

油松育苗地施用污泥厌氧消化产品重金属污染风险评价

李海洋¹, 孙文彦², 彭祚登^{2*}, 姚聪颖², 曹吉鑫³, 张晓娟¹, 彭玉信⁴

(1.北京市排水集团有限责任公司,北京 100044;2.北京林业大学森林培育与保护教育部重点实验室,北京 100083;3.中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所,北京 100091;4.北京市黄堡苗圃,北京 100123)

摘要 [目的]探究城镇排水污泥厌氧消化产品在油松育苗地施用后的重金属累积情况及其污染风险,为判定其应用的可行性及确定其施用量提供依据。[方法]在现有18年生油松大苗育苗地,采取随机区组试验设计,按0、1、2、3、4、5 kg/m²设置6个施用量水平定株施入污泥产品,通过测定土壤中铜(Cu)、镍(Ni)、铬(Cr)、锌(Zn)、镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铅(Pb)8种重金属的含量,利用潜在生态危害指数法对不同处理下的土壤环境质量进行评价。[结果]铜、镍、铬、锌、铅5种重金属随着污泥产品施用量的增加呈现先减少后增加的趋势,且在污泥产品中含量较高的铜、锌在0~20和20~40 cm土层中对照组皆显著高于4 kg/m²的处理($P < 0.05$),砷和汞含量变化幅度不大。不同土层重金属总量随施肥量增加的变化趋势类似,并在0~20 cm土层4 kg/m²处理下出现最小值。重金属镉具有产生污染的潜在风险,且在4 kg/m²处理下潜在生态危害指数最低。其他重金属单独作用或8种重金属共同作用均为低生态风险。[结论]综合考虑镉的生态风险及重金属含量的变化情况,在油松大规模苗木移植培育育苗地施用污泥产品可将用量控制在4 kg/m²较为适宜。

关键词 高级厌氧消化板框脱水;污泥产品;油松;重金属;潜在生态危害指数

中图分类号 X 820.4 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)02-0122-05

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.02.032



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Risk Assessment of Heavy Metal Pollution by Applying Sludge Anaerobic Digestion Products in the Nursery Field of *Pinus tabulaeformis*
LI Hai-yang¹, SUN Wen-yan², PENG Zuo-deng² et al (1. Beijing Drainage Group Co., Ltd, Beijing 100044; 2. The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract [Objective] To explore the accumulation of heavy metals and pollution risks of the anaerobic digestion products of urban sewage sludge after application in the seedling nursery of *Pinus tabulaeformis* Carr., so as to provide a basis for judging the feasibility of its application and determining its application rate. [Method] In the existing 18-year-old *Pinus tabulaeformis* seedling nursery, a randomized block experiment design was adopted, and 6 application levels were set at 0, 1, 2, 3, 4, and 5 kg/m² to apply the sludge products. The contents of eight heavy metals such as copper (Cu), nickel (Ni), chromium (Cr), zinc (Zn), cadmium (Cd), mercury (Hg), arsenic (As) and lead (Pb) in the soil were determined. The potential ecological risk index method was used to evaluate the soil environmental quality under different treatments. [Result] The five heavy metals of copper, nickel, chromium, zinc, and lead showed a trend of first decreasing and then increasing with the increase in the application amount of sludge products, and the contents of copper and zinc in sludge products were significant higher in the control group than those in the treatment of 4 kg/m² in the soil layer between 0-20 and 20-40 cm ($P < 0.05$); variation in the content of arsenic and mercury was not significantly. The change trend of the total amount of heavy metals in different soil layers with increasing fertilization is similar, and the minimum value appeared at the treatment of 4 kg/m² in the 0-20 cm soil layer. The heavy metal cadmium has the potential risk of pollution, and the potential ecological risk index is the lowest under the treatment of 4 kg/m². Other heavy metals acting alone or 8 kinds of heavy metals acting together are all at low risk level. [Conclusion] Considering the ecological risk of cadmium and the change of heavy metal content, it is more appropriate to control the dosage of sludge products at 4 kg/m² in the nursery land of large-scale seedling transplantation and cultivation of *Pinus tabulaeformis*.

