

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.059



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 疏浚土配制喷播绿化基质的配比试验研究

梅岭<sup>1</sup>, 陈虞祥<sup>1</sup>, 王雷<sup>1</sup>, 夏宇昂<sup>1</sup>, 陈正<sup>2</sup>

(1. 江苏科技大学 土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212000;

2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098)

**摘要:** 航道疏浚土与日俱增, 利用疏浚土配制喷播基质用于坡面绿化, 可以实现疏浚土的资源化利用。以疏浚土为主要试验材料, 采用  $L_{25}(5^3)$  正交试验设计, 在疏浚土中添加不同比例的聚丙烯酰胺(PAM)、高分子吸水性树脂(SAP)、稻草秸秆进行改良, 并种植高羊茅进行盆栽试验, 测定各试验组的物理结构特征、水分特征、化学性质、高羊茅出苗率等指标, 分析 PAM、SAP、稻草秸秆对疏浚土的影响, 通过主成分分析法综合评价, 得到基于疏浚土配制绿化喷播基质的配比。结果表明: 在疏浚土中加入 SAP 能显著改善疏浚土的孔隙特性, 降低土壤容重, 提高疏浚土的持水能力; 适量的 PAM 可以提高疏浚土中铵态氮的保留量, 促进高羊茅种子的发芽, 过量的 PAM 会抑制高羊茅种子的发芽; 秸秆能显著提高疏浚土的养分含量, 降低疏浚土的 pH 值; 基质的最佳配比为每 kg 疏浚土内添加 SAP 6 g、PAM 0.5 g、秸秆 35 g。

**关键词:** 疏浚土; 喷播基质; 聚丙烯酰胺; 高分子吸水性树脂; 秸秆

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2023)01-0135-10

## Experimental analysis on the ratio of green spraying substrate composed of dredging soil

MEI Ling<sup>1</sup>, CHEN Yuxiang<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, XIA Yuang<sup>1</sup>, CHEN Zheng<sup>2</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000,

Jiangsu, P. R. China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering,

Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

**Abstract:** The dredged soil of waterway is increase day by day, and the utilization of dredged soil to make spray seeding matrix for slope greening can realize the resource utilization of dredged soil. The  $L_{25}(5^3)$  orthogonal test design was adopted with dredged soil as the main test material, and different proportions of PAM, SAP and straw were added to the dredged soil for improvement, and tall fescue was planted for pot experiment. The physical structure characteristics, moisture characteristics, chemical properties and tall fescue emergence rate of each test group were measured. The effects of PAM, SAP and rice straw on the dredged soil were analyzed. Through the comprehensive evaluation of the principal component analysis method, the ratio of the green spraying substrate based on the dredged soil was obtained. The results show that adding SAP to the dredged soil can significantly improve the pore characteristics of the dredged soil, reduce the soil bulk density, and increase

收稿日期: 2021-01-12

作者简介: 梅岭 (1982-), 男, 副教授, 主要从事边坡工程研究, E-mail: mling530@163.com。

Received: 2021-01-12

**Author brief:** MEI Ling (1982-), PhD, associate professor, main research interest: slope engineering, E-mail: mling530@163.com.

the water holding capacity of the dredged soil; an appropriate amount of PAM can increase the retention of ammonium nitrogen in the dredged soil and promote tall fescue seeds. Excessive PAM will inhibit the germination of tall fescue seeds; straw can significantly increase the nutrient content of the dredged soil and reduce the pH value of the dredged soil; the optimal ratio of the substrate is 6 g of sap, 0.5 g of PAM and 35 g of straw per kg of dredged soil.

**Keywords:**dredged soil; spray substrate; polyacrylamide (PAM); super-absorbent polymer (SAP); straw

传统客土喷播基质主要由土壤、有机质肥料、复合肥料、土壤改良剂、保水剂、黏结剂等配制而成,利用客土喷播机喷射到裸露岩面和高陡边坡上,形成与自然土相类似的适宜植被生长的面层<sup>[1-2]</sup>。在施工过程中,客土喷播技术需要用到土壤当地大量的,土壤开挖又会形成新的裸露面层,破坏生态环境,因此,寻找一种环保型的喷播基质是当前亟需解决的问题。

疏浚土是疏浚工程中从河道挖出来的土壤,其细粒土含量高,力学性能差。随着长江 12.5 m 深水航道建设工程的进行,仅长江下游地区预估疏浚量就达 2 100 万 m<sup>3</sup><sup>[3]</sup>,而目前的处理方式大多为堆场堆填,占用大量的场地。如自 2002 年开始,无锡市已经对超过 1 000 万 m<sup>3</sup>的底泥进行了清淤,设置有雪浪堆场、渔港堆场、孔湾堆场、白旆湾堆场、周铁堆场等<sup>[4]</sup>。事实上,疏浚土中富含植物生长所需的 K、N、P、有机质等营养物质<sup>[5]</sup>,将其用于生产客土喷播基质,既可充分利用疏浚土中的养分,又可减缓土壤资源短缺的现状,所以,寻找合适的喷播基质配比,将疏浚土用于植被护坡中具有实际意义。付旭等<sup>[6]</sup>在低液限粉质黏土中加入聚丙烯酰胺(PAM) 10 g/m<sup>2</sup>、吸水性高分子树脂(SAP)30 g/m<sup>2</sup>、秸秆 20 kg/m<sup>2</sup>配制喷播基质进行施工;陈方鑫等<sup>[7]</sup>利用秸秆与 PAM 改良了湖滨地带土壤的团聚体特性和养分特性;Zhou 等<sup>[8]</sup>探究了 PAM、生物炭、泥炭土配制的喷播基质的养分特性,结果表明,PAM 和生物炭的复合使用可降低土壤中的 N、P 损失。而目前对于

