



# 速生植物根系固化浅层疏浚土的直剪试验<sup>\*</sup>

曾庆军, 毕世明, 郝珖存, 唐小骏

(中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 为研究速生植物对大面积疏浚土纳泥区浅层固化效果, 选取 2 种常见速生禾本科植物皇竹草和高丹草, 在排干纳泥区上层覆水后, 分区在粉质黏土为主的纳泥区种植, 采集表层原状素土及根土复合试样, 通过直接剪切试验量化分析 2 种植物根系对浅层疏浚土的固化效果, 观察和比较 2 种植物的根系发育情况及力学特性。结果表明: 1) 皇竹草根系更加致密且抗拉强度更高, 土体含根量为高丹草的 2.1 倍, 根系抗拉强度为高丹草的 1.6 倍; 2) 皇竹草和高丹草均可显著提高土体的内摩擦角、黏聚力及抗剪强度, 其固化后分别为素土的 1.5~6.3、1.2~2.4 及 1.2~3.2 倍; 3) 在土壤含水率相近且与植株水平距离相同的情况下, 皇竹草的固土效果优于高丹草; 4) 皇竹草的土体固化效果随着与植株间水平距离的增大而明显减弱; 5) 2 种植物均可促进浅层疏浚土的脱水。种植速生植物可作为大面积纳泥区浅层固化处理的辅助措施, 符合我国“双碳”目标和绿色工程发展理念。

**关键词:** 疏浚土; 速生植物根系; 固化; 直剪试验

中图分类号: TU 43; U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0038-07

## Direct shearing test of rank vegetation roots solidifying the shallow layer of dredged soil

ZENG Qingjun, BI Shiming, HAO Guangcun, TANG Xiaojun

(CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** To study the reinforcement effect of rank vegetation on shallow layer of large scale dredged soil storage areas, two kinds of rank vegetation, *Pennisetum hyridum* and *Sorghum bicolor* × *Sorghum sudanense*, are selected and planted in the silty clay-dominated soil storage areas after draining the upper layer of water. The undisturbed pure soil and root-soil composite samples are collected, the reinforcement effect of the roots of the two plants on the soil is quantitatively analyzed through the direct shear test, and the root development and tensile strength of the two plants are observed and compared. The results show that: 1) The root of *Pennisetum hyridum* is more denser and the tensile strength is higher, the root content of the soil is 2.1 times, and the root tensile strength is 1.6 times that of *Sorghum bicolor* × *Sorghum sudanense*; 2) The internal friction angle, cohesion and shear strength of the soil can be significantly improved by both *Pennisetum hyridum* and *Sorghum bicolor* × *Sorghum sudanense*, and the internal friction angle, cohesion and shear strength of the solidified soil are 1.5~6.3, 1.2~2.4 and 1.2~3.2 times that of the pure soil, respectively; 3) Under the condition of similar soil moisture content and same horizontal distance from the plant, the soil solidification effect of *Pennisetum hyridum* is better than that of *Sorghum bicolor* × *Sorghum sudanense*; 4) The soil solidification effect of *Pennisetum hyridum* obviously weakens with the increase of the horizontal distance from the plant; 5) Both the plants can promote the dewatering of the shallow layer of dredged soil. Above all, planting rank vegetation can be taken as an auxiliary measure for soil solidification treatment in large-scale dredged soil storage areas, which is in line with the “carbon peaking and carbon neutrality” goals and the green development concept.