Key words Advanced anaerobic digestion and frame dewatering; Sludge products; *Pinus tabulaeformis* Carr.; Heavy metals; Potential ecological risk index

近年来,各地在政府的大力支持下,城镇污水处理能力得到迅速提升,但同时也伴随着污泥产量的急剧增加。如何将产量巨大、成分复杂的污泥经过科学处理后,使其无害化、资源化,已成为我国乃至全世界在环境治理领域中深为关注的课题之一^[1]。城市排水污泥中含有丰富的有机质和氮、磷、钾等可供植物生长需求的营养元素,能够有效改善土壤的理化性质,增加土壤孔隙度,减少土壤表面板结和地表径流等,因此将城市污泥作为农林土地利用被认为是众多处置方式中最理想的途径^[2-4]。然而,由于城镇排水污泥产品来源的特殊性,施入土壤后是否会造成重金属污染又成为人们

担忧的问题。研究表明,城市排水污泥进行高级厌氧消化板框脱水工艺形成的污泥产品(SADR)可以有效降低污泥中污染物含量,但仍有约50%的重金属、病原微生物、寄生虫卵等污染物富集在污泥中,可能会对土壤生态系统带来一定的影响^[5-6]。近年来国内外对污泥产品土地利用的重金属污染风险研究较多。有学者指出,一般土壤重金属含量随污泥施用量的增加而增加,长期施用污泥会显著增加土壤重金属总量^[7]。张辉等^[8]研究发现,按不同比例施用污泥堆肥后,土壤中8种重金属均出现了一定程度的积累。Madrid等^[9]则认为,重金属元素在污泥中比例很大,但由于土壤对重金属具有一定的固定能力,因此施用污泥产品不会对环境产生严重危害。薛万来等^[10]研究也表明,相较于化肥常规施用,短期土地利用并未显著增加土壤重金属含量。目前关于城市排水污泥中的重金属对土壤的环境风险影响结论不一。该研究基于苗圃地培育大规模油松移植苗,施用不同量的SADR作为补充育苗地土壤营养,就其重金属在育苗地的积累

基金项目 国家发改委环境污染第三方治理“北京市污泥资源化苗圃种植项目”(发改办环资[2015]2075);北京排水集团污泥资源化苗圃种植项目(2017HXFWLXY023)。

作者简介 李海洋(1991-),女,宁夏中卫人,工程师,从事固体废物资源化利用研究;孙文彦(1998-),女,河北沧州人,硕士研究生,研究方向:污泥林地利用。李海洋与孙文彦为共同第一作者。*通信作者,教授,博士,从事森林培育研究。

收稿日期 2021-04-19

及可能带来的土壤污染风险进行了监测和比较评价,以期为 SADR 的应用前景以及合理利用技术参数提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究地概况 选择北京市黄堡苗圃为研究地点。育苗地土壤为砂质壤土,通气透水性好,蓄水保肥能力较差^[11-12]。区域降水主要集中在 7—9 月,多年平均降水量 575.5 mm,年平均气温 11.9 ℃。该研究选取苗圃培育的 18 年生大规格油松移植苗,苗木株间距为 2 m×3 m,苗木生长势以及育苗地管护措施等均一致。

1.2 试验设计 参照《城镇污水处理厂污泥处置 林地用泥质》(CJ/T 362—2011)中对污泥林地年施用量限定值的相关规定,将 SADR 的施用量设为 6 个水平:0 kg/m²(CK)、1 kg/m²(T₁)、2 kg/m²(T₂)、3 kg/m²(T₃)、4 kg/m²(T₄)、5 kg/m²(T₅)。每个水平设置 3 次重复,采用完全随机区组设计,共设置 18 个试验小区。每个小区选取 5 m×5 m 地块。试验于 2018 年 11 月开始,采用撒施法,将 SADR 按设计的施用量均匀撒在每个小区内,撒施后立即轻接地气,使 SADR 混合入土壤,然后立即浇冬冻水,使湿土层深达 40 cm 以上。

