



利用皇竹草生态固化浅表层疏浚土试验研究

陈广明¹, 张祝培¹, 毕世明², 曾庆军^{2,3}, 傅品⁴

- (1. 安徽省引江济淮集团有限公司, 安徽 合肥 230000;
2. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519080;
4. 中交四航局第五工程有限公司, 福建 福州 350008)

摘要: 利用植物根系兼具吸水 and 加筋作用的特性, 依托某疏浚工程, 对利用皇竹草生态固化浅表层疏浚土进行现场试验研究。通过观测试验区内浅表层(0~90 cm 深度)疏浚土含水率、承载力、土壤养分含量及重金属含量的变化, 分析和评价皇竹草生态固化浅表层疏浚土的效果。研究发现: 1) 皇竹草种植完成 85 d 后, 种植区土壤承载力由 11.8~27.7 kPa 增加至 54.5~68.3 kPa, 而空白对照区仅为 33.4 kPa; 2) 疏浚土中的有机质、碱解氮和速效磷含量分别增加了 25.5%~43.9%、6.5%~17.0%、1.5%~9.6%; 3) 皇竹草对重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni 均具有吸附效果, 其中对 Cd 的吸附效果最为明显。结果表明: 利用皇竹草生态固化浅表层疏浚土是可行的, 它能加速浅表层疏浚土的失水, 快速固化浅表层疏浚土, 尤其对 30~90 cm 深度范围效果明显; 此外, 皇竹草还具有提高土壤养分含量、吸收重金属的改良效果。

关键词: 疏浚土; 资源化利用; 生态固化; 皇竹草

中图分类号: TU 43; U 656.1⁺39

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)09-0016-07

Experimental study on ecological solidification on shallow layer of dredged soil using *Pennisetum hybridum*

CHEN Guang-ming¹, ZHANG Zhu-pei¹, BI Shi-ming², ZENG Qing-jun^{2,3}, FU Pin⁴

- (1. Anhui Provincial Group Limited for Yangtze-to-Huaihe Water Diversion, Hefei 230000, China;
2. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519080, China;
4. The Fifth Construction Co. Ltd. of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350008, China)

Abstract: Considering the advantage of plant roots of both water absorption and reinforcement, and relying on a dredging project, we carry out the field experiment on the use of *Pennisetum hybridum* for the ecological solidification of the shallow dredged soil. Observing the changes in water content, bearing capacity, soil nutrient content, and heavy metal content of the shallow dredged soil in the test area (depth of 0~90cm), we analyze and evaluate the effect of *Pennisetum hybridum* on the ecological solidification of the shallow dredged soil. It is found that 85 days after planting of the *Pennisetum hybridum*, the soil bearing capacity of the planted area increases from 11.8~27.7 kPa to 54.5~68.3 kPa, while the blank control area is only 33.4 kPa; The content of organic matter, alkaline hydrolysis nitrogen and available phosphorus increases by 25.5%~43.9%, 6.5%~17.0%, 1.5%~9.6% respectively; *Pennisetum hybridum* has an adsorption effect on heavy metals Cu, Zn, Pb, Cd, Ni. Among them, the adsorption effect of Cd is the most obvious. In conclusion, it is feasible to use *Pennisetum hybridum* to ecologically solidify the shallow dredged soil. It can accelerate the water loss of the shallow dredged soil and quickly

收稿日期: 2021-01-07

作者简介: 陈广明(1971—), 男, 高级工程师, 从事大型泵站建设与管理工

solidify the shallow dredged soil, especially for the depth range of 30cm to 90 cm. In addition, the *Pennisetum hydridum* also has the improvement effect of increasing soil nutrient content and absorbing heavy metals.