**Keywords:** dredged soil; rank vegetation roots; solidification; direct shearing test

收稿日期: 2022-08-10

\*基金项目: 国家自然科学基金项目 (32001142); 中交第四航务工程局有限公司科技研发项目 (2021-A-06-I-06)

作者简介: 曾庆军 (1972—), 男, 博士, 教授, 从事环境岩土、地基处理研究工作。

目前, 我国每年因航道疏浚产生大量疏浚土, 实现其资源化利用对缓解土地资源紧张、防止二次污染具有重要意义。疏浚土通常以硅铝酸盐等无机矿物为主, 部分疏浚土还富含有机质和营养盐<sup>[1]</sup>, 是很好的肥源和复垦用土<sup>[2]</sup>, 因此其农用地资源化利用潜力巨大。但新进吹填的疏浚土含水率高<sup>[3]</sup> (100%~150%)、强度低, 无法直接利用, 必须预先进行固化处理。

新近吹填疏浚土的场地脱水固结, 目前采用较多的是真空预压法和真空联合堆载预压法<sup>[4-6]</sup>。实践表明, 上述2种方法对于高含水率的软土地基具有良好的排水固结效果, 有效改善土体力学特性, 提高地基承载力<sup>[7-10]</sup>。但处理成本较高, 不适用于超大面积疏浚土纳泥区的脱水固结, 且施工过程能耗大, 难以满足国家的绿色工程发展需求。

近年来, 植物常被用于公路边坡的土体固化。研究表明: 植物根系可增强土体的抗剪强度, 提高土体稳定性和承载能力<sup>[11]</sup>, 是优良的“加筋”材料<sup>[12]</sup>。考虑国家对绿色工程技术的发展需求, 本文针对实际疏浚项目纳泥区的浅层固化和农用地利用需要, 在排干纳泥区上层覆水后种植速生植物, 利用根系对土体的“加筋”固化作用, 开展速生植物根系加固纳泥区浅层的直接剪切试验研究, 分析皇竹草和高丹草2种速生植物根系对纳泥区浅层土体力学特性的影响, 探究对疏浚土的固化效果, 以期为利用植物生态固化纳泥区浅层的可行性提供理论依据, 对于实现疏浚土的低碳、低成本资源化利用具有一定支撑意义。

## 1 研究概况

试验依托引江济淮工程安徽段某疏浚项目, 位于安徽省寿县瓦埠湖附近, 共设置14个纳泥区(1#~14#), 试验在3#纳泥区开展, 在排干纳泥区上层覆水后, 分别种植皇竹草和高丹草2种速生植物, 并各设置一个对照区, 平面布置见图1。皇竹草采用人工插播方式种植, 间距为1 m; 高丹草采用无人机撒播方式种植, 间距约10 cm, 种植时间为2021年4月27日, 采样及试验时间为2021年8月27—31日。

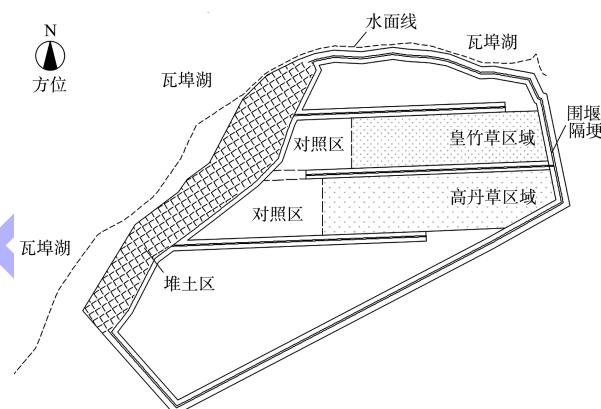


图1 3#纳泥区植物平面

## 2 试验材料及方法

### 2.1 试验材料

#### 2.1.1 疏浚土基本物理特性

在3#纳泥区内随机选取5个点位, 采用取土钻对试验区疏浚土表层1 m进行土样采集并充分混合, 通过室内土工试验得到土体物理性质见表1。

表1 疏浚土的基本物理性质

土质类型	含水率/%	塑性指数	土壤密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	粒径分布/%			
				粉砂/mm 0.05~0.075	粉粒粗/mm 0.01~0.05	粉粒细/mm 0.005~0.01	黏粒/mm <0.005
粉质黏土	45.1~53.2	13.03	1.81	0.3	40.3	13.3	46.1

