

污泥改良沙土中重金属及营养元素的迁移转化

黄殿男, 李琳, 傅金祥, 谭杰, 张贺凯, 常沙, 焦美怡

(沈阳建筑大学 辽河流域水污染防治研究院, 沈阳 110168)

摘要:为探究城市污水厂离心脱水污泥改良沙土对重金属及营养成分迁移转化的影响,利用掺混量为 15% 的污泥改良沙土作为 0—20 cm 土层土壤,通过饱和淋洗的方式分析了重金属及营养成分在土层中含量及形态转化,揭示了土层中重金属及营养成分迁移转化规律。结果表明:从重金属总量来看,试验淋洗 10 次后,土壤表层 Cu、Pb、Zn、Cr 滞留率较高,分别为 78.57%、78.72%、86.35%、76.61%,Ni 滞留率较低,为 40.37%。但随着淋洗次数的增加,重金属都存在一定淋失或向下层土壤迁移的风险;从重金属形态来看,各重金属 Ni、Zn、Cr、Cu、Pb 活性系数(MF)分别为 1.657、0.531、0.265、0.113、0,由此可以得出,Ni、Zn 在土壤环境中性质不稳定,Cr、Cu 性质较为稳定,Pb 最为稳定;改良沙土中氮磷营养元素在淋洗后含量下降,氮的流失率为 39.36%,磷的流失率为 18.67%,氮素较磷素易发生流失,下层沙土氮提升量高于磷。

关键词:污泥;沙土;重金属;营养成分

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)02-0359-07

Migration and Transformation of Heavy Metals and Nutrient Elements in Sandy Soil Ameliorated with Sludge

HUANG Diannan, LI Lin, FU Jinxiang, TAN Jie, ZHANG Hekai, CHANG Sha, JIAO Meiyi
(Liaoh River Basin Water Pollution Control Institute, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: To explore the influence of sewage plant dewatered sludge on the migration and transformation of heavy metals and nutrients in modified sandy soil, 15% of sludge was used to modify sand as 0—20 cm soil layer. Analysis of the content and morphological transformation of heavy metals and nutrients in soil layers was performed by using saturated leaching, revealing the migration and transformation of heavy metals and nutrients in soil layers. The results showed that, from the point of heavy metal content, experimental leaching after 10 times, the retention rates of Cu, Pb, Zn, Cr were 78.57%, 78.72%, 86.35%, 76.61%, retention rate was higher, the retention rate of Ni was 40.37%, retention rate was lower in the surface soil layer. However, with the increase of leaching times, there was a certain risk of heavy metals leaching or transferring to deep soil layer. The activity coefficients of Ni, Zn, Cr, Cu, Pb were 1.657, 0.531, 0.265, 0.113, 0, respectively, so it was found that the properties of Ni and Zn were unstable, the properties of Cr and Cu were stable, and Pb was the most stable. The contents of nitrogen and phosphorus nutrients in modified sandy soil decreased after leaching, the loss rate of nitrogen was 39.36%, and the loss rate of phosphorus was 18.67%. Nitrogen was more likely to be lost than phosphorus, the increase of nitrogen was higher than phosphorus in the deep layer.

Keywords: sludge; sandy soil; heavy metals; nutrients

随着城市人口增长以及污水处理行业不断发展,污泥产量逐年增加,但污泥妥善处理处置率较低^[1]。如此大量的污泥处理不当直接外排,将会占用大量土地且造成环境二次污染^[2],因此污泥处置后期的环境

消纳问题,已成为我国现阶段亟待解决的环境问题之一。同时,我国大面积的荒漠化/沙漠化土壤亟待修复,如何打破沙化土壤保水保肥能力差,不利于植物生长这一修复过程技术瓶颈,构建高效、低耗、环境友

收稿日期:2018-05-22

修回日期:2018-07-24

资助项目:辽宁省高等学校基本科研项目(LJZZ2017011);辽宁省科技厅工业攻关产业化项目(2015229011);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07202-011)