Keywords: dredged soil; resource utilization; ecological solidification; *pennisetum hydridum*

我国沿海地区每年因港口建设、港池和航道疏浚产生的疏浚土量高达 3.5 亿~4.0 亿 m^3 ^[1]。对疏浚土的处置和处置方式直接影响疏浚工程的经济和生态效益。目前, 国内外对疏浚土的处置方式主要有 2 种: 1) 倾倒, 如陆上堆放、海洋倾倒; 2) 有益利用, 如工程利用、农业和产品利用、改善环境^[2]。随着我国对生态环境保护的日益重视, 对疏浚土的处置越来越倾向于资源化利用。

疏浚土非常适合应用于农业土壤改良, 因为疏浚土主要以硅铝酸盐等无机矿物为主要成分, 并富含有机质和营养盐^[3], 比城市污泥具有更大的安全性, 是一种很好的肥源和复垦用土^[4]。Darmody 通过将疏浚底泥与农用土壤混合, 研究其改良效果, 结果表明疏浚土能够明显改善土壤的养分含量和质地^[5]。因此, 将疏浚土用于农业复垦被认为是最有潜力的资源化利用途径之一: 既能使疏浚土得到合理的利用, 又能改善土质, 满足植物生长对土壤养分的需求^[6]。

但由于疏浚工艺技术的限制, 施工时对淤泥和水的扰动非常大, 使得新近吹填的疏浚土含水率非常高, 一般表层的含水率为 100%~150%, 最高可达到 400%左右^[7], 难以直接资源化利用, 需要对其进行脱水固化处理^[8]。常用的技术包括机械物理脱水(土工管袋脱水、真空抽滤)、化学絮凝脱水以及电渗脱水^[9-11], 但上述脱水固化技术存在施工技术复杂、能耗高、易产生二次污染等缺点^[12]。因此, 开发一种绿色生态、成本低廉且施工流程简单的疏浚土生态固化技术意义重大。

近年来, 利用植物加固土体(如公路边坡等)是研究热点之一。研究表明, 植物主要通过两方面的作用达到加固土体的效果: 一是通过植物的蒸腾作用, 使得植物根系具有吸收土体水分的效果。随着根系吸水的不断进行, 浅层孔隙水压力

逐渐减小, 基质吸力增大, 非饱和土体剪切强度增加, 使土体稳定性逐渐提高^[13], 因此植物根系的吸水作用对土体的稳定性起着至关重要的作用; 二是植物根系的加筋作用, 普遍认为植物根系的受力主要有根与土壤之间的黏结力、胶结力、根表面上水的吸附力、根系网络之间相互牵动的张力和拉力等^[14], 由于上述根系与土体间的力学作用, 使得植物根系对土体产生加筋效果。

基于植物根系的吸水 and 加筋效果, 本研究以植物皇竹草为研究对象, 依托某疏浚项目, 在疏浚吹填区内, 对利用皇竹草生态固化浅表层疏浚土技术进行了现场试验研究, 通过观测试验区内浅表层疏浚土(0~90 cm 深度)的含水率、承载力以及土壤养分含量和重金属的变化, 对皇竹草生态固化浅表层疏浚土的效果进行试验研究和评价。

研究选取的植物皇竹草(*Pennisetum hydridum*), 是一种多年生直立丛生的禾本科植物, 由二倍体美洲狼尾草作母本和四倍体象草杂交选育而成, 故又称杂交狼尾草, 属三倍体 C4 植物, 其根系发达, 生长迅速, 对生存环境要求低^[15], 是一种理想的试验材料。

1 试验概况

1.1 排泥区基本情况

试验区位于安徽省引江济怀工程江淮沟通段某疏浚项目 3 号排泥区内, 排泥区内疏浚总量约为 90 万 m^3 , 总面积为 30 万 m^2 , 其中试验区面积约为 3 300 m^2 , 平面位置如图 1 所示。本工程采用环保绞吸疏浚工艺。现场调查发现, 在输泥管喷口的水力分选作用下, 排泥区内呈现出 2 种较为明显的土壤性状分区: 距离喷口约 50 m 半径范围内为 6~12 cm 直径大小的球形土块(土块区), 距离大于 50 m 以外为细粒土(细粒区), 如图 2 所示。