#### 2.1.2 试验植物

皇竹草为多年生、直立丛生的禾本科植物, 由象草和美洲狼尾草杂交选育而成, 具有生物量大、适应性强、分蘖性强、生长快速、根系发达等特点<sup>[13]</sup>, 近年来逐渐被应用于绿化荒山、保持

水土、改善土壤结构等生态环境治理和保护方面<sup>[14]</sup>。高丹草为一年生禾本科牧草, 杂种优势突出, 适应性强, 生长速度快, 且生物量较大, 通常作为家畜饲料而被大面积广泛种植。试验使用的皇竹草种节由华南农业大学提供, 高丹草种子

采购于郑州开元种业有限公司。

## 2.2 试验方法

### 2.2.1 土体含根量试验

在皇竹草、高丹草种植区域随机选取 3 个植株, 以植株为中心在距离植株根部 10 cm 处, 按照长、宽、深均为 20 cm 的尺寸, 利用平铲将根系复合土体试样挖出, 用水将根部的土壤清理干净并晾干表面水分, 利用 0.1 g 电子天平测定根系总质量  $m_r$ , 计算根系复合土体体积  $V$ , 则根系密度  $\rho_r$  为:

$$\rho_r = m_r / V \quad (1)$$

### 2.2.2 根系抗拉强度试验

利用微机控制电子万能试验机(型号: WDW-10J)测定根系的最大抗拉应力  $F$  与根系截面积  $A_r$  关系, 计算得到根系的抗拉强度  $q_r$ 。计算公式为:

$$q_r = F / A_r \quad (2)$$

### 2.2.3 根茎测定试验

从每个根系复合土体试样分离的根系中, 随机选取 3 个, 利用 0.01 mm 游标卡尺测定每个根系的上、中、下 3 处根径, 测量差值控制在 0.5 mm 以下, 然后统计每个试样的平均根径  $D_r$ , 将植物根系近似看作圆形, 估算根系横截面积  $A_r$  为:

$$A_r = \pi D_r^2 / 4 \quad (3)$$

### 2.2.4 复合土体直接剪切试验

表层约 20 cm 深度内的根系主要以横向根为主, 为准确试验植物横向根对表层土的加固效果, 采样时将环刀沿水平方向打入植株附近一定距离的土中, 得到根土原样。另外, 为研究水平距离对植物根系固土效果的影响, 以皇竹草植物为圆心, 分别在半径为 0(紧邻植株)、25、50 cm 的距离处采集根土样品。高丹草根系的横向分布不明显, 只在紧邻植株处采样。因此, 本试验共设置 5 种土体试样, 每种样品设置 3 组重复, 见表 2。

采用慢剪法进行素土和根土复合试样的直剪试验, 具体操作方法和标准参照 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》<sup>[15]</sup>, 使用的仪器为 ZJ 型应变控制式直剪仪(四联剪)。试验正应力分别为 100、200、300 和 400 kPa, 剪切加载速率为 0.04 mm/s, 最大剪切位移 100 mm, 取剪切位移为 4 mm 时所对应的剪应力为抗剪强度。

表 2 各土体试样组次

区域	试样名称	取样深度/cm	取样位置	重复数/组
皇竹草	素土	20	皇竹草对照区	3
	根土复合试样( $D=0$ cm)	20	紧邻皇竹草植株	3
	根土复合试样( $D=25$ cm)	20	距离植株 25 cm	3
高丹草	根土复合试样( $D=50$ cm)	20	距离植株 50 cm	3
	素土	20	高丹草对照区	3
	根土复合试样( $D=0$ cm)	20	紧邻高丹草植株	3

## 3 结果与讨论

### 3.1 根系形态对比

在试验区域选择 2 株株高相近的皇竹草和高丹草, 挖出其根系并用水洗净后, 如图 2 所示, 皇竹草根系更加致密、发达且深度分布均匀, 高丹草根系相对稀疏。



a) 皇竹草



b) 高丹草

图 2 植物根系形态

### 3.2 土体含根量及根系抗拉强度

由表 3 可知, 皇竹草和高丹草的平均根茎较为接近, 分别为 1.25、1.26 mm; 皇竹草区域土体含根量及抗拉强度明显高于高丹草, 分别为后者的 2.10 和 1.59 倍。