1.3 样品采集与测定方法

1.3.1 SADR 本底重金属含量测定。从待施的 SADR 中随机装取不少于 2 kg 的样品,将采出的样品按四分法缩分成 1 kg,分装于 2 个清洁的自封袋中,排出空气,一袋密封保存,3 次重复。检测结果如下:铜 130.67 mg/kg、镍 42.33 mg/kg、铬 57.33 mg/kg、锌 277.33 mg/kg、镉 0.43 mg/kg、汞 0.50 mg/kg、砷 5.60 mg/kg、铅 25.00 mg/kg。

1.3.2 土壤样品采集。土壤样品的采集于 2020 年 9 月中旬开始,采用正方形对角五点取样法,以 0~20 (D₁)、20~40 (D₂)和 40~60 cm (D₃) 3 个土层分别进行土壤取样。

1.3.3 指标测定方法。检测指标包括铜、镍、铬、锌、镉、汞、砷、铅 8 种重金属含量。其中:铜、镍、铬、锌、铅按照《土壤总铬的测定 火焰原子吸收分光光度法》(HJ 491—2019)测定;镉按照《土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/T 17141—1997)测定;汞按照《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法》(GB/T 22105.1—2008)测定;砷按照《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法》(GB/T 22105.2—2008)测定。

1.4 数据处理与分析评价

1.4.1 数据统计分析。使用 Microsoft Excel 2019 进行数据计算和图表绘制,运用 SPSS 23.0 进行统计分析,采用单因素方差分析进行显著性检验($P<0.05$)。

1.4.2 潜在生态危害指数评价。该方法由 Hakanson 提出,适于评价污泥土地利用的重金属污染风险^[13]。该法确定了重金属的毒性响应系数,从生态效应、环境效应等方面反应土壤中重金属的影响^[10]。分为 2 步进行计算,首先计算潜在生态危害系数,用来评价某一种重金属元素对环境的污染程度;其次计算潜在生态危害指数用于描述多种污染物的综合环境污染风险^[13]。其计算方法分别参照公式(1)和(2)。评价标准见表 1。

$$\text{潜在生态危害系数}(E_r^i) = \frac{C_i}{C_{ni}} \times T_{ni} \quad (1)$$

$$\text{潜在生态危害指数}(RI) = \sum (E_r^i) \quad (2)$$

其中, C_i 为某种重金属的实测值; C_{ni} 为某种重金属对应的标准值; T_{ni} 为某种重金属的毒性响应系数。土壤重金属对应标准值及毒性响应系数见表 2。

表 1 潜在生态危害指数评价标准

Table 1 Evaluation standard of potential ecological risk index

潜在生态危害系数 Potential ecological risk coefficient	生态风险程度 Ecological risk degree	潜在生态危害指数 Potential ecological risk index	生态风险程度 Ecological risk degree
$E_r^i < 40$	低生态危害	$RI < 150$	低生态危害
$40 \leq E_r^i < 80$	中等生态危害	$150 \leq RI < 300$	中等生态危害
$80 \leq E_r^i < 160$	较高生态危害	$300 \leq RI < 600$	高生态危害
$160 \leq E_r^i < 320$	高生态危害	$RI \geq 600$	极高生态危害
$E_r^i \geq 320$	极高生态危害		

表 2 标准值及毒性响应系数

Table 2 Background value and toxicity response coefficient

重金属元素 Heavy metal element	参考限定值 Reference limit value mg/kg	毒性响应系数 Toxicity response coefficient
Cu	100	5
Ni	100	5
Cr	200	2
Zn	250	1
Cd	0.3	30
Hg	2.4	40
As	30	10
Pb	120	5