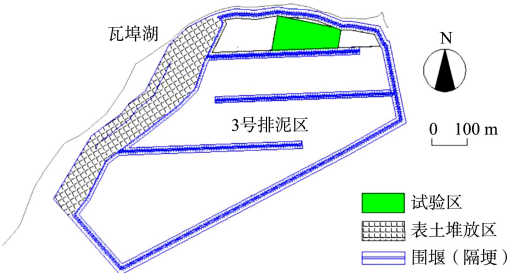


图 1 试验区位置

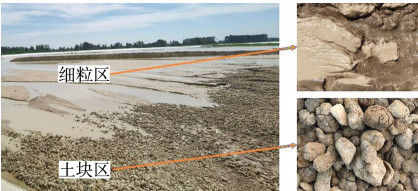


图 2 细粒区和土块区

由于土块区地势较高，晾晒和排水条件好，通过自然风干晾晒即可达到固化效果，故本试验主要针对含水率较高、排水条件差的浅表层(0~90 cm 深度)细粒区进行试验研究。

1.2 疏浚土物理及化学特性

植物种植前，在细粒区随机取 7 个位置的混合土样，对其物理和化学性质(土壤养分含量及重金属)进行检测分析，并将结果作为试验区的背景值，结果如表 1、2 所示。从结果可知，细粒区的土质为粉土，塑性指数为 7.1，密度为 1.81 g/cm³，pH 值为 7.56，有机质含量为 3.8 g/kg，且含有一定量的重金属(表 3)。

表 1 疏浚土岩土性质

界限含水率/%			粒径分布/%			密度/(g·cm ⁻³)	土样分类
液限	塑限	塑性指数	粉粒粗(0.05~0.01 mm)	粉粒细(0.01~0.005 mm)	黏粒(<0.005 mm)		
26.8	19.7	7.1	70.6	13.3	25.2	1.81	粉土

注：取样地点为 3^号排泥场。

表 2 疏浚土养分含量

pH	w/(g·kg ⁻¹)			w/(mg·kg ⁻¹)			有机质/(g·kg ⁻¹)
	全氮	全磷	全钾	碱解氮	速效磷	速效钾	
7.56	1.55	0.85	16.38	100.14	10.79	24.58	3.80

表 3 疏浚土重金属含量

mg/kg				
Cu	Zn	Pb	Cd	Ni
20.22	48.57	20.43	0.17	24.21

2 试验设计

2.1 试验处理及平面布置

试验对象为皇竹草，细粒区总面积约 3 000 m²，分为 3 个小区，包括 1 个区块作为空白对照(CK)，面积约为 400 m²，另外 2 个小区种植皇竹草，种植间距分别为 0.5 m(T1)和 1.0 m(T2)，T1 与 T2 面积均为 1 300 m²，平面布置如图 3 所示。皇竹草的种植完成时间为 2020 年 9 月 2 日。

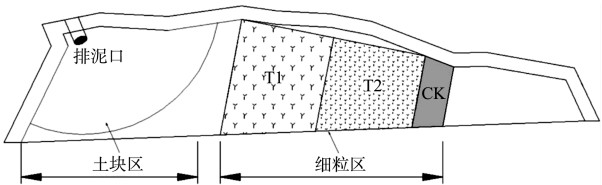


图 3 试验区平面布置

2.2 种植方法

全部采用人工扦插方式进行栽种。由于细粒区初始含水率较高、基本不具备承载能力，在吹填完后先晾晒 14 d，待表面形成一定的硬层后，铺设竹排形成支撑垫层，施工人员踩在竹排上进行种植。

2.3 观测数据和测定方法

试验基本的观测数据包括皇竹草株高、土壤含水率、承载力，测定频率约为 1 次/周，数据观测时间为 2020 年 9 月 4 日—11 月 28 日，土壤养分及重金属含量则在处理前、后各测 1 次。各指标测定方法如下。

