

徐宇鹏,王棣,杜莉莉,等. 城镇生活污水焚烧炉渣用于草本种植试验初探[J]. 净水技术, 2024, 43(11): 148-156.

XU Y P, WANG D, DU L L, et al. Preliminary exploration of urban domestic sludge incineration slag for herbs planting experiment [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(11): 148-156.

城镇生活污水焚烧炉渣用于草本种植试验初探

徐宇鹏¹,王棣^{1,2,*},杜莉莉¹,蔺洪永¹,杨浩¹,张玲敏³

(1. 中原环保股份有限公司,河南郑州 450000;2. 郑州市污水净化有限公司,河南郑州 450000;3. 郑州市郑东新区水务有限公司,河南郑州 450046)

摘要 为提高城镇生活污水焚烧炉渣资源化利用率,文章探究了污泥焚烧炉渣用于草本种植的可行性。首先对炉渣的基本理化性质、重金属及养分等进行测定,对照相关标准,判断其用于草本种植的可能性。然后以不同掺渣率的土壤作为种植土,对3种常用绿化草本开展盆栽试验,研究炉渣掺入比例对草本生长的影响。结果表明,污泥焚烧炉渣中有机质及速效氮、有效磷和速效钾质量分数分别达到 (14.6 ± 0.3) g/kg及 (46.7 ± 1.5) 、 (80.5 ± 3.1) 、 (410 ± 18) mg/kg,营养成分丰富,且理化性质适宜,重金属含量满足要求,能够用于草本种植。土壤最佳掺渣率为20%,此时3种草本的生长和发芽情况明显优于空白组(不掺渣),土壤的保水性和持水性明显改善,且炉渣的掺入对土壤重金属无明显影响,能够满足草本种植限值需要。

关键词 生活污水 污泥焚烧 炉渣 理化性质 草本种植

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)11-0148-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.11.019

Preliminary Exploration of Urban Domestic Sludge Incineration Slag for Herbs Planting Experiment

XU Yupeng¹, WANG Di^{1,2,*}, DU Lili¹, LIN Hongyong¹, YANG Hao¹, ZHANG Lingmin³

(1. Zhongyuan Environmental Protection Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China;

2. Zhengzhou Sewage Purification Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China;

3. Zhengzhou Zhengdong New District Water Affairs Co., Ltd., Zhengzhou 450046, China)

Abstract In order to improve the resource utilization rate of domestic sludge incineration slag, the feasibility of using it for herbs planting was explored in this paper. Firstly, the basic physical and chemical properties, heavy metals and nutrients of the slag were determined, and the possibility of using it for herbs planting was judged according to the relevant standards. Then, pot experiments were carried out on three kinds of commonly used green herbs, whose planting soil was mixed with different ratios of slag, to study the effect of mixing ratio of slag on the growth of herbs. The results showed that the mass fraction of organic matter, available nitrogen, available phosphorus, and available potassium in the sludge incineration slag reached (14.6 ± 0.3) g/kg, and (46.7 ± 1.5) , (80.5 ± 3.1) , (410 ± 18) mg/kg, respectively. The sludge incineration slag was rich in nutrients, had suitable physical and chemical properties, and the heavy metal content in it could meet the requirements. So it could be used for herbs planting. The optimal slag addition rate in soil was 20%. At this time, the growth and germination of the three kinds of herbs was significantly better than the blank group (without slag addition), and the water retention and water holding capacity of the soil was significantly improved. Moreover, the addition of slag had no significant impact on heavy metals in soil, which could meet the requirements of herbs planting limits.

Keywords domestic sludge sludge incineration slag physical and chemical properties herbs planting

[收稿日期] 2023-04-18

[基金项目] 郑州市重大科技创新专项项目(2020CXZX0078)

[作者简介] 徐宇鹏(1993—),男,硕士,工程师,主要从事污泥处置相关技术研发与推广,E-mail:xuyupeng@cpepgc.com。

[通信作者] 王棣,男,博士,工程师,主要从事固体废弃物资源化和生态修复等工作,E-mail:wangdi@cpepgc.com。

污泥焚烧技术具有彻底减容减重、彻底分解有毒有害物质、处理效率高、能够回收能源等优点,是国际上主流的城镇生活污水泥处理处置工艺^[1-3]。国内城镇生活污水泥焚烧起步较晚,当前主要大规模应用于江苏、浙江、上海等南方发达城市^[4]。随着技术发展的不断成熟和投资、运行成本的下降,污泥焚烧技术的市场认可度及市场占有率逐渐升高,发展前景广阔。然而,城镇生活污水泥焚烧后仍有干污泥质量分数为 50%~70% 的灰渣^[5]。据估计,全球每年至少产生 1.7×10^6 t 污泥焚烧灰渣^[6]。随着污泥焚烧技术在国内的大规模推广应用,污泥焚烧灰渣产量也将急剧增长,大量的灰渣必须进行合理处理处置。