疏浚土的改良研究大多集中于将其固化利用方面<sup>[9-10]</sup>,针对喷播基质的研究较少。利用 PAM、SAP、秸秆配制疏浚土喷播基质,探究不同改良材料对疏浚土的影响,具有一定的理论意义和实践价值。

以疏浚土为主要组成部分,利用 PAM、SAP、秸秆改良的喷播绿化基质,采用盆栽试验,综合考虑基质的容重、总孔隙度、水分特征(饱和水含水率、田间持水量)、铵态氮、有效磷、速效钾、有机质、pH 值和出苗率等指标,探究 PAM、SAP、秸秆对疏浚土物理性质、化学性质和植物生长特性的影响,得到疏浚土配制绿化喷播基质的最佳配比。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

疏浚土:取自江苏省镇江市丹徒区晓星村内位于京杭大运河边上的疏浚土堆场(119°34'34"E、32°4'49"N),取土深度为 0~1 m,呈黑色流塑状,将土样风干后,碾碎过 2 mm 筛备用。土壤的理化性质如表 1 所示。

高分子吸水性树脂(SAP):钾盐型,吸水倍数 600 倍。

聚丙烯酰胺(PAM):阴离子型,分子量 800 万。

植被材料:高羊茅种子,高羊茅是禾本科多年生草本植物,具有适应性强、耐高温、抗逆性强的特点,常被用于植被护坡。

表 1 土壤的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil

液限/%	塑限/%	塑性指数	干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	最佳含 水率/%	pH 值	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	铵态氮浓度/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷浓度/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾浓度/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
39	20	19	1.64	17.1	8.7	2.4	44.24	44.45	175.5

### 1.2 试验方案及测试方法

1.2.1 试验方案 采用盆栽试验,根据其他学者的研究成果<sup>[11-14]</sup>,采用正交试验设计法设置 SAP、

PAM、秸秆 3 个因素,每个因素 5 个水平,正交试验表选用 L<sub>25</sub>(5<sup>3</sup>)型,选取 SAP 与土壤的质量比梯度分别为 A<sub>1</sub>(0 g/kg)、A<sub>2</sub>(3 g/kg)、A<sub>3</sub>(6 g/kg)、A<sub>4</sub>(9 g/kg)、

$A_5(12 \text{ g/kg})$ , PAM 的梯度为  $B_1(0.5 \text{ g/kg})$ 、 $B_2(1 \text{ g/kg})$ 、 $B_3(1.5 \text{ g/kg})$ 、 $B_4(2 \text{ g/kg})$ 、 $B_5(2.5 \text{ g/kg})$ , 秸秆的梯度为  $C_1(15 \text{ g/kg})$ 、 $C_2(20 \text{ g/kg})$ 、 $C_3(25 \text{ g/kg})$ 、 $C_4(30 \text{ g/kg})$ 、 $C_5(35 \text{ g/kg})$ , 共 25 种处理, 每种处理 3 个重复, 具体方案见图 1。另外设置对照组 CK, 不添加 SAP、PAM 和秸秆。

试验盆栽选用口径、底径、高分别为 16、13、12 cm 的圆形塑料花盆。采用 SJD60 型单卧轴强制式搅拌机, 将土壤与 SAP、PAM 和秸秆搅拌 5 min, 装盆后浇 50% 的水, 静置 48 h 再浇水至饱和, 按照每盆 20 粒在盆栽表面均匀播撒高羊茅种子, 覆土约 1~2 cm, 配制完成后每天浇水养护 2 次, 14 之后减至每天 1 次。

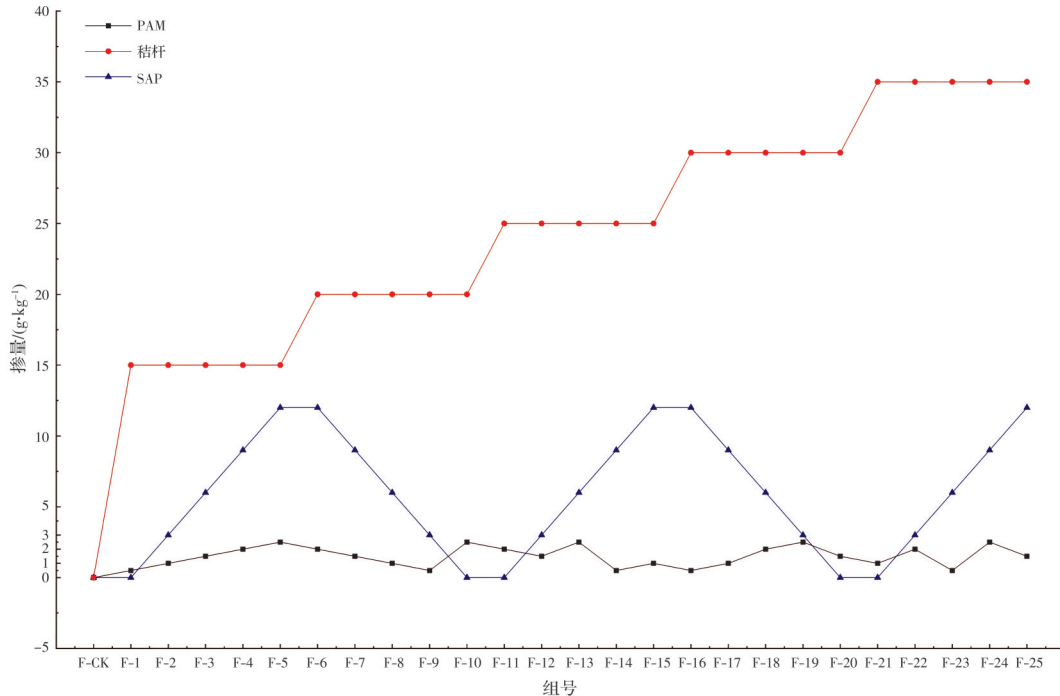


图 1 不同处理水平因素变化图

Fig. 1 Change of factors at different treatment levels

1.2.2 指标测定方法 土壤容重、土壤孔隙度、土壤含水率(饱和含水率、田间持水量)采用环刀法测量<sup>[15]</sup>;有机质采用  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  氧化法测定;铵态氮采用氯化钾(KCl)提取靛蓝比色法;有效磷采用碳酸氢钠( $\text{NaHCO}_3$ )浸提法测定;速效钾采用乙酸铵( $\text{NH}_4\text{OAc}$ )浸提法测定;pH值采用电极法测定<sup>[16]</sup>。