注:表中参考限定值引自 GB 15618—2018《土壤环境质量标准》农用地土壤风险筛选值,以 $6.5 < pH \leq 7.5$ 标准项下的取值计算

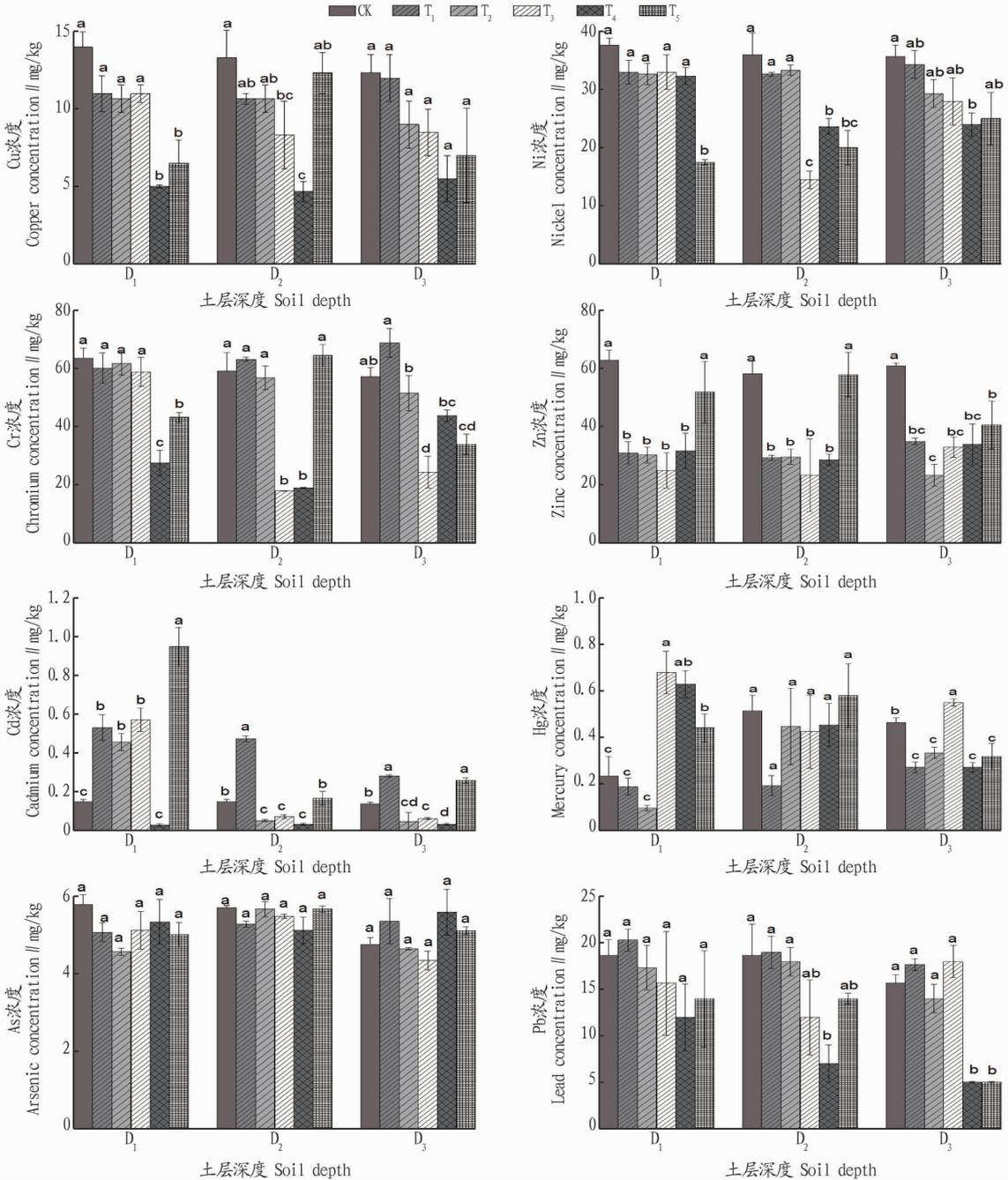
Note: The reference limit values in the table are derived from the soil risk screening value of agricultural land in GB15618—2018 Soil Environmental Quality Standards, and are calculated based on the value under the standard of $6.5 < pH \leq 7.5$

