

熊江波, 赖发英, 李小飞, 等. 城市污泥改良沙土的环境影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(23): 300-303.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.23.075

# 城市污泥改良沙土的环境影响

熊江波<sup>1</sup>, 赖发英<sup>1</sup>, 李小飞<sup>2</sup>, 凌志友<sup>1</sup>, 郭佳玮<sup>1</sup>, 李昊<sup>3</sup>

(1. 江西农业大学国土资源与环境学院, 江西南昌 330045; 2. 江西省红壤研究所, 江西南昌 331717;  
3. 江西省万载县农业局, 江西万载 336100)

**摘要:**采用室内喷头模拟降雨试验, 研究不同污泥施用量对沙土养分含量和重金属污染的影响。设置3个处理, 各处理污泥施用量为0.3、0.9、1.5 g/cm<sup>2</sup>。结果表明, 随着污泥施用量的增加, 沙土中总氮和总磷含量明显增加; 随着淋溶次数的增加, 总氮和总磷的淋失量增加, 3个处理0.3、0.9、1.5 g/cm<sup>2</sup>总氮的淋失率分别为27.38%、27.14%、25.41%, 总磷的淋失率分别为0.87%、1.16%、2.60%, 总氮淋失率大于总磷。3个处理铜(Cu)、锌(Zn)、铬(Cr)淋失率均小于2%, 铅(Pb)约10%, 镉(Cd)约20%; 重金属Zn、Cu、Pb、Cr、Cd在沙土中的滞留量均以1.5 g/cm<sup>2</sup>处理最大, 滞留量顺序为Zn > Cu > Cr > Pb > Cd, Zn最大, 约为120.32 mg, Cd最小, 约为0.18 mg; 3个处理滞留率Zn、Cu、Cr大于95%, Pb为约90%, Cd为约80%。以1.5 g/cm<sup>2</sup>污泥施用量进行风险评估, 沙土中各单项重金属含量均远小于土壤环境质量三级标准, 内罗梅综合污染指数除Zn(0.9)达警戒线值外, Cu、Pb、Cr、Cd都远小于0.7。城市污泥以1.5 g/cm<sup>2</sup>施用量改良沙土具有较好的可行性。

**关键词:**污水处理厂; 城市污泥; 沙土改良; 养分含量; 重金属污染; 淋溶; 滞留量; 风险评估; 内罗梅综合污染指数  
**中图分类号:** X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)23-0300-04

城市污泥是指城市生活污水处理厂在污水处理过程中产生的固体废弃物。我国干污泥排放量为550万~600万t/年,

而且每年以20%的速度递增<sup>[1]</sup>, 如何科学合理地处理处置这些污泥已成为当前亟待解决的问题<sup>[2]</sup>。李艳霞等对我国29个城市的污泥进行统计分析, 得出我国城市污泥(不包含工业污泥)有机质平均含量高达384 g/kg, 氮、磷、钾分别为27.0、14.3、7.0 g/kg, 有机质、氮和磷比纯猪粪分别高1/3~2/3<sup>[3]</sup>。由于污泥中富含氮、磷和植物必需的微量元素, 使污泥成为一种极具潜力的肥料<sup>[4]</sup>。污泥土地利用已成为国际上污泥处置的重要途径之一, 在我国土地施用法处置的污泥

收稿日期: 2018-04-07

基金项目: 江西省科技计划(编号: 20142BBF60003)。

作者简介: 熊江波(1974—), 女, 硕士, 高级实验师, 主要从事环境监测与分析研究。E-mail: xjb13879103690@126.com。

通信作者: 赖发英, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事土壤污染治理与生态工程修复研究。E-mail: laifyjx@163.com。

[13] Yang C F, Wang C C, Chen C H. Di-n-butyl phthalate removal by strain *Deinococcus* sp. R5 in batch reactors [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014, 95: 55-60.

[14] 李俊, 舒为群, 陈济安, 等. 降解DBP菌株CQ0302的分离鉴定及其降解特性[J]. *中国环境科学*, 2005, 25(1): 47-51.