植被出苗率测定:在播种后,每2天记录出苗数量,连续记录3周,在第15天后高羊茅出苗数基本稳定,因此,采用第21天的出苗数作为植被最终的存活数量。

1.2.3 数据处理 利用 Origin 软件对各指标数据进行均值图和趋势图的绘制;利用 SPSS 20 软件进行单因素方差分析(Duncan法)和主成分分析。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 指标测定结果

喷播基质所构建的是一种“基质-植被”系统,为保证分析的精确性与完成性,需要将基质情况与

植被情况进行系统地分析。因此,为了能够全面分析各配比基质的情况,特选取容重、总孔隙度、饱和含水率、田间持水量、铵态氮、有效磷、速效钾、有机质、pH值和出苗率等10个有代表性的指标进行测定,观测数据见表2、表3。其中,土壤容重和孔隙度都是判断土壤紧实程度的指标:容重过大不利于植物扎根透气,土壤容重过小会导致有机物分解过快,研究表明,一般情况下,肥沃的耕作层土壤容重在  $1 \text{ g/cm}^3$  左右;总孔隙度越大,土壤容纳水和空气的能力越强<sup>[17]</sup>。由表2可知,各试验组间容重的变化范围为  $0.79\sim 1.23 \text{ g/cm}^3$ ,相对于对照组 CK,容重最多降低了 47.67%。各试验组总孔隙度在 47.73%~66.89% 之间波动,相对于对照组 CK,总孔隙度最多提高了 26.7%。说明不同基质材料和掺量能够有效改良疏浚土的物理结构特性,降低绿化喷播基质容重,提高总孔隙度,使基质疏松多孔。

田间持水量是土壤在自然环境下能够维持的

表 2 基质的物理性质指标结果

Table 2 The measure results of the physical properties of the substrate

组号	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙率/%	田间持水量/%	饱和含水率/%
F-CK	1.39±0.031	51.56±0.84	37.06±0.01	38.19±0.66
F-1	1.23±0.002	50.61±0.09	42.13±0.33	44.97±0.91
F-2	1.10±0.003	52.91±0.35	48.59±0.04	49.80±1.20
F-3	1.03±0.025	58.92±0.44	57.52±0.06	58.67±0.36
F-4	0.99±0.031	62.97±0.70	67.05±0.05	68.32±0.61
F-5	0.72±0.022	66.89±0.96	83.2±0.09	84.34±0.86
F-6	0.85±0.000	65.33±0.22	79.02±0.45	79.83±0.11
F-7	0.97±0.047	63.53±0.48	68.08±0.16	69.23±0.36
F-8	1.04±0.030	57.48±0.74	56.91±0.13	57.86±0.61
F-9	1.10±0.007	47.73±0.52	41.22±0.42	42.12±0.86
F-10	1.19±0.040	63.09±0.26	58.40±0.71	59.20±0.11
F-11	1.14±0.059	52.71±0.52	47.02±0.01	47.95±0.36
F-12	1.12±0.049	54.78±0.78	51.76±0.29	53.20±0.61
F-13	1.04±0.027	57.93±0.04	56.80±0.58	57.70±0.86
F-14	0.99±0.007	60.34±0.30	62.80±0.87	63.80±0.11
F-15	0.93±0.015	63.83±0.56	70.52±0.16	71.49±0.36
F-16	0.83±0.018	65.54±0.82	74.80±0.45	75.75±0.61
F-17	0.96±0.020	60.89±0.08	63.88±0.74	64.87±0.86
F-18	1.04±0.002	58.6±0.34	57.63±0.03	58.63±0.11
F-19	1.08±0.011	59.68±0.60	57.36±0.32	58.49±0.36
F-20	1.18±0.016	48.85±0.86	42.02±0.61	42.59±0.61
F-21	1.13±0.003	51.57±0.12	45.69±0.90	46.65±0.86
F-22	0.96±0.031	57.80±0.38	58.11±0.19	59.97±0.11
F-23	1.01±0.016	54.93±0.64	55.24±0.48	56.20±0.36
F-24	0.94±0.015	59.63±0.9	63.47±0.77	64.36±0.61
F-25	0.94±0.046	62.05±0.16	68.62±0.06	69.94±0.86

注:表中数据为同一样品3次测试的平均值。

最大含水量,直接影响植被的生长发育。由表2可知,各处理均能提高基质的田间持水量,变化范围为41.22%~83.20%,说明试验所添加的材料对基质的田间持水量的影响较大,相对于对照组CK,试验组最多提高了101.59%。饱和含水率是基质中所有孔隙(毛管孔隙和非毛管孔隙)都填满水时的最大含水量,反映了基质的最大水容量,试验组与对照组CK相比有明显差异,试验组的饱和含水率相对于对照组最大提高了96.78%。说明以疏浚土为主要材料,SAP、PAM、秸秆改良的绿化喷播基质有着良好的持水特性。

有效磷、速效钾、铵态氮是植被生长过程中可以直接吸收的营养物质,主要由基质中的有机质矿化分解产生,通过测定基质中的有效磷、速效钾、铵态氮和有机质可以反映基质的营养水平。由表3可知,相对于对照组CK,各试验组有机质、铵态氮、有