2 结果与分析

2.1 不同 SADR 施用量对土壤中重金属含量的影响 图 1 为在施 SADR 不同量的处理水平下,油松育苗地土壤中铜、镍、铬、锌、镉、汞、砷、铅 8 种重金属含量的变化情况。从图 1 中可以看出,在 0~20 cm 土层,铜在 CK、T₁、T₂、T₃ 处理之间以及 T₄、T₅ 处理之间无显著差异($P>0.05$),但前 4 种处理与后 2 种处理间存在差异显著($P<0.05$);在 20~40 cm 土层,对照组高于 T₁、T₂、T₅ 处理,显著高于 T₃、T₄ 处理($P<0.05$);在 40~60 cm 土层中铜含量在各处理下无显著差异($P>0.05$)。在 0~20 cm 土层,镍在 T₅ 处理下出现最小值,并且与其他处理间存在显著差异($P<0.05$);在 20~40 cm 土层中镍在 T₃ 处理时出现最小值,且显著低于对照组($P<0.05$);在 40~60 cm 土层中, T₄ 处理时出现最小值,且显著低于对照组($P<0.05$)。铬的含量在 0~20 和 20~40 cm 土层 T₄ 处理下显著低于对照($P<0.05$);在 40~60 cm 土层 T₁ 处理略高于对照组,但显著高于其他处理组, T₃ 处理显著低于其他处理组($P<0.05$)。在全部土层的 CK、T₁、T₂、T₃、T₄ 处理下,土壤中锌

的含量均呈现先减小后增加的趋势,从 T_1 处理开始呈现迅速下降现象,并且在前 2 个土层中 T_3 处理下的锌含量分别比对照组低 60.3%、60.0%,在 40~60 cm 土层中 T_2 处理下的锌含量比对照组低 62.29%,在 0~20 cm 土层中 $T_1 \sim T_4$ 处理下的锌含量都显著低于 CK 和 T_5 处理 ($P < 0.05$),在 40 cm 以上土层,锌含量由 T_2 处理开始逐渐呈现递增的趋势,并且在该处理下锌含量与 CK 和 T_5 处理差异显著 ($P < 0.05$)。在 0~20 cm 土层, T_3 处理下的镉含量显著高于其他处理 ($P < 0.05$);在 20~40 cm 土层中 T_1 处理下土壤中镉的含量均高

于其他处理;在 40~60 cm 土层中, T_1 处理和 T_5 处理的镉含量显著高于其他处理;所有土层中, T_4 处理下土壤中镉含量均最低,皆为 0.03 mg/kg。汞含量在 0~20 cm 土层 CK、 T_1 、 T_2 处理下相对较低,在 T_3 处理下,汞含量出现峰值,该值与 CK、 T_1 、 T_2 、 T_5 处理下的汞含量存在显著性差异 ($P < 0.05$);在 20~40 cm 土层的全部处理下,汞的含量差异均不显著 ($P > 0.05$);在 40~60 cm 土层中 T_3 处理下汞含量显著高于其他处理,说明短期内施用不同浓度水平的 SADR 对中层土壤中的汞含量造成的影响不大,较高或较低浓度的 SADR 对深层



注:图中不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著

Note: Different lowercase letters in the figure stand for significant differences between different treatments at 0.05 level

图 1 不同处理下土壤重金属的变化特征

Fig.1 The change characteristics of heavy metals in soil under different treatments

土壤中的汞含量造成的影响较小。图 1 还表明, 砷的含量在各处理水平间无显著差异 ($P>0.05$), 说明施用 SADR 对土壤中砷含量影响不大。铅的含量在 0~20cm 土层无显著差异 ($P>0.05$); 但在 20~40 cm 土层 T_4 处理下铅含量显著低于 CK、 T_1 、 T_2 处理 ($P<0.05$); 在 40~60 cm 土层中, T_4 处理显著低于 CK、 T_1 、 T_2 、 T_3 处理, 说明在 T_4 处理下对铅含量的影响最小。

2.2 不同施用水平重金属总量在土层中的变化 图 2 显示, 在油松育苗地, 未施用 SADR 的对照组的 3 个土壤层次的铜、镍、铬、锌、镉、汞、砷、铅 8 种重金属总量均表现最高, 分别为 203.44、191.39 和 184.67 mg/kg, 且随着土层的加深, 重金属的总量呈减少趋势。施用 SADR 后, 随着施用量的增加, 0~20 和 20~40 cm 土层中重金属总量呈现先降低后升高的趋势, 其最低值的重金属总量分别为 113.62 和 95.63 mg/kg, 比对照组的重金属总量分别减少 44.15% 和 50.03%。在 0~20 cm 土层, T_4 处理下重金属总量最低; 在 20~40 cm 土层, 在 T_3 和 T_4 处理下重金属总量最低; 在 40~60 cm 土层, T_3 处理下重金属总量最低。不同土层的重金属总量均有逐渐增加的趋势。