[15] Jin D C, Liang R X, Dai Q Y, et al. Biodegradation of di-n-butyl phthalate by *Rhodococcus* sp. JDC-11 and molecular detection of 3,4-phthalate dioxygenase gene [J]. *Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2010, 20(10): 1440-1445.

[16] Wu X L, Liang R X, Dai Q Y, et al. Complete degradation of di-n-octyl phthalate by biochemical cooperation between *Gordonia* sp. strain JDC-2 and *Arthrobacter* sp. strain JDC-32 isolated from activated sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 176(1/2/3): 262-268.

[17] Wu X E, Wang Y Y, Liang R X, et al. Biodegradation of an endocrine-disrupting chemical di-n-butyl phthalate by newly isolated *Agrobacterium* sp. and the biochemical pathway [J]. *Process Biochemistry*, 2011, 46(5): 1090-1094.

[18] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[19] 张颖, 王丽华, 陈艺洋, 等. 一株DBP高效降解菌的筛选及降

解特性研究[J]. *东北农业大学学报*, 2016, 47(8): 46-54.

[20] 陈倩倩, 刘波, 王阶平, 等. 芽孢杆菌FJAT-28592抗真菌脂肽的研究[J]. *农业生物技术学报*, 2016, 24(2): 261-269.

[21] 王永中, 肖亚中. 植物内生菌及其活性代谢产物[J]. *生物学报*, 2004, 21(4): 1-5.

[22] 黄丽丽, 乔宏萍, 康振生. 植物内生细菌及其在农业方面的应用研究[J]. *临沂大学学报*, 2006, 28(6): 63-68.

[23] Barzanti R, Ozino F, Bazzicalupo M, et al. Isolation and characterization of endophytic bacteria from the nickel hyperaccumulator plant *Alyssum bertolonii* [J]. *Microbial Ecology*, 2007, 53(2): 306-316.

[24] Idris R, Trifonova R, Puschenreiter M, et al. Bacterial communities associated with flowering plants of the Ni hyperaccumulator *Thlaspi goesingense* [J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 2004, 70(5): 2667-2677.

[25] Lodewyckx C, Vangronsveld J, Porteous F, et al. Endophytic bacteria and their potential applications [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2002, 21(6): 583-606.

[26] Chen W M, Tang Y Q, Mori K, et al. Distribution of culturable endophytic bacteria in aquatic plants and their potential for bioremediation in polluted waters [J]. *Aquatic Biology*, 2012, 15(2): 99-110.

量占污泥处理总量的44.83%<sup>[5]</sup>。尽管如此,城市污泥的处置仍然存在占用土地的问题。

我国土壤沙漠化严重,沙漠化使土壤贫瘠,保水保肥力差,利用污泥改良沙漠化土壤具有很高的可行性和潜力<sup>[6]</sup>。李祯等用粉煤灰和城市污泥作荒漠土壤树肥,发现荒漠土壤蓄水性能提高,树木生长量增加<sup>[7]</sup>;华正伟用城市污泥施用于风沙土壤发现,随着污泥施用量增加,土壤孔隙度增加,杨树苗株高、叶面积及成活率都明显提高<sup>[8]</sup>。然而,污泥土地施用于土壤和地下水带来的重金属污染也一直是人们关注的问题。邹通等通过模拟淋溶试验发现,施用污泥后土壤中Cu、Zn、Pb、Cr的总量均有增加<sup>[9]</sup>;陈碧美对城市污泥农用重金属进行风险评价,得出Cd和Hg对污染贡献值较大<sup>[10]</sup>。然而,污泥施用量对沙土肥力和重金属积累两方面的影响少有报道。本研究以城市污泥和沙土为试验材料,通过室内喷淋模拟降雨试验,分析不同污泥施用量对沙土氮磷肥和重金属积累的影响,在此基础上评价污泥施用量对沙土重金属污染的风险,以期在城市污泥量化改良沙土提供理论依据和技术参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