表3 土体含根量及根系抗拉强度

植物	土体含根量 $\rho_r/(g \cdot cm^{-3})$	平均根径 $D_r/mm$	最大抗拉 应力 $F/N$	抗拉强度 $q_r/MPa$
高丹草	0.008±0.004	1.25±0.06	19.37±4.73	12.13±1.56
皇竹草	0.017±0.004	1.26±0.06	30.84±8.14	19.30±3.75

### 3.3 直接剪切试验结果

#### 3.3.1 土体黏聚力和内摩擦角

各试样的黏聚力和内摩擦角结果见表4。从含水率结果来看, 2种植植物种植区根土复合试样的土壤含水率均低于对应的素土, 说明植物的种植一定程度加快了浅层土壤失水; 从内摩擦角和黏聚力结果看, 皇竹草和高丹草根系均明显提高了土体的内摩擦角和黏聚力。在皇竹草组别中, 紧邻植株( $D=0\text{ cm}$ )试样的内摩擦角最大, 为素土的6.3倍, 其次为 $D=25\text{、}50\text{ cm}$ 的根土复合试样, 分别为素土的4.6和2.4倍, 3种距离(0、25、50 cm)下根土复合试样的黏聚力分别为素土的2.2、1.5和1.2倍, 说明皇竹草根系对土体的加固效果随着距离增大而明显减弱。高丹草根系固化后土体内摩擦角和黏聚力分别为素土的1.5和2.4倍。

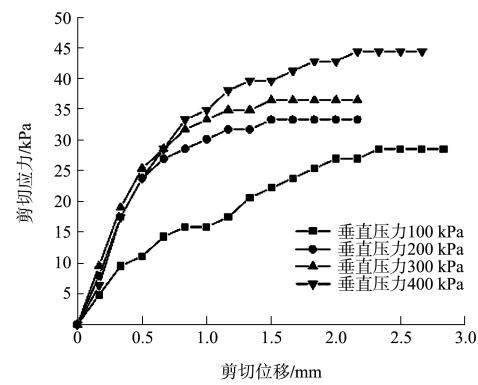
对比皇竹草和高丹草 $D=0\text{ cm}$ 处试样的测定结果可知, 在含水率接近的情况下(分别为20.6%、22.6%), 皇竹草根土复合试样的内摩擦角为高丹草的1.1倍, 黏聚力为高丹草的1.3倍, 说明在相近自然条件下皇竹草根系对土体内摩擦角和黏聚力的提高效果均优于高丹草。

表4 各组次试样的黏聚力和内摩擦角

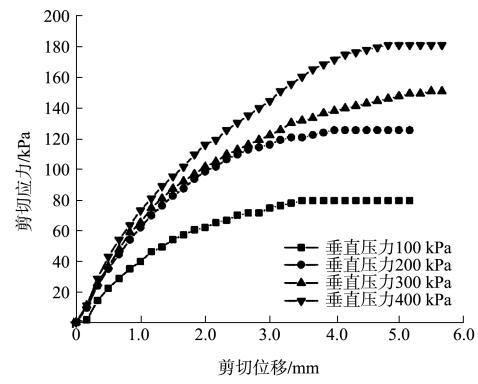
区域	试样名称	含水率/ %	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	相较于素 土的倍数	黏聚力 $c/kPa$	相较于素 土的倍数
素土		25.0	2.91	-	23.02	-
皇竹草	根土复合试样 ( $D=0\text{ cm}$ )	20.6	18.24	6.3	51.58	2.2
	根土复合试样 ( $D=25\text{ cm}$ )	20.4	13.26	4.6	34.12	1.5
高丹草	根土复合试样 ( $D=50\text{ cm}$ )	19.7	6.88	2.4	26.98	1.2
	素土	24.0	4.09	-	16.67	-
高丹草	根土复合试样 ( $D=0\text{ cm}$ )	22.6	6.27	1.5	40.40	2.4