2.3 土壤中重金属污染程度及潜在生态风险分析 表 3 表明, 铜、镍、铬、锌、汞、砷、铅在各个用量水平下不同土层的潜在生态危害系数均小于 40, 符合低生态危害的风险程度。

对于重金属镉而言, 在 T_1 处理下各个土层以及在 T_3 处

理下 0~20 cm 土层的潜在生态危害系数均出现了大于 40 的现象, 处于中等危害以上, 尤其是 T_1 处理下的 20~40 cm 土层中镉的潜在生态危害系数为 85.67, 达到了较高生态危害水平。 T_4 处理下各土层生态危害等级最低, 潜在生态危害指数最小值仅 2.67。

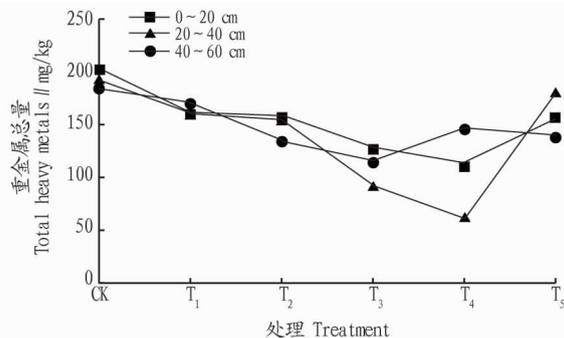


图 2 不同土层重金属总量随 SADR 施用量增加的变化趋势

Fig.2 Variation trend of the total amount of heavy metals in different soil layers with the increase of SADR application

通过计算这 8 种重金属的潜在生态危害指数 RI 值可看出, 在 3 个土层的全部处理中, 所得到的 RI 值均不超过 150, 属于低污染等级, 但单独来看, 镉存在的风险较大, 而且镉的含量对 RI 值贡献较大, 预计将会成为污泥土地利用的主要限制因子。

表 3 不同处理土壤重金属潜在生态风险评价结果

Table 3 Results of potential ecological risk assessment of heavy metals in soils with different treatments

处理 Treatment	土层 Soil layer cm	E_r^i								RI 值 RI value	污染等级 Pollution level
		Cu	Ni	Cr	Zn	Cd	Hg	As	Pb		
CK	0~20	0.70	1.88	0.64	0.25	14.67	8.09	1.93	0.78	28.94	低
	20~40	0.67	1.80	0.59	0.23	14.67	8.61	1.69	0.78	29.03	低
	40~60	0.62	1.78	0.57	0.23	30.33	10.01	1.70	0.65	45.90	低
T_1	0~20	0.55	1.65	0.60	0.12	53.00	2.64	1.70	0.78	61.04	低
	20~40	0.53	1.63	0.63	0.12	85.67	3.23	1.77	0.78	94.36	低
	40~60	0.60	1.72	0.69	0.13	63.67	4.56	1.79	0.65	73.80	低
T_2	0~20	0.53	1.63	0.62	0.12	31.67	2.24	1.53	0.72	39.07	低
	20~40	0.53	1.67	0.57	0.12	7.00	7.44	1.90	0.75	19.98	低
	40~60	0.45	1.47	0.52	0.09	6.67	8.88	1.56	0.65	20.29	低
T_3	0~20	0.55	1.40	0.44	0.10	55.67	11.39	1.60	0.65	71.80	低
	20~40	0.42	0.93	0.29	0.09	19.00	7.06	1.84	0.50	30.12	低
	40~60	0.33	1.40	0.36	0.09	5.33	10.92	1.45	0.75	20.64	低
T_4	0~20	0.37	1.45	0.28	0.13	2.67	9.43	1.79	0.50	16.61	低
	20~40	0.23	1.18	0.26	0.11	3.00	7.65	1.71	0.29	14.45	低
	40~60	0.53	1.70	0.37	0.20	3.00	3.46	1.87	0.36	11.50	低
T_5	0~20	0.47	1.28	0.50	0.21	32.33	7.37	1.68	0.58	44.42	低
	20~40	0.62	1.38	0.64	0.23	39.67	9.73	1.71	0.58	54.56	低
	40~60	0.35	1.42	0.44	0.18	35.67	6.57	1.71	0.43	46.76	低

