条件下,所施用污泥中的重金属向体内转移的比例范围在0.13%~13.44%之间,就该种土壤而言,要更为注意含Pb量较高的污泥的施用,而Cu则是最为安全的。

(4)施用污泥可明显增加苏丹草的生长,考虑到其他因素,一次性施干污泥应控制在 $8\text{ t}\cdot 667\text{ m}^{-2}$ 以下,但同时也要注意长期施用后,土壤中累积的重金属可能对环境造成潜在危害。

参考文献:

- [1] 严长清,孙伟,陆效平,等.江苏省沿海滩涂土地利用与生态保护研究[J].生态科学,2007,26(3):263-268.
YAN Chang-qing, SUN Wei, LU Xiao-ping, et al. Study on coastal wetlands use and its ecological protection of Jiangsu province[J]. *Ecologic Science*, 2007, 26(3): 263-268.
- [2] Wang Y. The mudflat coast of China[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1983, 40(1): 160-171.
- [3] Zhu D K, Martini I P, Brookfield M E. Morphology and land use of coastal zone of the north Jiangsu plain Jiangsu Province, eastern China[J]. *Journal of Coastal Research*, 2001, 14: 591-599.
- [4] 王芳,朱跃华.江苏省沿海滩涂资源开发模式及其适宜性评价[J].资源科学,2009,31(4):619-628.
WANG Fang, ZHU Yue-hua. Development patterns and suitability assessment of tidal flat resources in Jiangsu Province[J]. *Resources Science*, 2009, 31(4): 619-628.
- [5] 张雯雯.滩涂土壤盐分梯度对微生物群落结构影响的研究[D].扬州:扬州大学,2009.
ZHANG Wen-wen. The study of effects of mudflat soil salt gradient on the microbial community structure[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2009.
- [6] 曹秀芹,陈珺.污水处理厂污泥处理存在的问题分析[J].北京建筑工程学院学报,2002,18(1):1-4.
CAO Xiu-qin, CHEN Jun. Analysis on problems of sludge disposal in wastewater treatment plant[J]. *Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture*, 2002, 18(1): 1-4.
- [7] Abad E, Martínez K, Planas C, et al. Priority organic pollutant assessment of sludges for agricultural purposes[J]. *Chemosphere*, 2005, 61(9): 1358-1369.
- [8] Cheng H F, Xu W P, Liu J L. Application of composted sewage sludge (CSS) as a soil amendment for turf grass growth[J]. *Ecological Engineering*, 2007, 29: 96-104.
- [9] Ojeda G, Alcaniz J M, Ortiz O. Runoff and losses by erosion in soils amended with sewage sludge[J]. *Land Degradation and Development*, 2003, 14(6): 563-573.
- [10] Casado-Vela J, Sellés S, Navarro J, et al. Evaluation of composted sewage sludge as nutritional source for horticultural soils[J]. *Waste Management*, 2006, 26(9): 946-952.
- [11] 陈宝书.牧草饲料作物栽培学[M].北京:中国农业出版社,2001: 23-33.
CHEN Bao-shu. Forage crop cultivation[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2001: 23-33.
- [12] 徐玉鹏,武之新,赵忠祥.苏丹草的适应性及在我国农牧业生产中的发展前景[J].草业科学,2003,20(7):23-25.
XU Yu-peng, WU Zhi-xin, ZHAO Zhong-xiang. The adaptability and the developing foreground of Sudan grass in the produce of agriculture and animal husbandry in China[J]. *Pratacultural Science*, 2003, 20(7): 23-25.
- [13] Flowers T J. Salinisation and horticultural production[J]. *Scientia Horticulture*, 1999, 78: 1-4.
- [14] 谢振宇,杨光穗.牧草耐盐性研究进展[J].草业科学,2003(8):11-17.
XIE Zhen-yu, YANG Guang-sui. Advances in salt tolerance of forage plants[J]. *Pratacultural Science*, 2003(8): 11-17.
- [15] 鲍士旦.土壤农业化学分析[M].(第三版).北京:中国农业出版社,2000:25-403.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. (3rd Edition) Beijing: China Agricultural Press, 2000: 25-403.
- [16] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000:302-336.
LU Ru-kun. Analytical methods for soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 302-336.
- [17] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000:134-261.