第一作者:黄殿男(1983—),女,辽宁沈阳人,博士(后),副教授,主要从事污泥处理处置研究。E-mail:7nan@163.com

通信作者:傅金祥(1955—),男,辽宁沈阳人,博士(后),教授,主要从事污泥减量资源化研究。E-mail:jinxianf1955@sina.com

好型的荒漠化/沙漠化土壤修复技术已成为现阶段我国亟待解决的问题。

利用污水厂污泥特有的高含水率、高有机质含量和胶质粘性状态,改善沙化土壤结构,提高沙化土壤中营养元素含量,提升土壤自身保水保肥能力^[3]。该法既缓解了污泥在环境中的消纳问题,同时也实现了沙化土壤的生态修复。现已被国内外学者证明该技术在沙化土壤修复中具有较高的可行性^[4-5]。但是污泥中含有的重金属和氮磷元素在土层中迁移转化以及其施用后对土壤及地下水可能产生的潜在污染和环境风险,现已成为污泥土地利用备受关注的问题。Baveye 等^[6]研究表明:重金属在施用污泥的土壤剖面上的分布趋势为:随着深度的增加,Cu,Zn,Ni,Pb,Cd 的单因子污染指数显著减小。Richards 等^[7]在美国和津巴布韦做的类似研究表明,重金属主要集中在土壤表层,其向下迁移的能力较弱。同时,重金属在环境中的存在形态也对其生物毒性和迁移性影响显著。而重金属在环境中的存在形态受重金属种类、土壤 pH 值、有机质含量、土壤还原电位(Eh)等多因素影响^[8-9]。杨秋菊^[10]研究发现弱酸可提取态重金属对 pH 值较敏感,易于迁移转化,pH 值下降其容易释放进入环境中。宋琳琳等^[11]研究发现,污泥施加到土壤中,生物有效态的 Cd 和 Zn 含量显著增加,生物有效态 Pb 含量显著降低。

污泥改良沙土过程中,各土层中养分含量较未施用污泥时均有提高,污泥的掺入改变了沙土原有的物质结构和组分构成^[12],进而影响重金属和氮磷等营养元素在土壤中的环境行为、存在形态和迁移转化规律。有效识别污泥改良沙土过程中重金属和营养元素在改良土体中的形态迁移转化规律,将对该技术推广应用过程中进行合理的风险管控具有重要指导意义。基于此目的,本论文以掺混了污水厂污泥的改良沙土为研究对象,通过模拟降雨淋溶的方式,考察改良沙土中重金属总量、重金属四态含量、总氮和总磷含量在各土层中的迁移转化规律。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验沙土于 2017 年 4 月取自辽宁省昌图县福德店荒漠化土壤 0—120 cm 土层,按土层深度将沙土编号:1[#](0—20 cm),2[#](20—40 cm),3[#](40—60 cm),4[#](60—80 cm),5[#](80—100 cm),6[#](100—120 cm)。污泥于 2017 年 4 月取自抚顺三宝屯污水处理厂污泥离心脱水车间。样品取回后存放于 4℃ 冰箱内,取回当日测样品含水率、pH 值和有机质。污泥和沙土样品在避光处自然风干后剔除其中杂质和石块等废物,用研钵磨碎后

过 100 目筛后测定总氮、总磷、重金属含量等指标。其中沙土含水率、pH 值和有机质含量分别是 4.77%,6.64,0.43%,总氮、总磷分别为 4.022,0.035 mg/g,容重、孔隙度、土粒密度分别是 1.36 g/cm³,0.47,2.62 g/cm³。污泥的含水率、pH 值和有机质含量分别是 80.3%,6.71,66.4%,总氮和总磷分别为 35.84,14.13 mg/g,总金属 Cu,Zn,Pb,Cr,Ni 分别为 0.117,0.395,0.036,0.398,0.17 mg/g。

1.2 试验装置及方法

模拟土柱采用内径 40 cm,高 150 cm 圆柱体有机玻璃,为承受上层沙土,柱体底部设置加厚多孔有机玻璃板,多孔有机玻璃板下方设置集水斗,多孔有机玻璃板上布设 5 cm 的鹅卵石,将分层采集的 6[#],5[#],4[#],3[#],2[#]沙土分层填充入模拟土柱的装置中,模拟装置上方设置直径为 40 cm 的模拟降雨盘,降雨盘通过聚氯乙烯管与水箱、流量控制器、水泵等设备连接形成模拟淋洗系统,模拟土柱侧面开口,用于淋洗后采取土样分析(图 1)。试验将质量占比 15% 的污泥与沙土充分掺混后填充入模拟土柱表层(1[#]),填充厚度为 20 cm^[13]。采用去离子水模拟降雨饱和淋洗法淋洗模拟沙土层。通过前期对沙土层的饱和淋洗试验调试,将模拟降雨参数确定为:0.1 L/min,降雨总量为 8 L,降雨强度约为 48 mm/h。每两次模拟降雨饱和淋洗土柱为一个采样周期,每次模拟降雨间隔 10 d,沙土样品的采集时间是降雨后 48 h,从模拟土柱侧面纵向取样口采集各土层土壤样品,初次淋洗时间为 2017 年 5 月 2 日,共模拟降雨 10 次,为期 100 d。分析沙土不同土层中 Cu,Zn,Pb,Cr,Ni 这 5 种重金属总量及形态迁移转化规律,以及有机质、总氮和总磷含量在各土层中变化规律。

1.3 分析方法

污泥和沙土中有机物的测定采用灼烧称重法;全磷采用 NaOH 熔融—分光光度法;全氮采用凯氏蒸馏法;重金属采用湿法消解—紫外分光光度法消解及测定;重金属形态采用 BCR-AAS 法^[8]。表层土壤的重金属滞留率=淋洗后表层重金属含量/淋洗前表层重金属含量×100%;淋失率=1—滞留率。