试验于2017年6—9月于江西农业大学中心实验室进行,供试污泥取自江西省南昌市青山湖污水处理厂脱水污泥。污泥基本指标:pH值6.16,有机质含量338.00 g/kg,总氮含量19.00 g/kg,总磷含量11.34 g/kg,重金属锌(Zn)、铜(Cu)、铅(Pb)、铬(Cr)、镉(Cd)含量分别为1 115.12、539.69、33.11、128.49、2.07 mg/kg。供试沙地土壤取自江西省新建县厚田乡南部,沙地土壤的沙粒粒径较大,土壤贫瘠,对沙土样品分析测试显示,其养分和重金属含量极低(在本试验中忽略不计),在取样地多点分层分别取0~20、20~40、40~60 cm层沙土作为试验用土。

### 1.2 试验设计

试验采用室内模拟喷头淋溶模式。试验用淋溶柱为聚碳酸酯(简称PC)材质,柱高1 000 mm,内径96 mm,外径100 mm,柱内模拟沙地土壤结构由下至上分别装40~60、20~40、0~20 cm层沙土各20 cm,最上层按照各处理施用污泥。试验共设3个处理,各处理污泥施用量分别为0.3、0.9、1.5 g/cm<sup>2</sup>,每个处理做3次平行试验,共9个淋溶柱。淋溶前,用蒸馏水淋洗土壤至水分饱和,静置24 h之后,模拟中雨强度进行淋洗,每次淋洗量为2 200 mL去离子水,频率为1次/周,共淋洗5次,总淋洗量相当于沙地土壤的年均降雨量,模拟试验共进行35 d,每次淋溶时用烧杯收集淋溶液,密封后于冰箱中4℃保存,待分析用。

### 1.3 分析测试方法

采用凯氏定氮法测全氮含量,钼锑抗比色法测全磷含量,湿法消解;安捷伦3510型原子吸收分光光度计测定重金属含量<sup>[11]</sup>。采用Origin软件进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同污泥施用量下沙土中养分含量的变化分析

2.1.1 总氮和总磷淋失量动态变化 每次淋溶时将淋溶液收集到烧杯中,采用测定全氮、全磷含量,做3次重复并计算

平均值;淋失率是以淋失液中全氮或全磷含量除以淋失前污泥中全氮或全磷含量得到。由图1可知,在3种不同污泥施用量下,淋出液中总氮淋失量的变化规律相同,随着淋溶次数增加,淋失量增大,前2次淋失率大于后2次,第3次淋失率最大,为28.52%。3个处理0.3、0.9、1.5 g/cm<sup>2</sup>5次淋溶后,总氮淋失量分别为104.78、335.67、564.42 mg,淋失率分别为25.41%、27.14%、27.83%。总磷淋失量变化趋势与总氮相似,如图2所示,淋失量随着淋溶次数增加而增加,3个处理淋失率都是在第2次淋溶时达到最大为2.97%,第2次淋溶以后淋失率逐渐减小。3个处理0.3、0.9、1.5 g/cm<sup>2</sup>5次淋溶后总磷淋失量分别为6.39、8.54、10.73 mg,淋失率分别为0.87%、1.16%、2.60%。在相同污泥施用量和相同的淋溶条件下,总磷淋失率远小于总氮淋失率。

