

不同改良剂对红壤土水特征曲线及吸附强度的影响

刘武江¹, 段青松², 杨松², 熊寿德³, 保锐琴⁴, 黎李杨⁵, 张川^{2,6*}

(1.云南省农业工程研究设计院, 昆明 650215; 2.云南农业大学 水利学院, 昆明 650201;

3.云南地质工程勘察设计院有限公司, 昆明 650041; 4.云南农业大学 资源与环境学院,

昆明 650201; 5.云南远科土地整治规划设计有限公司, 昆明 650201;

6.中国矿业大学 中国资源型城市转型发展与乡村振兴研究中心, 江苏 徐州 221116)

摘要:【目的】向边坡土壤内加入改良剂会对土体水分产生较大影响, 揭示此过程中土水特征曲线及吸附强度的变化规律可为采用改良剂进行边坡治理提供依据。【方法】通过测定不同配比的糯米胶、木纤维、糯米胶/木纤维混施的红壤土的基质吸力 ψ 和体积含水率 θ_v , 绘制土水特征曲线并分析典型特征参数变化; 采用直剪试验测定不同改良剂红壤饱和状态的内摩擦角 ϕ , 结合Fredlund双应力变量抗剪强度理论, 分析不同改良剂对红壤吸附强度 τ_ψ 的影响。【结果】①糯米胶和木纤维能提高土体饱和含水率 θ_s , 混合改良剂反之; 糯米胶和混合改良剂会降低土水特征曲线的残余含水率 θ_r , 木纤维只有在较低或较高掺量时才会降低残余含水率, 反之增高; 3种改良剂均能提高土水特征曲线的进气值 ψ_a , 混合改良剂>糯米胶>木纤维; 糯米胶会降低土水特征曲线的残余值 ψ_r , 木纤维反而增加残余值, 混合改良剂介于二者之间且高于素土; 糯米胶的土水特征曲线斜率 $|k|$ 最大, 其次是混合改良剂和木纤维。②不同改良剂红壤随 θ_v 降低, ψ 增加, 吸附强度 τ_ψ 增大, 抗剪强度随 ψ 增加的速率减小。在23.73%~30.76%体积含水率区间, 2.5%纤维和5.0%纤维的吸附强度相对较大, 其次是素土、5.0%混合和2.5%混合, 最后是2.5%胶、5.0%胶和0.5%胶。【结论】①糯米胶主要影响 $|k|$ 值, 致使土体水分散失速率加快; 木纤维对 θ_s 、 θ_r 和 ψ_r 的影响最大, 土体保水性好, 水分不易流失; 混合改良剂以提高 ψ_a 为最优, 土体初期(边界效应阶段)不易失水, 中后期受糯米胶成分的影响, 持水能力减弱。②不同改良剂增大 τ_ψ 的效果由强到弱依次为: 木纤维>糯米胶>混施。

关键词: 土壤改良剂; 红壤; 基质吸力; 土水特征曲线; 吸附强度

中图分类号: S284

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2021408

OSID:



刘武江, 段青松, 杨松, 等. 不同改良剂对红壤土水特征曲线及吸附强度的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(9): 68-78.
LIU Wujiang, DUAN Qingsong, YANG Song, et al. The Effect of Soil Conditioners on Water Characteristic Curves and Adsorption Strength of Red Loam Soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(9): 68-78.

0 引言

红壤土为云南省主要土壤类型之一, 在境内广泛分布。云南的土地主要是山地和丘陵, 坡改梯作为农用地土地整治常用的技术手段, 形成了大量的田坎坡面。【研究意义】田坎坡面大多处于非饱和状态, 随着气候和季节的变化, 其力学性质也在发生着变化, 对实际工程的影响巨大。边坡的强度与稳定性在很大程度上与边坡的湿度有关, 其湿度状况主要是由基质吸力所决定的。而土水特征曲线 (Soil-water Characteristic Curve, SWCC) 是反映土壤基质势和含水率的关系曲线^[1], 所以对边坡红壤的土水特征曲线

的研究就显得尤为重要^[2]。

【研究进展】通过向边坡土壤内加入改良物质来改善边坡土壤结构、提高土壤质量和增强边坡稳定性是一条可行的路径^[3]。边坡土壤改良剂中, 固化剂类和纤维类运用较广。在固化剂类方面, 潘英华等^[4]采用聚丙烯酰胺(PAM)和磷石膏做研究时指出, 土壤改良剂能抑制土壤水分蒸发, 使土壤吸持水能力增强, 表现为随着PAM用量增加, 土壤饱和含水率增大, 土壤吸水速度却在下降。裴向军等^[5]采用糯米胶改良剂固化黄土, 研究发现糯米胶改良剂能降低黄土的饱和吸水率, 改变原有的孔隙结构, 增强颗粒间的黏结, 改善黄土的水敏性。吴军虎等^[6-7]采用羟丙基甲基纤维素(HPMC)和羧甲基纤维素(CMC)做改良剂研究时表明, HPMC具有广泛的耐酶性和黏结性, 由于羟基和羟丙基的亲水性, HPMC与土壤水结合形成的三维互穿凝胶网络一定程度上填充了土壤孔隙, 随HPMC添加量增加, 平均孔隙水流速逐渐减小, 土壤可动水体的含水率比率逐渐减少; 采用CMC做研究时也得出, 当含水率相同时, 随CMC添加量增加,

