

# 污染淤泥固化稳定化处理及种植性能试验

史燕南<sup>1,2,3</sup>, 占川<sup>1,2</sup>, 张超杰<sup>1,2,3</sup>, 吴文华<sup>1,2</sup>, 杨炜<sup>1</sup>

(1. 浙江广川工程咨询有限公司, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020;  
3. 浙江省水利防灾减灾重点实验室, 浙江 杭州 310020)

**摘要:** 疏浚淤泥具有含水率高、固结难、体积大的特点, 部分受到重金属污染, 导致淤泥干化慢、利用难, 且干化后土壤易板结, 不利于植物生长。为了解决上述问题, 以铜、铅、镉离子溶出超标的疏浚淤泥为研究对象, 掺入纤维、石灰、粉煤灰、高岭土、硅酸钠、碳酸钠、硫酸铁和硫酸镁等多种材料进行固化稳定化试验和种植性能试验。结果表明: 固化后土体渗透系数提高了2~3个数量级; 8项重金属的浸出量有明显降低且达到标准要求; 处理后土体上种植的羽衣甘蓝的生长速率更快, 叶片外观更加鲜艳健康。确定10% (粉煤灰+石灰+高岭土+纤维)+6% (碳酸钠+硫酸铁) 配比作为植物种植应用的优选方案, 其种植的羽衣甘蓝重金属含量最少, 8项重金属的浸出减少率之和超过其他4种配比, 对N、P的吸收量较多。

**关键词:** 疏浚淤泥; 重金属; 固化稳定化; 种植土

**中图分类号:** X799.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-7647(2021)02-0089-06

**Experiments on stabilizing treatment of polluted silt solidification and planting performance**//SHI Yannan<sup>1,2,3</sup>, ZHAN Chuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Chaojie<sup>1,2,3</sup>, WU Wenhua<sup>1,2</sup>, YANG Wei<sup>1</sup> (1. Zhejiang Guangchuan Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310020, China; 2. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China; 3. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Water Conservancy Disaster Prevention and Mitigation, Hangzhou 310020, China)

**Abstract:** Dredged silt has the characteristics of high moisture content, difficult consolidation and large volume, and polluted by heavy metals, leading to slow drying, hard utilization and soil hardening, which is unbeneficial of plant growing. To solve the above problems, dredged silt polluted by copper, lead, and cadmium was taken as a study object, which was mixed with fiber, lime, fly ash, kaolin, sodium silicate, sodium carbonate, ferric sulfate and magnesium sulfate. Then polluted silt stabilization and planting tests were performed. The results show that the permeability coefficients after soil solidification are increased by 2 or 3 orders of magnitude. Eight leaching amounts of heavy metals are obviously decreased, which can meet the national standards. The kale grown in solidified silt has faster growing rate with healthier leaf appearance. The optimum proportion of planting is 10% mixtures of fly ash, lime, kaolin, and fiber combined with 6% mixtures of sodium carbonate and ferric sulfate. Using the optimum scheme, the kale has lower heavy metal contents with higher reduction rate of heavy metal leaching amounts compared with other four groups, which can absorb more nitrogen and phosphorus.

**Key words:** dredged silt; heavy metal; solidification stabilizing; planting soil

为了改善和提升水环境、水生态, 增加调蓄库容、提高行洪排涝能力和航运能力, 清淤疏浚成为河湖库塘治理的常用方法之一。近年来, 水利部加大河湖长制建设, 加强河湖黑臭水体治理, 如太湖、滇池、巢湖、鄱阳湖等重要湖泊, 以及河道、水库等, 每年均有大量淤泥产生<sup>[1-2]</sup>, 其中大部分疏浚淤泥用于农田施肥、鱼塘回填、废弃矿坑复垦等。

疏浚淤泥普遍具有含水率高、固结难、体积大的特点。城镇水底淤泥在很大程度上受到有机物、营

养盐、重金属或难降解高分子有机物的污染, 若未及时处理, 大量污染淤泥直接堆放并用于农业生产, 极易对土壤环境、水环境等造成污染<sup>[3]</sup>, 甚至对食物链造成威胁<sup>[4]</sup>, 因此, 受到污染的淤泥处置备受水利、岩土、环境等多学科的研究者们关注。