污泥焚烧灰渣包括飞灰和炉渣两部分:其中飞灰主要指烟气净化系统收集的残渣,炉渣主要是从炉床直接排出的废渣^[7]。目前,国内一般将污泥焚烧飞灰从严按照危险废弃物处理,炉渣则按照一般固体废弃物处理。现有的炉渣处理处置方式主要包括露天堆放、卫生填埋和建材利用等^[8-9]。露天堆放容易对环境造成二次污染,卫生填埋需要占用大量土地资源,建材利用作为一种高附加值利用方式,国内外研究较为广泛^[9-10],但是产品质量问题存在较大争议,且市场认可度较低^[11-12]。因此,现有的处理利用方式均无法满足对炉渣的彻底有效处理,亟需探索一种新的更有效的炉渣处理利用方式。低成本、高附加值的处理利用方式也有利于进一步降低污泥焚烧成本,促进污泥焚烧技术的推广应用。

研究^[13-15]表明,污泥焚烧炉渣中含有丰富的氮、磷、钾等营养元素,能够为植物生长提供必要的养分。虽然炉渣中存在一定含量的重金属,但其形态相比于污泥已经发生明显改变,植物有效态比例大幅下降,残渣态显著增加,迁移性、生物可利用性和环境风险均大大降低^[16],这也是市政污泥焚烧后的炉渣作为一般固废处理的主要原因。王妍等^[17]对垃圾焚烧炉渣与垃圾土混合用作矿山废弃地植被恢复的可行性进行了研究,发现能够满足多数植物生长需要。市政污泥相比于生活垃圾成分较为简单,有毒有害物质含量少,焚烧后的炉渣中重金属等有毒有害物质含量也会相对较低。现有研究中,鲜有污泥焚烧炉渣用于草本种植的报道。因此,本研究将开展污泥焚烧炉渣种植草本试验,重点关注对

于环境的重金属风险以及用于草本种植的可行性,旨在为炉渣资源化利用探索新的出路。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用的炉渣样品取自郑州市某城市生活污水泥处置项目焚烧后的底渣。该项目为污泥独立干化焚烧工程,设计规模为 33 t/d (以含水率为 80% 计)。整个污泥处置项目包括污泥脱水系统、干化系统、焚烧系统、烟气处理系统和输送系统等。污水处理厂经过浓缩后含水率为 98% 左右的污泥直接进入污泥处置生产线,经过脱水、干化、焚烧等流程,产出的炉渣水封降温后进行资源化利用,污泥焚烧产生的热量用于前端污泥干化,整个系统可实现热量自平衡。污泥焚烧系统采用机械炉排炉,焚烧温度稳定维持在 850 °C 以上,烟气停留时间为 2 s 以上。本项目炉渣产生量占灰渣总产生量的 95% 以上,系统产生的炉渣经破碎机破碎为 5 mm 左右的分散小颗粒。试验用炉渣通过随机采样得到,静置备用。

我国北方地区冬季气候寒冷干燥,绿化工程草本植物通常选择耐寒、耐旱性比较好的品种,常用的绿化草本有四季青、百慕大、护坡王、果岭草、百喜草、黑麦草、高羊茅等。本研究选取四季青、百慕大、护坡王 3 个品种作为研究对象,试验用草本种子通过外购获得。

1.2 试验设计

1.2.1 掺渣率初筛试验

试验以盆栽种植模式进行,分别在土壤中掺入 0%、20%、50%、80%、100% (体积分数) 的炉渣,充分混合后,取约 5.6 L 混合物装入 7.5 L 的塑料栽培盆(上口径为 23 cm,下口径为 18 cm,高为 22 cm)中,每个掺渣比例设置 3 盆,分别将 3 个品种的试验种子均匀播撒于盆中,每盆浇自来水 1 L。试验土壤掺渣比例如表 1 所示。各栽培盆中除掺渣比例不同外,其他操作均相同。由于试验时间为冬季,为保证草本的正常发芽生长,将播种浇水后的栽培盆放置于提前搭建好的塑料薄膜大棚,尺寸为 1.8 m × 1.1 m × 0.6 m (长 × 宽 × 高) 中,试验区域为室外向阳位置。试验过程中,观察草本发芽、生长状况。45 d 后,对草本生长高度、生长情况进行统计记录,分析不同掺渣率对各草本生长的影响。

表 1 试验土壤掺渣率

Tab. 1 Test Soil with Different Mixing Ratios of Slag

编号	掺渣率
A	0
B	20%
C	50%
D	80%
E	100%

1.2.2 优化试验

掺渣率初筛试验结束后,根据试验结果,选择适合试验草本生长的掺渣浓度范围,进一步缩小浓度梯度,进行优化试验。设置土壤掺渣率分别为 0、

10%、15%、20%、25%、30%、40%,开展盆栽试验。每盆播撒 400 粒种子,其他种植步骤与掺渣率初筛试验相同。各栽培盆中除掺渣比例不同外,其他操作均相同。试验中,分别在播种后 37 d 和 67 d 对草本生长高度以及土壤含水率进行统计记录,试验结束后统计草本发芽率。

