

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¹, 赖发英¹, 李小飞², 凌志友¹, 郭佳玮¹, 李 昊³

(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/cm²。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/cm² 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/cm² 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/cm² 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/cm² 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,

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。

而且每年以 20% 的速度递增^[1], 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^[2]。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^[3]。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^[4]。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

[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 FIAT-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]. *生物学杂志*, 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%^[5]。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^[6]。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^[7];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^[8]。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^[9];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^[10]。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/cm²,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^[11]。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/cm² 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 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/cm² 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。

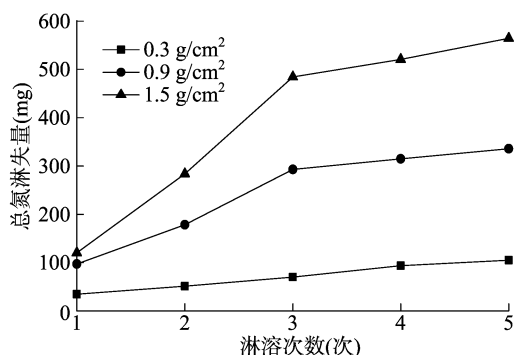


图1 总氮淋失量变化

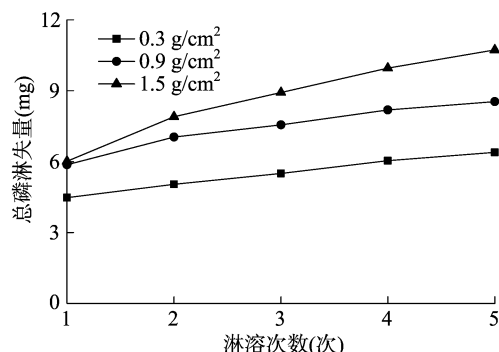


图2 总磷淋失量变化

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/cm² 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 ²)	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/cm² 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/cm² 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/cm² 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/cm² 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/cm² 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/cm² 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/cm² 的处理,Pb 淋失量第 1 次淋溶时均小于 0.9、0.3 g/cm² 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/cm² 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/cm² 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/cm² 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/cm² 处理第 1 次的 Cr 淋失量均小于污泥施用量为 0.9、0.3 g/cm² 的处理;5 次淋溶结束,0.3、0.9、1.5 g/cm² 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/cm² 时,第 1 次 Cd 淋失量比污泥施用量 0.9、0.3 g/cm² 时都小,Cd 在第 5 次淋溶时淋失率最大,而 0.3、0.9 g/cm² 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

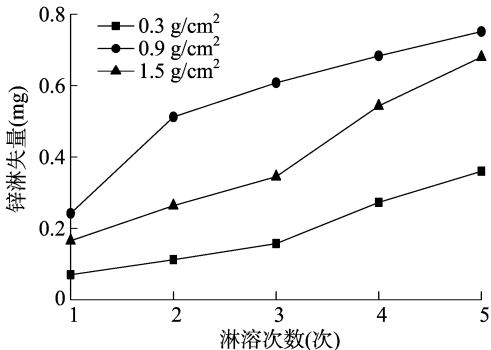


图3 锌淋失量变化

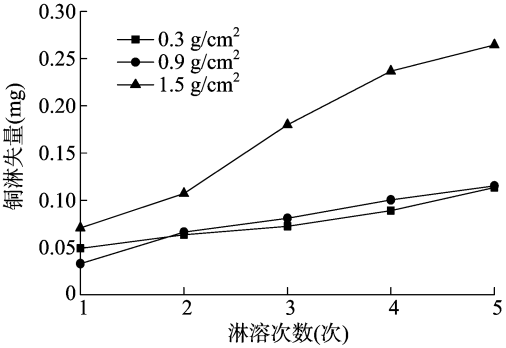


图4 铜淋失量变化

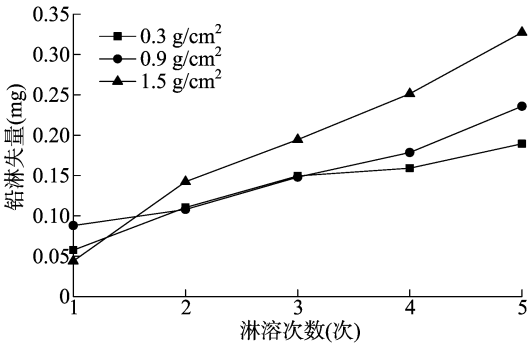


图5 铅淋失量变化

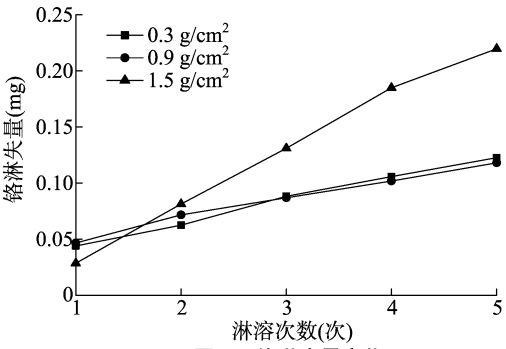


图6 铬淋失量变化

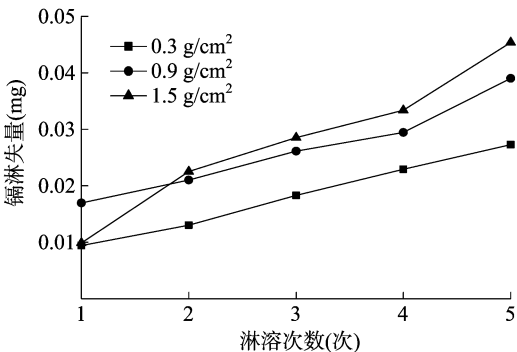


图7 镉淋失量变化

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/cm² 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 ²)	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/cm² 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/cm² 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/cm² 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^[12]。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/cm² 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 1 497.27 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 1 219.77 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^[13]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^[14]。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/cm² 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^[15-16]。李霞等的研究结果表明, Cd 在沙土中容易淋失造成地下水污染的风险比 Cu、Zn 大^[13]。

以污泥最大施用量 1.5 g/cm² 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/cm² 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, 胡藹堂, 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] 李祯, 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.