效磷、速效钾含量均有显著的提升。其中,有机质含量的变化范围为4.50~7.89 g/kg,相对于对照组CK,最多提高了234.47%;铵态氮含量的变化范围为66.04~123.00 mg/kg,相对于对照组CK,提高了217.58%;有效磷含量的变化范围为59.3~197.27 mg/kg,相对于对照组CK,最多提高了253.78%;速效钾含量的变化范围为244.83~1032.52 mg/kg,相对于对照组CK,最多提高了468.13%。同时,各试验组的pH值均小于对照组CK,变化范围为7.6~8.6,相对于对照组CK,最多降低了12.64%。这说明试验所添加的基质材料可以有效地提高疏浚土中营养物质含量,降低疏浚土的pH值。

植物的出苗率是检验基质是否适宜植被生长的重要指标,由表3可知相对于对照组CK,各试验组中高羊茅的出苗率均有显著的提高,说明添加基质材料可以有效地提高高羊茅在疏浚土中的出苗率,其中,在试验组F-23中高羊茅的出苗率最高,相对于对照组CK,提高了4倍;F-20的出苗率最低,相对于对照组CK,仅提高了25%。

## 2.2 不同配比的改良材料对疏浚土物理结构和持水特性的影响

表4为各试验组基质的物理性质指标方差分析,由表4可知,PAM和秸秆对基质的物理结构和持水特性影响不显著( $p>0.05$ ),SAP对基质的容重、总孔隙度、饱和含水率和田间持水量的大小具有显著性影响( $p<0.01$ )。为比较不同配比改良材料对疏浚土物理结构和持水特性的影响,以改良材料的水平为横坐标、指标均值为纵坐标,绘制不同因素水平下基质物理性质指标趋势图,结果如图2所示。由图2可知,随着SAP掺量的增加,基质容重逐渐减小,总孔隙度逐渐增加,饱和含水率和田间持水量逐渐增加。这说明在基质中添加SAP可以有效地降低疏浚土的容重,提高疏浚土总孔隙度和持水能力。

## 2.3 不同配比改良材料对疏浚土化学性质的影响

由表5可知,秸秆的掺量对基质中有机质含量影响极显著( $p<0.01$ ),对铵态氮、有效磷、速效钾含量影响显著( $p<0.05$ )。为比较不同配比改良材料对疏浚土化学性质的影响,以改良材料的水平为横坐标、指标均值为纵坐标,绘制不同因素水平下基质物理性质指标趋势图,结果如图3所示。由图3可知,随着秸秆掺量的增加,基质中有机质含量逐渐增加,铵态氮含量逐渐增加,有效磷和速效钾含量先增加后减少,pH值逐渐减小。这说明秸秆的掺入可以有效地提高疏浚土的养分含量,降低疏浚土的pH值。



表 3 基质的化学性质指标和出苗率测定结果

Table 3 The chemical properties of the substrate and the results of the emergence rate

组号	铵态氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	pH 值	出苗率/%
F-CK	38.73±0.11	55.76±0.20	176.16±0.93	8.7±0.2	20±1.65
F-1	77.16±0.59	169.40±0.05	566.77±0.64	7.8±0.1	45±1.65
F-2	67.09±1.40	95.85±0.06	974.99±0.24	7.9±0.1	45±6.50
F-3	71.22±0.78	133.22±0.06	589.28±7.92	8.3±0.2	45±0
F-4	85.64±0.40	119.59±0.42	712.32±0.18	8.5±0.1	40±3.50
F-5	83.32±0.70	147.90±1.02	460.83±0.23	8.5±0.1	30±5
F-6	86.60±0.16	114.61±0.85	301.19±0.86	8.4±0.2	35±3.50
F-7	84.46±2.86	90.75±0.12	465.78±0.53	8.4±0.1	45±5
F-8	66.04±1.36	116.58±1.87	568.47±0.42	8.3±0.1	60±8
F-9	88.12±0.12	184.78±0.22	364.57±0.50	8.2±0.0	70±3.50
F-10	83.57±0.08	197.27±0.01	477.42±0.22	7.8±0.1	35±5
F-11	83.23±0.44	176.34±0.19	425.36±0.21	7.7±0.1	50±8
F-12	82.06±0.88	190.32±0.29	743.66±0.46	7.9±0.0	45±5
F-13	87.65±0.91	144.53±0.44	385.21±0.00	8.1±0.1	50±8
F-14	74.18±2.12	150.30±0.01	721.53±0.09	8.6±0.1	75±5
F-15	83.04±3.17	158.64±0.49	839.50±0.50	8.3±0.1	55±5
F-16	75.18±0.01	152.57±1.56	1 032.52±0.34	8.5±0.1	50±10
F-17	80.90±2.51	136.87±0.00	629.32±0.20	8.3±0.1	65±5
F-18	96.00±0.69	59.30±0.18	365.00±0.10	8.1±0.1	55±10
F-19	123.00±0.08	87.77±1.20	317.51±0.48	7.9±0.1	70±5
F-20	84.10±0.31	89.05±0.01	419.55±0.48	7.6±0.1	25±10
F-21	70.58±0.97	91.76±0.15	244.83±0.21	7.7±0.1	45±5
F-22	113.93±0.57	90.00±1.22	356.85±0.04	7.7±0.1	60±5
F-23	111.90±0.50	84.77±0.12	369.63±0.24	8.0±0.0	80±8
F-24	97.34±2.09	93.40±0.47	339.49±0.44	8.2±0.1	55±5
F-25	102.84±0.04	78.28±0.19	264.39±3.29	8.2±0.1	40±10

表 4 基质的物理性质指标方差分析

Table 4 Analysis of variance for physical properties of matrix

方差分类	因素	离差平方和	均方	F	显著性
容重	PAM	0.012	0.003	0.891	0.499
	秸秆	0.006	0.002	0.495	0.740
	SAP	0.283	0.071	21.705	0.000
总空隙度	PAM	93.784	23.446	2.016	0.156
	秸秆	14.160	3.540	0.304	0.869
	SAP	450.42	112.605	9.683	0.001
饱和水	PAM	0.023	0.006	2.572	0.092
	秸秆	0.003	0.001	0.31	0.866
	SAP	0.246	0.061	27.418	0.000
田间水	PAM	0.024	0.006	2.729	0.08
	秸秆	0.002	0.001	0.274	0.889
	SAP	0.255	0.064	29.448	0.000