1.3 分析方法

对炉渣中重金属含量、重金属浸出浓度、有机质等理化性质进行检测分析,各检测项目采用的检测方法及使用的仪器如表 2 所示。每个样品设置 3 个平行样。

表 2 检测项目、检测方法及检测仪器

Tab. 2 Test Items, Methods and Instruments

检测项目	检验方法	使用仪器
含水率	干燥称重法	烘箱
pH	玻璃电极法	便携式 pH 计
热灼减率	灼烧称重法	马弗炉
密度	固定体积称重法	电子天平
重金属	《固体废物 22 种金属元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法》(HJ 781—2016)	电感耦合等离子体原子发射光谱仪
重金属浸出浓度	《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)	电感耦合等离子体原子发射光谱仪 原子吸收光谱仪 原子荧光光谱仪
有机质	《土壤检测 第 6 部分:土壤有机质的测定》(NY/T 1121.6—2006)	滴定管
全氮	《森林土壤氮的测定》(LY/T 1228—2015)	滴定管
全磷、有效磷	《森林土壤磷的测定》(LY/T 1232—2015)	可见分光光度计
全钾	《土壤全钾测定法》(NY/T 87—1988)	原子吸收光谱仪
速效氮	《土壤速效氮测定》(DB13/T 843—2007)	滴定管
速效钾	《森林土壤钾的测定》(LY/T 1234—2015)	原子吸收光谱仪

2 结果与讨论

2.1 炉渣理化性质

2.1.1 炉渣基本理化性质

对炉渣的 pH、含水率、热灼减率、密度这些基本理化性质指标进行测定,炉渣 pH 值为 6.11 ± 0.15 ,呈弱酸性,符合《绿化种植土壤》(CJ/T 340—2016)规定的 pH 值(5.0~8.0)。新鲜炉渣含水率为 $30.8\% \pm 1.2\%$,由于污泥焚烧后的炉渣经过湿水降温过程,含水率较高,但不稳定,在自然状态下水分蒸发,含水率逐渐降低。炉渣热灼减率为 $2.2\% \pm 0.10\%$,说明污泥焚烧比较充分,符合《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)中的规定值($\leq 5\%$)。炉渣密度为 $(817.39 \pm 22.58) \text{ mg/cm}^3$ 。

2.1.2 炉渣重金属含量及浸出浓度

污泥和炉渣中重金属元素含量检测结果如表 3 所示。其中,Hg、Pb 在炉渣中的含量均显著低于在污泥中的含量,这是因为 Hg、Pb 属于易挥发重金属,污泥焚烧过程中,在高温作用下挥发进入飞灰和烟气中,使得炉渣中含量显著降低;其他重金属在炉渣中均得到了不同程度的浓缩,尤其是 Zn、Cr、Mn、Cu、Ni 在炉渣中含量很高,这主要是因为这些元素相对不易挥发,污泥焚烧过程中水分和挥发分的大量减少使得这部分重金属浓度升高^[18-20]。虽然炉渣中部分重金属被浓缩,含量升高,但是仍能够达到《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600—2018)中第二类用地筛选值标准。炉

渣中部分重金属的植物有效态检测结果如表 4 所示。炉渣中重金属植物有效态含量较低,生物可利用性低,因此炉渣资源化利用对环境造成危害的可能性不大^[16]。同时,炉渣中的有效 Cu、有效 Zn、有效 Mn 等元素能够为植物提供生长必需的微量元素。

表 3 炉渣重金属元素质量分数检测值(单位:mg/kg)
Tab. 3 Detection Value of Heavy Metal Element Mass Fraction in Slag

指标	污泥	炉渣	GB 36600—2018
Cu	69.4±1.1	184±4	18 000
Zn	340±10	716±17	/
Cd	6.8±0.1	7.7±0.1	65
Pb	36.4±1.2	26±1	800
Cr ⁶⁺	<2	<2	5.7
Hg	3.63±0.01	0.099±0.002	38
Ni	35.8±1.4	94.6±1.7	900
As	11.4±0.4	16±0.4	60
Co	8.8±0.2	21.8±0.5	70
Tl	<0.4	<0.4	/
Sb	6±0.1	12.7±0.2	180
Mn	191±4	306±3	/

表 4 炉渣重金属植物有效态质量分数
Tab. 4 Plants Effective Mass Fraction of Heavy Metals in Slag

指标	质量分数/(mg·kg ⁻¹)
有效铅	1.46±0.03
有效镉	0.061±0.001
有效铜	4.54±0.10
有效锌	15.21±0.35
有效锰	55.9±1.3
有效镍	3.93±0.08

炉渣中重金属浸出浓度检测结果如表 5 所示。由表 5 可知,污泥焚烧炉渣中重金属浸出浓度均较低,远低于《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)中规定的值,因此该炉渣属于一般固体废弃物。同时可以发现,炉渣的浸出液中重金属浓度低于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中 V 类水标准和《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)中的重金属浓度限值。因此,利用该炉渣进行草本种植的环境风险较低。

2.1.3 炉渣养分

氮、磷、钾是植物生长必需的营养成分,氮肥长

叶,磷肥长根,钾肥长茎^[21]。对炉渣中有机质、氮、磷、钾等营养成分进行检测,结果如表 6 所示。由表 6 可知,炉渣中速效氮、有效磷和速效钾质量分数分别为(46.7±1.5)、(80.5±3.1)mg/kg 和(410±18)mg/kg,均高于《绿化种植土壤》(CJ/T 340—2016)中规定的土壤肥力指标要求,有机质质量分数为(14.6±0.3)g/kg,略低于标准值。炉渣中的有机质含量低是因为焚烧较为充分,大部分有机质变为气体挥发。炉渣中的全氮、全磷和全钾含量与文献^[22]中垃圾焚烧炉渣混合锯末等制作的园林绿化种植基材含量相当。同时,对照全国第二次土壤普查养分分级标准可以发现,炉渣中除了全钾和速效氮指标为五级(低)标准,有机质为四级(中)标准,其他养分指标均达到一级(极高)标准。因此,从养分角度来看,炉渣含有丰富的营养成分,可以用于草本种植。