固化稳定化技术能改善淤泥的物理力学性质, 并将游离态的有毒有害物质稳固于固化体中, 减少污染物的溶出<sup>[5-6]</sup>。国内外在固化材料筛选、有机质含量对固化淤泥影响、力学性质变化、水分转化、氮

磷和重金属释放等方面进行了较多的研究<sup>[7-15]</sup>,但对污染疏浚淤泥固化稳定化处理后进行种植应用的研究较少。疏浚淤泥中含有丰富的营养物质可被植物利用<sup>[16-17]</sup>,但干化后的疏浚淤泥孔隙率低、易板结,影响植物根部吸水、呼吸和无机盐的吸收等,不宜直接进行种植。为了探讨污染疏浚淤泥的种植利用可行性,本文对重金属污染的淤泥进行固化稳定化配比试验,通过改变固化稳定化试剂掺量调节土体 pH、孔隙、重金属溶出浓度等,解决重金属溶出超标、土壤板结不透气等问题;通过羽衣甘蓝等绿化植物种植试验研究植物生长特性,探索重金属固化稳定化机理,并筛选出适宜羽衣甘蓝等绿化植物的最佳种植配比方案,为污染淤泥进行种植利用提供更多可能性。

## 1 试验材料的物理、化学性质

试验淤泥来自浙江省某城市湖荡淤泥。经勘测,该湖荡平均淤积厚度为 42 cm,因此现场采样时,主要采集其岸边约 3~5 m 处 0~50 cm 的淤泥。淤泥存在部分有分层情况,整体呈黑色,有强烈的腐臭味。采样后立即将淤泥封装于 PVC 桶,防止淤泥失水。

### 1.1 淤泥物理性质

该湖荡淤泥为高含水率的流泥,具流动性,自身强度极低,渗透性小;湖荡淤积层均为高压缩性、低强度的超软土,作为堆场直接填土其固结性能极差。淤泥的颗粒组成以粉粒、黏粒和胶粒等为主,其中粒径小于等于 0.005 mm 的淤泥颗粒含量约为 45%,中值粒径  $d_{50}=0.006$  mm,具体性质见表 1 和表 2。

表 1 淤泥颗粒组成

粒径范围/mm	质量分数/%	粒径范围/mm	质量分数/%
<0.002	26.8	[0.075,0.25)	0.3
[0.002,0.005)	18.1	[0.25,0.5)	0.1
[0.005,0.075)	54.6	[0.5,2)	0.2

### 1.2 淤泥污染特性

该湖荡长期接纳周围居民生活、企业生产排放的部分污水,淤泥中部分重金属超出可直接农业利

表 2 淤泥物理性质

含水率/%	湿密度/ ( $g \cdot m^{-2}$ )	干密度/ ( $g \cdot cm^{-2}$ )	孔隙比/%	液限/%	塑限/%	土粒 比重	垂直渗透系数/ ( $cm \cdot s^{-1}$ )	直剪固快		压缩系数/ $MPa^{-1}$
								黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	
145.5	1.67	1.1	1.486	54.6	31.2	2.74	$4.4 \times 10^{-7}$	9.6	7.1	1.199

表 3 自然干化后淤泥浸出液重金属检测结果

项目	铜	锌	镍	铅	镉	总铬	汞	砷
检测结果	4.29	0.55	0.23	0.15	0.02	0.03	$8.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-3}$
V 类标准 <sup>[20]</sup>	1.0	2.0		0.1	0.01	0.1	0.001	0.1