表 5 基质的化学性质指标方差分析

Table 5 Analysis of variance for chemical properties of matrix

方差分类	因素	离差平方和	均方	F	显著性
有机质	PAM	1.152	0.288	1.102	0.40
	秸秆	13.807	3.452	13.201	0.00
	SAP	4.083	1.021	3.903	0.03
铵态氮	PAM	1 435.685	358.921	3.339	0.047
	秸秆	1 637.814	409.454	3.809	0.032
	SAP	597.030	149.258	1.388	0.296
有效磷	PAM	4 470.449	1 117.612	1.204	0.359
	秸秆	18 121.042	4 530.261	4.881	0.014
	SAP	3 910.451	977.613	1.053	0.421
速效钾	PAM	207 349.274	51 837.318	1.891	0.177
	秸秆	396 860.139	99 215.035	3.620	0.037
	SAP	80 137.184	20 034.296	0.731	0.588
pH 值	PAM	0.070	0.017	1.919	0.172
	秸秆	0.218	0.054	6.000	0.007
	SAP	1.738	0.434	47.912	0.000

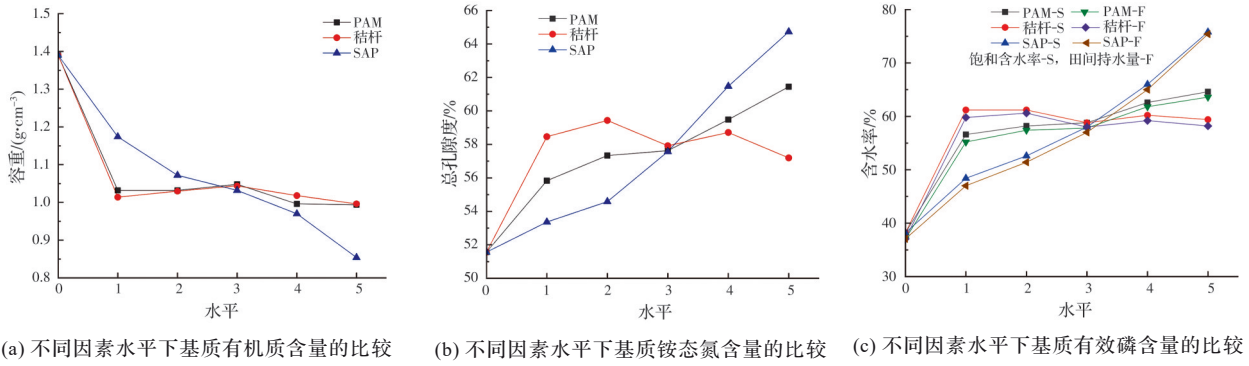


图 2 不同因素水平下基质物理性质指标均值的比较

Fig. 2 Comparison of mean values of matrix physical properties under different factor levels

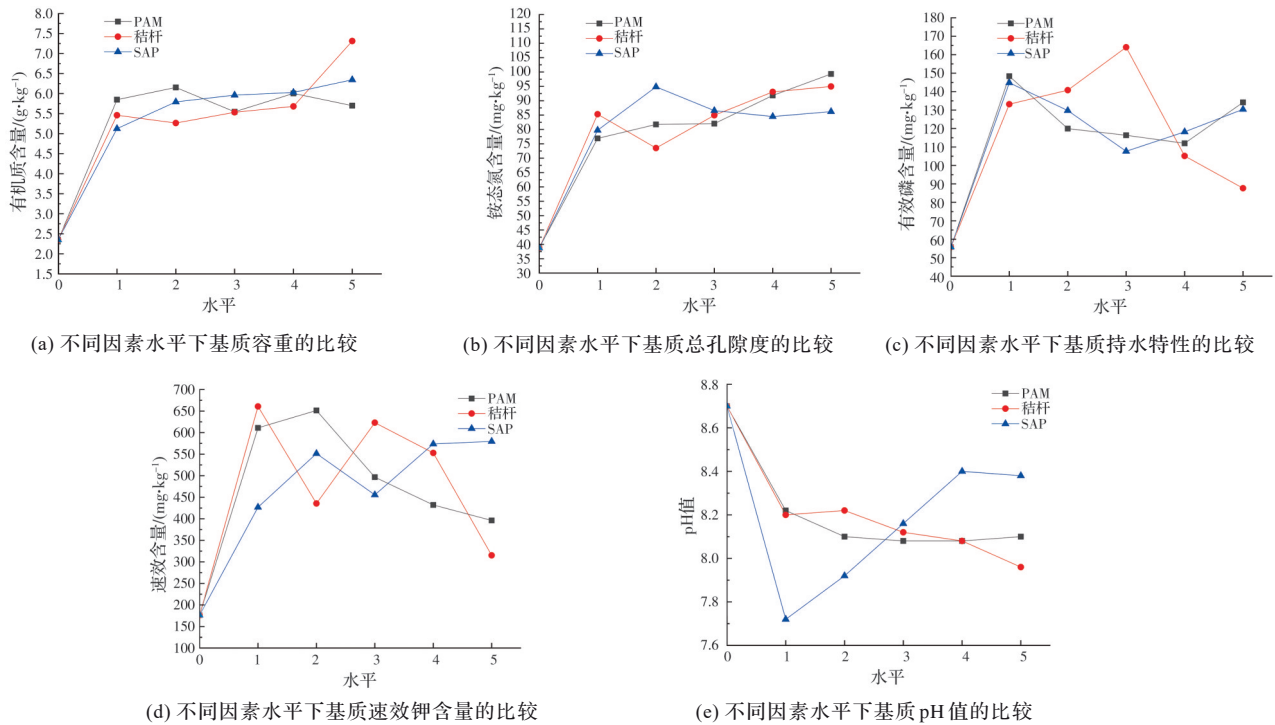


图 3 不同因素水平下基质化学性质指标均值的比较

Fig. 3 Comparison of mean values of matrix chemical properties under different factor levels