收稿日期: 2021-08-27 修回日期: 2023-05-29 网络出版日期: 2023-09-14
基金项目: 国家自然科学基金项目(41867038); 国土资源部公益性行业科研专项经费(201511003-3); 国土资源部开放基金项目(YNTD2018KF05); 云南省水利科技重大专项项目(2023BG204001)
作者简介: 刘武江(1993-), 男, 云南曲靖人。硕士, 主要从事土地生态利用与保护研究。E-mail: 804310301@qq.com
通信作者: 张川(1982-), 男, 云南大理人。副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事土地整治工程、农业水土工程研究。
E-mail: zhangchuan0569@sina.com
©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

土壤水吸力呈增大趋势,即土壤基质势降低。李崇清等^[8]采用高分子固化材料(SH)进行土壤抗侵蚀研究的结果与吴军虎等^[6-7]一致。可见,固化剂主要通过影响土壤孔隙结构进而使土壤含水率发生改变,主要表现在吸水、脱水速率方面。

在纤维类方面,肖兴艳等^[9]研究发现,由于秸秆炭化处理后,具有疏松多孔的结构、巨大的表面积和极强的吸附能力,能够吸附和保持水分,改善土壤理化性质,增强土壤保水能力;与素土相比,秸秆炭化处理土壤含水率较高,而未碳化的秸秆处理土壤含水率则低于素土,其会疏散土壤水分,降低土壤持水性能。王珍等^[10]研究发现,秸秆掺入土中,能降低土壤体积质量,提高土壤饱和含水率,粉碎秸秆优于长秸秆;且粉碎秸秆在低吸力段对土壤持水能力的提高作用明显高于长秸秆。可见,纤维受加工处理方式不同,自身结构发生改变后,会增强或减弱土壤持水能力。

在固化剂和纤维混合类方面,张燕等^[11]研究发现,以秸秆、建筑垃圾等为主要原料制成的PJG土壤改良剂吸水倍率高,吸水速率提高,失水速率相对缓慢。冯瑞云等^[12]指出以秸秆、聚丙烯酰胺(PAM)等为原料混合制成的土壤改良剂,能够有效改良土壤,降低土壤体积质量;随着施入土壤时间的延长,土壤大颗粒(1~3 mm、3~5 mm、>5 mm)颗粒粒级分数均随施入量增加而逐步增加;田间持水率随着混合改良剂

施入量增多而增加,土壤水分蒸发量恰好相反。王增丽等^[13]研究秸秆经过粉碎、氨化预处理后与无机固化剂(硫酸钙)混合施用对黄绵土结构及低吸力段持水特性的影响时指出,无论单施秸秆、单施硫酸钙还是混合施用,相比素土均能提高土壤的持水能力、降低脱水速率。可见,混合改良剂能提高田间持水率,使土体失水变得迟缓。

综上所述,不同类别的土壤改良剂通过自身性质或与土体的相互作用来影响土壤含水率,进而使土水特征曲线发生改变。【切入点】在边坡治理领域,目前学者们对土壤改良剂的研究主要集中于增强边坡土体抗剪抗压强度方面^[14-18],未从水力角度研究土水特征曲线进气值、残余值的变化及对土体抗剪强度的影响。【拟解决的关键问题】系统分析土壤改良剂对土水特征曲线及吸附强度的影响,为采用改良剂治理边坡红壤提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用土取自云南农业大学后山试验基地。地理位置为102°44'57" E、25°7'44" N,海拔1 930 m;属亚热带季风气候,年降水量900~1 000 mm,年平均气温14.2℃,年日照时间2 393 h;土壤为红壤土,肥力中等。土壤基本物理性质指标见表1。

表1 土样基本物理性质指标

Table 1 Basic physical property index of soil samples

水分特征				不同粒径土颗粒质量分数/%			最大干密度/(g cm ⁻³)
风干含水率/%	最优含水率/%	液限/%	塑限/%	<0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm	
6.00	32.00	53.28	24.63	56.67	28.59	14.74	1.43

土壤改良剂在固化剂类和纤维类分别选用糯米胶、木纤维。糯米胶是以糯米淀粉、玉米或小麦淀粉等为主要原料制成的环保胶黏剂,适用范围广,黏性强,黏性系数(12 000±2 000) mpa.s,黏结强度0.55 MPa,剥离强度>9 N/25 mm,由天逸墙纸用品有限公司生产。木纤维是一种天然植物纤维,具有不规则的扇形结构,超强的亲水性能,吸湿速度快,吸湿量大,有机质量9%、灰分量8%、pH值为6、纤维长度3~10 mm、横截面直径0.45 mm,平均抗拉强度8.62 MPa,比表面积6.597 cm²/g,由宁国市东南木纤维科技有限公司生产。