2.2 掺渣率初筛试验结果

草本生长高度是衡量植物生长状况的重要指标。掺渣率初筛试验在草本种植后 45 d 统计 3 种草本生长高度,并绘制 3 种草本在不同掺渣率条件下的生长高度柱状图,如图 1 所示。试验结果表明,当掺渣率为 20%时,四季青、百慕大和护坡王生长高度最佳,平均高度分别为 19.07、24.68、19.27 cm,对应空白组(掺渣率为 0)平均高度分别为 14.69、21.91、13.44 cm,相比于空白组,掺渣率为 20%的试验组对 3 种草本的促进作用分别为 29.82%、12.64%、43.38%。当掺渣率为 50%时,四季青、百慕大和护坡王 3 种草本仍可以正常生长,但相比于空白组,试验组表现出一定的抑制作用。当掺渣率为 80%和 100%时,试验用 3 种草本均未生长,发芽率为 0。另外,试验还发现当掺渣率为 20%时,土壤湿度明显高于空白组,相同种植时间下,植物叶片更加挺拔和碧绿,未出现枯萎现象。

虽然掺渣率初筛试验未对草本发芽率进行统计,但通过观察可以发现,掺渣率为 20%的试验组与空白组发芽率相当,均布满整个栽培盆,而掺渣率为 50%或者更高时,草本发芽率明显降低。因此决定在掺渣率 40%以内,缩小掺渣浓度梯度,继续开展优化试验,深入探究不同掺渣率对草本生长的影响机制。

表 5 炉渣重金属浸出质量浓度(单位:mg/L)
Tab. 5 Leaching Mass Concentration of Heavy Metals in Slag

指标	炉渣	GB 5085.3—2007	GB 3838—2002	GB 5084—2021
Cu	<0.01	100	1	0.5
Zn	0.016±0.001	100	2	2
Cd	<0.01	1	0.01	0.01
Pb	<0.01	5	0.1	0.2
Cr	<0.01	15	/	/
Hg	<0.001	0.1	0.001	0.001
Ni	0.03±0.01	5	/	0.2
As	0.045±0.002	5	0.1	0.05
Cr ⁶⁺	0.004±0.001	5	0.1	0.1
Co	<0.01	/	/	/
Tl	<0.01	/	/	/
Sb	<0.01	/	/	/
Mn	0.45±0.02	/	/	/

表 6 炉渣养分质量分数
Tab. 6 Nutrient Mass Fraction of Slag

指标	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	速效氮/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
炉渣	14.6±0.3	2.63±0.06	44.6±1.8	8.4±0.4	46.7±1.5	80.5±3.1	410±18
CJ/T 340—2016	20~80	/	/	/	40~200	5~60	60~300
全国土壤养分 分级标准	10~20 四级	>2 一级	>1 一级	5~10 五级	30~60 五级	>40 一级	>200 一级

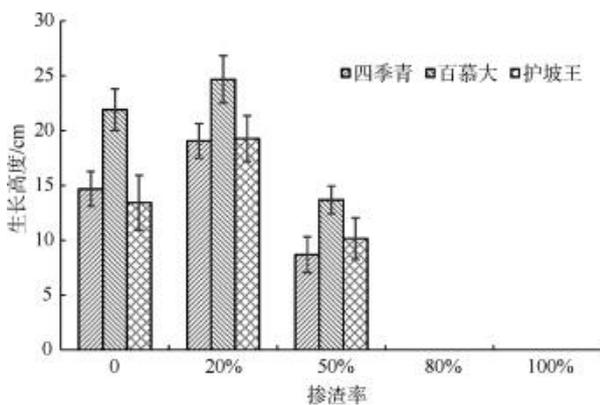


图 1 草本植物在不同掺渣率条件下的生长高度

Fig. 1 Growth Height of Herbs under Different Slag Content

2.3 优化试验结果

2.3.1 草本生长高度

优化试验在草本种植 37 d 和 67 d 后,统计四季青、百慕大和护坡王 3 种草本在不同掺渣率条件下的生长高度并绘制柱状图,结果分别如图 2、图 3 所

示。由图 2 可知,随着掺渣率的增加,3 种草本平均生长高度变化趋势均表现为先升高后降低。试验 37 d 后,当掺渣率不超过 20% 时,四季青、百慕大和护坡王 3 种草本相较于空白组均表现出一定的生长促进作用,四季青、百慕大、护坡王 3 种草本的促进程度分别为 16.3%~27.3%、6.2%~15.8%、22.5%~30.0%;当掺渣率在 25% 时,3 种草本生长高度与空白组相当;当掺渣率进一步提高到 30% 以上时,3 种草本表现出显著的生长抑制作用。由图 3 可知,试验 67 d,在掺渣率不超过 20% 时,四季青、百慕大、护坡王 3 种草本均表现出一定的生长促进作用,促进程度分别为 1.5%~14.4%、14.3%~22.8%、12.6%~17.8%;当掺渣率达到 30% 以上时,3 种草本均表现出显著的生长抑制。发生上述现象主要是因为污泥焚烧炉渣中含有丰富的氮、磷、钾等营养成分和微量元素,适量炉渣的掺入能够增加土壤中的养分,改善土壤的理化性质,提高土壤透气性,进而