#### 3.3.2 土体剪切位移-应力曲线

图3a)~f)为各组试样在不同垂直压力下剪切应力与位移的结果。其中图3a)~d)为皇竹草区域试样的结果, 素土试样位移在0~0.5 mm之间基本呈线性关系, 当位移超过0.5 mm后转变为非线性关系, 4种垂直压力下的剪切应力均在位移2.5 mm前达到最大值并趋于稳定。而根土复合试样在位移达到1 mm前, 4种垂直压力下的剪切应力与位移基本为线性关系, 之后变为非线性关系, 当位移超过3.5 mm及以上才发生剪切破坏并趋于定值。上述现象表明: 含有皇竹草根系的根土复合试样相对于素土, 发生剪切破坏所需要的位移更大, 说明根系一定程度增强了土体的韧性。在同一垂直压力下, 与植株的距离越小, 土体的剪切破坏应力越大, 说明与植株距离越近, 根系的固土作用越强。从图3e)、f)可知, 同一垂直压力下, 高丹草根土复合试样的破坏剪切应力及破坏所需位移均明显高于素土, 说明高丹草根系对土体同样具有明显的加固效果。



a) 皇竹草区域素土

b) 皇竹草区域根土( $D=0\text{ cm}$ )

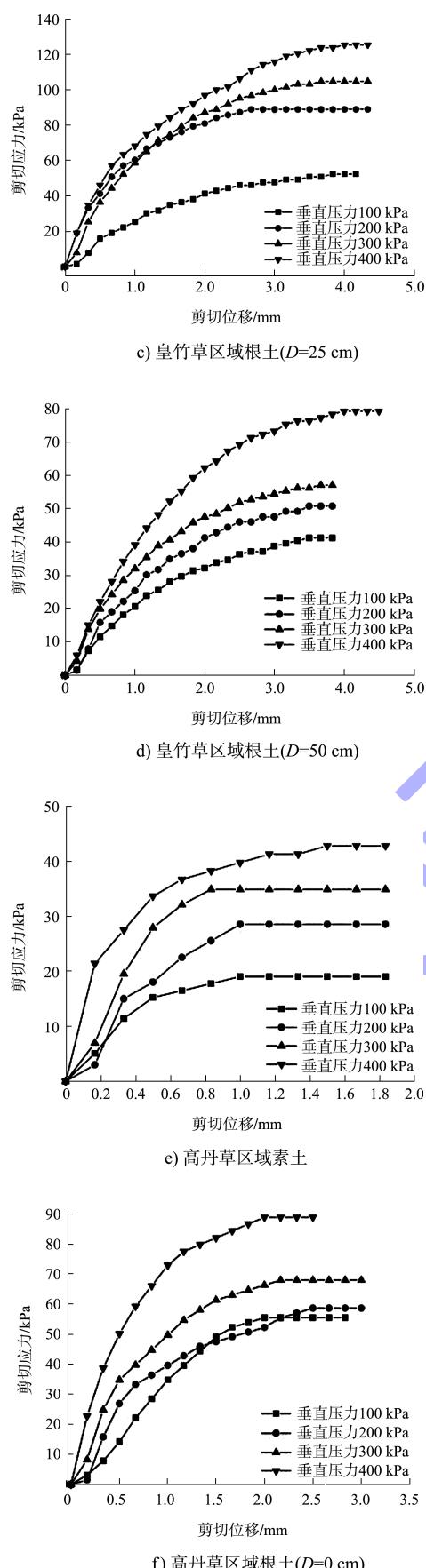


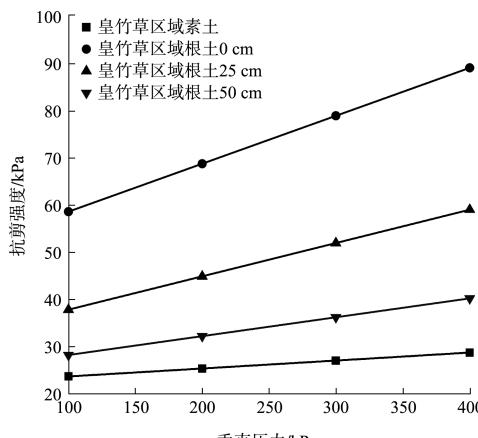
图 3 各组次试样的剪切位移-应力曲线

将同一水平距离的皇竹草和高丹草的剪切位移-应力曲线图 3b)、f) 进行对比, 表现出 2 种植物的固化效果差异。图 3b) 中各垂直压力下土体剪切应力趋于稳定所需位移( $3.5 \sim 5.0$  mm) 明显大于图 3f) ( $2.0 \sim 2.5$  mm), 且不同垂直压力下的剪切应力最大值亦明显高于图 3f), 说明皇竹草根系对土体的黏结效果优于高丹草, 使土体具有更强的韧性。