- LI He-sheng. Experimental principles and techniques of plant physiology and biochemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 134-261.
- [18] 苏德纯, 张福锁, 黄焕忠. 粉煤灰钝化污泥人工土壤上高麦草生长发育及营养状况研究 [J]. 应用与环境生物学报, 1997, 3 (3): 230-235.
- SU De-chun, ZHANG Fu-suo, HUANG Huan-zhong. The growth of a-gropyron elongatum in an artificial soil mix with coal fly ash and sewage sludge[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 1997, 3(3): 230-235.
- [19] Paliat M, Guidi G, La Marca M, et al. Effects of sewage sludge and composts on soil porosity and aggregation [J]. *Environ Qual*, 1981, 10: 556-561.
- [20] 许国成, 豆 卫, 韩天虎. 苏丹草、高丹草和籽粒苋引种栽培试验 [J]. 甘肃畜牧兽医, 2006(6): 10-12.
- XU Guo-cheng, DOU Wei, HAN Tian-hu. Study on introduction and cultivation of *Sudangrass*, *Sorghum sudanense* and *Amaranthus hypochondriacus* L.[J]. *Gansu Animal and Veterinary Sciences*, 2006 (6): 10-12.
- [21] 肖 玲, 李 岗, 郝卫平. 壤土施污泥对小麦生长的影响研究[J]. 西北农业大学学报, 1994, 22(1): 89-93.
- XIAO Ling, LI Gang, HAO Wei-ping. The effects of applying sewage sludge to manural loess soil on wheat growth[J]. *Journal of Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry*, 1994, 22(1): 89-93.
- [22] 张增强, 薛澄泽. 污泥堆肥对几种草坪草生长的响应[J]. 草业学报, 1997, 6(1): 57-65.
- ZHANG Zeng-qiang, XUE Cheng-ze. Responses of some turfgrasses to sewage sludge compost[J]. *Acta Pratacultural Science*, 1997, 6(1): 57-65.
- [23] 刘东方, 宋 君, 李克勋. 北方典型污水处理厂污泥农用可行性分析[J]. 农机化研究, 2010(3): 211-214.
- LIU Dong-fang, SONG Jun, LI Ke-xun. Agriculture application feasibility of sewage sludge from typical wastewater treatment plants in north China[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2010 (3): 211-214.
- [24] 李艳霞, 赵 莉, 陈同斌. 城市污泥堆肥用作草皮基质对草坪草生长的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(6): 797-801.
- LI Yan-xia, ZHAO Li, CHEN Tong-bin. The municipal sewage sludge compost used as lawn medium[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(6): 797-801.
- [25] 李国学. 施用污泥堆肥对土壤和青菜(*Brassicachinensis*)重金属积累特性的影响[J]. 中国农业大学学报, 1998, 3(1): 113-118.
- LI Guo-xue. Heavy metal accumulation in Chinese cabbage(*Brassica chinensis*) grown in soil amended with sewage sludge compost[J]. *Journal of China Agricultural University*, 1998, 3(1): 113-118.
- [26] 吴新民, 陈德明. 施用城市污泥对土壤中重金属积累和迁移的影响[J]. 环境与健康杂志, 2005, 22(3): 177-179.
- WU Xin-min, CHEN De-ming. Accumulation and movement of heavy metals in the environment through sewage sludge using in agriculture [J]. *Journal of Environment and Health*, 2005, 22(3): 177-179.
- [27] 张朝升, 陈秋丽, 张可方, 等. 大坦沙污水厂污泥重金属形态及其生物有效性的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 1259-1264.
- ZHANG Chao-sheng, CHEN Qiu-li, ZHANG Ke-fang, et al. Chemical forms and bioavailability of heavy metals in the sludge of Datansha wastewater treatment plant[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3): 1259-1264.