1.4 数据统计与分析

利用 Excel 2010 和 IBM SPSS Statistics 19 软件对数据进行整理和统计分析,利用 Origin 9 绘制图形。

2 结果与分析

2.1 重金属在土壤表层及各土层中的迁移转化

2.1.1 重金属总量在表层改良沙土中变化规律 本研究采用污泥掺混到沙土表层的方式改良沙化土壤,因此系统分析表层沙土中重金属的稳定性,对于合理

评估改良沙土后续利用的环境风险具有重要指导意义。该研究选用周期性模拟降水淋洗的方式,通过考察不同淋洗周期后表层土壤中 Cu,Zn,Pb,Cr,Ni 这 5 种重金属总量变化情况和在表层中滞留情况,揭示重金属总量在表层沙土中的环境行为。

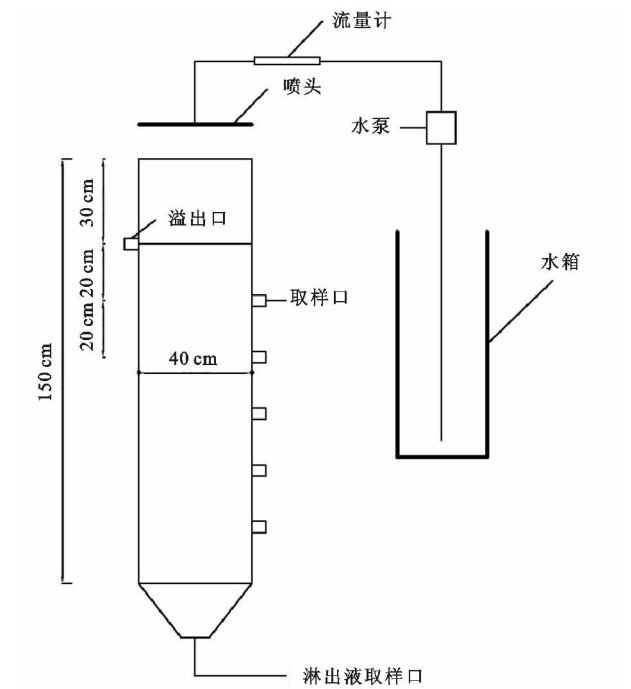
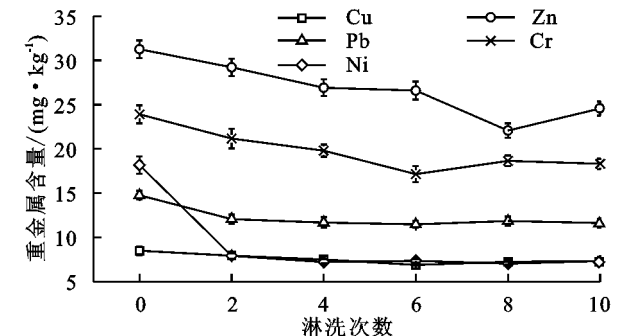


图 1 试验装置示意图

将圆形土柱划分成 4 等份,分别在圆心处、分割线的 1/2 半径处取得总共 5 个样品,将所测样品指标的平均值作为表层重金属含量的最终值。表层沙土中重金属总量随淋洗次数的变化趋势如图 2 所示。掺混土壤中原始重金属含量从大到小依次为 Zn(31.27 mg/kg),Cr(23.91 mg/kg),Ni(18.18 mg/kg),Pb(14.77 mg/kg),Cu(8.5 mg/kg)。土壤重金属含量符合《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)一级标准,5 种重金属含量均在其规定的保障农业生产、维护人体健康的土壤重金属限值之内。表明合理利用污泥作为沙化土壤的改良剂,规避重金属土壤污染风险具有一定可行性。随着淋洗次数的增加,Zn,Cr,Ni,Pb,Cu 各重金属含量均呈现不同程度的下降趋势,表明污泥改良沙土中重金属存在一定淋失或向下层土壤迁移的风险。淋洗 2 次后,重金属 Ni 含量呈现较大幅度的下降,由初始的 18.18 mg/kg 降低至 7.93 mg/kg。在随后几次淋洗过程中重金属含量下降速率变小。表明 Ni 在土壤环境中较活泼,较易迁移,前两次淋洗迅速向下层土壤迁移。而 Cu,Zn,Cr 和 Pb 含量下降速率相对较小,表明其在环境中较金属 Ni 更为稳定。采用各种重金属在土层中的滞留率来表征其在土壤环境中的稳定性。从图 3 中可以看