促进草本生长;当掺渣量高于一定比例时,由于炉渣经过焚烧后有机质含量低,混合后的土壤中有有机质含量逐渐低于空白组,无法满足植物正常生长需要,且炉渣中的盐分等有害物质在土壤中浓度增加,对草本表现出抑制作用。通过上述分析得出,适宜的掺渣率能够促进草本植物生长,适宜四季青、百慕大和护坡王 3 种草本生长的掺渣比例为不超过 20%。

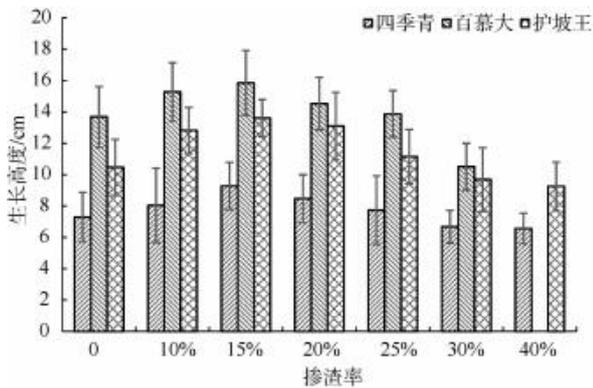


图 2 第 37 d 时草本植物在不同掺渣率条件下的生长高度变化
Fig. 2 Growth Height Changes of Herbs under Different Slag Content at 37th Day

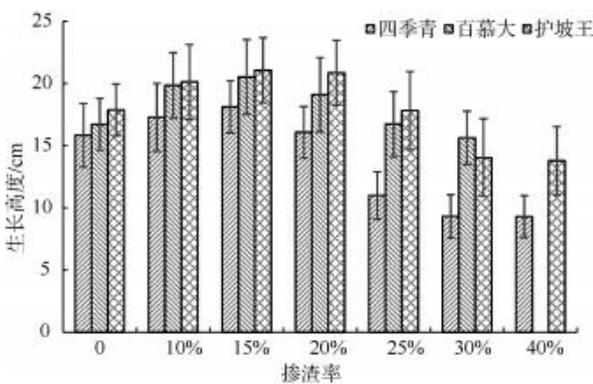


图 3 第 67 d 时草本植物在不同掺渣率条件下的生长高度变化
Fig. 3 Growth Height Changes of Herbs under Different Slag Content at 67th Day

2.3.2 草本发芽率

为探究土壤掺杂炉渣对草本种植发芽率的影响,试验 67 d 后,统计了不同草本在不同掺渣率条件下的发芽率,结果如图 4 所示。由图 4 可知,随着掺渣率的增加,草本发芽率呈现出先升高后降低的趋势,与草本生长高度变化趋势相似。当掺渣率不超过 20% 时,试验组草本发芽率均略高于空白组;随着掺渣率的增加,草本发芽率逐渐降低,掺渣率达

到 25% 以上时,草本发芽率显著降低。这是由于少量炉渣的掺入使土壤养分和水分得到了优化,整体表现为发芽促进作用,当炉渣掺入量大于一定比例时,土壤中的有机质含量降低,盐分等有害物质增加,表现为发芽抑制作用^[23]。因此,适量炉渣的掺入能够促进草本发芽。

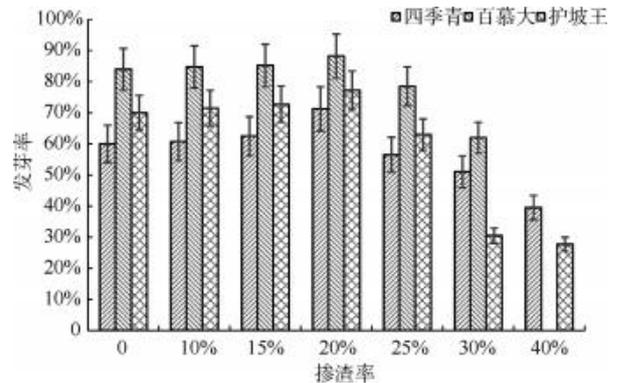


图 4 草本植物在不同掺渣率条件下的发芽率变化
Fig. 4 Changes of Germination Rates of Herbs under Different Slag Contents

2.3.3 土壤含水率

试验期间,在 7、37 d 和 67 d 测定土壤含水率,不同掺渣率下土壤含水率结果如图 5 所示。由图 5 可知,随着掺渣率的增加,相同时间下土壤含水率呈现先升高后下降的趋势,与草本生长高度和发芽率变化趋势相似。相较于空白组(掺渣率为 0),当掺渣率为 20% 时,土壤中含水率增加最多。这说明适量炉渣的掺入能够改善土壤持水性能,含水率的改善能够为草本生长提供有利条件,这也是适量掺渣对草本生长和发芽起到促进作用的一个重要因素。