用范围,具体检测结果:pH 为 6.85,有机物为 85.4 g/kg,全氮 0.341%,氨氮为 104 mg/kg,总磷为 1060 mg/kg,铜为 1079 mg/kg,锌为 208 mg/kg,铅为 104 mg/kg,镉为 0.27 mg/kg,镍为 45 mg/kg,汞为 0.389 mg/kg,砷为 18.3 mg/kg,总铬为 73 mg/kg,六六六为 0.098 mg/kg,滴滴涕未检出(ND),总大肠菌群为  $8.5 \times 10^5$  MPN/kg,细菌总数为  $9.9 \times 10^7$  个/kg。其铜含量为 1079 mg/kg,对照 GB 15618—2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》<sup>[18]</sup>,远高于农用地土壤污染风险筛选值 200 mg/kg(果园)、100 mg/kg(其他)。该淤泥对农产品质量、农作物生长或土壤生态环境可能存在风险,应当加强土壤环境监测和农产品协同监测,原则上应当采取安全利用措施。但是,稳定在土壤中的重金属对生物生长影响并不大<sup>[19]</sup>,因此需要了解溶出的重金属浓度。自然干化后淤泥浸出质量浓度检测结果如表 3 所示。浸出液 pH 为 6.9,铜、铅、镉离子质量浓度符合地表水 V 类标准。

### 1.3 主要材料

粉煤灰:二级灰,粉末状,呈灰白色,pH 为 8.6,密度为  $2.2 g/cm^3$ 。石灰:浙江省建德市莲花化工有限公司的分析纯  $CaO(\geq 98\%)$ ,白色或微带黄色的不定形块状或粒状粉末,在湿空气中易吸收二氧化碳及水分,遇水生高热,pH 为 12.7,分子量为 56.08。

高岭土:氧化硅含量为 45%,pH 为 7.8,规格为 600 目。

碳酸钠:杭州高晶精细化工有限公司生产的分析纯  $Na_2CO_3$ ,白色粉末,暴露于空气中逐渐吸水成为一水合物,溶于水,不溶于乙醇,分子量为 105.99。

硫酸铁:上海山海工学团实验二厂生产的分析纯  $Fe_2(SO_4)_3 \cdot xH_2O$ ,白色或黄色粉末,易潮解,溶于水和醇,水溶液呈酸性,分子量为 399.87(以无水盐计)。

硫酸镁:上海试四赫维化工有限公司生产的分析纯  $MgSO_4 \cdot 7H_2O(\geq 99\%)$ ,白色结晶或粉末,味

苦咸而凉,25℃时 50 g/L 的溶液 pH 为 5.0~8.0,分子量为 246.47。

硅酸钠:如皋市金陵试剂厂生产的分析纯  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ,别名:偏硅酸钠,白色或灰白色块状物粉末,溶于水和碱溶液,由于水解,其水溶液呈强碱性,不溶于醇和酸,分子量为 284.20。

纤维:规格为 9 mm 的聚乙烯醇(PVA)纤维。

## 2 污染淤泥的试验方法

### 2.1 固化稳定化试验

通过 pH 的调整确定 5 个固化稳定化配比方案和原状土方案,分别为 GW0(原状土)、GW1(粉煤灰+石灰+高岭土+纤维+硅酸钠+硫酸铁)、GW2(粉煤灰+石灰+高岭土+纤维+碳酸钠+硫酸铁)、GW3(粉煤灰+石灰+高岭土+纤维+硅酸钠+碳酸钠+硫酸镁+硫酸铁)、GW4(粉煤灰+石灰+高岭土+纤维+硫酸镁+硫酸铁)、GW5(粉煤灰+石灰+高岭土+纤维+硫酸镁),其中粉煤灰+石灰+高岭土+纤维的掺量为 10%(掺量以干泥质量百分比计),其余部分掺量为 6%。

采用 5 mm × 5 mm × 5 mm 试模,每种配比配制 3 个平行试样,共配制 18 个试样。以固化体毒性浸出液铜、铅、镉等离子浓度减少率、渗透系数、中值粒径等为考察指标,探索重金属污染淤泥处理 60 d 后的固化稳定化机理。

### 2.2 种植试验

由于在冬天和初春开展试验,气候比较干冷,试验周期较短,因此选择耐寒、生长周期短的羽衣甘蓝幼苗作为植生性能研究对象。每个配比种植 2 盆,共种植 12 盆,每盆 1 株羽衣甘蓝。为了保证阳光充足,昼夜温度保持稳定,选用在 2 m × 2 m 的透明花棚中进行,在花棚内设置温度计,可随时观察棚内温度,并适时通风。