1)株高：每个区块随机选择 7 株并标记好作为连续观测对象，利用卷尺每周观测 1 次。

2)土壤含水率：每个区块选择 6 个固定取样点，利用钻土器取出 90 cm 土柱，每 30 cm 取土样

分别测定不同土层的含水率(0~30、30~60、60~90 cm), 将 6 个取样点同一深度的含水率平均值作为该土层的含水率代表值。测定方法采用烘干法, 使用 101A-3 型电热鼓风恒温干燥箱和电子天平进行测定。

3)承载力: 在测定含水率的同一位置测定承载力, 由于试验区内均为黏性土, 根据 TB 10018—2018《铁路工程地质原位测试规程》, 采用轻型动力触探仪测定, 记录探杆每插入 30 cm 记录锤击数 \bar{N}_{10} , 承载力 σ_0 值根据下表数据内插得出, 将 6 个测定点同一深度的承载力平均值作为该土层的承载力代表值。黏性土承载力见表 4^[16]。

表 4 黏性土承载力				
$\bar{N}_{10}/[\text{击}\cdot(30\text{ cm})^{-1}]$	15	20	25	30
σ_0/kPa	100	140	180	220

4)养分含量: 全氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾、有机质。在含水率和承载力相同测定位置取 90 cm 土柱, 混合均匀后测定养分含量, 取 6 个样品的平均值作为该处理的代表值。具体的测定方法为: 全氮、碱解氮含量测定采用碱解扩散法; 全磷含量测定采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法; 速效磷含量测定采用 1/2H₂SO₄ 硫酸法; 全钾含量测定采用 NaOH 熔融-火焰分光光度计法; 速效钾含量测定采用 NH₄OAc 浸提-火焰分光光度计法。

5)重金属: Cu、Zn、Pb、Cd、Ni。取样及数据处理方法与养分含量测定相同, 测定方法为 HF-HNO₃-HClO₄ 消煮-原子吸收分光光度法。

2.4 试验期间天气情况

降水和温度变化会直接影响土壤的含水率和承载力, 因此对试验期间天气情况的统计十分必要。图 4 为 2020 年 9 月 1 日—11 月 30 日间的降雨量、最高温度及最低温度情况。可以看出: 9—11 月均有不同程度的降雨, 月降雨量分别为 24、117 和 56 mm, 9 月和 10 月降雨较为分散, 11 月降雨较为集中。11 月中下旬降温明显。

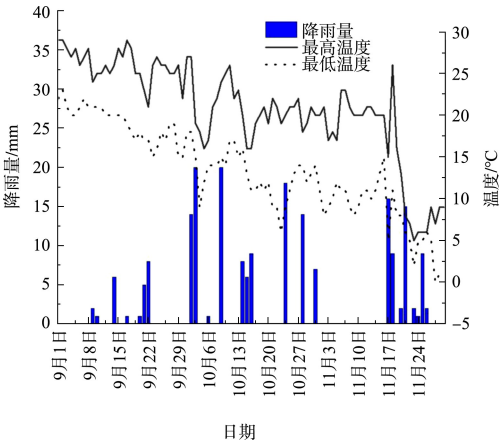


图 4 试验期间天气变化情况

3 结果与分析

3.1 株高

图 5 为试验期间皇竹草株高的变化。可以看出, 皇竹草种植后 85 d, T1 和 T2 的株高分别为 128.3 cm 和 131.7 cm, 株高变化趋势基本一致, 说明在 0.5 m 和 1.0 m 间距下, 皇竹草的生长速度基本相同。