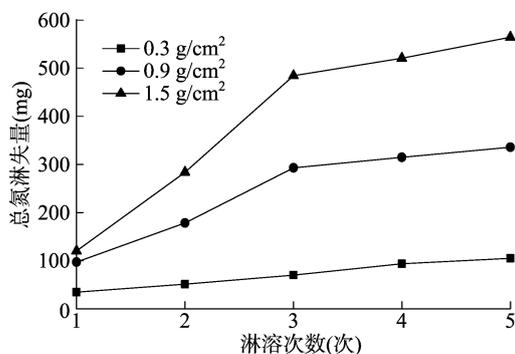


图1 总氮淋失量变化

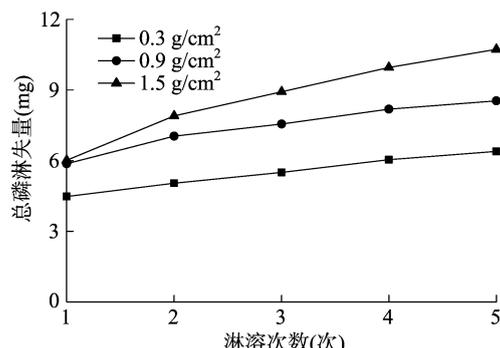


图2 总磷淋失量变化

2.1.2 沙土中总氮和总磷淋滞留量 5次淋溶结束后,取0~60 cm土层土混匀,测定全氮、全磷滞留量,每个处理做3次重复并计算平均值,结果列于表1。从表1可以看出,随着污泥施用量的增加,总氮、总磷在沙土中的滞留量逐渐增加,由此可以推测出总氮和总磷滞留量与污泥量有一定关系。3个处理0.3、0.9、1.5 g/cm<sup>2</sup>的总氮滞留率分别为74.59%、72.86%、71.62%,总磷滞留率分别为97.40%、98.84%、99.13%,随着污泥施用量增加,总氮滞留率有下降的趋势,而总磷的滞留率有增加的趋势,总磷的滞留率大于总氮,这与“2.1.1”节的研究结果一致。

### 2.2 不同污泥施用量下沙土中重金属含量分析

2.2.1 重金属淋失量动态变化 每次淋溶时将淋溶液收集到烧杯中,采用酸消解-原子吸收分光光度计法测定重金属含量,淋失率是淋失液中重金属含量除以淋溶前污泥中重金属含量计算而得。从图3~图7可以看出,各处理Zn、Cu、Pb、Cr、Cd淋失量随淋溶次数增加而增加;随污泥施用量的增

表1 5次淋溶后沙土中总氮和总磷滞留量

污泥施用量 (g/cm <sup>2</sup> )	总氮滞留量 (mg)	总磷滞留量 (mg)
0.3	307.55	239.71
0.9	901.34	729.76
1.5	1 497.27	1 219.77

加,淋失液中5种重金属含量均增加,说明淋失液中重金属含量与污泥施用量有一定关系,但每种元素各处理淋失率有所不同。如图3所示,污泥施用量为0.9 g/cm<sup>2</sup>处理,Zn在第2次淋溶时淋失率最大,为1.25%;污泥施用量为1.5、0.3 g/cm<sup>2</sup>时,Zn淋失率在第4次淋溶时最大,分别为1.62%、0.88%;5次淋溶后,0.3、0.9、1.5 g/cm<sup>2</sup>这3个处理的Zn淋失量分别为0.359 9、0.751 2、0.680 2 mg,淋失率分别为0.56%、1.03%、1.49%。从图4可以看出,0.3、0.9 g/cm<sup>2</sup>这2个处理的Cu淋失量和淋失率非常接近,而污泥施用量为1.5 g/cm<sup>2</sup>的处理,淋失量和淋失率明显高于这2个处理,淋失率在第3次淋溶时达最大,为1.08%;5次淋溶后,0.3、0.9、1.5 g/cm<sup>2</sup>这3个处理Cu淋失量分别为0.113 5、0.115 2、0.264 6 mg,淋失率分别为0.35%、0.33%、0.97%。由图5可知,污泥施用量为1.5 g/cm<sup>2</sup>的处理,Pb淋失量第1次淋溶时均小于0.9、0.3 g/cm<sup>2</sup>处理,第5次淋溶时Pb淋失量和淋失率都达到最大值,分别为0.225 2 mg和9.11%。当污泥施用量为0.9 g/cm<sup>2</sup>时,Pb淋失率也是在第5次最大,为10.94%;5次淋溶结束后,0.3、0.9、1.5 g/cm<sup>2</sup>这3个处理Pb淋失量分别为0.189 4、0.235 8、0.327 2 mg,淋失率分别为11.64%、10.94%、9.11%。从图6可以看出,不同污泥施用量下,Cr淋失量总体变化规律与Pb相似,0.3、0.9 g/cm<sup>2</sup>这2个处理在淋失量和淋失率变化上很接近;污泥施用量为1.5 g/cm<sup>2</sup>处理第1次的Cr淋失量均小于污泥施用量为0.9、0.3 g/cm<sup>2</sup>的处理;5次淋溶结束,0.3、0.9、1.5 g/cm<sup>2</sup>3个处理Cr淋失量分别为0.122 6、0.118 1、0.219 6 mg,淋失率分别为4.40%、1.41%、1.58%。Cd淋失规律如图7所示,当污泥施用量为1.5 g/cm<sup>2</sup>时,第1次Cd淋失量比污泥施用量0.9、0.3 g/cm<sup>2</sup>时都小,Cd在第5次淋溶时淋失率最大,而0.3、0.9 g/cm<sup>2</sup>处理的淋失量和淋失率变化程度上很接近;5次淋溶结束时,3个处理Cd淋失量分别为0.027 3、0.039 0、0.045 4 mg,淋失率分别为20.52%、19.94%、20.20%。由此看来,重金属淋失量较小,淋失率与元素性质有关,5种元素淋失率由大到小顺序为Cd > Pb > Cr > Zn > Cu。