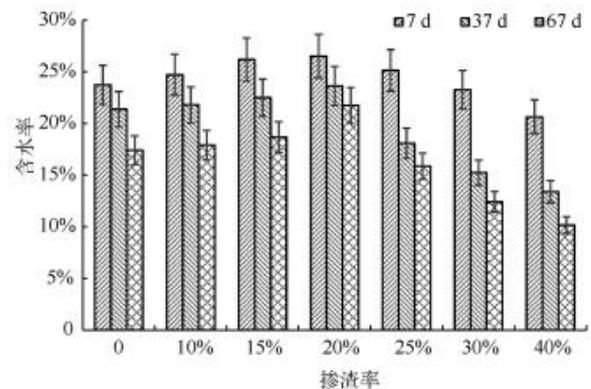


图 5 试验期间不同掺渣率条件下的土壤含水率变化
Fig. 5 Changes of Soil Moisture Content under Different Slag Contents during Test Period

适量炉渣的掺入能提高土壤持水性能,这与通常认为的炉渣孔隙率大,持水性能差的观点不一致,这可能是由于炉渣掺入土壤后,与土壤形成了团聚结构,提升了土壤整体的持水性能,具体机理仍需深入研究。

2.3.4 土壤重金属含量及浸出浓度

由上述分析可知,土壤掺杂 20% 炉渣条件下,3 种草本的生长高度、发芽率、土壤含水率均较好。为了研究掺杂炉渣对土壤中重金属含量及浸出浓度的长期影响,试验 67 d 后,分别对空白组和掺渣率为 20% 的试验组土壤重金属含量及浸出浓度进行了检测,结果分别如表 7 和表 8 所示。由表 7 可知,相比于空白组,掺渣率为 20% 的试验组重金属含量无明显变化,且两者均能够达到《绿化种植土壤》(CJ/T 340—2016)中规定的土壤重金属含量 I 级范围内。由表 9 可知,重金属浸出浓度与重金属含量相似,在空白组和掺渣率为 20% 的试验组之间无明显变化,且重金属浸出浓度能够满足《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)中的基本控制项目和选择控制项目限值要求。因此,可以认为在试验时间范围内,土壤中掺杂炉渣不会对土壤重金属含量和浸出浓度产生明显影响,且能够满足草本种植对土壤重金属限值的要求。

表 7 20% 掺渣率土壤第 67 d 时重金属元素质量分数
(单位:mg/kg)

Tab. 7 Heavy Metal Elements Mass Fraction in Soil Mixed with 20% Slag at 67th Day

指标	空白组	掺渣率为 20%	CJ/T 340—2016
Cu	18±0.8	18.8±0.8	40
Zn	52.8±2.4	57.2±2.6	150
Cd	0.14±0.01	0.14±0.01	0.4
Pb	15.5±0.7	15±0.7	85
Cr ⁶⁺	<2	<2	/
Hg	0.07±0.003	0.091±0.003	0.4
Ni	21.6±0.8	22.4±1.0	40
As	7.96±0.37	7.88±0.38	30
Co	12.2±0.5	12.2±0.5	/
Tl	<0.4	<0.4	/
Sb	1.6±0.07	1.9±0.07	/
Mn	308±6	321±6	/

表 8 20% 掺渣率土壤第 67 d 时重金属浸出质量
浓度(单位:mg/L)

Tab. 8 Leaching Mass Concentration of Heavy Metals in Soil Mixed with 20% Slag at 67th Day

指标	空白组	掺渣率为 20%	GB 5084—2021
Cu	<0.01	<0.01	0.5
Zn	<0.006	<0.006	2
Cd	<0.000 2	<0.000 2	0.01
Pb	<0.001	<0.001	0.2
Cr ⁶⁺	<0.004	<0.004	0.1
Hg	<0.000 2	<0.000 2	0.001
Ni	<0.01	<0.01	0.2
As	0.000 8±0.000 1	0.002 7±0.000 1	0.05
Co	<0.005	<0.005	/
Tl	<0.000 3	<0.000 3	/
Sb	0.000 3±0.000 1	0.000 6±0.000 1	/
Mn	0.004±0.001	0.006±0.001	/
Cr	<0.01	<0.01	/

3 结论

通过开展污泥焚烧炉渣混合土壤种植草本盆栽试验,可以得出以下结论。

(1) 污泥焚烧炉渣中含有丰富的营养成分和微量元素,其中有机质及速效氮、有效磷、速效钾质量分数分别达到(14.6±0.3)g/kg 及(46.7±1.5)、(80.5±3.1)、(410±18)mg/kg,炉渣理化性质适宜,重金属总量、浸出浓度、植物有效态含量较低,生物可利用性低,对环境造成危害的可能性小。因此,炉渣用于草本种植理论上是可行的。

(2) 污泥焚烧炉渣可以用于草本种植,但不能单独使用。土壤中掺入适当比例的炉渣能够起到促进草本生长和发芽的作用,但是当掺入炉渣过多时,草本生长受到抑制,甚至不能生长。

(3) 适宜四季青、百慕大和护坡王 3 种草本生长的最佳掺渣比例为 20%,此时炉渣的掺入能够明显改善土壤持水性,提高土壤保水能力,并且对土壤重金属含量和浸出浓度无明显影响,能够满足草本生长对土壤重金属的限值要求。

参考文献

- [1] HAO X D, CHEN Q, LOOSDRECHT MARK C M, et al. Sustainable disposal of excess sludge: Incineration without anaerobic digestion[J]. Water Research, 2020, 170: 115298.