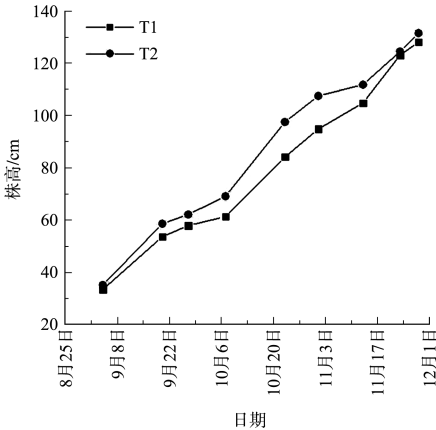


图 5 皇竹草株高变化

3.2 土壤含水率

图 6 为 0~30、30~60、60~90 cm 深度的土层含水率随时间变化的情况。可以看出, 所有土层的含水率总体上均呈下降趋势, 且大小顺序均为 CK>T2>T1。0~30 cm 深度, 3 种处理的含水率由 34.7%~35.1%下降至 30.7%~31.7%, T1、T2 与 CK 差别不明显。而 30~60 cm 及 60~90 cm 深度的土层, T1、T2 含水率由 34.4%~35.7%下降至 30.1%~30.7%, CK 含水率由 34.4%~35.7%降至 33.5%~33.2%, T1、T2 的最终含水率显著低于 CK。