SAP的掺量对基质中有机质的含量影响显著 ( $p < 0.05$ ),对基质的 pH 值影响极显著 ( $p < 0.01$ ),随着 SAP 用量的增加,基质中有机质含量逐渐增加,pH 值逐渐增大。这是因为,SAP 的掺入使疏浚土产生更多的孔隙,保留更多的水分,为秸秆的腐化提供更加良好的条件,从而促进秸秆的分解和转化<sup>[18-19]</sup>,提高疏浚土中的有机质含量。

PAM 的掺量对基质中铵态氮含量影响显著 ( $p < 0.05$ ),随着 PAM 用量的增加,基质中铵态氮含量逐渐增加。这是因为,由于铵态氮是一种水溶性物质,会随着水流而产生转移,而阴离子 PAM 溶液吸附了黏土中的阳离子颗粒,形成更大的团聚体,

抑制土壤的封闭性,增加水流的入渗量和土壤的持水能力,从而限制铵态氮的流失,增加铵态氮的保留量<sup>[8]</sup>。

### 2.4 不同配比改良材料对出苗率的影响

由表 6 可知,SAP、PAM 和秸秆的掺量对高羊茅出苗率均具有显著性影响 ( $p < 0.05$ )。由图 4 可知,随着 SAP 掺量的增加,基质中高羊茅的出苗率逐渐增加,当掺入量达到 3 g/kg 后,出苗率的增加趋势逐渐平缓,掺入量达到 12 g/kg 后出苗率出现下降,说明 SAP 的掺入量并不是越多越好,这可能是由于过高的 SAP 会显著降低土壤容重,使得土壤容重过低,导致出苗率下降;随着 PAM 掺量的增

加,高羊茅的出苗率逐渐下降,适量的PAM掺量可以促进高羊茅种子的萌发,过高的PAM掺量会显著抑制高羊茅种子的萌发,这可能是因为过量添加的PAM会与种子争抢水分,影响种子萌发<sup>[20]</sup>;随着秸秆含量的增加,高羊茅的出苗率逐渐增加,这与其他的研究成果相似<sup>[21-24]</sup>,这是因为秸秆中的有机质会进行分解,产生大量的无机元素、腐殖质和有机质,为高羊茅种子的发育提供养分,促进微生物的活动和种子的萌发。

表 6 高羊茅出苗率方差分析

因素	离差平方和	均方	F	显著性
SAP	64.96	16.24	7.144	0.003
PAM	63.36	15.84	6.968	0.004
秸秆	29.76	7.44	3.273	0.049

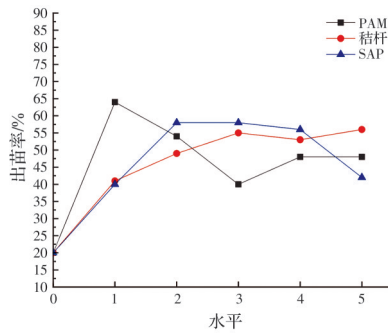


图 4 不同因素水平下高羊茅出苗率均值的比较

Fig. 4 Comparison of the average value of tall fescue emergence rate under different factor levels

2.5 不同基质配方适宜性的综合评分

方差分析只能反应各改良材料对基质的影响,不能对基质进行最终的评价,因此,采用主成分分析法,综合 10 个指标(其中,容重为负指标,分析过程中取倒数将其正向化),对各配比基质情况进行综合评价,以主成分累计贡献率达 85% 提取主成分个数<sup>[25-26]</sup>。

由表 7 可知,第 1 主成分的特征值和贡献率最大,分别为 4.489 和 44.887%,第 2、3、4 主成分贡献率依次减小,分别为 23.468%、11.397%、8.025%。

以 F-1 为例,用  $F_i$  表示第  $i$  个主成分的得分,用  $X_1 \sim X_{10}$  分别表示容重、总孔隙度、田间持水量、饱和含水率、有机质、铵态氮、有效磷、速效钾、出苗率、pH 值,则 4 个主成分表达式为

$$F_1=0.205X_1+0.207X_2+0.221X_3+0.221X_4+0.075X_5+0.015X_6-0.029X_7+0.036X_8-0.024X_9+$$

表 7 基质指标主成分分析

Table 7 Principal component analysis of matrix indicators

成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	4.489	44.887	44.887
2	2.347	23.468	68.354
3	1.140	11.397	79.752
4	0.802	8.025	87.776

$$0.179X_{10}$$

$$F_2=0.027X_1-0.032X_2-0.007X_3-0.006X_4+0.316X_5+0.34 X_6-0.313X_7-0.281X_8+0.135X_9-0.114 X_{10}$$

$$F_3=-0.029X_1-0.07X_2-0.069X_3-0.074X_4+0.15X_5+0.041X_6+0.138X_7+0.34X_8+0.789X_9+0.283X_{10}$$

$$F_4=0.012X_1+0.174X_2+0.074X_3+0.081X_4-0.457X_5+0.518X_6+0.643X_7-0.519X_8+0.208X_9-0.019X_{10}$$

由表 8 可知,对第一主成分  $F_1$  贡献最大的是田间持水量( $X_3$ )与饱和含水率( $X_4$ ),其次是容重( $X_1$ )、总孔隙度( $X_2$ )、pH 值,综合体现了基质的物理性能,因此,可将  $F_1$  定为基质的物理性质指数。对第 2 主成分  $F_2$  贡献最大的是有机质( $X_5$ )、铵态氮( $X_6$ )、有效磷( $X_7$ )、速效钾( $X_8$ ),综合体现了基质的养分含量,对第 3 主成分  $F_3$  贡献最大的是出苗率( $X_9$ ),体现了基质的出苗率,因此,将  $F_2, F_3$  分别定为基质的养分含量指数和植被生长指数。对第 4 主成分( $F_4$ )贡献最大的是有机质( $X_5$ )、铵态氮( $X_6$ )、有效磷( $X_7$ )、速效钾( $X_8$ ),而第 4 主成分  $F_4$  的贡献率仅为 8.02%,因此,将  $F_4$  定为基质养分含量的修正指数。

