

黏合剂与纤维组合对喷播基质材料抗剪性能及植物生长的影响

张传耀¹, 胡兴波², 叶康军², 赵斌², 徐金鹏³, 李金波^{1,4}, 宋桂龙^{1,4*}

(1. 北京林业大学草业与草原学院, 北京 100083; 2. 北京市首发天人生态景观有限公司, 北京 102600; 3. 宁夏华硕生态农业科技有限公司, 宁夏 银川 753000; 4. 国家林业草原运动场与护坡草坪工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要:【目的】明确添加“黏合剂+植物纤维”对客土喷播初期基质抗剪性能和植物生长的影响, 为工程实践提供参考。【方法】采用环刀法、直接剪切法和模拟坡面法, 选择聚丙烯酰胺(PAM)和聚乙烯醇(PVA) 2种黏合剂与棕榈纤维(PF)、椰丝纤维(CF)、剑麻纤维(SF)、木纤维(WF) 4种植物纤维, 探究黏合剂和纤维两两组合下喷播基质的孔隙度、抗剪性能及植被生长特征。【结果】1) PAM+SF组合孔隙度表现最优, 其总孔隙度和毛管孔隙度显著高于CK($P<0.05$), 分别是CK的1.26倍和1.37倍; 2) 添加PAM能够提高纤维-土复合体的抗剪强度, PAM+CF和PAM+SF组合内摩擦角显著大于CK和其他处理组($P<0.05$), 分别是CK的1.71倍和1.88倍, PAM+PF组合内聚力显著高于CK($P<0.05$), 是CK的1.14倍。3) PVA+SF组合的植物生长状况最优, 总生物量与根冠比显著大于CK($P<0.05$)。【结论】添加PAM的组合能够提高喷播基质的抗剪性能; 2种黏合剂相比, 添加PAM的组合抗剪强度优于添加PVA的组合。并且喷播基质的抗剪性能变化由黏合剂和植物纤维共同影响。添加“黏合剂+植物纤维”, 对植被生长恢复友好。

关键词:客土喷播; 黏合剂; 植物纤维; 孔隙度; 抗剪强度; 植物生长

中图分类号:S73 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2024)02-0116-09

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2024.02.012



客土喷播技术是石质裸露边坡植被恢复工程常用的关键技术之一。该技术以客土构建为基础, 以乡土植物快繁及合理配置为关键, 以绿色高效养护为辅助, 共同形成了裸露创面植被快速修复综合技术体系^[1]。其中, 针对一些高陡石质坡面, 客土构建不仅需要营造适合植物生长的基础, 同时还需要加强客土的附着性能, 否则就会出现客土滑坡、剥落、流失等现象。

黏合剂和植物纤维是增强喷播基质附着性能和改善土壤结构的关键材料, 能通过喷播基质表面形成黏膜层或通过渗入表层土壤固结颗粒, 形成一定比例的团聚体, 改变基质土壤结构, 达到水土保持和稳定边坡的效果^[2]。许多学者研究证明, 有机高分子类黏合剂, 能够快速与土颗粒结合, 有效改善土壤结构, 迅速形成团聚体, 增强土壤对水分的吸附能力, 成为目前客土喷播基材中最常用的黏合剂类型^[3]。聚丙烯酰胺(Polyacrylic amide, PAM)和聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol, PVA), 两者均是有多分支的长链有机高分子聚合物, 能吸附于土壤表面, 或者利用其结构特点填充进土壤孔隙, 从而具有增强土体的作用, 有学者研究表明这2种黏合剂可改善坡体的产流产沙特征^[4], 在固化软土中能形成纤维状、网状空间结构, 促使土中自由水转换为结合水, 可明显改善土壤结构和通气

收稿日期: 2023-01-16; 修回日期: 2023-03-30

基金项目: 北京市首发天人生态景观有限公司科研项目
(2022HXKFCXY001)

作者简介: 张传耀(1998-), 男, 广东乳源人, 硕士研究生。

E-mail: zhangchuanyao8@163.com

*通信作者。E-mail: syihan@163.com

状况^[5],PVA 由于其亲水基团作用与土壤发生吸附,在团聚体表面及周围形成连结,维持其形状稳定,进而稳定土体^[6]。此 2 种高分子黏合剂近年来在客土喷播修复中也越来越得到广泛运用^[7-8]。除高分子黏合剂外,喷播植被恢复后的植物根系亦可以改良土体结构和提高土体的抗剪性能,提高喷播基质的稳定性。许多学者研究表明“草类+PAM”对土体抗剪和抗蚀性能的增强效果明显,也能提高土壤内摩擦角 φ 和内聚力 c ^[9-10],证明“高分子黏合剂+植物根系”的组合在对土体的强度有正向加强作用。然而在喷播工程实践中,植物根系的生长需要较长的时间,喷播结束 7~28 d 后植物开始生长萌发,几个季度后始形成复杂完整的网状根系,无法立刻对喷播基质提供加强作用,这就需要添加其他替代材料在喷播初期模拟植物根系的作用^[11-12]。植物纤维在喷播基质中主要起到加筋作用,尤其是植物根系尚未发挥作用的喷播初期,植物纤维能够通过模拟植被根系的网络串连作用、根土粘结作用等方式增强基质的抗剪切力^[13],有学者研究发现添加植物纤维后土壤的抗剪强度、抗压强度都有显著提高^[14]。目前喷播工程实践中常用的植物纤维材料包括棕榈纤维(Palm fiber,PF)、椰丝纤维(Coconut fiber,CF)、剑麻纤维(Sisal fiber,SF)、木纤维(Wood fiber,WF)等^[15]。“高分子黏合剂+植物纤维”的组合通过连结土体团聚体、增强土体颗粒间摩擦力等作用叠加,在喷播初期可能起到与“高分子黏合剂+植物根系”组合起到对喷播基质类似的保固加强作用。