### 3.3.3 土体抗剪强度

图 4 为各组次试样的抗剪强度结果。各试样的抗剪强度与垂直压力呈线性关系, 垂直压力越大, 土体抗剪强度越大, 与其他研究中根土复合体类似直接剪切试验的结果一致<sup>[16-17]</sup>。对比图 4a) 中同一垂直压力下不同试样的抗剪强度, 说明含有皇竹草根系试样的抗剪强度明显高于素土试样, 各试样的抗剪强度大小顺序表现为  $D=0$  cm 试样  $> D=25$  cm 试样  $> D=50$  cm 试样  $>$  素土, 在  $100$ 、 $200$ 、 $300$ 、 $400$  kPa 垂直压力下,  $D=0$ 、 $25$ 、 $50$  cm 根土试样的抗剪强度分别为素土的  $2.5 \sim 3.2$ 、 $1.6 \sim 2.1$ 、 $1.2 \sim 1.4$  倍, 说明皇竹草根系显著提高了土体的抗剪强度, 且距离植株越近, 土体抗剪强度提高效果越明显。由图 4b) 可知, 在 4 种垂直压力下高丹草根土复合试样的抗剪强度为素土的  $2.1 \sim 2.3$  倍, 说明高丹草根系也可显著提高土体的抗剪强度。

将高丹草根土复合试样与  $D=0$  cm 的皇竹草组相比, 在 4 个垂直压力下, 后者为前者的  $1.4 \sim 1.8$  倍, 说明皇竹草对土体抗剪强度的提高效果明显优于高丹草。