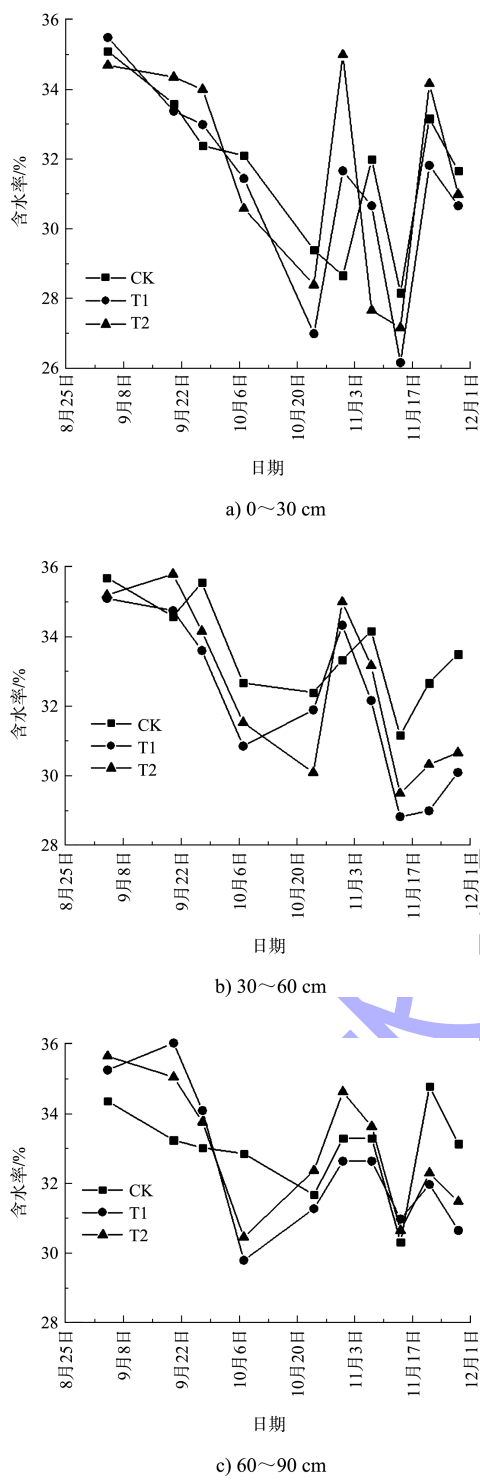


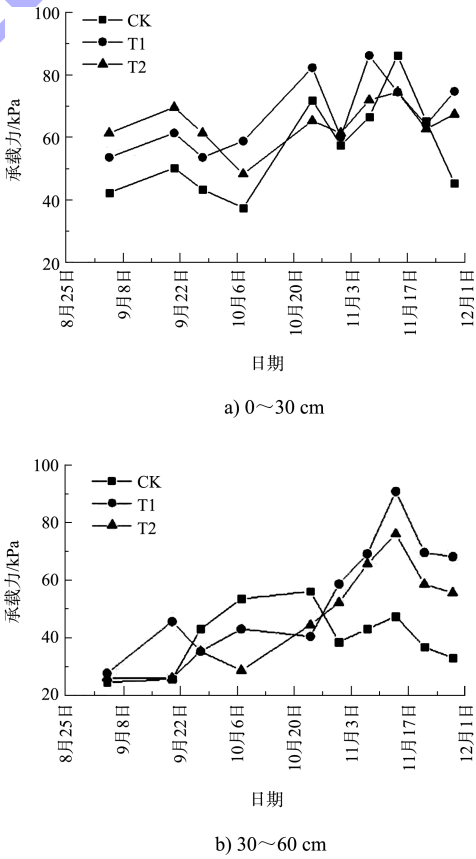
图 6 不同深度土壤含水率变化

综上可以判断，皇竹草在 30~90 cm 深度范围可以显著加速土体的失水速度。从种植间距(0.5 m 和 1.0 m)对皇竹草吸水效果的影响看，0.5 m 种植

间距略优于 1.0 m 间距，但差别不显著。另外，结合图 6 的天气情况可以看出，降雨对 0~30 cm 深度土层含水率随降雨的波动较 30~90 cm 深度更为明显。

3.3 土壤承载力

图 7 为 0~30、30~60、60~90 cm 深度的土层承载力随时间变化的情况。可以看出，不同深度的土壤承载力均有所增加，最终承载力大小顺序为：T1>T2>CK。0~30 cm 深度，T1 和 T2 承载力分别由 53.6 kPa 增加至 74.7 kPa，T2 承载力由 61.4 kPa 增加至 67.4 kPa，CK 区由 42.3 kPa 增加至 45.3 kPa；30~60 cm 深度，T1 和 T2 的承载力分别由 26.1 kPa 和 27.7 kPa 增加至 68.3 kPa 和 55.7 kPa，分别增加了 2.6 倍和 2 倍；60~90 cm 深度，T1 和 T2 的承载力分别由 11.8 kPa 和 14.5 kPa 增加至 58.3 kPa 和 54.5 kPa，分别增加了 4.9 倍和 3.8 倍，CK 承载力仅为 33.4 kPa。



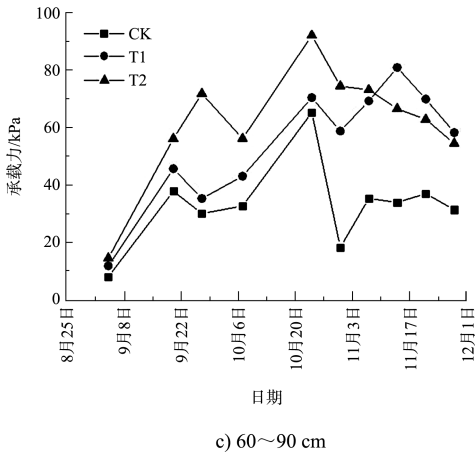


图 7 不同深度土壤承载力变化

综上可以判断, 皇竹草可以明显加快疏浚土的固化速度, 尤其对 30~90 cm 深度范围固化效果明显, 0.5 m 种植间距的皇竹草对疏浚土承载力改善效果优于 1.0 m 间距。

3.4 土壤养分含量

从表 5 可知, CK 处理的各个养分含量指标较背景值均略有减少, 变化率在 1.5%~12.6%, 其原因在于土壤在降雨的淋溶和冲刷作用下随着水流流失。T1 处理中, 有机质与背景值相比增加了 43.9%, 全氮和全磷含量分别减少 23.9% 和 75.3%, 碱解氮和速效磷分别增加了 17.0% 和 9.6%, 全钾和速效钾分别减少了 1.5% 和 20.5%。T2 处理中, 有机质增加 25.5%, 全氮和全磷含量分别减少 20.6% 和 60.0%, 碱解氮和速效磷分别增加了 6.5% 和 1.5%, 全钾和速效钾较背景值分别减少了 6.2% 和 37.4%。