现有的研究主要着眼于植物根系对土体抗剪强度的影响,以及研究单施高分子黏合剂对土壤抗剪强

度的影响,对喷播工程初期尚未形成植被覆盖、无植物根系情况下的喷播基质的稳定性关注尚不足,侧重于单一材料比例和功能的研究^[16-18],对于“高分子黏合剂+植物纤维”可能的组合效应对喷播前期基质的抗剪强度以及植物生长的影响研究较少。本研究以模拟喷播的形式,研究不同“高分子黏合剂+植物纤维”的组合对客土喷播前期基质抗剪性能和植物生长的影响,以期高分子黏合剂和植物纤维在裸露坡面植被恢复工程中的应用提供理论基础和科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验于北京市昌平区马池口镇白浮村北京林业大学草坪试验基地(116°35' E,40°01' N)开展。试验地气候属于典型的暖温带半湿润大陆季风气候,春秋季节短,夏季炎热,雨热同期,冬季寒冷干燥,少雨雪。

1.2 供试材料

供试土壤来自张家口冬奥廊道裸露创面植被恢复工程赤城示范区,其质地为粗砂(0.5~1 mm)10.1%、中砂(0.25~0.5 mm)12.2%、细砂(0.1~0.25 mm)25.9%、粉粒(<0.1 mm)51.8%。植物纤维和黏合剂材料来源及特点见表 1,土和有机肥各指标参数见表 2。

试验喷播选用植物及配比参照冬奥廊道裸露创面植被恢复工程(张家口赤城示范区),具体如下:紫花苜蓿(*Medicago sativa*) 3 g/m²、一年生黑麦草(*Lolium multiflorum*) 1 g/m²、披碱草(*Elymus dahuricus*) 5 g/m²、草木樨(*Melilotus officinalis*) 4 g/m²、冰草(*Agropyron cristatum*) 3 g/m²、胡枝子(*Lespedeza bicolor*) 7 g/m²、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)

表 1 供试材料
Table 1 Test material

试验材料	来源公司	材料特点	备注
聚丙烯酰胺(PAM)	河北晴俊环保科技有限公司	絮凝作用强,土壤团聚效果好	阳离子型,分子量 1 200 万
聚乙烯醇(PVA)	河北晴俊环保科技有限公司	有良好的粘合性和成膜性,易吸水	冷溶性粉末
棕榈纤维(PF)	天津市佳加绿色产品科技有限公司	有多孔结构且含有大量亲水基团多,弹性性能较好	选定试验规格为 2 cm
椰丝纤维(CF)	天津市佳加绿色产品科技有限公司	由废弃椰壳提取,拉伸强度高,延展性好	选定试验规格为 2 cm
剑麻纤维(SF)	广西龙州强力麻业有限公司	纤维长、抗拉伸强度大	选定试验规格为 2 cm
木纤维(WF)	东南木纤维有限公司	来源广,成本低,保水性强	选定试验规格为 1 cm

表 2 土和有机肥各指标参数

Table 2 Parameters of each index of soilandorganic fertilizer

材料	pH 值	土壤电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	全氮/%	全磷/%	全钾/%	有机质/%
土壤	7.87	128.75	0.266	0.061	1.85	5.55
有机肥	7.74	8331	1.378	3.883	2.32	53.8

5 g/m²、柠条(*Caragana korshinskii*)7 g/m²、沙棘(*Hippophae rhamnoides*) 5 g/m²、丁香(*Syzygium aromaticum*)5 g/m²。植物种子采用浸泡处理(灌木种子 80 ℃ 热水浸泡 1 d,草本植物种子用清水浸泡 1~2 h)。

1.3 试验设计

采用双因素随机区组设计,因素为黏合剂和植物纤维种类。黏合剂种类 2 种,即聚丙烯酰胺 PAM 和聚乙烯醇 PVA;植物纤维种类 4 种,即棕榈纤维 PF、椰丝纤维 CF、剑麻纤维 SF、木纤维 WF。喷播时黏合剂和纤维两两组合,具体添加量 and 处理见表 3,共 8 个处理,每个处理 3 个重复,设置不添加黏合剂和植物纤维的处理为对照(CK)。基材中其他材料(包括土壤、有机肥、植物种子)及比例一致。

采用自制钢架试验槽模拟石质边坡,单个试验槽规格为长 100 cm×宽 40 cm,坡比为 1:0.75,坡底铺设石砖,铺设位置距离试验槽上沿 10 cm,为喷播客土层预留厚度。将水、客土、有机肥、黏合剂、植物纤维等材料加入喷播机,并搅拌均匀。喷播厚度约为 10 cm,分 3 次完成,最后一次喷播基质中混入植物种子。喷播后的基质遮盖无纺布覆盖处理,1 周后揭开无纺布。采用雾状喷头进行浇灌喷灌,生长期间保证水分正常供给。植物生长约 6 月后进行取样。