图1 土壤改良剂

Fig.1 Soil amendment

1.2 试样制备

试验在昆明市盘龙区云南农业大学水利学院岩土力学实验室内进行。试验制样步骤参考文献[19]。将土体风干碾碎后,过2 mm干筛(保证土内没有石块和杂质,减少后期试验影响),随机抽取6份土样于铝盒内置于烘箱中,算出试验用土的风干含水率。设计素土、单施糯米胶、单施木纤维、混施糯米胶/木纤维4个试验组,3个施用土壤改良剂的试验组再设置3个掺量(以干土的质量百分比计),分别为0.5%、2.5%、5.0%,共10个处理(素土、0.5%胶、2.5%胶、5.0%胶、0.5%纤维、2.5%纤维、5.0%纤维、0.5%混合、2.5%混合、5.0%混合),每个处理重复制样8次,共80个试样。其中,每个处理用于测试基质吸力的土样为4个,用于室内直剪试验的土样4个(制作成饱和状态)。称取一定量的水,将土壤改良剂与红壤土充分拌匀(木纤维在投入土体前,先手工撕成均匀的细丝状,保证木纤维在掺入土体后均匀分布,本试验的木纤维在试验前采用无刀刃的搅拌器代替

手工使木纤维分散均匀), 然后再用塑料防水布盖好密闭 24 h 使土壤水分分布均匀。

采用轻型击实仪 (NX.6-04, 宁曦土壤仪器有限公司, 南京) 制作干密度为 1.4 g/cm^3 的圆柱试样, 试样直径为 102 mm, 高 40 mm。由制样前的初步试验结果可知, 拌合料含水率过低时, 拌合料偏干, 试样不易压实, 有裂隙; 含水率太高则不易控制干密度。反复测试后, 将拌合料多次搅拌使水和土充分混合, 确定拌合料含水率为 17% 左右, 击实次数初步定为 12 次。在此基础上, 采用环刀取样的方法获得试验所需的试样, 环刀尺寸为 $\Phi 61.8 \text{ mm} \times H 20 \text{ mm}$ 。用螺旋式千斤顶缓慢将环刀压入试样约 30 mm, 即环刀顶底面均留余 10 mm, 以便后期切削时能最大限度地保证试样的完整性。压入速率不宜过大, 不宜超过 0.3 mm/s 。将环刀获取的试样表面刮平, 然后放入真空缸内进行抽气饱和, 抽气时间为 6 h, 试样在真空下的浸泡时间不少于 12 h, 以保证试样充分饱和, 使内外含水率均匀分布。

将饱和试样移出置于室内恒温 (22°C) 环境下, 使其在自然状态下蒸发脱湿。考虑到时间因素, 试验过程中采用小型电风扇吹试样表面以加速水分蒸发。转面与试样表面平行, 距离 600 mm。试验过程中定期称量试样质量, 其保持不变时表明脱湿过程完成 (试样前后 2 次质量变化不超过 0.5 g)。最后用塑料薄膜将其密封。

1.3 滤纸法测定土壤基质吸力

测试基质吸力采用接触式滤纸法, 如图 2 (a) 所示。此方法要求接触滤纸和试验土体紧密接触, 二者水分的迁移以液态水的方式进行。同时, 液态水在迁移过程中会将土体中的溶解盐带入到滤纸中, 因此, 接触法不体现溶液渗透吸力的影响。

本试验以图 2(a) 滤纸法试验装置原理^[20]为准则, 遵循水汽平衡规律, 除了在 2 个环刀土样中间夹放 2 张保护层滤纸和 1 张接触式滤纸外, 还在 2 个环刀土样上下处各放 2 张保护层滤纸和 1 张接触式滤纸 (图 2 (b)), 以得到多次重复的接触式滤纸含水率数据。提前进行预试验 (采用素土处理, 重复制样 6 次, 每 2 个土样按图 2 (b) 的装置制作成 1 组, 共 3 组。采集每组上、中、下 3 个位置处的滤纸含水率, 计算各组上-中、中-下的滤纸含水率分异系数 (DV) 以及不同组别间中部滤纸含水率的分异系数。①密封后的滤纸法土样水平放置后的上、中、下 3 张接触式滤纸的含水率离散度较高, 上层和上层、中层和下层的 DV 为 0.063、0.016; 竖立放置后, DV 变为 0.023、0.028。②不用组别间中部滤纸含水率的 DV 为 0.03。本试验方法相比常规方法分异系数更低, 该方法具有可行性。