种植试验主要研究植物的株高、根长、茎叶重量、生长速率、茎叶重金属含量和种植 60 d 后固化土中重金属离子浸出浓度变化等,从而筛选出适宜羽衣甘蓝生长的固化稳定化配比方案,探讨重金属污染淤泥用于种植的可行性。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 固化稳定化试验

#### 3.1.1 淤泥固化土渗透性

土壤中存在一定的空气和连通的输水通道是植物根部生长呼吸的前提条件。Taylor<sup>[21]</sup>提出土渗透系数和孔隙比存在半对数关系,并在软土工程中得到较多的应用。本文采用变水头渗透试验,在 20℃ 室温中进行,测试不同掺量固化稳定化淤泥的渗透系数,结果如图 1 所示。

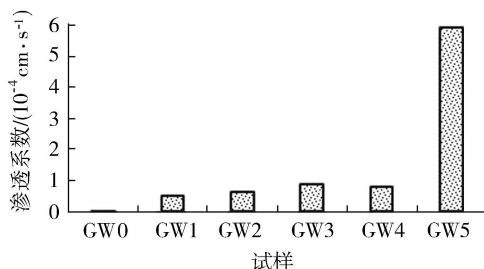


图 1 各固化稳定化土的渗透系数对比

从图 1 中知,渗透性从大到小排序为 GW5、GW3、GW4、GW2、GW1、GW0,其对应的中值粒径分别为 0.067 mm、0.051 mm、0.044 mm、0.035 mm、0.038 mm 和 0.006 mm,基本可以说明粗颗粒含量越多,渗透性越好;GW5 的渗透系数为 10<sup>-4</sup> cm/s 数量级,GW1~GW4 的渗透系数均为 10<sup>-5</sup> cm/s 数量级,相比 GW0 原状土来说渗透系数提高了 2~3 个数量级,主要由于土体里加入纤维,随着土体里水的排出,一条条纤维形成一条条的渗水通道,导致淤泥固化土的渗透性增大。

#### 3.1.2 淤泥固化土浸出毒性

重金属毒性浸出试验浸提液为醋酸溶液(pH 值为 4.93±0.05),通过试验来模拟固化体在酸性条件下或进入填埋场后重金属的浸出过程,了解各种淤泥固化土污染物的稳定性,试验结果如表 4 所示。从表 4 可以看出,固化土的毒性浸出稳定效果较好,浸出液为 I~III 类水(《地表水环境质量标准》<sup>[20]</sup>,下同),而原状土浸出液为劣 V 类水,固化土中重金属稳定性有不同程度提高。

统计各类固化土相较于原状土的重金属浸出质

表 4 淤泥固化土重金属浸出试验结果

试样	pH	重金属质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )							
		铜	锌	镍	铅	镉	总铬	汞	砷
GW0	6.9	4.29	0.55	0.23	0.15	0.02	0.03	8.0×10 <sup>-4</sup>	1.0×10 <sup>-3</sup>
GW1	7.3	0.02	0.42	0.17	ND	5.5×10 <sup>-4</sup>	ND	ND	ND
GW2	8.6	ND	0.39	0.06	ND	ND	ND	ND	ND
GW3	6.2	0.12	0.38	0.22	ND	1.5×10 <sup>-3</sup>	0.03	ND	4.0×10 <sup>-4</sup>
GW4	5.4	0.18	0.21	0.23	7.7×10 <sup>-3</sup>	3.0×10 <sup>-3</sup>	0.03	6.0×10 <sup>-5</sup>	1.0×10 <sup>-4</sup>
GW5	7.9	0.00	0.45	0.14	ND	4.5×10 <sup>-4</sup>	0.02	5.0×10 <sup>-5</sup>	ND