出,在土壤表层 Cu,Zn,Cr,Pb 滞留率相对较高,Ni 滞留率较低,淋失率较高。



注:0 次代表试验污泥沙土掺混后重金属初始含量。

图 2 表层改良土壤重金属总量动态变化

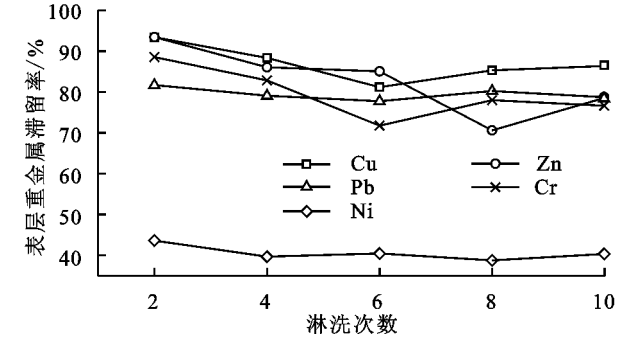


图 3 表层改良土壤重金属滞留率动态变化

2.1.2 各土层重金属含量变化 从以上分析结果可以看出,随着模拟降雨淋洗过程的进行,重金属在土壤中具有向下层土壤迁移的潜力,识别重金属在各土层中含量变化,将对该方法改良土壤的后期资源化利用过程中植物的优选以及各土层重金属污染风险管控措施的合理制定具有重要的指导意义。该部分研究对比掺混初期和 10 次淋洗后,各土层中重金属含量变化,试验结果如图 4 所示。可见,表层(1[#])土壤重金属含量经过 10 次淋洗后都有所降低,而试验 10 次淋洗后各土层中重金属含量普遍高于淋洗前各土壤中重金属含量。表明表层施加污泥改良沙土经过淋洗后,重金属有向下土层迁移的趋势。

考察改良表层沙土后各土层重金属含量变化,分析表层迁移的重金属在土层的富集情况,评价下层土壤受表层改良土壤的重金属影响,试验结果如图 5 所示。1[#] 土层各重金属含量试验后与试验前比值都小于 1,说明经过淋洗后重金属都向下层土壤迁移。Zn 在 2[#] 土层中比值最大(2.75),说明 Zn 富集在 2[#] 土层中,Ni,Cu,Cr 在 3[#] 土层中比值最大,分别为 2.83,2.24,1.35,说明它们在 3[#] 土层中富集较多,Zn,Ni,Cu 在 4[#],5[#],6[#] 土层中比值较为平缓但都远大于 1,说明经过淋洗后这 3 种金属在 4[#],5[#],6[#] 土层中都有富集现象,而 Cr 的比值在 1 上下波动,说明 Cr 在 4[#],

5[#], 6[#] 土层中并无富集或富集较少。Pb 在 2[#], 3[#], 4[#], 5[#], 6[#] 土层中比值都在 1 上下波动, 较为平缓, 说明 Pb 在土层中性质稳定不易迁移。