1.4 指标及方法

1.4.1 孔隙度 采用环刀法。将填满试验土体的环刀底部用不带孔底盖扣紧,再扣上带孔顶盖,称重,记为 W₁。将配置好的环刀放入盒中盛水浸泡 24 h,浸泡时水位线应高出顶盖 2 cm。浸泡后取出,擦去多余水分,立即称重,记为 W₂。环刀顶盖朝下,倒置在叠有滤纸的漏斗上,静置 3 h,用烧杯收集自由排出的水分,直至无水渗出。此时再称量环刀、基质及其中持水总重,记为 W₃。计算如下:

$$TP=W_2-W_1$$

$$VP=W_2-W_3$$

$$CP=TP-AP$$

式中:TP 为总孔隙度(%);W₂ 为充分吸水后,环刀、基质和水的质量(g);W₁ 为环刀和风干基质的质量(g);VP 为通气孔隙度(%);W₃ 为环刀倒置排水后,环刀、基质及所持水的质量(g);CP 为毛管孔隙度(%)。

1.4.2 抗剪强度 将喷播养护 1 周后的基质用环刀取样,试样大小为 61.8 mm×20 mm。参考土工试验方法标准(GB/T 50123—2019),采用 ZJY—2 型应变控制式直剪仪(四联剪)对土壤抗剪强度进行测试。根据库伦定律,对试样进行不同压力荷载下剪切,剪切速率为 1.2 mm/min。法向应力分别设为 50、100、150、200 kPa,开始剪切后,位移指针稳定或后退表示

表 3 试验设计和处理名称

Table 3 Experimental design and treatment names

黏合剂	添加量(w/w, %)	植物纤维	添加量(w/w, kg)	处理名称
聚乙烯醇(PVA)	0.3	棕榈(PF)	0.4	PAM+PF
		椰丝(CF)	0.4	PAM+CF
		剑麻(SF)	0.4	PAM+SF
		木(WF)	0.4	PAM+WF
聚丙烯酰胺(PAM)	1	棕榈(PF)	0.4	PVA+PF
		椰丝(CF)	0.4	PVA+CF
		剑麻(SF)	0.4	PVA+SF
		木(WF)	0.4	PVA+WF

注:黏合剂用量参考(张鹏,2019)^[19],纤维用量参考(龙荣,2018)^[20]。

试件已剪切损坏,一般宜剪切变形至 4 mm,若测力计读数继续增加,则应使剪切变形达到 6 mm 为止。读数结束后按照下式计算得出抗剪强度 τ_f ,以法向应力为横坐标,抗剪强度 τ_f 为纵坐标,画出抗剪强度和法向应力的关系曲线,该线的倾斜角即为土壤的内摩擦角 φ ,该线在纵坐标上的截距即为土的内聚力 c 。

抗剪强度的计算为:

$$\tau_f = C_0(R - R_0)$$

式中: τ_f 为抗剪强度(kPa); C_0 为量力环给定系数; R 为量力环上百分表的最大读数,或是位移为 4 mm 时的读数(0.01 mm); R_0 为量力环上初始读数。

1.4.3 生物量、根冠比和灌草比 试验取 20 cm×20 cm 面积为一个取样点,每个处理 3 次重复,识别灌木和草本植物,分别得到灌木和草本植物的数量,计算灌草比;将各处理植物取回,用清水洗净,装入信封,分别放入烘箱内烘干至恒重再称重,分开植物的根系和地上部分,得到地上部生物量、地下部生物量和总生物量。

根据下式计算灌草比:

$$\text{灌草比} = \frac{\text{灌木数量}}{\text{草本植物数量}}$$

根据下式计算根冠比:

$$\text{根冠比} = \frac{\text{地下部分干重}}{\text{地上部分干重}}$$

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理,利用 IBM SPSS Statistics 25 进行差异显著性方差分析(Waller—Duncan法, $P < 0.05$),利用 Origin 2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同组合孔隙度变化

PAM+SF 组合的总孔隙度显著大于 CK ($P < 0.05$),是 CK 的 1.26 倍;PAM+SF 组合毛管孔隙度显著大于 CK ($P < 0.05$),是 CK 的 1.37 倍;PVA+WF 组合的通气孔隙度显著小于 CK ($P < 0.05$),其他组合的通气孔隙度与 CK 均无显著差别(表 4)。

表 4 不同组合孔隙度变化

Table 4 Porosity variation of different treatments

处理	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	通气孔隙度/%
CK	31.87±4.15 ^b	24.23±5.52 ^b	7.63±1.66 ^{ab}
PAM+PF	34.25±3.85 ^{ab}	26.60±3.40 ^{ab}	7.65±0.45 ^{ab}
PAM+CF	34.85±2.95 ^{ab}	26.15±3.15 ^{ab}	8.70±0.20 ^a
PAM+SF	40.05±2.35 ^a	33.20±2.60 ^a	6.85±0.25 ^b
PAM+WF	32.95±4.75 ^{ab}	26.50±5.10 ^{ab}	6.45±0.35 ^{bc}
PVA+PF	37.85±1.45 ^{ab}	31.40±1.80 ^{ab}	6.45±0.35 ^{bc}
PVA+CF	37.98±1.43 ^{ab}	31.19±1.46 ^{ab}	6.79±0.15 ^b
PVA+SF	38.60±5.10 ^{ab}	30.60±5.50 ^{ab}	8.00±0.40 ^{ab}
PVA+WF	35.85±1.45 ^{ab}	31.00±0.30 ^{ab}	4.85±1.75 ^c