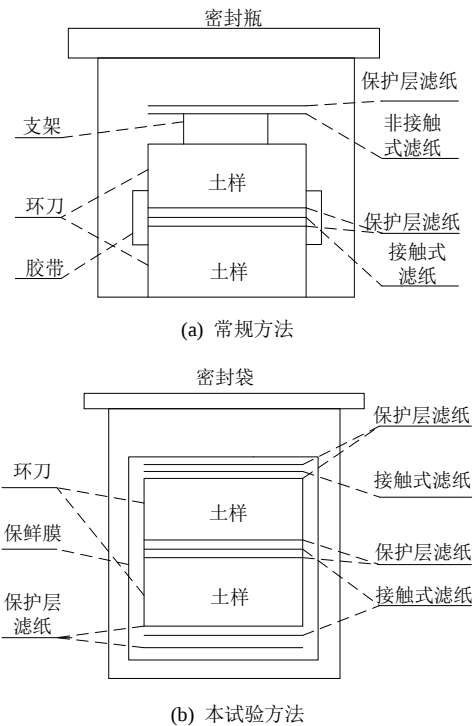


图 2 滤纸法试验装置

Fig.2 Filter paper test device

一般而言, 计算接触滤纸法测量土体土水特征曲线的平衡时间至少是 7 d ^[21]。将直接测得的滤纸质量含水率 (表 3) 结合对应滤纸的率定方程进行计算, 求得试验土体的基质吸力 (表 4)。本次试验所选的滤纸为国产“双圈”牌 No.203 型滤纸, 计算基质吸力时选用的为唐栋等^[22]提出的率定方程:

$$\begin{cases} \lg(\psi) = -0.071w_{fp} + 5.2964, & w_{fp} < 47\% \\ \lg(\psi) = -0.051w_{fp} + 2.6784, & w_{fp} \geq 47\% \end{cases}, \quad (1)$$

式中: ψ 为基质吸力 (kPa); w_{fp} 为滤纸质量含水率 (%)。

1.4 基于土水特征曲线的吸附强度

采用南京土壤仪器厂有限公司生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪进行剪切试验, 剪切速率为 4 r/min 。为了得到完整的抗剪强度曲线, 每个处理试样的 4 级垂直压力取 100、200、300、400 kPa。严格按照规范《土工试验方法标准》的规定进行快剪试验^[23]。

采用库仑公式进行计算, 获得不同改良剂红壤饱和状态的内摩擦角:

$$\tau = \sigma \cdot \tan \varphi + c, \quad (2)$$

式中: τ 为土体抗剪强度 (kPa); σ 为承受的垂直压力 (kPa); φ 为内摩擦角 ($^\circ$); c 为黏聚力 (kPa)。

Fredlund 等^[24]基于连续介质力学理论, 提出了以双应力状态变量 ($\sigma - u_a$) 和基质吸力 ψ 来描述非饱和土的抗剪强度。具体公式为:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b, \quad (3)$$

$$\tau_{\psi} = (u_a - u_w) \tan \phi^b, \quad (4)$$

$$\tan \phi^b = \left(\frac{\theta_v - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi', \quad (5)$$

式中： c' 为饱和土的有效黏聚力（kPa）； ϕ' 为有效内摩擦角（°）； $(\sigma - u_a)$ 为土体破坏时在破坏面上的净法向应力状态（kPa）； τ_{ψ} 为吸附强度（kPa）； $(u_a - u_w)$ 为基质吸力，也可以用 ψ 来表示（kPa）； ϕ^b 为吸附强度随基质吸力 ψ 而增加的速率（°）； $\tan \phi^b$ 为与基质吸力有关的参数； θ_v 为体积含水率（%）； θ_s 为饱和体积含水率（%）； θ_r 为残余体积含水率（%）。

1.5 数据处理与统计分析

采用 Excel 2010 软件和 SPSS 18.0 软件对测定数据进行整理和统计，用单因素方差分析法进行数据间的分析比较，表中数据以平均值±标准误差的形式表达。图 3 采用 Microsoft Visio 2007 软件制作，图 4—图 9 采用 Origin 2018 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 不同改良剂对红壤-土水特征曲线的影响

以基质吸力的对数值作为横坐标，结合试样的体积含水率（表 2）绘制土水特征曲线。如图 3 所示，土水特征曲线被分为 3 个阶段，即：边界效应段、过渡段与非饱和和残余段^[25]，在每个阶段内，曲线的形态

特征各不相同。土水特征曲线主要的特征参数包括饱和含水率 θ_s （Saturated moisture content）、残余含水率 θ_r （Residual moisture content）、进气值 ψ_a （Air entry value）、残余值 ψ_r （Residual value）和斜率 $|k|$ （Slope）。各特征参数具体确定方法为： θ_s 取最大的体积含水率值，成立 $y=\theta_s$ 常数函数；将土水特征曲线过渡段的数据点（如图 4（a）的 3~9 号点），拟合 $y=k_1x+b_1$ 一次函数，斜率 $|k|$ 取 k_1 的绝对值；将土水特征曲线非饱和和残余段的数据点（如图 4（a）的 9~10 号点），拟合 $y=k_2x+b_2$ 一次函数，将 $y=\theta_s$ 与 $y=k_1x+b_1$ 求解得出 ψ_a ；将 $y=k_1x+b_1$ 与 $y=k_2x+b_2$ 求解得出 ψ_r 和 θ_r 。不同处理的计算过程见图 4。