综上可知, 皇竹草能增加土壤中的有机质、碱解氮和速效磷含量, 且种植密度越大, 效果越好。

表 5 土壤养分含量 w 变化

区块	w/(g·kg ⁻¹)			w/(mg·kg ⁻¹)			
	有机质	全氮	全磷	全钾	碱解氮	速效磷	速效钾
背景值	3.80	1.55	0.85	16.38	100.14	10.79	24.58
CK	3.65	1.45	0.81	15.43	98.61	9.42	22.31
T1	5.47	1.18	0.21	16.14	117.21	11.83	19.54
T2	4.77	1.23	0.34	15.35	106.64	10.95	15.39

3.5 重金属含量

表 6 为不同处理的重金属含量与背景值的比较结果。可以看出, CK 处理土壤中的重金属含量随时间增加略微减少, 变化率为 0%~2.55%。T1 中 Cd 的吸附率最高, 为 76.47%, 其次为 Cu(7.86%)、Ni(3.76%)、Zn(2.18%)、

Pb(1.42%); T2 中同样是 Cd 的吸附率最高, 为 58.82%, 其次为 Cu (5.49%)、Zn (2.35%)、Ni(2.02%)、Pb(1.32%)。综上可以判断, 皇竹草对 5 种重金属均具有吸附效果, 其中对 Cd 的吸附效果最好。另外, 0.5 m 种植间距的皇竹草吸附效果优于 1.0 m 间距。

表 6 土壤重金属含量变化

重金属	背景值 (mg·kg ⁻¹)	CK		T1		T2	
		处理后/(mg·kg ⁻¹)	变化率/%	处理后/(mg·kg ⁻¹)	吸附率/%	处理后/(mg·kg ⁻¹)	吸附率/%
Cu	20.22	20.01	1.04	18.63	7.86	19.11	5.49
Zn	48.57	48.32	0.51	47.51	2.18	47.43	2.35
Pb	20.43	19.91	2.55	20.14	1.42	20.16	1.32
Cd	0.17	0.17	0.00	0.04	76.47	0.07	58.82
Ni	24.21	24.05	0.66	23.30	3.76	23.72	2.02

4 讨论

目前, 草本植物被广泛用于边坡加固及重金属污染修复等领域。研究表明, 植物根系能显著提高土体的抗剪强度, 随着土体含根率的提高, 根系土体的抗剪强度值增大^[17], 表现为根系对土

体的加筋作用。因此, 考虑本研究中的皇竹草除了通过加速土壤失水来加固浅表层疏浚土外, 其发达的根系产生的加筋作用也是土体承载力得到快速改善的重要原因之一。除了加固土体, 皇竹草能有效提取土壤中较高浓度的重金属, 是修复

重金属污染土壤的可行材料: 皇竹草对重金属 Zn、Cu、Pb 和 Cd 的提取率分别达到 1.90%~4.52%、3.96%~5.72%、0.53%~1.24% 和 10.34%~17.14%^[18]。本研究中, 皇竹草除了对上述 4 种重金属有吸附作用外, 对重金属 Ni 也有一定的吸附作用, 吸附率最大为 3.76%; 皇竹草对 Cd 的吸附效果优于其他重金属。

从本研究的结果看, 利用皇竹草生态固化浅表层疏浚土是可行的, 不仅能加速高含水率疏浚土的失水和固化速度, 还能提高疏浚土中碱解氮、速效磷及有机质含量, 从而有效改善土壤的养分结构。

5 结论

1) 皇竹草能够加速浅表层疏浚土中水分的流失, 尤其对 30~90 cm 深度土层的加速效果明显, 0.5 m 种植间距略优于 1.0 m 间距, 但差别不显著;

2) 皇竹草可以明显加快疏浚土的固化速度, 尤其对 30~90 cm 深度范围固化效果明显。种植完成 85 d 后, 可使浅表层疏浚土的承载力由 11.8~27.7 kPa 增加至 54.5~68.3 kPa;