量浓度减少率如图 2 所示。由图 2 可知,8 项重金属的浸出浓度均有不同程度的降低,可能由于疏浚淤泥在固化稳定化处理前,各项重金属都存在一定浓度的可溶可交换态,在掺入了石灰、粉煤灰、硅酸钠、碳酸钠等碱性材料,提高土体 pH 值,降低污染淤泥中的微生物和有机物含量,在微生物的分解代谢作用下,淤泥中的化学条件不断发生变化,从而稳定了重金属的形态<sup>[22]</sup>。超标重金属铜、铅、镉浸出减少效果最佳,铜、铅的浸出减少率超过 95%,镉的浸出减少率超过 85%,说明固化剂碳酸钠、硅酸钠、硫酸铁、硫酸镁的组合可以有效稳定游离态的铜、铅、镉等离子。GW3 和 GW4 固化土浸出减少效果稍差,可能由于 GW3 和 GW4 组合中,pH 分别为 6.2 和 5.4,在酸性条件下,H<sup>+</sup>会破坏化产物和阻碍金属化合物的沉降,或与 OH<sup>-</sup>发生反应而导致氢氧化钙浓度降低,进而促进水化产物的溶解,加速重金属的浸出<sup>[15]</sup>。

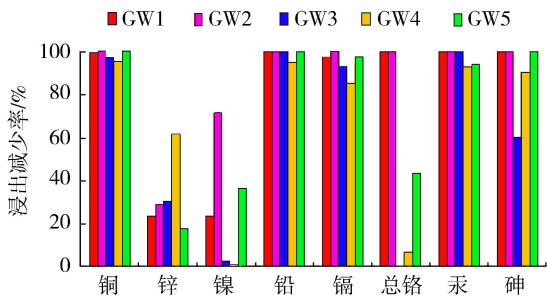


图 2 各固化土不同污染物的浸出减少率

### 3.2 种植试验

#### 3.2.1 植生特性

羽衣甘蓝的平均株高、茎叶重量、根长、生长情况等如表 5 所示。观察羽衣甘蓝生长态势,通过植株生长速率曲线进行线性拟合,得到不同固化稳定化试剂作用下的生长趋势拟合系数如图 3 所示,羽衣甘蓝生长情况如图 4 所示。

表 5 羽衣甘蓝植生性能观测结果

试样	平均株高/cm	茎叶重量/g	根长/cm	生长趋势拟合系数	生长情况
GW0	12.0	34	11.0	0.0058	较矮小,颜色泛白
GW1	15.3	35	10.1	0.0063	较矮小,颜色暗沉
GW2	17.2	48	8.8	0.0071	长势良好,紫色鲜艳
GW3	16.8	46	12.0	0.0067	长势良好,紫色鲜艳
GW4	18.8	49	11.0	0.0091	长势良好,紫色鲜艳
GW5	13.5	37	11.2	0.0052	较矮小,少量老叶枯黄

总体上,5 个配比所种植的羽衣甘蓝,其平均株高、茎叶重量相比原状土长势更好。其中,GW2、GW3 和 GW4 羽衣甘蓝的叶片颜色呈现鲜艳的紫色,生长趋势拟合系数分别为 0.0071、0.0067 和 0.0091,其余配比颜色较暗,尤其 GW0 颜色略微泛白。主要由于 GW0 渗透系数极小,仅普通锄松不能

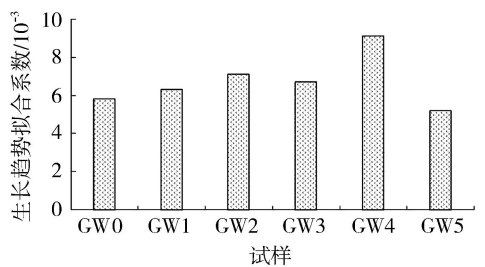


图 3 不同配比下的羽衣甘蓝生长趋势拟合系数



图 4 不同配比下的羽衣甘蓝生长情况

解决土壤根部呼吸问题,其土壤板结影响根部吸收水分和无机盐类,导致其植株特别矮小。此外,适量的铜可保障植物维持正常的光合作用和呼吸作用,但过量会对植物产生生物胁迫和非生物胁迫,如引起光合作用的改变、呼吸作用的异常等,从而影响植物的正常生长<sup>[19]</sup>,GW0 的铜、铅、铬溶出超标,影响了羽衣甘蓝的光合作用和呼吸作用。