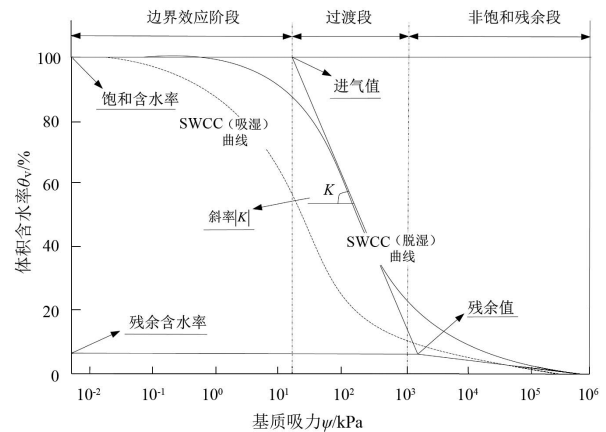


图 3 土水特征曲线（SWCC）示意图

Fig.3 Schematic diagram of SWCC

表 2 不同改良剂红壤的体积含水率

编号	素土	0.5%胶	2.5%胶	5.0%胶	0.5%纤维	2.5%纤维	5.0%纤维	0.5%混合	2.5%混合	5.0%混合
1	38.32±1.29	36.79±1.68	38.10±2.73	38.78±0.81	34.27±1.82	45.32±1.72	41.04±1.79	38.00±2.26	37.64±2.23	36.04±1.35
2	38.02±1.46	36.80±2.23	33.83±4.20	34.21±0.36	33.27±1.63	41.74±1.34	36.57±1.91	34.52±2.77	35.65±2.23	33.96±0.94
3	35.58±1.99	33.78±2.05	29.56±4.38	29.64±0.55	31.53±1.52	38.15±1.77	33.10±1.60	32.05±2.40	33.70±1.95	28.88±0.90
4	32.13±1.54	29.37±1.93	25.29±4.25	25.06±0.66	28.79±1.62	35.57±1.77	30.63±1.55	27.58±2.32	29.75±1.77	23.80±1.03
5	29.19±1.76	25.65±1.82	21.02±3.75	20.49±0.58	26.05±1.49	32.88±1.74	28.17±1.46	24.10±2.23	25.80±1.60	19.72±0.95
6	27.25±1.60	22.93±1.67	16.75±3.52	15.92±0.48	23.32±1.57	29.50±1.71	24.70±1.50	22.63±2.16	21.85±1.53	15.64±1.19
7	23.31±1.71	19.21±1.61	12.48±3.08	11.35±0.69	20.08±1.53	25.81±1.58	20.23±1.40	17.15±2.29	17.91±1.41	11.56±1.11
8	20.07±1.62	14.50±1.50	8.21±2.98	8.77±0.89	17.84±1.54	20.22±1.48	16.76±1.46	13.68±1.88	13.96±1.35	7.48±1.09
9	17.42±1.63	10.78±1.57	7.37±2.81	6.45±0.83	15.10±1.45	18.53±1.32	16.27±1.38	10.27±1.75	10.01±1.23	6.43±1.19
10	17.23±1.55	10.72±1.47	7.04±2.68	6.06±0.93	15.09±1.53	18.04±1.32	15.68±1.27	10.11±1.70	9.58±1.15	6.16±1.12

表 3 不同改良剂红壤的滤纸质量含水率

编号	素土	0.5%胶	2.5%胶	5.0%胶	0.5%纤维	2.5%纤维	5.0%纤维	0.5%混合	2.5%混合	5.0%混合
1	138.98±1.14	136.26±0.18	50.94±0.04	43.35±0.03	138.12±0.97	59.18±0.08	85.09±0.04	85.25±0.08	45.79±0.03	34.35±0.03
2	110.55±0.56	125.59±0.49	42.28±0.04	38.98±0.04	116.11±0.56	43.30±0.09	66.07±0.69	56.96±0.34	38.84±0.06	30.38±0.04
3	77.80±7.54	83.42±0.43	38.33±0.04	36.00±0.08	87.01±7.27	37.07±0.36	44.18±0.76	43.04±0.54	36.34±1.11	26.28±0.06
4	51.52±4.37	60.13±6.54	35.18±0.13	34.44±0.21	50.59±1.71	30.86±0.16	37.65±1.44	37.22±0.82	32.04±1.09	22.27±0.11
5	40.58±1.78	42.64±0.83	32.04±0.14	32.98±0.16	40.43±0.24	24.69±0.30	30.23±1.00	31.08±0.47	27.26±0.22	18.17±0.12
6	33.17±0.54	36.39±0.21	29.09±0.49	31.46±0.25	33.46±0.57	18.49±0.09	22.88±0.38	25.22±0.32	22.88±0.11	14.11±0.02
7	26.63±0.38	30.3±0.61	25.94±0.43	29.84±0.39	26.30±0.18	12.20±0.05	15.87±0.17	18.92±0.09	18.56±0.06	10.14±0.04
8	20.15±0.12	24.13±0.14	19.87±0.09	28.38±0.37	19.26±0.14	6.00±0.05	8.75±0.05	12.79±0.13	14.24±0.08	6.03±0.05
9	13.72±0.05	15.36±0.10	15.63±0.07	23.20±0.38	10.68±0.05	2.24±0.06	4.59±0.05	7.02±0.04	8.52±0.06	2.50±0.04
10	6.28±0.03	10.06±0.02	9.35±0.05	18.87±0.32	7.48±0.05	0.12±0.07	0.11±0.07	0.99±0.06	5.70±0.05	0.24±0.07