将各指标的标准化数据代入式中求和,得到不同基质的综合得分,综合得分值越高,代表基质表

表 8 主成分得分系数矩阵

Table 8 Principal component score coefficient matrix

指标	1	2	3	4
$X_1$ 容重正向化	0.205	0.027	-0.029	0.012
$X_2$ 总孔隙度	0.207	-0.032	-0.07	0.174
$X_3$ 田间持水量	0.221	-0.007	-0.069	0.074
$X_4$ 饱和含水率	0.221	-0.006	-0.074	0.081
$X_5$ 有机质	0.075	0.316	0.150	-0.457
$X_6$ 铵态氮	0.015	0.340	0.041	0.518
$X_7$ 有效磷	-0.029	-0.313	0.138	0.643
$X_8$ 速效钾	0.036	-0.281	0.340	-0.519
$X_9$ 出苗率	-0.024	0.135	0.789	0.208
$X_{10}$ pH 值	0.179	-0.114	0.283	-0.019

现越好,表9为各组基质,按综合得分由高到低排列。可知,最佳的配比为F-23,即每kg疏浚土中添加SAP 6 g、PAM 0.5 g、秸秆35 g。

表9 基质评价综合得分

Table 9 Comprehensive score of matrix evaluation

排名	组号	物理性质 $F_1$	养分含量 $F_2$	植被生长 $F_3$	养分含量修正 $F_4$	综合得分 $F$
1	F-23	-0.23	2.20	1.59	-0.16	3.41
2	F-19	-0.30	1.60	0.46	1.59	3.35
3	F-22	-0.08	1.97	0.04	0.13	2.06
4	F-14	0.51	-0.69	2.19	-0.05	1.96
5	F-24	0.46	1.24	0.10	-0.18	1.62
6	F-5	2.11	-0.57	-1.09	0.86	1.31
7	F-17	0.42	-0.38	0.99	0.19	1.22
8	F-25	0.83	1.49	-0.92	-0.21	1.19
9	F-15	0.99	-0.50	1.12	-0.41	1.19
10	F-6	1.55	0.33	-1.08	0.36	1.16
11	F-9	-1.35	-0.17	1.22	1.41	1.11
12	F-16	1.53	-1.11	0.95	-0.63	0.74
13	F-13	-0.18	0.14	-0.17	0.57	0.36
14	F-7	0.79	0.09	-0.40	-0.24	0.24
15	F-4	0.80	-0.50	-0.03	-0.52	-0.25
16	F-8	-0.16	-0.75	0.54	-0.40	-0.78
17	F-10	-0.42	-1.02	-1.20	1.67	-0.98
18	F-18	-0.21	-0.46	-0.20	-0.17	-1.04
19	F-11	-0.28	-0.53	-0.49	1.20	-1.10
20	F-3	0.02	-0.73	-0.11	-0.49	-1.30
21	F-12	-0.80	-1.22	-0.02	0.59	-1.44
22	F-1	-1.53	-0.92	-0.47	0.34	-2.57
23	F-21	-1.13	0.88	-1.03	-1.50	-2.78
24	F-2	-0.74	-0.55	0.24	-2.98	-4.03
25	F-20	-1.60	0.15	-2.23	-0.98	-4.65

### 3 结论

通过对不同配比基质进行盆栽试验,得到以下结论:

1)SAP可以显著改善疏浚土的孔隙特性,降低土壤容重,并有效提高基质的保水性能,促进秸秆的分解。

2)适量的PAM可以提高疏浚土中铵态氮的保留量,促进高羊茅种子的发芽,过量的PAM会抑制高羊茅的发芽,本次试验中用量在0.5 g/kg时,效果最好。

3)稻草秸秆可以显著提高疏浚土的养分含量,降低疏浚土的pH值,促进高羊茅种子的发芽。

4)根据主成分分析法综合评价,基于疏浚土的喷播基质的最佳配比为每kg疏浚土中添加SAP 6 g、PAM 0.5 g、秸秆35 g。

### 参考文献

- [1] 方军辉,朱德滨,程承,等.客土喷播的护坡机理及基材和施工等控制要点[J].森林工程,2014,30(3):116-119,123.  
FANG J H, ZHU D B, CHENG C, et al. Mechanism of slope protection, base material mixture, and construction technology of soil spray-sowing [J]. Forest Engineering, 2014, 30(3): 116-119, 123. (in Chinese)
- [2] YANG H, LI S C, SUN H L, et al. Effects of substrate material on plant growth and nutrient loss [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2018, 27(6): 2821-2832.
- [3] 陈海培,翟华,阎成浩.长江南京以下深水航道维护疏浚现状及对策研究[J].中国水运 航道科技,2018(2):32-36.  
CHEN H P, ZHAI H, YAN C H. Current situation and countermeasures of Nanjing Changjiang River dredging the deepwater channel maintenance [J]. China Water Transportation (Science & Technology for Waterway), 2018(2): 32-36. (in Chinese)
- [4] 王鸿涌.太湖无锡水域生态清淤及淤泥处理技术探讨[J].中国工程科学,2010,12(6):108-112.  
WANG H Y. Discussion on ecological dredging and silt treatment technology of Taihu Lake in Wuxi City [J]. Engineering Sciences, 2010, 12(6): 108-112. (in Chinese)
- [5] 熊红霞,黄伟,刘长兵,等.太湖疏浚底泥养分特征及园林应用研究[J].水道港口,2015,36(6):583-586.  
XIONG H X, HUANG W, LIU C B, et al. Nutrient characteristics and horticultural application of the sediment in Taihu Lake [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2015, 36(6): 583-586. (in Chinese)
- [6] 付旭,刘晓立,周晓旭,等.秸秆泥综合防护技术在公路边坡绿化中的应用[J].公路,2015,60(9):249-253.  
FU X, LIU X L, ZHOU X X, et al. Application of straw mud comprehensive protection technology to slope greening highway [J]. Highway, 2015, 60(9): 249-253. (in Chinese)
- [7] 陈方鑫,卢少勇,冯传平.农业秸秆复合PAM对湖滨带土壤改良效果的研究[J].农业环境科学学报,2016,35(4):711-718.