### 2.2.2 沙土中重金属滞留量 5次淋溶结束后,取0~60 cm

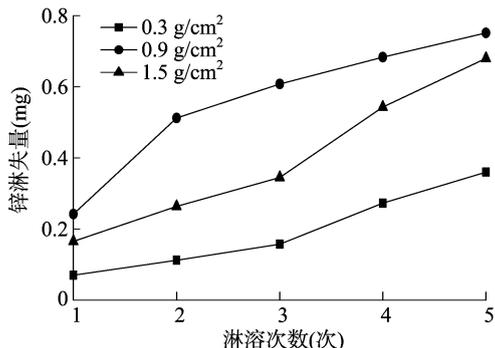


图3 锌淋失量变化

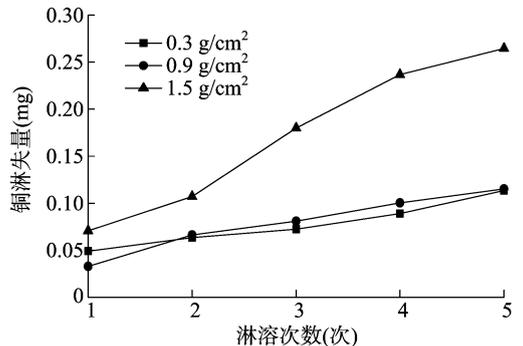


图4 铜淋失量变化

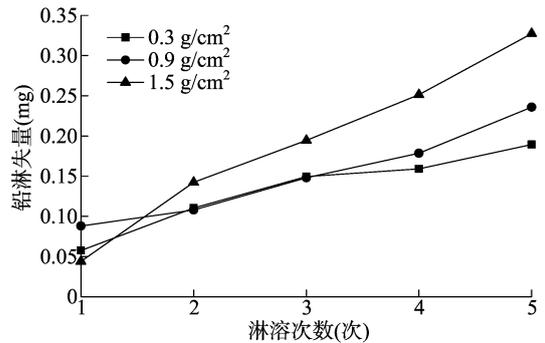


图5 铅淋失量变化

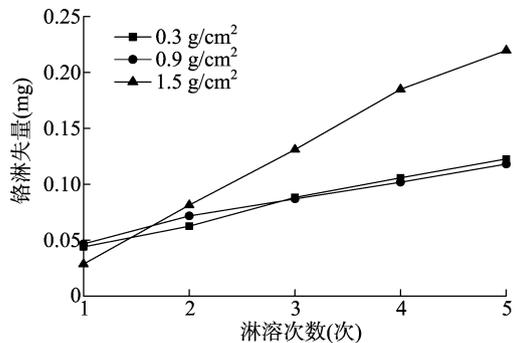


图6 铬淋失量变化

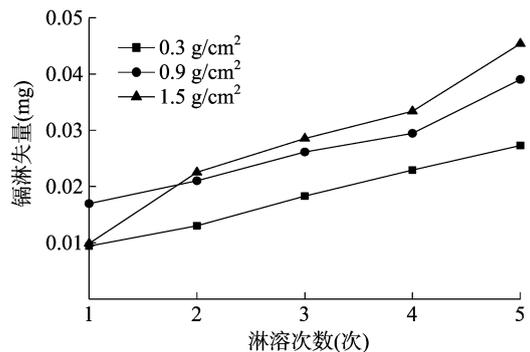


图7 镉淋失量变化

土层土混匀,采用酸消解-原子吸收分光光度计法测量重金属含量,每个处理做3次重复并计算滞留量,滞留率以滞留量除以污泥中重金属总含量计算。由表2可知,Zn、Cu、Pb、Cr、Cd在沙土中的滞留量随污泥施用量增加而增加,每种重金属元素都是以1.5 g/cm<sup>2</sup>处理的滞留量最大,滞留量从大到小依次为Zn > Cu > Cr > Pb > Cd,Zn最大,为120.32 mg,Cd最小,为0.18 mg;从滞留率来看,3个处理Zn、Cu、Cr的滞留率

表2 五次淋溶后沙土中重金属滞留量

污泥施用量 (g/cm <sup>2</sup> )	滞留量(mg)				
	Zn	Cu	Pb	Cr	Cd
0.3	23.84	11.60	0.53	2.67	0.02
0.9	71.85	35.02	1.92	8.25	0.10
1.5	120.32	58.30	3.27	13.72	0.18

均大于95%,Pb在90%左右,Cd约为80%。

2.2.3 重金属污染风险评估 由以上研究得出,5种重金属在土壤中的滞留量随污泥施用量的增加而增加,因此选择污泥施用量最大的处理1.5 g/cm<sup>2</sup>进行风险评估足够说明问题。从表3可以看出,5种重金属在沙土中的最大滞留量(表2)均比土壤环境质量三级标准小得多,其内梅罗指数均小于1,由此看来,以1.5 g/cm<sup>2</sup>污泥施用量改良沙土不存在重金属污染的潜在风险。

表3 1.5 g/cm<sup>2</sup>处理沙土中重金属污染风险评价