表 4 不同改良剂红壤的基质吸力

编号	素土	0.5%胶	2.5%胶	5.0%胶	0.5%纤维	2.5%纤维	5.0%纤维	0.5%混合	2.5%混合	5.0%混合
1	3.94±0.15	4.31±0.03	82.10±0.13	165.43±0.73	4.05±0.14	61.76±0.17	25.24±0.03	25.10±0.07	111.05±0.53	720.80±3.51
2	10.48±0.20	6.24±0.10	197.15±1.26	337.81±2.40	8.65±0.17	166.88±2.52	48.74±1.15	42.36±0.95	346.01±3.35	1 378.21±9.46
3	37.80±8.35	26.75±0.40	375.77±2.28	550.62±7.15	27.23±5.86	465.42±26.59	150.03±17.94	177.36±15.38	561.86±93.06	2 696.00±25.63
4	107.78±21.17	72.05±5.33	630.13±12.94	711.88±24.49	85.36±5.66	1 277.31±33.65	476.81±98.06	470.42±60.02	1 133.04±185.89	5 195.62±96.47
5	313.52±75.61	194.34±25.06	1 052.07±24.16	903.21±23.06	267.56±10.41	3 515.09±169.73	1 505.77±227.22	1 248.01±94.12	2 301.68±83.28	10 162.87±202.01
6	890.72±76.29	517.99±18.03	1 728.37±136.92	1 160.07±47.66	850.86±77.71	9 634.38±148.53	4 743.62±292.58	3 225.97±160.92	4 698.93±83.23	19 705.45±53.77
7	2 569.75±156.79	1 430.6±137.19	2 882.15±98.11	1 520.70±95.64	2 689.91±79.64	26 941.88±221.53	14 802.58±403.25	8 987.54±128.66	9 522.99±100.06	37 695.86±232.22
8	7 342.43±141.53	3 832.72±89.59	7 694.45±12.71	1 930.09±116.23	8 495.22±189.31	74 176.88±646.99	47 330.86±414.46	24 464.86±497.68	19 315.21±259.71	73 893.52±556.49
9	20 995.48±185.07	16 066.71±259.14	15 361.89±165.69	4 503.47±279.75	34 545.98±275.05	137 341.24±1 419.34	93 458.74±776.43	62 855.09±418.47	49 180.58±508.21	131 497.69±938.94
10	70 863.85±321.81	38 216.45±94.39	42 928.92±372.46	9 117.98±474.24	58 251.58±528.35	194 251.41±2 294.39	194 303.88±2 261.98	168 370.87±1 601.74	77 912.17±598.75	190 445.96±2 351.93