#### 3.2.2 植物茎叶重金属含量

由于淤泥在固化稳定化处理前铜、铅、镉溶出超标,因此,本文探讨这 3 种重金属的茎叶吸收情况,检测结果见表 6。5 组固化稳定化配比种植的羽衣甘蓝茎叶中的铜为 1.5~4.9 mg/kg,相比 GW0 都有一定程度的减少,羽衣甘蓝茎叶中未检出镉、铅,进一步说明处理后土体中游离态的重金属含量减少,重金属稳定性提高,进入植物体内的重金属减少;GW2 配比种植的羽衣甘蓝长势良好,其茎叶中的重金属含量最少,说明该配比对铜的固化稳定化效果较好,适宜作为羽衣甘蓝等绿化植物的种植土。

表 6 不同试样土种植的羽衣甘蓝茎叶中的重金属

试样	mg/kg		
	铜	镉	铅
GW0	4.9	ND	ND
GW1	2.7	ND	ND
GW2	1.5	ND	ND
GW3	2.3	ND	ND
GW4	1.8	ND	ND
GW5	2.0	ND	ND

#### 3.2.3 种植后盆土中总氮、总磷和超标重金属的浸出结果

5 种固化土浸出液中的总磷和总氮质量浓度如图 5 所示。从图 5 可以看出,5 种固化土浸出液中总磷、总氮的质量浓度较 GW0 有所降低,说明固化

对总磷、总氮的稳定也有一定的作用;GW2、GW3 和 GW4 组浸出液中总磷、总氮质量浓度最小,而这 3 组羽衣甘蓝长势较好,可能由于这 3 组植株对 N、P 的吸收较多。

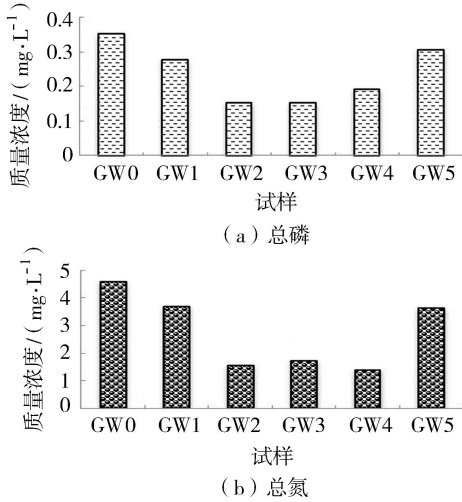


图5 各固化稳定化土浸出液中总磷和总氮质量浓度

种植羽衣甘蓝后,盆土浸出液中重金属铜、铅和镉的质量浓度见表7,重金属铅均未检出;相比种植前,GW0 铜的浸出减少率接近 100%,镉的浸出减少率超过 85%;经过固化稳定化处理后,浸出浓度值较小,可能由于误差导致有几项浓度相比种植前有些许增加。该试验也进一步说明了经过处理后的淤泥固化稳定化效果较好。

表7 种植羽衣甘蓝后盆土浸出液中的重金属 mg/L

试样	铜	铅	镉
GW0	0.015	ND	0.0022
GW1	0.017	ND	0.0017
GW2	0.004	ND	0.0018
GW3	0.015	ND	0.0027
GW4	0.023	ND	0.0044
GW5	0.016	ND	0.0036

从表6和表7还可以看出,羽衣甘蓝茎叶中的铜、铅、镉含量和种植后盆土中的铜、铅、镉浸出质量浓度均较低,尤其是种植后 GW0 盆土中的铜、铅、镉浸出质量浓度相对种植前降低更为明显,可能由于 GW0 土壤在未种植前重金属铜、铅、镉的浸出质量浓度相对较高,而羽衣甘蓝对重金属有很强的富集能力<sup>[23]</sup>,同时重金属浓度未超过破坏根系细胞壁的范围,使得羽衣甘蓝根部在重金属的作用下产生保护性反应,增加了根系对铜、铅、镉等重金属的结合能力<sup>[24]</sup>,未转运至上部茎叶。