2.2 不同组合抗剪强度变化

在 50 kPa 荷载下,PAM+PF 和 PAM+WF 组合的抗剪强度显著高于 CK 和其它组合 ($P < 0.05$),抗剪强度分别是 CK 的 1.16 倍和 1.15 倍(表 5)。在 100 kPa 荷载下,各组合并未出现抗剪强度显著优于 CK 的组合。在 150 kPa 荷载下,PAM+SF 组合的抗剪强度显著高于 CK 和其他组合 ($P < 0.05$),抗剪强度为 CK 的 1.22 倍。在 200 kPa 荷载下,PAM+SF 和 PAM+CF 组合的抗剪强度显著高于 CK 和其他组合 ($P < 0.05$),抗剪强度分别是 CK 的 1.41 倍和 1.16 倍。添加 PAM 的组合在特定的荷载下能够有效提升植物纤

维—土复合体的抗剪强度。在各荷载强度下,添加 PVA 的组合抗剪强度均显著小于 CK。

PAM+CF 和 PAM+SF 组合内摩擦角显著大于 CK 和其他组合 ($P < 0.05$),分别是 CK 的 1.71 倍和 1.88 倍。添加了 PVA 的组合内摩擦角均显著大于 CK ($P < 0.05$),PVA+SF、PVA+CF、PVA+PF、PVA+WF 组合的内摩擦角由大至小排列,分别是 CK 的 1.40 倍、1.39 倍、1.34 倍和 1.26 倍。PAM+PF 组别内聚力显著高于 CK ($P < 0.05$),是 CK 的 1.14 倍。添加 PVA 的组合内聚力均显著小于 CK。

表5 不同组合抗剪强度以及抗剪强度指标
Table 5 Shear strength of different combinations and shear strength index

处理	不同荷载下的抗剪强度				内摩擦角	内聚力/kPa
	50 kPa	100 kPa	150 kPa	200 kPa		
CK	74.12±4.17 ^b	110.19±4.23 ^a	130.03±23.60 ^b	131.42±6.37 ^c	20.95±2.84 ^c	63.51±2.43 ^b
PAM+PF	85.68±5.97 ^a	102.74±4.61 ^{ab}	120.36±15.24 ^{bcd}	129.31±15.21 ^c	16.49±4.00 ^c	72.40±0.81 ^a
PAM+CF	45.21±4.55 ^d	86.77±7.20 ^{bc}	127.35±5.58 ^{bc}	152.44±6.37 ^b	35.91±1.47 ^a	12.37±6.29 ^d
PAM+SF	64.66±6.31 ^c	108.06±13.77 ^a	158.51±9.72 ^a	185.03±7.28 ^a	39.45±0.99 ^a	26.17±4.69 ^c
PAM+WF	85.16±2.73 ^a	101.68±4.02 ^{ab}	117.14±19.37 ^{bcd}	130.37±12.75 ^c	18.84±3.91 ^c	65.00±6.08 ^{ab}
PVA+PF	38.37±3.28 ^{de}	77.19±7.20 ^{cd}	101.56±12.79 ^{cd}	119.33±8.69 ^{cd}	28.04±3.60 ^b	17.30±3.92 ^{de}
PVA+CF	39.95±1.82 ^{de}	72.93±16.00 ^{cde}	106.39±2.79 ^{bcd}	121.95±7.94 ^d	29.19±1.09 ^b	15.44±2.47 ^{de}
PVA+SF	32.59±3.64 ^e	67.07±9.97 ^{de}	101.56±8.53 ^{cd}	115.12±10.34 ^d	29.42±0.98 ^b	8.57±2.46 ^e
PVA+WF	39.95±3.28 ^{de}	58.56±4.02 ^e	99.94±4.26 ^d	108.81±8.78 ^d	26.36±1.71 ^b	14.82±2.00 ^{de}

2.3 植物生长情况

2.3.1 生物量 PVA+CF组合地上生物量显著大于CK($P<0.05$),PAM+PF、PAM+SF组合对地上生物量无显著影响,PAM+CF、PAM+WF、PVA+PF、PVA+SF、PVA+WF组合的地上部生物量显著降低($P<0.05$)。PVA+SF组合的地下生物量显著大于CK($P<0.05$),PVA+WF组合对地下生物量无影响,其余组合地下生物量显著降低($P<0.05$)(图1-A)。

对照组地上部生物量箱体偏态对称,添加PAM和PVA的组合地上部生物量箱体宽度近似,2个组别有相似的地上部生物量,但PAM组别的平均相对生物量变化比PVA组别更少,PVA组内生物量相对PAM组别更加离散(图1-B)。对于地下部生物量,CK组箱体对称,数值分布均匀。添加PVA的组合箱体较PAM组合更为离散。

地上部生物量CK组别箱体偏态对称,地上部生物量离散程度CF>PF>SF>WF(图1-C),不同植物纤维组别的地上部生物量中位数相近,CF>SF>WF>PF。添加不同植物纤维组合之间的地下部生物量箱式图,地下部生物量CK组别箱体对称,数值分布均匀。离散程度WF>SF>PF>CF。不同植物纤维组别的地下部生物量中位数SF>CF>WF>PF。