3 讨论

重金属是限制污泥产品大规模林地利用的重要因素, 前人的诸多试验表明, 污泥林地施用可能会造成重金属的积累或对土壤中的重金属影响不明显。笔者通过在苗圃油松大规模苗木培育地施用经过高级厌氧消化板框脱水处理后的

污泥产品后发现, 在不同施用量水平下某些重金属含量出现了较对照组含量更低的情况。在某些土层中铜、锌、铬、镍、铅在土壤中的含量随施用量增加的过程中均出现了先降低后增高的趋势。虽然不同重金属及不同土层的最低值所处的施用量水平不尽相同, 但都集中在 T_3 、 T_4 处理。这可能与

油松苗木根系的吸收与富集、随地表径流流失或淋溶等因素有关。付新梅等^[14]研究发现,添加堆肥污泥后耕作层土壤中的某些重金属形态发生了明显变化,其中易被植物利用的酸溶/可交换态和可还原态有了明显增加。曹学慧等^[15-16]研究得出,油松对铜、锌、镉等重金属有较强的富集能力;汞和砷含量随施用量水平变化不大,短期施用对土壤中砷含量影响不大。该研究发现,各层土壤中铜、镍、铬、锌、镉、汞、砷、铅8种重金属总量之和均在 T_3 处理下最低。通过利用潜在生态污染风险指数发现,从RI值分析各处理下均不存在生态污染风险,但从各种重金属单独的潜在生态危害系数来看,重金属镉存在一定的污染风险,在 T_2 、 T_3 处理下达到了中等至较高的生态危害水平,但在 T_4 处理下该指数为最小值,这可能与油松在该施用量下对镉的富集作用有增强的趋势有关。徐秋曼等^[17]研究表明,随着镉浓度的增加,叶片和根系中的MDA、POD和SOD活性明显增加,但随着胁迫时间的延长又有降低的趋势,表明植物对镉胁迫的适应能力是有限的。此外,姚俊修等^[18]通过不同浓度 Cd^{2+} (5、10、15、20、25 mg/L)对黑杨派5个无性系进行胁迫试验发现,随着Cd浓度升高其净光合速率和蒸腾速率都呈现先升高后降低的趋势,而气孔导度则出现先降低后升高的趋势。由此可看出,一定浓度的镉胁迫会促进植物各项生理指标的提升,从而进一步促进植物对镉的富集。

综合各重金属的变化趋势看,各土层最低值均集中在 T_3 和 T_4 处理下,从潜在生态危害指数评价结果来看,在 T_4 处理下各重金属的潜在危害系数较低,同时,其综合指数等级为低生态危害。所以从重金属角度考虑,污泥短期土地利用以 T_4 处理即 4 kg/m^2 为最佳施用量。该研究重点关注了重金属在土地利用过程中对土壤的影响,但污泥土地利用过程中重金属对植物、地下水的影响以及污泥中营养物质对植物的影响都应该成为污泥合理施用量的重要参考数据,还需要进一步探究。

4 结论

通过在苗圃油松大规格移植苗培育地施用不同量的经高级厌氧消化和板框脱水工艺后所得到的污泥产品,分析施用后的土壤中8种重金属的含量以及重金属总量的变化情况,评估其潜在生态风险,可以得出以下结论:

(1)不同污泥产品施用量下,土壤中的重金属铜、锌、铬、镍、铅的含量呈现先下降后升高趋势,最小值主要出现在3和 4 kg/m^2 施用量处理,重金属镉在 4 kg/m^2 施用量处理下出现最小值,汞和砷变化幅度较小。