## 4 结论与建议

a. 疏浚淤泥在掺入固化稳定化剂和纤维后,土体渗透性大大增加,渗透系数从  $10^{-7}$  cm/s 提高到

$10^{-5}$  cm/s 和  $10^{-4}$  cm/s,渗透系数提高了 2~3 个数量级,更适宜植物生长。

b. 掺入石灰、粉煤灰、高岭土、硅酸钠、碳酸钠、硫酸铁和硫酸镁等多种材料,调节 pH,改变土体物理化学性能,对铜、锌、镍、铅、镉、总铬、汞、砷 8 项重金属均有固化稳定化作用,浸出量、浸出率均有明显降低且达到标准要求,其中,超标重金属铜、铅的浸出减少率超过 95%,重金属镉的浸出减少率超过 85%;GW1、GW2、GW5 碱性较强,对重金属的固化稳定化效果更佳。

c. GW0 的铜、铅、镉溶出超标,对羽衣甘蓝生长产生一定影响,导致 GW0 盆土种植的植株矮小、泛白;经过固化稳定化处理的淤泥更适宜羽衣甘蓝生长,其生长速率更快,植株生长更有活力,尤其是 GW2、GW3 和 GW4 配比;其中,GW2 中进入植株体内的重金属最少,植株对 N、P 的吸收量也较多。

综合考虑固化稳定化效果和植生性能影响,GW2 更适宜羽衣甘蓝等植物生长,因此建议以 10% (粉煤灰+石灰+高岭土+纤维)+6% (碳酸钠+硫酸铁)为绿化植物种植应用的固化稳定化试剂优选方案,为后期污染淤泥的固化稳定化、资源化利用提供参考。但是,羽衣甘蓝根系、茎叶中的铜、铅、镉以何种形态存在,以及重金属在根系与茎叶内的转运关系如何,尚需进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 朱伟,闵凡路,吕一彦,等.“泥科学与应用技术”的提出及研究进展[J]. 岩土力学,2013,34(11):3041-3054. (ZHU Wei, MIN Fanlu, Lu Yiyan, et al. Subject of “mud science and application technology” and its research progress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3041-3054. (in Chinese))
- [2] 汤德意,沈杰.生态清淤及淤泥处置技术在水库整治中的应用[J]. 水利水电科技进展,2018,38(3):70-75. (TANG Deyi, SHEN Jie. Application of ecological dredging and silt disposal technique in reservoir dredging engineering[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(3):70-75. (in Chinese))
- [3] LOMBARDI L, SEBASTIANI L. Copper toxicity in *Prunus cerasifera*: growth and antioxidant enzymes responses of in vitro grown plants [J]. Plant Science, 2005, 168(3): 797-802.
- [4] 包建平,朱伟,汪顺才,等.固化对淤泥中重金属的稳定化效果[J]. 河海大学学报(自然科学版),2011,39(1):24-28. (BAO Jianping, ZHU Wei, WANG Shuncai, et al. Stabilization effect of heavy metals in solidified sludge [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(1): 24-28. (in Chinese))
- [5] 方红卫,李晓翠,黄磊,等.受污染底泥陶粒化回填技术