2.3.2 根冠比和灌草比 8个组合的根冠比中,PAM+CF、PVA+SF、PVA+WF 3个组合的根冠比显著大于CK($P<0.05$),PAM+PF、PAM+SF、PAM+WF、PVA+PF、PVA+CF组合根冠比显著小于CK($P<0.05$)(图2-A);8个组合的灌草比中,PVA+CF的灌草比显著大于CK($P<0.05$),是CK的1.36倍,PAM+WF组合灌草比显著小于CK($P<$

0.05),其他组合与CK无显著差别(图2-B)。

3 讨论

土壤孔隙度是土壤理化性质的重要指标之一,能够反映土壤的保水贮水能力,保障植物生长。添加不同组合黏合剂和植物纤维的喷播基质孔隙度特征是植被恢复过程中植物获取水分和养分的关键影响因素。前人研究表明,在喷播基质中添加一定量的植物纤维,初期可以吸收水分,增加土颗粒之间的间隙,待养护后期植物纤维降解后,可以在原来植物纤维留存的地方留下孔隙,增加土壤的毛管孔隙和通气孔隙度,从而增加土壤的通气、透水性^[21],这里只探讨了添加植物纤维的情况。本试验添加黏合剂与植物纤维后,喷播基质的总孔隙度和CK并无显著差别,喷播基质的毛管孔隙度以及通气孔隙度分别只有1组显著大于CK,其余组别与CK并无显著差异,原因可能是植物纤维改善了土壤结构,而黏合剂形成的网状结构联结土粒,侵占了一部分土体颗粒之间的空间。该试验结果与张鹏等^[19]研究结果一致。添加黏合剂和植物纤维,容易改变土壤结构,有影响土壤抗剪强度和植物生长的可能。

基质抗剪强度是反映土体在石质边坡上稳定性的指标之一。土体的摩擦强度和粘聚强度共同构成了土体抗剪强度,内摩擦角与内聚力是土体摩擦强度和粘聚力的直观反映参数^[9],表示土体在外力(重力,雨水冲刷以及强对流席卷等)作用下,一部分土体对另一部分土体产生滑动而抵抗剪切的极限强度。土体上下部分产生的横向的剪应力达到土体自身的极限抗剪强度时,土体即遭到滑动破坏。在实际的喷播