- CHEN F X, LU S Y, FENG C P. Improvements of soil in lakeside zones using combined crop straw and PAM [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4): 711-718. (in Chinese)
- [8] ZHOU J J, LIANG X Q, SHAN S D, et al. Nutrient retention by different substrates from an improved low impact development system [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 238: 331-340.
- [9] LEI H Y, XU Y G, LI X, et al. Effects of polyacrylamide on the consolidation behavior of dredged clay [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(3): 04018022.
- [10] BIAN X, ZENG L L, DENG Y F, et al. The role of superabsorbent polymer on strength and microstructure development in cemented dredged clay with high water content [J]. *Polymers*, 2018, 10(10): 1069.
- [11] 李绍才, 孙海龙, 杨志荣, 等. 秸秆纤维、聚丙烯酰胺及高吸水树脂在岩石边坡植被护坡中的效应[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(2): 257-267.
- LI S C, SUN H L, YANG Z R, et al. Effect of straw fiber, polyacrylamide and super absorbent polymer eco-engineering on rock slope protection [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(2): 257-267. (in Chinese)
- [12] 郭晶晶, 郭小平, 赵廷宁, 等. 北京房山采石场渣土基质对高羊茅生长的影响[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(3): 161-166.
- GUO J J, GUO X P, ZHAO T N, et al. Effect of quarry waste matrix on growth of *Festuca arundinacea* in Beijing Fangshan [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(3): 161-166. (in Chinese)
- [13] 王丽, 张金池, 张小庆, 等. 土壤保水剂含量对喷播基质物理性质及抗冲性能的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(2): 79-82.
- WANG L, ZHANG J C, ZHANG X Q, et al. Influence of water holding agent on physical properties and anti-scour ability of spray seeding matrix [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2): 79-82. (in Chinese)
- [14] 牟信刚. 护坡绿化基质筛选及其理化性质研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008.
- MU X G. Research on selection of substrates for slope protection and revegetation and its physiochemical properties [D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- [15] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil physical properties determination method [M]. Beijing: Science Press, 1978. (in Chinese)
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU R K. Soil agricultural chemical analysis method [M]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 2000. (in Chinese)
- [17] 张明柱. 土壤学与农作学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社. 1994.
- ZHANG M Z, Soil science and agronomy [M] Beijing China WaterPower Press, 1994. (in Chinese)
- [18] MUELLER T, JENSEN L S, NIELSEN N E, et al. Turnover of carbon and nitrogen in a sandy loam soil following incorporation of chopped maize plants, barley straw and blue grass in the field [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(5): 561-571.
- [19] 廖人宽, 杨培岭, 任树梅. 高吸水树脂保水剂提高肥效及减少农业面源污染[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(17): 1-10.
- LIAO R K, YANG P L, REN S M. Review on super absorbent polymer application for improving fertilizer efficiency and controlling agricultural non-point source pollutions [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(17): 1-10. (in Chinese)
- [20] 郑惠欣, 黄晓, 蔡丽平, 等. 土壤颗粒组成及黏着剂对类芦种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *草业学报*, 2020, 29(2): 92-102.
- ZHENG H X, HUANG X, CAI L P, et al. Effects of soil particle composition and adhesives on seed germination and seedling growth of *Neyraudia reynaudiana* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(2): 92-102. (in Chinese)
- [21] BLANCO-CANQUI H, LAL R, POST W M, et al. Changes in long-term no-till corn growth and yield under different rates of stover mulch [J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(4): 1128-1136.
- [22] QIU Y, LV W, WANG X P, et al. Long-term effects of gravel mulching and straw mulching on soil physicochemical properties and bacterial and fungal community composition in the Loess Plateau of China [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2020, 98: 103188.

- [23] WANG D D, YU X X, ZHANG J J, et al. The impacts of *Robinia pseudoacacia* litter cover and roots on soil erosion in the Loess Plateau, China [J]. *Chemistry and Ecology*, 2017, 33(6): 528-542.
- [24] 杜韬, 王冬梅, 张泽洲, 等. 煤矸石植生基质保水性能对黑麦草生长的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(4): 75-84.
- DU T, WANG D M, ZHANG Z Z, et al. Effect of the water-retaining property of coal gangue planting substrate on the growth of *Lolium perenne* [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(4): 75-84. (in Chinese)
- [25] 石立, 林海明. 关于主成分分析综合评价函数质疑的讨论[J]. *数学的实践与认识*, 2020, 50(14): 312-320.
- SHI L, LIN H M. Discussion on the query of the comprehensive evaluation function of the principal component analysis [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2020, 50(14): 312-320. (in Chinese)
- [26] 钞小静, 任保平. 中国经济增长质量的时序变化与地区差异分析[J]. *经济研究*, 2011, 46(4): 26-40.
- CHAO X J, REN B P. The fluctuation and regional difference of quality of economic growth in China [J]. *Economic Research Journal*, 2011, 46(4): 26-40. (in Chinese)

(编辑 胡玲)