- 及其底泥修复效果[J]. 水资源保护, 2019, 35(3): 1-6. (ANG Hongwei, LI Xiaocui, HUANG Lei, et al. Ceramization of contaminated sediment backfill technology and its effects of sediment remediation [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(3): 1-6. (in Chinese))
- [6] MALVIYA R, CHAUDHARY R. Leaching behavior and immobilization of heavy metals in solidified/stabilized products[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(1): 207-217.
- [7] 陈萌, 杨国录, 徐峰, 等. 淤泥固化处理研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 128-138. (CHEN Meng, YANG Guolu, XU Feng, et al. Research progress on solidification treatment of dredged silt[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 128-138. (in Chinese))
- [8] 范惜辉, 朱伟, 王升位, 等. 固化污泥固结渗透特性及孔隙变化试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(增刊1): 20-24. (FAN Xihui, ZHU Wei, WANG Shengwei, et al. Experimental study on consolidation-permeability properties and pore size variation during consolidation [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(Sup1): 20-24. (in Chinese))
- [9] ERDEM O T, TUNCER B E, CRAIG H B, et al. Stabilization of organic soil with fly ash[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 139(12): 2170-2181.
- [10] 赵含梅, 赵仲辉, 胡孝彭, 等. 固化淤泥持水特性试验[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(1): 57-60. (ZHAO Hanmei, ZHAO Zhonghui, HU Xiaopeng, et al. Experimental study on water retention characteristics of solidified dredged materials[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(1): 57-60. (in Chinese))
- [11] 甘雅雄, 朱伟, 吕一彦, 等. 从水分转化研究早强型材料固化淤泥的早强机理[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 755-760. (GAN Yaxiong, ZHU Wei, LYU Yiyang, et al. Early-strength mechanism of cementitious additives from perspective of water conversion [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 755-760. (in Chinese))
- [12] 刘秀梅, 张夫道, 张树清, 等. 纳米级高岭土对氮、磷、钾和有机碳的吸附及解吸特性的研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(1): 102-109. (LIU Xiumei, ZHANG Fudao, ZHANG Shuqing, et al. Study on adsorption and desorption properties of nano-kaoline to nitrogen, phosphorus, potash and organic carbon[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(1): 102-109. (in Chinese))
- [13] 李志清, 吴苏舒, 诸晓华, 等. 石臼湖表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 73-78. (LI Zhiqing, WU Sushu, ZHU Xiaohua, et al. Distribution of nutrients and heavy metals in surface sediments of Shijiu Lake and its pollution assessment[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 73-78. (in Chinese))
- [14] 毛新伟, 仵荟颖, 徐枫. 太湖底泥主要营养物质污染特征分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 100-104. (MAO Xinwei, WU Huiying, XU Feng. Analysis of pollution characteristics of main nutrients in Taihu Lake sediment [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 100-104. (in Chinese))
- [15] CHEN Q Y, TYRER M, HILLS C D, et al. Immobilization of heavy metal in cement-based solidification/stabilisation: a review [J]. Waste Management, 2009, 29(1): 390-403.
- [16] 王维琳, 姜翠玲, 孙敏华, 等. 梁塘河底泥污染特征及资源化利用分析[J]. 四川环境, 2016, 35(3): 64-65. (WANG Weilin, JIANG Cuiling, SUN Minhua, et al. Characteristics of sediment pollution of Liangtang River and resource utilization analysis [J]. Sichuan Environment, 2016, 35(3): 64-65. (in Chinese))
- [17] 陈江博, 范成五, 朱仁秀, 等. 不同比例底泥复合基质的理化性状及其对紫罗兰生长的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(7): 1462-1467. (CHEN Jiangbo, FAN Chengwu, ZHU Renxiu, et al. Physical and chemical properties of bottom mud compound substrates with different proportion and their effect on growth of Matthiola incana [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(7): 1462-1467. (in Chinese))
- [18] 生态环境部. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018 [S]. 北京: 生态环境部, 2018.
- [19] 葛才林, 杨小勇, 刘向农, 等. 重金属对水稻和小麦 DNA 甲基化水平影响[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2002, 28(5): 363-368. (GE Cailin, YANG Xiaoyong, LIU Xiangnong, et al. Effects of heavy metal on the DNA methylation level in rice and wheat [J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology. 2002, 28(5): 363 - 368. (in Chinese))
- [20] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准: GB3838—2002 [S]. 北京: 国家环境保护总局, 2002.
- [21] TAYLOR D W. Fundamentals of soil mechanics [M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1948.
- [22] 吉顺健. 污泥固化/稳定化处理对重金属形态的影响 [D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [23] 贾永霞, 李弦, 张长峰, 等. 羽衣甘蓝对镉的耐性和富集特征研究[J]. 西北植物学报, 2015, 35(5): 971-977. (JIA Yongxia, LI Xian, ZHANG Changfeng, et al. Cadmium tolerance and accumulation characteristics of Brassica oleracea L. Var. Acephala DC. [J]. Journal of Northwest Flora, 2015, 35(5): 971-977. (in Chinese))
- [24] 徐照丽, 吴启堂, 依艳丽. 不同品种菜心对镉抗性的研究[J]. 生态学报, 2002, 22(4): 571-576. (XU Zhaoli, WU Qitang, YI Yanli. Studies on the resistance to cadmium in different cultivars of Brassica parachinensis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(4): 571-576. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-03-09 编辑: 郑孝宇)