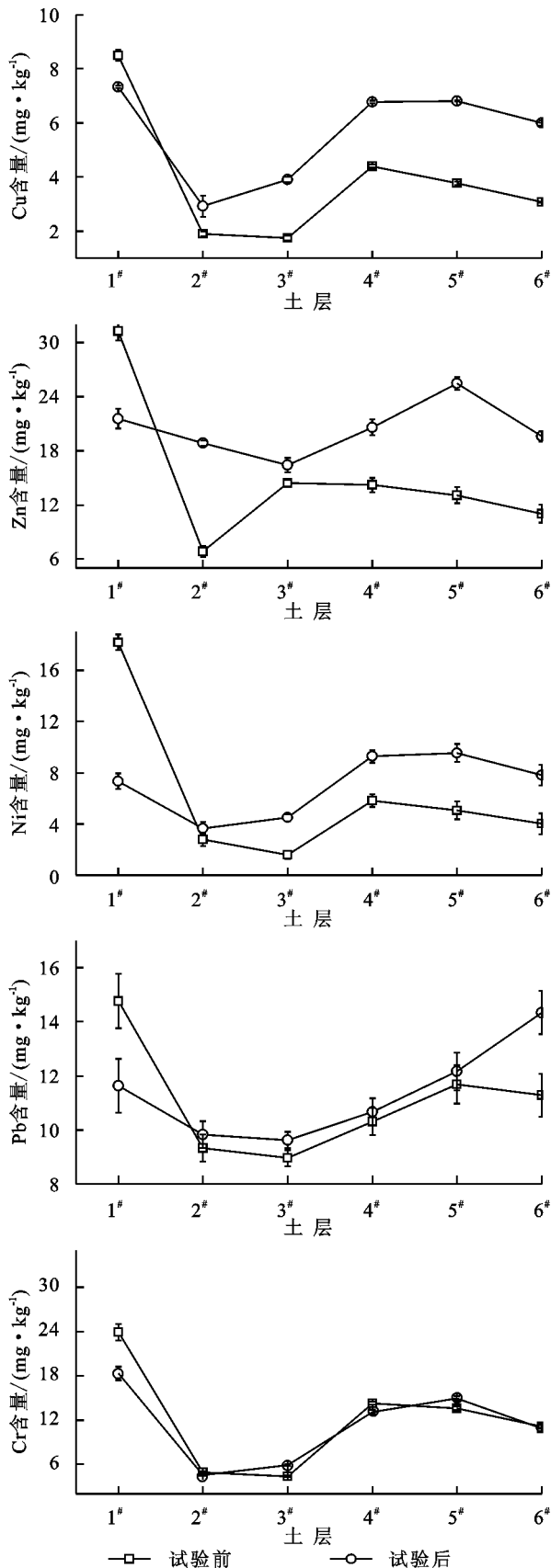


图 4 各土层重金属含量变化

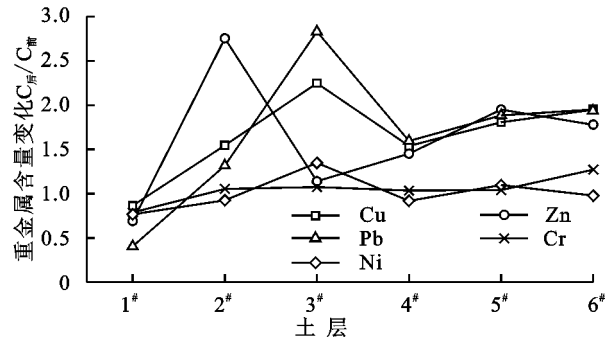


图 5 各土层重金属含量变化

从图 5 中可以看出, Zn, Ni, Cu 在土层中富集较多且易于迁移, Cr 相对不易迁移, Pb 含量变化最小, 最不易迁移。可能由于 Zn, Ni, Cu 在土壤中较为活泼, Pb 性质比较稳定。但各土壤中重金属总量均符合《土壤环境质量标准》(GB15618—1995) 一级标准, 表明改良后的土壤能保障农业生产, 维护人体健康。

2.1.3 表层土壤重金属形态变化 重金属的存在形态可在一定程度上表征其在环境中稳定性和迁移性。有效识别土壤中各重金属四态含量变化, 将对研究其在土壤中的环境风险预测及评估具有一定的理论参考意义。该部分研究对比了表层各重金属随着淋洗次数的增加其存在形态的变化。试验结果如图 6 所示。图 6A—6E 分别表征表层土壤中 Cu, Zn, Pb, Ni, Cr 这 5 种重金属的形态变化。从图 6A 可以看出, 随着淋洗次数的增加, Cu 的弱酸可提取态占比逐渐减小; 可还原态在第 8 次淋洗后占比最大, 10 次淋洗后最少; 可氧化态只出现在第二次淋洗后。表明污泥改良沙土中 Cu 性质较不稳定, 随着淋洗次数的增加, 较活泼的弱酸可提取态、可还原态可能具有向下层土壤迁移或被淋出的趋势, 导致残渣态占比逐渐升高。

如图 6B 所示, 随着淋洗次数的增加, Zn 的弱酸可提取态在第 4 次淋洗后占比最大, 第 10 次淋洗未检出弱酸可提取态; 可还原态在第 6 次淋洗后占比最大, 之后逐渐减少; 可氧化态占比逐渐减小; 残渣态虽然有波动, 但随着淋洗次数的增加, 占比逐渐升高。表明试验前期 Zn 的性质不稳定, 最终 Zn 有向稳定态转变的趋势。

如图 6C 所示, 金属 Pb 的各形态变化幅度相对较小, 在试验周期内, 没有检测出弱酸可提取态 Pb, 这可能与金属 Pb 在环境中较为稳定有关^[14]。随着试验的进行, 可还原态占比逐渐减少, 第 10 次降雨后可氧化态、可还原态、弱酸可提取态均未检出, 残渣态占比 100%, 这表明改良沙土中 Pb 多以稳定形态存在, 向生物链富集转化风险较低。

如图 6D 所示,金属 Ni 在试验期间,弱酸可提取态、还原态、氧化态和残渣态占比并无明显变化趋势,但在第 8 次、第 10 次淋洗后 Ni 的残渣态相对增多,说明污泥改良沙土中 Ni 的形态转化风险降低。

如图 6E 所示,整个试验周期内并未检测出弱酸可提取态的金属 Cr,且残渣态占比一直大于 60%,试验末期,金属 Cr 的可还原态、及可氧化态占比均减少,残渣态占比加大,表明试验后期 Cr 金属的转移风险减少,金属 Cr 更为稳定。

土壤中重金属的活性可以用活性系数(MF)来描述^[15],表示土壤中不同重金属元素被生物利用,进而对生态环境造成潜在危害的能力。通常条件下,活性系数是用非残渣态与总量的比值来反映:

$$MF=\frac{F_1+F_2+F_3}{F_1+F_2+F_3+F_4}$$

式中: F_1, F_2, F_3, F_4 分别是弱酸可提取态、可还原态、可氧化态和残渣态中的重金属含量(mg/kg)。MF 值越小,表示重金属在土壤中的稳定性越高,不易被植物利用,危害小;而 MF 值越大,就会表现出较大的危害性和不稳定性。根据以上公式计算的各重金属淋洗 10 次后 Ni,Zn,Cr,Cu,Pb 活性系数(MF)依次为 1.657,0.531,0.265,0.113,0,由此可以得出,Ni,Zn 活性系数都大于 0.5,性质不稳定,Cr,Cu 性质较为稳定,Pb 最为稳定。