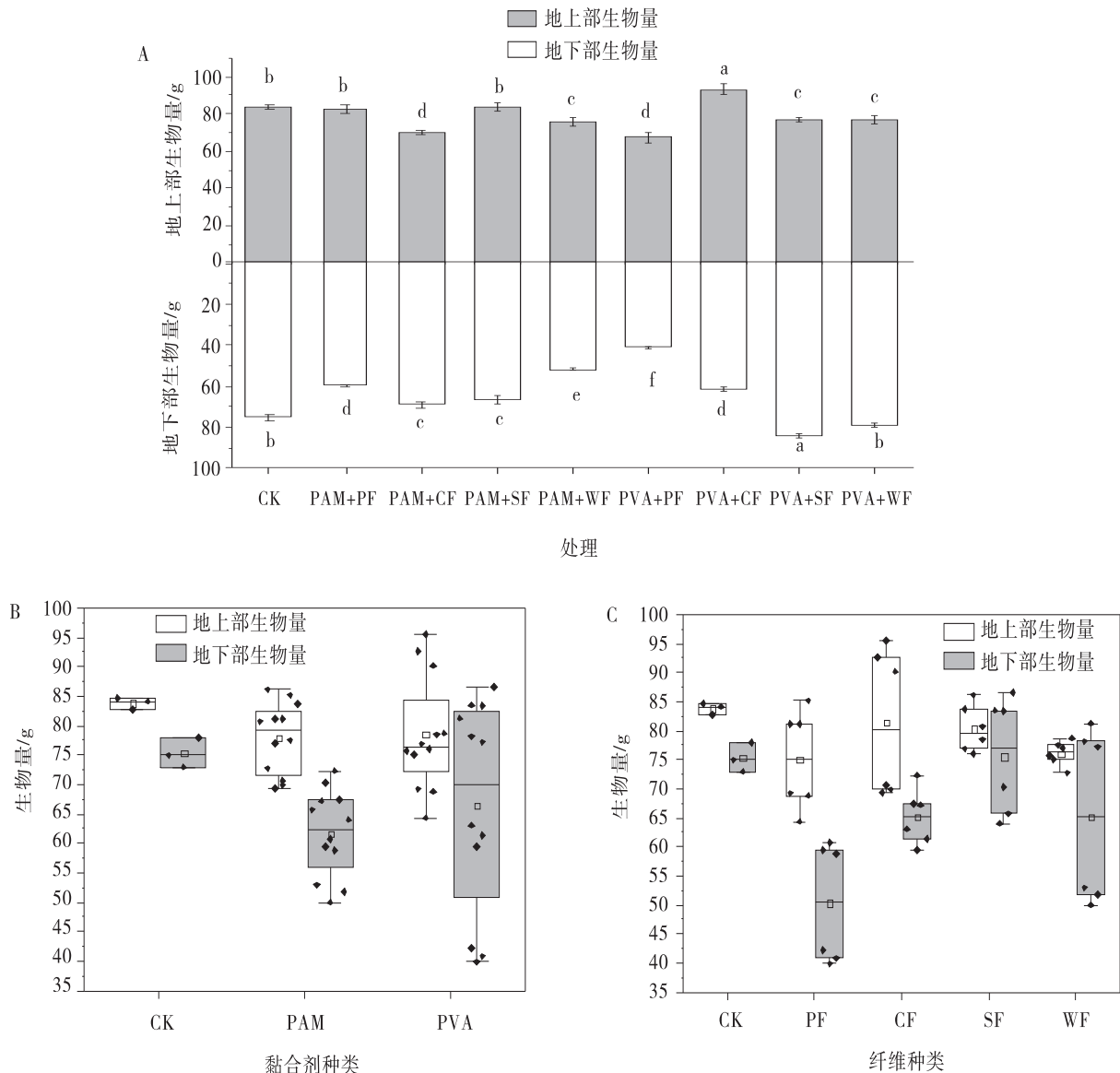


图 1 不同组合的地上部和地下部生物量

Fig. 1 Above-ground and below-ground biomass of different treatment combinations

应用中则表现为石质边坡喷基质失稳,或者喷播基质整体剥离,植物失去在石质边坡上的立地条件,造成喷播修复失败^[22-23]。

添加 PAM 的组合能够提高喷播土体的抗剪强度,这与李铁等^[10]的研究结果一致。不同组合基材导致内聚力和内摩擦角表现出一定的差异性。8 个组合中,黏合剂和植物纤维共同影响基质内摩擦角和内聚力,研究结果与唐朝生等^[24-25]对纤维与水泥水化产物研究结果一致,黏合剂与植物纤维组合后,内摩擦角提高以植物纤维表面摩擦力和相互交织连结为主,内聚力的提升主要以黏合剂的粘结力为主。部分 PAM 与植物纤维的组合能提升基质内聚力,这与周涛^[26]的

研究结果相似,而 PVA 与部分 PAM 组合降低了基质内聚力,并且有的组合导致土壤内聚力大幅下降,但与之相反,内聚力大幅度下降的组合的内摩擦角均显著优于 CK,这可能是由于黏合剂与植物纤维组合形成的结构体界面摩擦不一致而引起的内聚力变化所致,抗剪强度的变化主要以土体颗粒之间的相互嵌入连锁以及植物纤维与土颗粒的咬合交织而并非是由黏合剂的粘结力体现出来^[27],这种不同组合在不同方向上对喷播基质的抗剪性能加强的规律性需要进一步研究。8 个组合中,6 个组合的内摩擦角提升显著($P < 0.05$),相比于喜银巧等^[28]在 3 种风沙土单独施加土壤改良剂并未显著改变风沙土的内摩擦角,黏合剂和

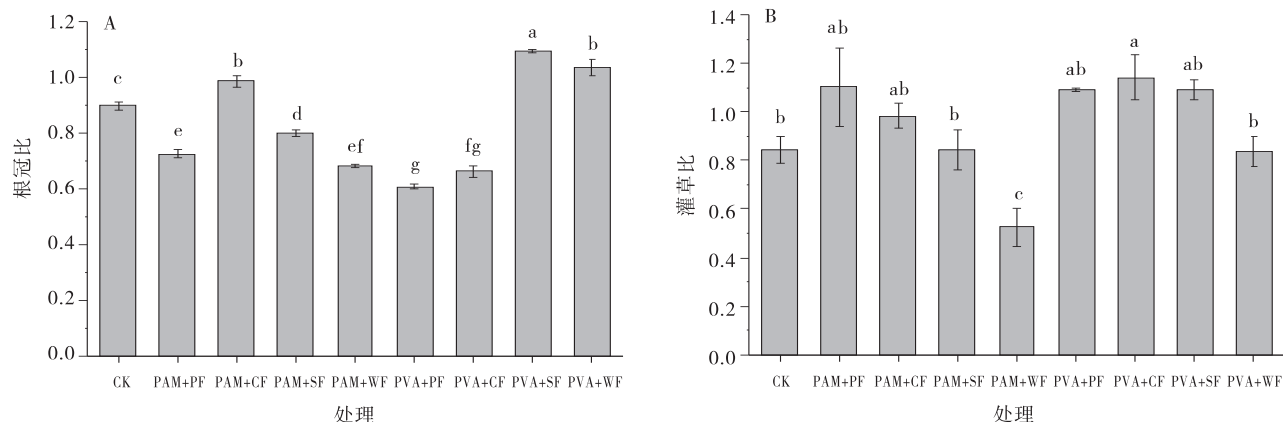


图2 不同组合的根冠比和灌草比

Fig. 2 Root-crown ratio and shrub-herb ratio of different treatment combinations

植物纤维的组合对土体的内摩擦角改变有着显著效应。添加不同黏合剂的土质界面接触条件均会改变加筋土的力学作用特点,这与Falorca等^[29]发现的土—纤维复合体通过添加进其中的材料提升摩擦性能从而加强自身的抗剪强度的观点一致。总体来看,土壤抗剪强度性能变化由黏合剂和植物纤维配合呈现,添加PAM对土体抗剪强度的提升要优于添加PVA,而植物纤维通过在土体中随机分布交织的方式,起到类似于植物根系交织分布的作用,增强了植物纤维表面与土颗粒之间的摩擦作用,提高了内摩擦角^[30-31]。