- DOI: 10.1016/j.watres.2019.115298.
- [2] CHEN G Y, WANG X T, LI J, et al. Environmental, energy, and economic analysis of integrated treatment of municipal solid waste and sewage sludge: A case study in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 647: 1433 - 1443. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.104.
- [3] 王莉, 何蓉, 雷海涛. 城镇污水处理厂污泥处理处置技术现状综述[J]. *净水技术*, 2022, 41(11): 16-21, 69.
WANG L, HE R, LEI H T. General review of sludge treatment and disposal technology for urban WWTP [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(11): 16-21, 69.
- [4] 安叶, 张义斌, 黎攀, 等. 我国市政生活污泥处置现状及经验总结[J]. *给水排水*, 2021, 47(s1):94-98.
AN Y, ZHANG Y B, LI P, et al. Current situation and experience summary of municipal sewage sludge treatment and disposal in China [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(s1): 94-98.
- [5] LIANG Y, XU D H, FENG P, et al. Municipal sewage sludge incineration and its air pollution control[J]. *Journal of cleaner production*, 2021, 295: 126456. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126456.
- [6] DONATELLO S, CHEESEMAN C R. Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): A review[J]. *Waste Management*, 2013, 33(11): 2328-2340.
- [7] 中华人民共和国环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 生活垃圾焚烧污染控制标准: GB 18485—2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for pollution control on the municipal solid waste incineration; GB 18485—2014[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014.
- [8] 李赞. 城市污泥焚烧技术研究进展[J]. *东北电力大学学报*, 2022, 42(3): 46-56.
LI Y. Research progress for sewage sludge incineration technology[J]. *Journal of Northeast Electric Power University*, 2022, 42(3): 46-56.
- [9] 冯修平, 韩小蒙. 面向道路利用的污泥焚烧灰渣性质测试与分析[J]. *净水技术*, 2022, 41(s1): 133-137.
FENG X P, HAN X M. Test and analysis of sludge incineration ash properties for road utilization[J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(s1): 133-137.
- [10] WU Z X, JIANG Y M, GUO W X, et al. The long-term performance of concrete amended with municipal sewage sludge incineration ash [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 23: 101574. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101574.
- [11] 陈小亮, 谷麟, 王艳, 等. 污泥焚烧残渣水热合成 NaP1 型沸石和水钙沸石的性质研究[J]. *环境化学*, 2011, 30(12): 2092-2098.
CHEN X L, GU L, WANG Y, et al. Hydrothermal synthesis and characterization of NAP1 zeolite and gismondine from sludge incineration ash[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(12): 2092-2098.
- [12] 胡艳军, 李国建, 宁方勇, 等. 城市垃圾焚烧底灰资源化处理的可行性研究[J]. *环境污染与防治*, 2011, 33(12): 42-47, 69.
HU Y J, LI G J, NING F Y, et al. Study on the feasibility of municipal solid waste incineration bottom ash reutilization [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2011, 33(12): 42-47, 69.
- [13] LI R, TENG W, LI Y, et al. Potential recovery of phosphorus during the fluidized bed incineration of sewage sludge [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 964 - 970. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.06.177.
- [14] LIANG S, CHEN H M, ZENG X H, et al. A comparison between sulfuric acid and oxalic acid leaching with subsequent purification and precipitation for phosphorus recovery from sewage sludge incineration ash[J]. *Water Research*, 2019, 159: 242-251. DOI: 10.1016/j.watres.2019.05.022.
- [15] 李秉正, 李一, 吴汕. 一种利用园林废弃物无害化处理生活污水污泥的方法及系统: 201711028676.1 [P]. 2017-01-19.
LI B Z, LI Y, WU S. A method and system for harmless treatment of domestic sludge with garden wastes: 201711028676.1 [P]. 2017-01-19.
- [16] 方平, 唐子君, 钟佩怡, 等. 城市污泥焚烧渣中重金属的浸出特性[J]. *化工进展*, 2017, 36(6): 2304-2310.
FANG P, TANG Z J, ZHONG P Y, et al. A study on leaching characteristics of heavy metals in sludge incineration slag [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(6): 2304-2310.
- [17] 王妍, 张成梁, 姚晶晶. 垃圾焚烧炉渣种植试验初探[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(11): 162-167.
WANG Y, ZHANG C L, YAO J J. Preliminary study on the cultivation experiment of municipal solid waste incineration bottom ashes[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 42(11): 162-167.
- [18] 李国建, 胡艳军, 陈冠益, 等. 城市污水污泥与固体垃圾混烧过程中重金属迁移特性的研究[J]. *燃料化学学报*, 2011, 39(2): 155-160.
LI G J, HU Y J, CHEN G Y, et al. Transferring characteristics of heavy metals during co-incineration of municipal sewage sludge and solid waste[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2011, 39(2): 155-160.
- [19] ABANADES S, FLAMANT G, GAGNEPAIN B, et al. Fate of heavy metals during municipal solid waste incineration [J]. *Waste Management & Research*, 2002, 20(1): 55-68.
- [20] ZHANG H, HE P J, SHAO L M. Fate of heavy metals during municipal solid waste incineration in Shanghai [J]. *Journal of*