3) 皇竹草能增加疏浚土中的有机质、碱解氮和速效磷含量, 改善土壤养分结构, 且种植密度越大, 效果越好;

4) 皇竹草对重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni 均具有吸附效果, 其中对 Cd 的吸附效果最为明显。

5) 试验结果表明, 利用皇竹草 (*Pennisetum hybridum*) 生态固化浅表层疏浚土, 不仅能快速固化浅表层疏浚土, 还能提高土壤的养分含量、吸附一部分重金属, 其固化和改良的效果良好。施工过程中无需使用大型设备, 施工能耗和成本低, 对周围环境无任何污染风险, 是一种简单有效、生态环保的浅表层疏浚土固化方法。该方法尤其适合作为疏浚土复垦资源化利用的预处理措施, 具有一定的推广应用前景。

参考文献:

- [1] 张更生, 徐继涛, 尹崧宇. 疏浚吹填粉土固化室内试验[J]. 水运工程, 2018(9): 54-58.
- [2] 赵德招, 刘杰, 程海峰, 等. 长江口深水航道疏浚土处理现状及未来展望[J]. 水利水运工程学报, 2013(2):

26-32.

- [3] 黄佳音, 马凯. 环保疏浚土资源化利用途径[J]. 水运工程, 2018(S1): 135-140.
- [4] 朱广伟, 陈英旭, 周根娣, 等. 疏浚底泥的养分特征及污染化学性质研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(3): 311-317.
- [5] Darmody R G, Diaz D R. Dredged sediment: Application as an agricultural amendment on sandy soils[R]. Campaign: Illinois Sustainable Technology Center, 2017.
- [6] 杨丹, 范欣柯, 刘燕, 等. 河道疏浚底泥农业利用可行性分析[J]. 科技通报, 2017, 33(1): 235-239.
- [7] 陈彦霖. 疏浚淤泥的固化处理技术与资源化利用[J]. 中国设备工程, 2020(20): 11-12.
- [8] 薛飞, 林丽华, 王亮, 等. 海洋疏浚泥资源化综合利用成果转化推广“瓶颈”及其对策建议[J]. 海洋开发与管理, 2020, 37(6): 25-29.
- [9] 楚维国, 张志军, 陈琦. 疏浚工程中的土工管袋技术[J]. 水运工程, 2014(6): 151-153.
- [10] 李鑫斐, 黄佳音. 疏浚清淤脱水工艺及工程应用进展[J]. 水运工程, 2020(S1): 16-20, 56.
- [11] 陈雄峰, 荆一凤, 吕鑑, 等. 电渗法对太湖环保疏浚底泥脱水干化研究[J]. 环境科学研究, 2006, 19(5): 54-58.
- [12] 林莉, 李青云, 吴敏. 河湖疏浚底泥无害化处理和资源化利用研究进展[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(10): 80-88.
- [13] 张攀, 徐永福, 武孝天. 植物根系吸水对边坡稳定性的影响[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(8): 120-125, 136.
- [14] 程洪, 颜传盛, 李建庆, 等. 草本植物根系网的固土机制模式与力学试验研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 62-65.
- [15] 马崇坚, 刘发光. 皇竹草在生态环境治理中的应用研究进展[J]. 中国水土保持, 2012(1): 41-44.
- [16] 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 铁路工程地质原位测试规程(附条文说明): TB 10018—2018[S]. 武汉: 中国铁道出版社, 2018.
- [17] 蒋必凤, 王海飙, 李淑敏. 草本植物根系对土体加筋的效应[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(7): 51-54.
- [18] 王熙娜, 易自成, 张瑶芬, 等. 皇竹草 (*Pennisetum hybridum*) 对施用重金属污染的鸡粪和污泥的响应及其污染修复效应[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(5): 477-484.

(本文编辑 郭雪珍)