项目	GBⅢ标准(mg/kg)	$P_N$
Zn	500	0.90
Cu	400	0.05
Pb	500	0.08
Cr	300	0.04
Cd	1	0.00

注:GBⅢ表示GB 15618—1995《土壤环境质量标准》三级标准(pH值>6.5); $P_N$ 表示内梅罗综合污染指数, $P_N \leq 0.7$ 表示土壤清洁, $0.7 < P_N \leq 1.0$ 表示土壤重金属污染达警戒线值。

### 3 结论与讨论

污泥中全氮、全磷含量远高于土壤,能充分补充沙漠土壤的氮素、磷素<sup>[12]</sup>。本试验采用室内模拟中强度降雨淋溶模式研究不同污泥施用量与土壤中总氮和总磷滞留量的关系,结果表明,沙土中总氮和总磷的滞留量与污泥施用量有一定关系,污泥施用量越大,总氮和总磷的滞留量越大。5次淋溶结束时,总氮和总磷的淋失量和滞留量均以1.5 g/cm<sup>2</sup>处理最大,总氮淋失量最大为564.42 mg,占污泥总氮含量的27.38%,滞留量最大为1497.27 mg,占污泥总氮含量的72.62%;总磷最大淋失量为10.73 mg,占污泥总磷含量的99.13%,滞留量最大为1219.77 mg,占污泥总磷含量的0.87%。总氮的淋失率远远大于总磷的淋失率,而滞留率总磷比总氮大,研究结果与李霞等以科尔沁沙土为研究对象采用室内淋溶模拟试验<sup>[13]</sup>相同。尽管总氮的淋失率远大于总磷,但污泥中总氮的含量比总磷高,所以最终滞留在沙土中总氮和总磷的量都较高,这对提高沙土肥力有利。

污泥富含有机质和氮磷钾等营养元素,但污泥中也含有大量的有毒有害生物和物质,尤其是重金属,成为限制其农业土地利用的主要障碍<sup>[14]</sup>。本试验同时也考察了污泥施用量对重金属Cu、Zn、Pb、Cr、Cd淋失和滞留的影响。结果表明,3个处理Cu、Zn、Cr的淋失率较小,均小于5%,Pb和Cd的淋失率较大,Pb约为10%,Cd约20%。Cu、Zn、Pb、Cr、Cd在沙土中的滞留量均以1.5 g/cm<sup>2</sup>处理最大,滞留量顺序为Zn > Cu > Cr > Pb > Cd,Zn最大,为120.32 mg,Cd最小,为0.18 mg;从滞留率来看,3个处理中Cu、Zn、Cr的滞留率均大