2.2 营养元素在土壤表层及各土层中含量的变化

污泥作为土壤改良剂改良沙土后,污泥中的大量营养元素转移到了土壤中,为植物生长提供了必需的营养,检测改良沙土中营养元素的动态变化,有利于科学预测及合理管控污泥改良沙土中氮磷风险。

2.2.1 营养元素在土壤表层含量变化 污泥改良沙土后,土壤中 TN,TP 含量大幅增加,其含量分别达 9.12,0.75 g/kg。随着淋洗的进行中,TN 和 TP 含量均出现不同程度下降,试验期内,TN 含量从 8.51 g/kg 下降到 5.53 g/kg,TN 含量下降了 35.02%,TP 含量从 0.67 g/kg 下降到 0.61 g/kg,TP 含量仅下降 8.96%。试验表明,污泥改良土壤中 TN 含量和有机物含量下降速率相对较快。TP 在改良土壤中滞留率相对较高。该研究结果表明土壤中氮素淋失风险较高,而磷淋失风险相对较低。

2.2.2 营养元素在各土层中含量的变化 该部分研究对比掺混初期和 10 次淋洗后,各土层中氮磷含量变化。试验结果表明,土壤表层 1# 样点,淋洗后 TN,TP 含量小于淋洗前(图 8)。

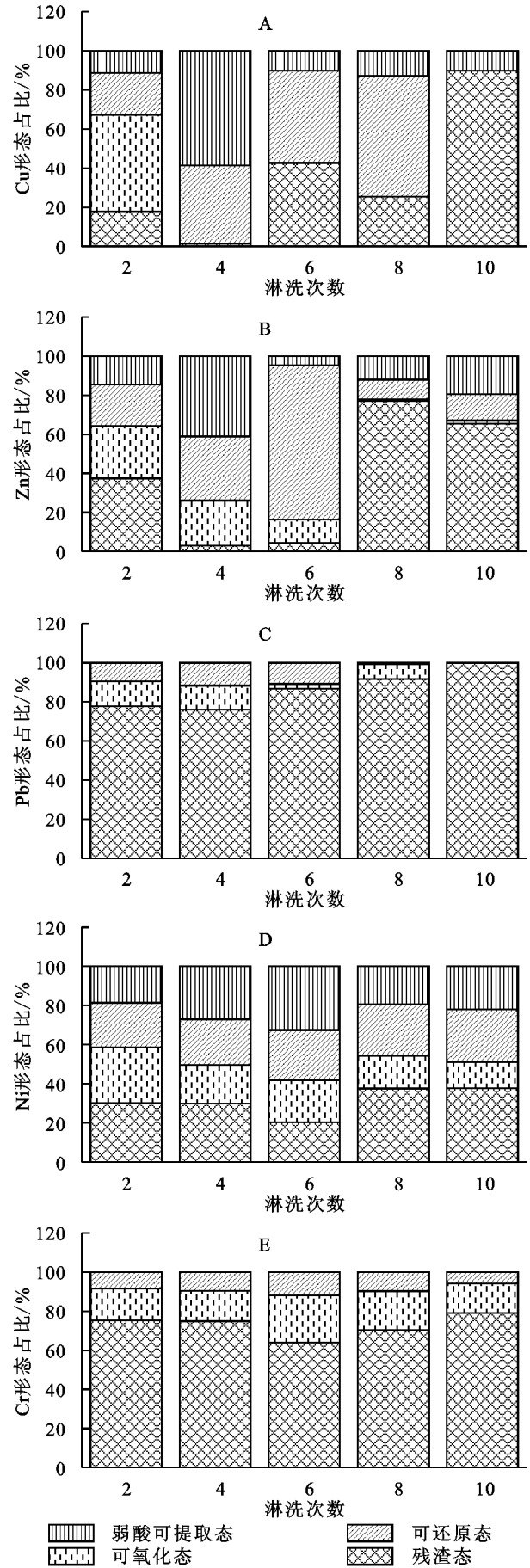


图 6 表层土壤重金属形态变化

2[#]—6[#]样点,淋洗后 TN,TP 含量大于淋洗前。从淋洗前后表层和纵向各样点土壤氮磷的变化趋势表明,随着淋洗的进行,表层土壤中的氮磷有向下迁移淋失的趋势,导致淋洗后,表层 TN,TP 含量小于淋洗前,而下层 2[#]—6[#] 由于受到表层向下迁移的影响,土体中氮磷含量呈现不同程度的升高趋势。比较 TN,TP 纵向变化趋势,可以看出,氮素向下迁移率远大于磷,淋洗前后 2[#]—6[#] 样点中磷含量一直趋于稳定,无显著变化,而氮淋洗后 2[#]—6[#] 样点中 TN 含量较淋洗前增加 40.8%~60.6%。