石质坡面经过喷播修复后,植物在喷播基质上的生长情况直接反映着喷播施工作业的效果。植被生物量、灌草比和根冠比3个指标是分析植被恢复效果的重要指标^[32-33]。有学者发现,少量添加黏合剂会刺激植物幼苗生长发育,适当增加了幼苗的生长发育速度,但是当添加过量的黏合剂会使基质颗粒凝结,抑制幼苗出土以及根系呼吸^[34]。通过本试验植被特征发现,添加适量的黏合剂和植物纤维后,会通过改良喷播基质的物理特性一定程度上促进植被生长,从而改变植被生物量、灌草比和根冠比,这与苗蕾等^[35]研究结论相近。黏合剂主要通过改变土壤颗粒状况和水分情况改变了基质内聚力,进一步对植被的出芽率、成活率进行了改变,这与张桐瑞^[36]的研究观点相似;而植物纤维主要能够利用其本身的韧性、相互交织特点以及保水特性,通过与土颗粒的交织摩擦作用改变内摩擦角,以及影响植物根系固结延伸效果进一步影响植物在岩石边坡上的成活效果,使其能在基质中不同深度混合形成复杂的根系系统,最终达到增强

基质稳定性的效果。

4 结论

(1) 添加聚丙烯酰胺和聚乙烯醇2种黏合剂与4种植物纤维两两组合中,“聚丙烯酰胺+剑麻纤维”组合的总孔隙度显著大于CK。“聚丙烯酰胺+剑麻纤维”组合的毛管孔隙度显著大于CK。“聚丙烯酰胺+椰丝纤维”组合的通气孔隙度显著大于CK。

(2) 添加聚丙烯酰胺能够提高喷播土体的抗剪强度。聚丙烯酰胺组别中“聚丙烯酰胺+椰丝纤维”、“聚丙烯酰胺+剑麻纤维”组合的内摩擦角相对CK提升了71.4%和88.3%。聚乙烯醇组别的内摩擦角均较CK分别提升了33.8%、39.3%、40.4%和25.8%。聚丙烯酰胺组别的“聚丙烯酰胺+棕榈纤维”组合内聚力较CK提升了14%。喷播基质抗剪性能变化由黏合剂和植物纤维共同影响。

(3) 8个组合的总生物量中,“聚乙烯醇+椰丝纤维”组合地上部生物量显著大于CK($P<0.05$)。不同组合的地下部生物量,“聚丙烯酰胺+剑麻纤维”组合的生物量显著大于CK($P<0.05$);“聚丙烯酰胺+椰丝纤维”、“聚乙烯醇+剑麻纤维”、“聚乙烯醇+木纤维”3个组合的根冠比显著大于CK($P<0.05$);在8个组合的灌草比中,“聚乙烯醇+椰丝纤维”的灌草比显著大于CK($P<0.05$)。适当添加黏合剂和植物纤维对植物生长友好。

参考文献:

[1] 徐慧,吕庆,杨雨荷,等. 边坡植被重建效果评价:研究进

- 展与展望[J]. 生态学杂志, 2022, 41(3): 589—596.
- [2] 力乙鹏, 李婷. 土壤固化剂的固化机理与研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(36): 237—277.
- [3] 曹丽花, 赵世伟, 梁向锋, 等. PAM对黄土高原主要土壤类型水稳性团聚体的改良效果及机理研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 45—49.
- [4] 冯浩, 吴淑芳, 吴普特. 高分子聚合物对土壤物理及坡面产流产沙特征的影响[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(1): 15—19.
- [5] 李鑫. 聚丙烯酰胺加固软土地基效果分析及真空预压联合处理试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [6] Jin Liu, Yong Wang, Yi Lu, et al. Effect of Polyvinyl Acetate Stabilization on the Swelling—Shrinkage Properties of Expansive Soil[J]. International Journal of Polymer Science, 2017, 2: 8128020.
- [7] 陈虞祥. 疏浚土配制喷播绿化基质配方研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
- [8] 赵佳愉, 伍红燕, 史蔚林, 等. 聚丙烯酰胺添加浓度对种基盘特性的影响[J]. 草原与草坪, 2021, 41(5): 16—21.
- [9] 周涛, 刘泉宏, 湛芸, 等. 狗牙根和三叶草的根系特征及对荒坡紫色土抗剪性能的影响[J]. 草业科学, 2018, 28(3): 463—471.
- [10] 李铁, 王润泽, 湛芸, 等. PAM和草类根系对荒坡紫色土物理性质与抗剪性能的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(2): 69—78.
- [11] 张晓航, 杨建英, 赵惠恩, 等. 公路边坡喷播绿化初期根系特征及其对抗剪强度的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(5): 1528—1537.
- [12] 李亚宁. 长江流域边坡植被恢复效果评价及影响因素研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- [13] 张洪东, 李海峰, 李贺勇, 等. 棕榈纤维加筋土强度特性试验研究[J]. 矿产勘查, 2021, 12(5): 1264—1271.
- [14] 李金和, 郝建斌, 陈文玲. 纤维加筋土技术国内外研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2015, 37(3): 319—325.
- [15] Qasim Umair, Ali Muzaffar, Ali Touqeer, et al. Biomass derived Fibers as a Substitute to Synthetic Fibers in Polymer Composites[J]. ChemBioEng Reviews, 2020, 7(6): 193—215.
- [16] 冯国建, 朱维伟. 草本植物根系对边坡浅层稳定性影响研究[J]. 草原与草坪, 2015, 35(4): 23—26.
- [17] 陈终达, 肖宏彬, 张春晓, 等. 根系分布方式对根—土复合体抗剪强度的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(8): 130—135.
- [18] 康倍铭, 徐健, 吴淑芳, 等. PAM与天然土壤改良材料混合对部分土壤理化性质的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 68—72+78.
- [19] 张鹏. 水泥和聚丙烯酰胺对高羊茅草坪根系层加固性能及根系生长影响的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [20] 龙荣. 不同纤维类型及比例条件下草坪根系加固效果研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- [21] 师海然. 喷播绿化木纤维基质材料配方的开发研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [22] 郑江坤, 张鸽, 曾倩婷, 等. 弃渣场边坡草本植物根系力学及土壤抗冲特征[J]. 中国水土保持学报, 2022, 20(6): 59—66.
- [23] 王万平, 张熙胤, 王义, 等. 季节冻土区黄土抗剪强度变化特征及其影响因素[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(8): 143—150.
- [24] 唐朝生, 顾凯. 聚丙烯纤维和水泥加固软土的强度特性[J]. 土木工程学报, 2011, (A2): 5—8.
- [25] 唐朝生, 施斌, 高玮. 聚丙烯纤维和水泥对粘性土强度的影响及机理研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(1): 108—113.
- [26] 周涛, 湛芸, 王润泽, 李铁, 唐菡, 翟婷婷, 刘泉宏. 种草和施用聚丙烯酰胺对荒坡紫色土抗剪和抗蚀性能的影响研究[J]. 草业学报, 2019, 28(3): 62—73.
- [27] 包承纲, 丁金华. 纤维加筋土的研究和工程应用[J]. 土工基础, 2012, 26(1): 80—83.
- [28] 喜银巧, 赵英, 李生宇. 三种土壤改良剂对风沙土抗剪强度的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1401—1410.
- [29] Falorca I M C F G., Pinto M I M. Effect of short, randomly distributed polypropylene microfibres on shear strength behaviour of soils. [J] Geosynthetics International, 2011, 18(11): 2—11.
- [30] Li C, Jorge G Z. Shear Strength Behavior of Soils Reinforced with Weak Fibers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(9).
- [31] 张凯, 杨松. 基于离散元模拟的草本植物根系分布对黏土抗剪强度的影响研究[J]. 草原与草坪, 2022, 42(2): 59—66.
- [32] 舒安平, 赵冉, 高小虎, 等. 公路边坡干湿客土喷播生态恢复效果评价[J]. 交通标准化, 2020, 6(4): 45—51.
- [33] 廖琪, 洪波, 杨杰军, 等. 公路生态恢复效果评估研究——以荣乌高速烟威段为例[J]. 中国海洋大学学报(自