(2)油松育苗地土壤在施用污泥产品一段时间后,随着污泥施用量的增加,重金属总量有一定程度的下降,0~20和

20~40 cm土层之间的下降趋势大致相同,这种下降的情况在20~40 cm土层 4 kg/m^2 处理最为明显,下降约50.03%,但施用过多的污泥产品仍会使土壤重金属含量继续增加,存在一定风险。

(3)采用Hankson潜在生态危害指数法对油松育苗地施用经高级厌氧消化和板框脱水工艺后所得到的污泥产品后的重金属污染所带来的生态风险进行评价,结果显示,8种重金属单独作用时,镉在 $1\sim 3\text{ kg/m}^2$ 施用量下存在中等至较高生态风险,其他水平处理下均为低生态风险,除镉以外的其他7种重金属单独作用时均为低生态风险。8种重金属共同作用时为低生态风险。

(4)为防止重金属镉对油松育苗地土壤各土层存在的潜在生态污染风险,推荐选择 4 kg/m^2 作为污泥产品施用量。

参考文献

- [1] 伏苓.城市污水处理厂污泥两相厌氧消化的研究[D].西安:长安大学,2005.
- [2] 刘学娅,赵亚洲,冷平生.城市污泥的土地利用及其环境影响研究进展[J].农学报,2018,8(6):21-27.
- [3] TEJADA M, GONZALEZ J L. Influence of organic amendments on soil structure and soil loss under simulated rain[J]. Soil & tillage research, 2007, 93(1): 197-205.
- [4] 康军,孙西宁,杨凌城市污泥重金属环境风险评价及合理施用量研究[J].安徽农业科学,2014,42(28):9903-9905.
- [5] 刘新安.西安城市污水处理厂污泥在市政园林绿化中的应用研究[D].西安:西安建筑科技大学,2012.
- [6] BENNETT G F. Endocrine disruptors in wastewater and sludge treatment processes[J]. Journal of hazardous materials, 2003, 100(1/2/3): 317-318.
- [7] UDOM B E, MBAGWU J S C, ADESODUN J K, et al. Distributions of zinc, copper, cadmium and lead in a tropical ultisol after long-term disposal of sewage sludge[J]. Environment international, 2004, 30(4): 467-470.
- [8] 张辉,阜崑,左社,等.污泥堆肥林地利用对土壤环境的影响[J].环境工程,2017,35(增刊):553-556.
- [9] MADRID F, FLORIDO M C. Effects of the presence of a composted biosolid on the metal immobilizing action of an urban soil[J]. Journal of hazardous materials, 2010, 176(1/2/3): 792-798.
- [10] 薛万来,李法虎.污泥不同利用形式及利用量对土壤生态环境的影响[J].生态科学,2018,37(4):130-137.
- [11] 周洁,张志强,孙阁,等.不同土壤水分条件下杨树人工林水分利用效率对环境因子的响应[J].生态学报,2013,33(5):1465-1474.
- [12] 岳德鹏,刘永兵,王计平,等.河流冲积沉积沙地风蚀规律及植被防风蚀效应:以北京市永定河沙地为例[J].生态学报,2006,26(9):2948-2956.
- [13] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [14] 付新梅,俞珊,李云飞,等.污泥土地利用中重金属铜在土壤中的迁移行为[J].环境科学与管理,2010,35(12):18-21.
- [15] 曹学慧,安海龙,刘超,等.北京市主要绿化树种叶片中重金属的积累特性及其大气污染评价[C]//2015年中国环境科学学会学术年会论文集(第一卷).北京:中国环境科学学会,2015.
- [16] 宋学华.尾矿库周边优势树种重金属积累特征研究[J].绿色科技,2019(16):184-185.
- [17] 徐秋曼,陈宏,程景胜,等.镉对油菜叶细胞膜的损伤及细胞自身保护机制初探[J].农业环境保护,2001,20(4):235-237.
- [18] 姚俊修,乔艳辉,杨庆山,等.重金属镉胁迫对黑杨派无性系光合生理及生长的影响[J].西北林学院学报,2020,35(2):40-46,107.