- Hazardous Materials, 2008, 156 (1/2/3): 365–373. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.12.025.
- [21] 李石恒,王毅,卜令豪. 寒旱区氮磷钾元素缺乏对小白菜生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(17): 136–139.
LI S H, WANG Y, BU L H. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium deficiency on growth of cabbage[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(17): 136–139.
- [22] 夏小栋. 一种利用垃圾焚烧炉渣制作的园林绿化种植基材及其制备方法: 201710893100.5[P]. 2017-09-27.
- XIA X D. A landscaping planting substrate made of waste incineration slag and its preparation method: 20171089 3100.5 [P]. 2017-09-27.
- [23] 曾正中,李国梁,苟剑锋,等. 污泥改性黄土合适配比及作物盆栽实验[J]. 环境工程学报, 2016, 10(8): 4473–4479.
ZENG Z Z, LI G L, GOU J F, et al. Reasonable proportion of sludge modified loess for a pot experiment of crops[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(8): 4473–4479.
- (上接第 124 页)
- CHEN J Z, MA X, LIANG W. Latest research progress and prospect of red mud resource utilization[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2023, 41(3): 105–111.
- [18] 王春峰,姚丹,陈冠飞,等. 赤泥重金属和放射性元素的毒性浸出和生物可给性[J]. 环境科学研究, 2017, 30(5): 809–816.
WANG C F, YAO D, CHEN G F, et al. Toxicity and bioaccessibility of heavy metals and radioactive elements in red mud[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(5): 809–816.
- [19] 杨永琼,张耀,李晓燕. 赤泥中重金属元素的浸出性与结合形态[J]. 化工环保, 2018, 38(2): 227–230.
YANG Y Q, ZHANG Y, LI X Y. Leachability and binding states of heavy metals in red mud[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2018, 38(2): 227–230.
- [20] 于华通. 用赤泥去除酸性矿井水中重金属的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2006.
YU H T. Study on the removal of heavy metal in acid mine drainage using red mud [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2006.
- [21] 熊浩,张涣清,杜禹芃,等. 赤泥的资源化利用研究进展[J]. 中国井矿盐, 2023, 4(3): 24–26.
XIONG H, ZHANG H Q, DU Y J, et al. Reviews of research on the use of red mud as a resource[J]. China Well and Rock Salt, 2023, 4(3): 24–26.
- [22] 卢彩萍. 赤泥基粒子电极的制备及其三维电催化降解环丙沙星的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
LU C P. Electrode and the study of catalytic degradation of ciprofloxacin by particle electrode in three-dimensional electrochemical system [D]. Nanning: Guangxi University, 2022.
- [23] 张崇森,刘淑瑞,郑婷婷,等. 钢渣粒子电极的制备及其在三维电催化氧化除藻中的应用[J]. 环境工程学报, 2020, 14(5): 1146–1153.
ZHANG C M, LIU S R, ZHENG T T, et al. Preparation of steel slag particle electrodes and its application in three-dimensional electrocatalytic oxidation for algae removal[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(5): 1146–1153.
- [24] 安路阳,刘宽,潘雅虹,等. Fe/Al₂O₃ 催化剂催化氧化兰炭废水[J]. 工业催化, 2016, 24(6): 73–77.
AN L Y, LIU K, PAN Y H, et al. Catalytic oxidation of semi-coking wastewater over Fe/Al₂O₃ catalyst [J]. Industrial Catalysis, 2016, 24(6): 73–77.
- [25] SING K S W, EVERETT D H, RAW H. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity[J]. Pure and Applied Chemistry, 1985, 57(4): 603–619.
- [26] LIN H P, WONG S T, MOU C Y. Extensive void defects in mesoporous aluminosilicate MCM-4 [J]. Journal of Physical Chemistry B, 2000, 104(38): 8967–8975.
- [27] GOMEZ S, GIRADIO O, GARCES L J. New synthetic route for the incorporation of manganese species into the pores of MCM-48 [J]. Chemistry of Materials, 2004, 16(12): 2411–2417.
- [28] WAN H J, WU B S, AN X, et al. Effect of Al₂O₃ binder on the precipitated iron-based catalysts for fischer-tropsch synthesis[J]. Journal of Natural Gas Chemistry, 2007, 16(2): 130–138.
- [29] SHINDE S S, MEENA S S, YUSUF S M, et al. Mossbauer, raman, and magnetoresistance study of aluminum-based iron oxide thin films[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2011, 115(9): 3731–3736.
- [30] WAN H J, WU B S, ZHANG C H, et al. Study on Fe-Al₂O₃ interaction over precipitated iron catalyst for Fischer-Tropsch synthesis[J]. Catalysis Communications, 2007, 8(10): 1538–1545.
- [31] XIE Y C, XU X P, ZHAO B Y, et al. Studies on the dispersion states of Fe₂O₃ on γ -Al₂O₃ by means of Mossbauer-spectroscopy and XRD[J]. Catalysis Letters, 1992, 13(3): 239–245.
- [32] LIU M, LI H B, XIAO L, et al. XRD and mossbauer spectroscopy investigation of Fe₂O₃-Al₂O₃ nano-composite [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2005, 294(3): 294–297.
- [33] RISTIC M, POPOVIC S, MUSIC S. Investigation of crystalline phases in the α -Fe₂O₃/ α -Al₂O₃ system[J]. Croatica Chemica Acta, 2009, 82(2): 397–404.