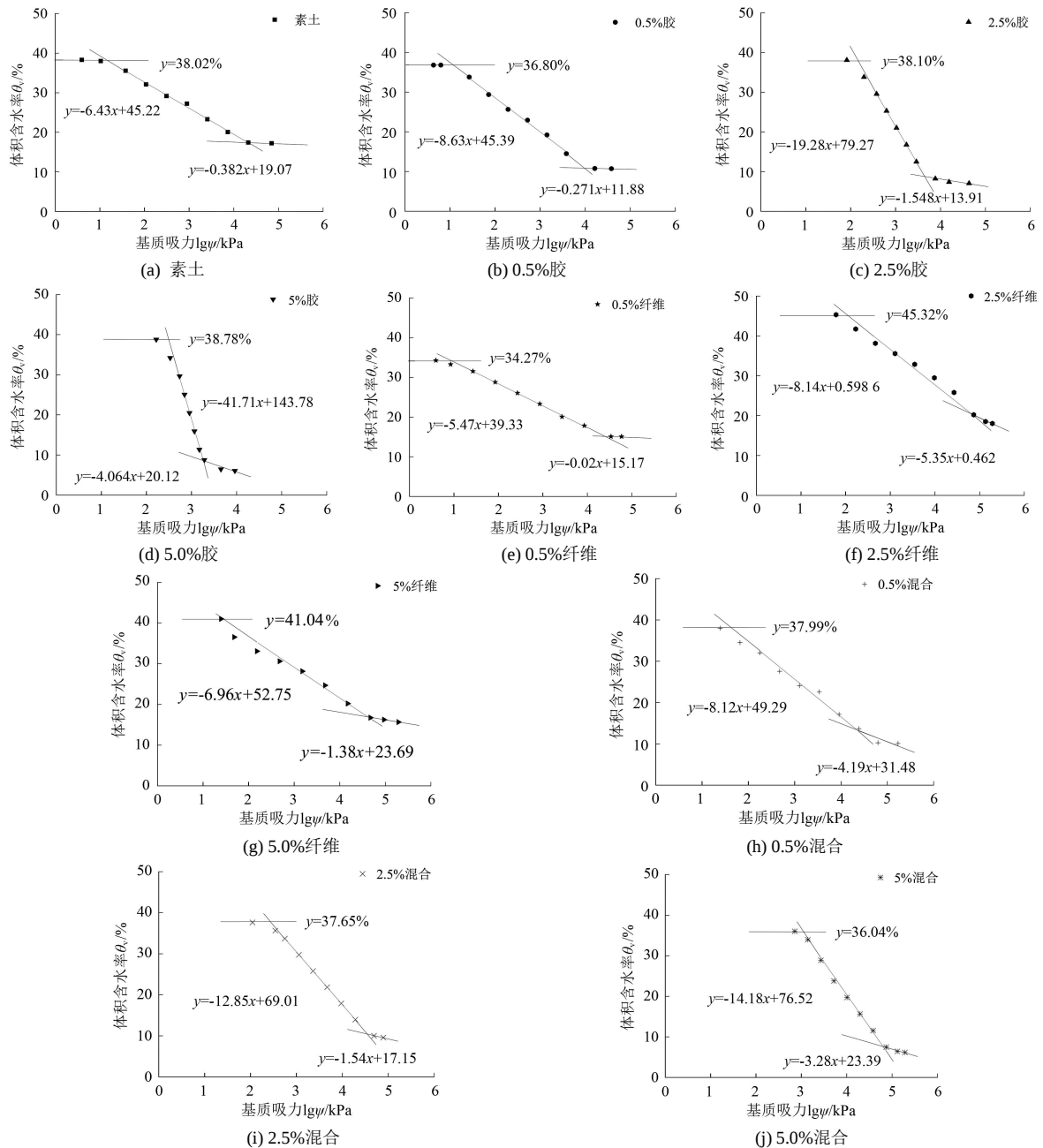


图 4 试样土水特征曲线及特征参数

Fig.4 Soil-water characteristic curves and characteristic parameters of the sample

2.1.1 不同改良剂红壤饱和含水率

饱和含水率 θ_s 指当土体达到饱和时, 土体内的孔隙全部充满水, 孔隙水是连续且均匀分布的, 此时土

体内的基质吸力值降到 0。饱和含水率是 SWCC 曲线中边界效应阶段对应的最高体积含水率^[26]。不同改良剂红壤的饱和含水率见图 5。

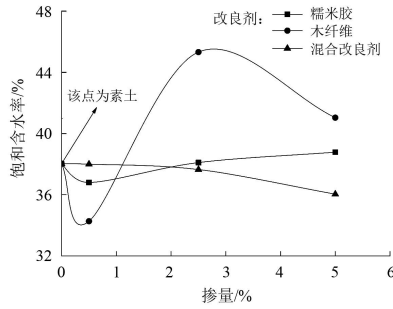


图 5 不同改良剂红壤的饱和含水率

Fig.5 Saturated moisture content of red soil with different modifiers

糯米胶量为 0.5% 时的 θ_s 为 36.8%，低于素土的 38.02%；而其量为 2.5%~5.0% 时的 θ_s 在 38.1%~38.8% 之间，均高于素土；且其量为 5.0% 时最高。饱和含水率随其量增加逐渐增高，其量为 0.5% 时略低。这是因为少量的胶性物质加入土中，在土体中分布不均匀，会粘结胶性物质周围的土粒，使得土体内未分布有胶性物质的区域结构受到破坏，土体孔隙扩大，持水能力降低。而随着胶量的增加，胶性物质在土体内逐渐分布匀称，胶性物质与土粒的接触面增加，逐渐黏结或包裹土粒，土体结构稳定^[27]。此外，胶性物质本就是一种能与水汽发生液化反应的物质，具有吸水性，故能提高饱和含水率^[28]。