- 然科学版), 2017, 47(S1): 109—116.
- [34] 艾冬冬, 赵瑞, 陈俊琴, 等. 添加不同比例粘合剂的育苗块对黄瓜幼苗生长发育的影响[J]. 华南农业大学学报, 2009, 30(3): 114—116.
- [35] 苗蕾, 唐妍, 杨喜田, 等. 厚层客土喷播基质中不同有机质添加物对护坡植物早期生长的影响[J]. 河南农业大学学报, 2008, 42(1): 57—60.
- [36] 张桐瑞, 李富翠, 李辉, 等. 草垫植入对混合草坪床稳定性及表观质量的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(8): 27—36.

Effect of different binder and fiber combinations on shear resistance of substrate and plant growth of spray seeding

ZHANG Chuan-yao¹, HU Xing-bo², YE Kang-jun², ZHAO Bin², XU Jin-peng³,
LI Jin-bo^{1,4}, SOMG Gui-long^{1,4*}

(1. School of Grassland Science, Beijing Forestry University, 100083, Beijing, China; 2. Beijing Shoufa Tianren Ecological Landscape Co., Ltd., 102600 Beijing, China; 3. Ningxia Huashuo Ecological Agriculture Technology Co., Ltd., Yinchuan 753000, China; 4. Engineering and Technology Research Center for Sports field and Slope Protection Turf, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100083, China)

Abstract: 【Objective】 To investigate the effect of adding “binder + plant fiber” on the shear performance and plant growth of the substrate during the early stages of guest soil spraying, and to provide reference for engineering practice. 【Method】 The ring knife method, direct shear method and simulated slope method were employed. Two binders, Polyacrylic amide (PAM) and Polyvinyl alcohol (PVA), and four plant fibers, palm fiber (PF), coconut fiber (CF), sisal fiber (SF) and wood fiber (WF), were selected. The porosity, shear resistance and vegetation growth characteristics of sprayed substrates were investigated under the two combinations of binder and fiber. 【Result】 The results showed that (1) PAM+SF exhibited the highest porosity, with total and capillary porosity significantly higher than CK ($P<0.05$), at 1.26 and 1.37 times higher than those of CK, respectively; (2) Addition of PAM enhanced the shear strength of the fiber-soil composite, with internal friction angles of PAM+CF and PAM+SF significantly higher than those of CK and other treatment groups ($P<0.05$), at 1.71 and 1.88 times higher than those of CK, respectively, while the cohesion of PAM+PF combination was significantly higher than that of CK ($P<0.05$), at 1.14 times higher than that of CK; (3) PVA+SF combination showed the best plant growth condition, with total biomass to root crown ratio significantly greater than CK ($P<0.05$). 【Conclusion】 Combining with PAM can improve the shear resistance of the sprayed substrate; PAM exhibited better shear strength compared to PVA. Shear resistance of sprayed substrates was influenced by both binder and plant fiber. The “binder + plant fiber” combination promotes vegetation growth recovery.

Key words: spray seeding; polymeric adhesives; plant fibers; porosity; shear strength; plant growth

(责任编辑 刘建荣)