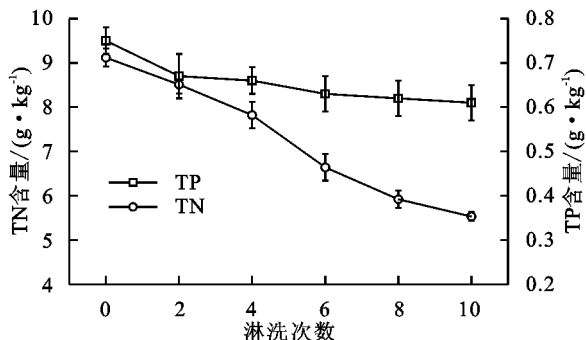


图 7 表层改良沙土营养元素动态变化

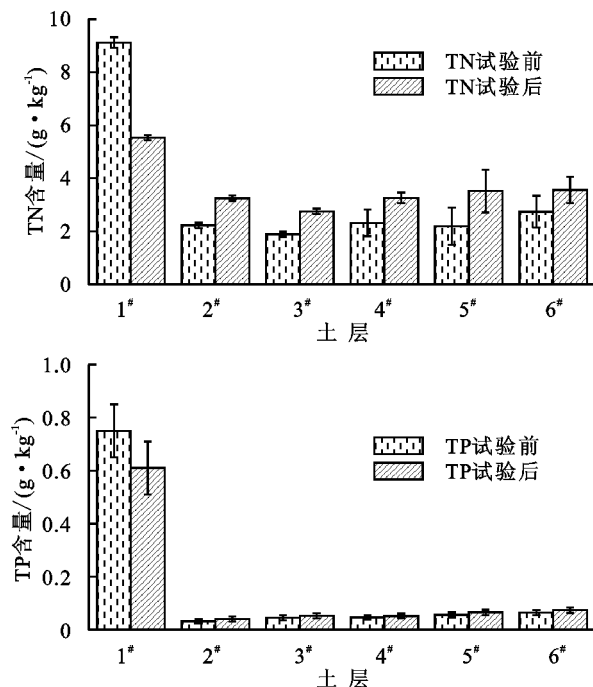


图 8 土层中氮磷含量变化

3 讨论

污泥改良沙土中重金属含量符合《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)一级标准,检测的 Cu,Zn,Pb,Ni,Cr 这 5 种重金属含量均在其规定的保障农业生产、维护人体健康的土壤重金属限值之内。但本次试验仅考察了 Cu,Zn,Pb,Cr,Ni 这 5 种重金属,没有考察 Hg,As 等其他重金属。实际工程中还需要全

面调研分析各种重金属含量、结合被改良土壤理化性质、环境背景值和当地气候条件等来合理评估污泥中重金属可能产生的潜在累积环境风险效应。

试验中污泥改良沙土研究,重金属在淋洗过程中具有向下层土壤迁移趋势,但大部分仍停留在土壤表层,这与土壤或污泥中含的有机物和无机物对重金属的强吸附作用有关^[16]。不同重金属在土壤中的滞留率不同,其中 Cu,Zn,Cr,Pb 这 4 种重金属在土壤表层的滞留率相对较高,其中金属 Zn 在试验后期滞留率下降,这可能与不同重金属在环境中的吸附、解吸和迁移行为的差异性有关^[17];而 Ni 滞留率最低,淋失率较高。Cu,Zn,Cr,Pb 滞留多与四者性态含量有关,4 种金属初始形态或经过淋洗后的形态都较稳定或向稳定状态转变,则其不易被淋失,滞留在表层比较多。而金属 Ni 不稳定状态含量占比一直较多,滞留少。在各土层中,Zn,Ni 在土层中富集较多且易于迁移,Cu,Cr 相对不易迁移,Pb 含量变化最小,最不易迁移。这与 Mbila 等^[18]在尼日利亚的研究结果一致。可能与 Zn,Ni,Cu 本身含量较多有关,这也表明表层流失的重金属被下层沙土截留固定,从而导致下层土壤重金属含量的增加。因此,Zn,Ni,Cu 这 3 种金属的迁移富集风险较大,应重点关注与管控。

从重金属形态来看,根据重金属活性系数计算可知,改良土壤中 Ni,Zn 的形态容易发生转变,金属 Cu,Cr 多以稳定形态存在,金属 Pb 最为稳定。这与严明书等^[19]研究成果较为一致。试验后期各个重金属的残渣态、可氧化态等稳定形态占比加大,表明试验后期重金属转化风险较低。导致这一现象的原因可能是污泥中的重金属在物理、化学、生物的共同作用下使重金属进一步稳定,也可能是不稳定形态的金属早已经发生了迁移,导致改良土壤中不稳定形态的金属占比变小。