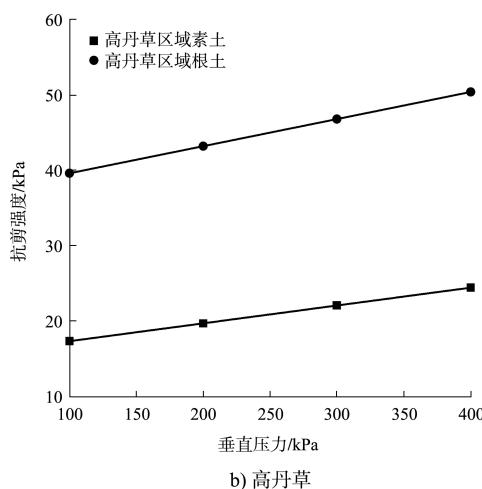


图4 不同垂直压力下各试样的抗剪强度

### 3.4 固化效果讨论

在土体含水率相近、与植株间的水平距离相同( $D=0$  cm)的条件下, 皇竹草根系对浅层疏浚土的内摩擦角、黏聚力、抗剪强度的提高效果均优于高丹草。原因可能与根系形态有关, 皇竹草根系更为致密, 单位体积土体内根系数量更多、与土体接触的面积更大, 当发生剪切位移时, 根系与土粒间表现出更大的摩擦力和黏结作用。且皇竹草根系的抗拉强度明显高于高丹草, 因而在剪切破坏过程中能够承受更大的拉应力, 使土体表现出更强的韧性, 需较大的拉力和位移才能将其破坏并达到稳定状态, 表现出更优的土体固化效果。另外, 试验结果表明皇竹草根系对土体的加固效果随距离增大而明显减弱, 可能是由于植物根系形态呈发散状, 越靠近植株, 剪切面上单位面积的根系数量越大, 固土作用越明显。

从固土植物的选择上来说, 虽然皇竹草根系更旺盛、对土体固化效果更好, 但由于皇竹草通常只能通过人工扦插茎节进行繁育, 而高丹草可采用植保无人机撒播种子进行大面积高效种植; 从施工便利性和成本考虑, 高丹草更适合在超软土(流泥)状态下大面积疏浚土纳泥区的固化, 皇竹草则适合在具备一定承载力(可人工作业)条件的局部区域, 通过人工扦插种植进行辅助固化处理。

通过植物种植对大面积疏浚土纳泥区进行固化处理的优势有: 1)施工流程简单, 无需使用大

型机械或高能耗设备, 节能减排优势明显; 2)植物种子廉价易得, 利用无人机和少量人工即可完成种植, 综合成本低; 3)植物生长具有固碳效果, 可实现“碳汇”; 4)施工过程中不产生任何污染物, 生态环保。因此, 利用植物生态固化疏浚土的方法, 应用前景广阔。

综上, 在大面积纳泥区表面种植速生植物, 一定程度促进了浅层疏浚土的脱水, 显著提高浅层疏浚土的力学特性(内摩擦角、黏聚力及抗剪强度), 可作为纳泥区疏浚土浅层固化处理的辅助措施。且在节能减排、降低固化成本(与真空预压等方法相比)、减少污染物排放等方面优势明显, 应用前景广阔。另外, 植物的固碳效果对于实现我国的“碳达峰、碳中和”目标、实践绿色发展理念具有较强的现实意义。

### 4 结论

- 1) 速生植物皇竹草和高丹草均可一定程度地促进纳泥区浅层疏浚土的脱水。
- 2) 在植物根系发育及力学特性上, 皇竹草根系更加致密、深度上分布更均匀, 单位体积的土体含根量为高丹草的2.1倍; 当2种植物的根茎接近时, 皇竹草根系的抗拉强度明显高于高丹草, 为高丹草的1.6倍。
- 3) 皇竹草和高丹草根系均可明显提高疏浚土浅层土体的内摩擦角、黏聚力及抗剪强度。其中皇竹草区域根土复合试样的内摩擦角为素土的2.4~6.3倍, 黏聚力为素土的1.2~2.2倍, 抗剪强度为素土的1.2~3.2倍; 高丹草区域根土复合试样的内摩擦角为素土的1.5倍, 黏聚力为素土的2.4倍, 抗剪强度为素土的2.1~2.3倍。
- 4) 在土壤含水率接近、与植株水平距离相同的条件下, 皇竹草对浅层疏浚土内摩擦角、黏聚力及抗剪强度的提高效果均不同程度地优于高丹草。
- 5) 与皇竹草植株间的水平距离会影响根系的土体固化效果, 随着距离增大, 固化效果明显减弱。