于95%,Pb在90%左右,Cd的滞留率约80%。由此看来,Cu、Zn、Cr、Pb容易滞留于土壤中,造成土壤重金属污染,而Cd相对较容易淋失,这可能是因为Cu和Zn对有机质具有很强的亲和性,形成了较为稳定的有机络合态,从而提高了在土壤中的滞留量<sup>[15-16]</sup>。李霞等的研究表明,Cd在沙土中容易淋失造成地下水污染的风险比Cu、Zn大<sup>[13]</sup>。

以污泥最大施用量1.5 g/cm<sup>2</sup>进行风险评估,结果表明,沙土中Cu、Zn、Pb、Cr、Cd滞留量均小于GB 15618—1995《土壤环境质量标准》国家土壤环境质量三级标准,内罗梅综合污染指数除Zn(为0.9),达警戒线值外,Cu、Cr、Pb、Cd都远远小于0.7。因此,加强污泥中重金属Zn的源头监测与控制,以1.5 g/cm<sup>2</sup>的污泥施用量改良沙土,短期内不会造成重金属污染的风险。

### 参考文献:

- [1] 邹绍文,张树清,王玉军,等. 中国城市污泥的性质和处置方式及土地利用前景[J]. 中国农学通报,2005,21(1):198-201,282.
- [2] 周立祥,胡嵩堂,戈乃玢,等. 城市污泥土地利用研究[J]. 生态学报,1999,19(2):185-193.
- [3] 李艳霞,陈同斌,罗维,等. 中国城市污泥有机质及养分含量与土地利用[J]. 生态学报,2003,23(11):2464-2474.
- [4] 崔春红. 污泥农肥化施用效果及肥料中有机质质量的评价研究[D]. 南京:南京农业大学,2008.
- [5] 白莉萍,伏亚萍. 城市污泥应用于陆地生态系统研究进展[J]. 生态学报,2009,29(1):416-426.
- [6] 王磊,香宝,苏本营,等. 城市污泥应用于我国北方沙地生态修复的探讨[J]. 环境工程技术学报,2016,6(5):485-493.
- [7] 李赟,李胜荣,申俊峰,等. 粉煤灰和城市污泥配施对荒漠土壤持水性能影响的实验研究[J]. 地球与环境,2005,33(2):74-78.
- [8] 华正伟. 城市污泥对风沙土改良及杨树生长的影响[D]. 沈阳:辽宁大学,2012.
- [9] 邹通,惠秀娟,唐风德,等. 污泥对风沙土养分与重金属效应的淋溶模拟研究[J]. 安徽农业科学,2012,40(24):12174-12176.
- [10] 陈碧美. 城市污泥重金属含量及农用风险评价[J]. 长春工业大学学报,2015,36(3):347-351.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2008:115-317.
- [12] 黄丽荣,李雪,唐风德,等. 污泥对樟子松生物量及其重金属积累和土壤重金属有效性的影响[J]. 环境科学学报,2010,30(12):224-228.
- [13] 李霞,李法云,荣湘民,等. 城市污泥改良沙地土壤过程中氮磷的淋溶特征与风险分析[J]. 水土保持学报,2013,27(4):93-102.
- [14] Labrecque M, Traian T I, Daigle S. Early performance and nutrient of two willow species in short-rotation intensive culture fertilized with wastewater sludge and impact on the soil characteristics[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1998, 28(11):1621-1635.
- [15] Wong J W C, Su D C. Chemical speciation and phytoavailability of Zn, Cu, Ni and Cd in soil amended with fly ash-stabilized sewage sludge[J]. Environment International, 2004, 29(7):895-900.
- [16] 陈同斌. 土壤化学性质对Cu的植物吸收效应和土壤有效Cu测定的影响[J]. 应用生态学报,1998,9(1):84-88.