污泥改良沙土中氮磷含量显著升高^[20],改良沙土表层氮磷营养元素在淋洗后含量下降,氮的流失率为 39.36%,磷的流失率为 18.67%,氮素较磷素易发生流失。试验后各土层中的营养元素比试验前含量有所提升,其原因可能是表层改良土壤氮、磷的流失,导致氮磷向下层土壤转移。其中氮素的增加量较大,其原因是表层氮素流失速率较快、流失量大。这与李霞等^[5]的研究结果一致,氮素比磷素的淋失风险更大。

4 结论

(1) 相比原始沙土,污泥改良沙土中的重金属含量

升高,长期淋洗过程中会提升下层沙土重金属含量,但沙土各层中的重金属含量均符合《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)一级标准,合理控制污泥与沙土的掺混比例可以避免重金属对改良沙土的风险。

(2) 从重金属含量来看,试验淋洗 10 次后,在土壤表层 Cu, Pb, Zn, Cr 滞留率分别为 78.57%, 78.72%, 86.35%, 76.61%, 滞留率较高, Ni 滞留率为 40.37%, 滞留率较低。但随着淋融次数的增加,重金属都存在一定的淋失或向下层土壤转移的风险。在各土层中, Zn, Ni 在土层中富集较多且易于迁移, Cu, Cr 相对不易迁移, Pb 含量变化最小, 最不易迁移。

(3) 从重金属形态来看,根据重金属活性系数计算可知,改良土壤中 Ni, Zn 的形态容易发生转变,金属 Cu, Cr 多以稳定形态存在,金属 Pb 最为稳定。试验后期各个重金属的残渣态、可氧化态等稳定形态占比加大,表明试验后期重金属迁移风险降低,污泥改良沙土中重金属性质逐渐趋于稳定。

(4) 改良沙土中表层土壤氮磷营养元素在淋洗过程中含量下降,其中部分氮磷向下层土壤转移,提升下层土壤的养分含量,氮素较磷素易发生流失,下层沙土氮提升量高于磷。

参考文献:

[1] 李济源. 城镇污水处理厂污泥处理处置监管体系研究[D]. 北京:北京工业大学, 2013.

[2] 王东琴, 惠晓梅, 杨凯. 污泥处理处置技术进展[J]. 山西化工, 2016, 36(3): 17-19.

[3] 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): 484-492.

[4] 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): 93-97, 102.

[5] 李霞. 城市污泥在科尔沁沙地土壤改良中的应用及风险分析[D]. 长沙:湖南农业大学, 2013.

[6] Baveye P, McBride M B, Bouldin D, et al. Mass balance and distribution of sludge-borne trace elements in a silt loam soil following long-term applications of sewage sludge[J]. Science of the Total Environment, 1999, 227(1): 13-28.

[7] Richards B K, Steenhuis T S, Peverly J H, et al. Metal mobility at an old, heavily loaded sludge application site[J]. Environmental Pollution, 1998, 99(3): 365-377.

[8] 杨忠平, 卢文喜, 辛欣, 等. 长春市城区土壤中 Pb、Cu、Zn、Cd 及 Cr 化学形态特征[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1247-1255.

[9] 张江华, 王葵颖, 李皓, 等. 陕西潼关金矿区土壤 Pb 和 Cd 生物有效性的影响因素及其意义[J]. 地质通报, 2014, 33(8): 1188-1195.

[10] 杨秋菊. 土壤重金属形态分析研究进展[J]. 云南化工, 2016, 43(4): 43-49.

[11] 宋琳琳, 铁梅, 张朝红, 等. 施用污泥对土壤重金属形态分布和生物有效性的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2701-2707.

[12] 黄殿男, 谭杰, 傅金祥, 等. 城市污水处理厂污泥对沙漠化土壤的改良效果[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 323-327.

[13] 黄殿男, 谭杰, 傅金祥, 等. 城市污水厂污泥改良水蚀沙土对地下水风险模拟[J]. 生态学杂志, 2017, 36(10): 2926-2932.

[14] 闫江龙. 不同催化条件下超临界水气化污泥及重金属迁移转化规律的研究[D]. 广东深圳:深圳大学, 2016.

[15] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.

[16] Merrington G, Oliver I, Smernik R J, et al. The influence of sewage sludge properties on sludge-borne metal availability[J]. Advances in Environmental Research, 2004, 8(1): 21-36.

[17] 林青. 土壤中重金属 Cu, Cd, Zn, Pb 吸附及迁移的试验研究[D]. 山东青岛:青岛大学, 2008.

[18] Mbila M O, Thompson M L, Mbagwu J S, et al. Distribution and movement of sludge-derived trace metals in selected Nigerian soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(5): 1667-1674.

[19] 严明书, 李武斌, 杨乐超, 等. 重庆渝北地区土壤重金属形态特征及其有效性评价[J]. 环境科学研究, 2014, 27(1): 64-70.

[20] Su J, Wang H, Kimberley M O, et al. Fractionation and mobility of phosphorus in a sandy forest soil amended with biosolids[J]. Environmental Science and Pollution Research-International, 2007, 14(7): 529-535.