## 参考文献：

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 魏雁冰, 李振鑫, 李垚. 真空预压法加载方式的改进及试验研究[J]. 人民珠江, 2021, 42(7): 107-111, 117.
- [5] 顾勇, 蔡建, 朱治. 砂垫层在真空预压软土地基处理中的作用[J]. 水运工程, 2011(5): 127-131, 140.
- [6] 曾起召. 真空联合堆载预压在较厚超软弱土地基处理中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(2): 221-223.
- [7] 郭尧顺. 真空预压法在沿海软基加固中应用与分析: 以福州沿海某工业园区软基加固工程为例[J]. 福建建筑, 2020(9): 69-73.
- [8] 沈浩. 无砂垫层真空预压法在地基处理中的应用: 以台州湾循环经济产业集聚区三山涂涂面整理一期工程为例[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(1): 156-158.
- [9] 王彬, 顾凤祥, 李学东, 等. 真空-堆载联合预压法在软土路基处理中的应用[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(3): 73-76.
- [10] 汤斌, 肖玉成. 真空-堆载联合预压法在某大型软黏土地基处理工程中的应用[J]. 结构工程师, 2010, 26(3): 140-144.
- [11] 张超波, 蒋静, 陈丽华. 植物根系固土力学机制模型[J]. 中国农学通报, 2012, 28(31): 1-6.
- [12] 刘超, 倪天翼. 天然植物纤维加筋土强度劣化规律及机理研究综述[J]. 四川建材, 2018, 44(1): 76-77.
- [13] 林晓燕, 王慧, 王浩, 等. 利用皇竹草处理城市污泥生产植物产品[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 4234-4240.
- [14] 雷小文, 邱静芸, 李建军, 等. 蚯蚓粪及沼液处理对赣南稀土尾矿种植皇竹草及改良土壤的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(11): 191-196.
- [15] 水利部水利水电规划设计总院, 南京水利科学研究院. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S] 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [16] 余冬梅, 付江涛, 胡夏嵩, 等. 柴达木盆地大柴旦盐湖区盐生植物根-土复合体力学强度试验研究[J]. 盐湖研究, 2017, 25(1): 37-48.
- [17] 杨幼清, 胡夏嵩, 李希来, 等. 高寒矿区草本植物根系增强排土场边坡土体抗剪强度试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(6): 105-113.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 18 页)

## 参考文献：

- [1] 第十届全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国港口法[Z]. 2004.
- [2] 史国光, 李善友. 建国以来我国港口规划的回顾与总结[J]. 中国港口, 2009(10): 1-4.
- [3] 中华人民共和国交通运输部. 港口规划管理规定[Z]. 2008.
- [4] 中华人民共和国交通部. 港口总体规划编制内容及文本格式[Z]. 2006.
- [5] 朱建海. 我国港口体制改革回顾评估与深化改革的研究[R]. 上海: 中国港口协会, 2015.
- [6] 林静柔, 张晓浩, 陈蕾, 等. 国土空间规划体系下海岸带专项规划的编制重点与策略[J]. 规划师, 2021, 37(23): 5-11.
- [7] 郝庆, 彭建, 魏治, 等. “国土空间”内涵辨析与国土空间规划编制建议[J]. 自然资源学报, 2021, 36(9): 2219-2247.
- [8] 周鑫, 陈培雄, 黄杰, 等. 国土空间规划的海洋分区研究[J]. 海洋通报, 2020, 39(4): 408-415.
- [9] 李彦平, 刘大海, 罗添. 陆海统筹在国土空间规划中的实现路径探究: 基于系统论视角[J]. 环境保护, 2020, 48(9): 50-54.
- [10] 中共中央国务院. 国家综合立体交通网规划纲要[R]. 北京: 中华人民共和国国务院, 2021.
- [11] 罗本成. 坚持系统观念 加快打造现代化港口发展格局[J]. 中国港口, 2021(8): 1-5.
- [12] 姜玉波, 陈立. 新形势下的内河港口总体规划编制[J]. 水运管理, 2022, 44(3): 15-16, 37.
- [13] 杨文武. 关于调整港口总体规划的编制内容的探讨[J]. 中国水运(上半月), 2021(5): 91-93.
- [14] 高树奇, 杨斌. 新时代沿海港口总体规划方向与对策[J]. 中国港口, 2019(10): 26-27.

(本文编辑 王传瑜)