木纤维量为 0.5% 时的 θ_s 为 34.27%，远低于素土；而其量为 2.5%~5.0% 时的 θ_s 在 41%~45.3% 之间，均远高于素土；其量为 2.5% 时最高。木纤维随其量增加，饱和含水率先低后高，掺量过高时反而有下降趋势。这是因为木纤维属于丝状纤维物质，表面积比较高，与土粒接触并咬合在一起，由于其量低，在土体的分布也不够均匀，致使土体裂隙发育，持水能力下降。而纤维量增加，土体受纤维交叉束缚作用，结构稳定，加之木纤维也具有亲水性，土体饱和含水率增高。但纤维量过高时，纤维在土体内穿插重叠，隔断了土粒，形成了新的孔隙通道，相对于土粒形成的孔隙会更加笔直通畅，利于水分的流通，导致饱和含水率下降^[10]。

混合改良剂量为 0.5%~5.0% 时的 θ_s 在 36%~38% 之间，与素土相比，呈逐渐下降趋势。这可能是因为胶性物质包裹了木纤维和土粒，胶性物质吸水膨胀，致使土体内的孔隙缩小或被堵塞，饱和含水率下降。

总的来看，糯米胶和木纤维均会影响土体结构，胶和纤维具有亲水性，木纤维会提高饱和含水率，其次是糯米胶，混合改良剂反而会降低饱和含水率。

2.1.2 不同改良剂红壤残余含水率

残余含水率 θ_r 指当土体内的水分逐渐减少，基质吸力不再是影响土体排水的主要因素时对应的体积

含水率。不同改良剂红壤的残余含水率见图 6。

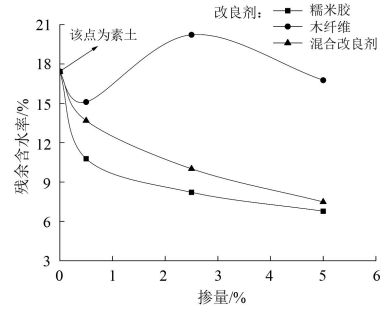


图 6 不同改良剂红壤的残余含水率

Fig.6 Residual moisture content of red soil with different modifiers

糯米胶量为 0.5%~5.0% 时的 θ_r 在 6.7%~10.8% 之间，低于素土的 17.42%，呈逐渐下降趋势。这是因为土体在脱湿过程中，胶性物质也逐渐失水，慢慢黏结固化并依附在土粒的表面，使土体孔隙逐渐扩大，释放水流通路，水分逐渐散失^[7,29]，相比素土较快。

木纤维量为 0.5%、2.5%、5.0% 时的 θ_r 分别为 15.1%、20.22%、16.76%，除其量为 2.5% 的 θ_r 高于素土，其余均低于素土，呈先低后高再低的趋势。这是因为木纤维量低时，木纤维导致土体结构的破坏，大孔隙增多，土体失水加快。而其量在 2.5% 左右时，土体结构稳定，但由于木纤维具有亲水性，不易失去水分，残余含水率增高。木纤维量增加至 5.0% 时，水流通路有曲变直，残余含水率降低。

混合改良剂量为 0.5%~5.0% 时的 θ_r 在 7.5%~13.7% 之间。低于素土，介于糯米胶和木纤维之间，整体呈下降趋势。这主要是胶性物质失水固化，促进了孔隙的发育，由小孔隙形成大孔隙，致使残余含水率下降。

总的来看，胶性物质对土体孔隙结构的改变较大，进而影响残余含水率发生改变，纤维只有在较低或较高掺量时才会降低残余含水率，反之增高。

2.1.3 不同改良剂红壤进气值

进气值 ψ_a 代表着土体产生减饱和所必须达到的水气压力差。当基质吸力大于进气值后，土体的含水率会随着吸力的进一步增大而大幅下降，这表明土体开始进入减饱和过程。进气值见图 7。

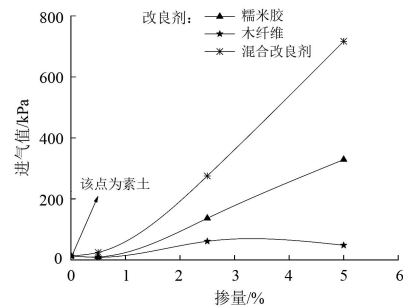


图 7 不同改良剂红壤的进气值

Fig.7 Air entry values of red soil with different modifiers

糯米胶量为 0.5% 时的 ψ_a 为 9.89 kPa，低于素土

的 13.19 kPa, 而 2.5%~5.0% 的 ψ_a 为 136.37~328.85 kPa 之间, 高于素土, 呈先弱后强的趋势。这是因为胶性物质掺量较低时, 破坏了土体孔隙结构, 大孔隙增多, 水气凹液面平缓, 水气压力减弱, 气体易进入土体。而胶量增加时, 胶性物质吸水涨大, 孔隙由大变小, 水气凹液面压缩, 水气压力增强, 气体不易进入土体。

木纤维量为 0.5%、2.5%、5.0% 时的 ψ_a 分别为 8.43、61.01、48.09 kPa, 除 0.5% 的 ψ_a 低于素土, 其余均高于素土, 呈先减弱后增强再减弱的趋势。基质吸力是由非饱和土中水气界面引起的, 水气交界面也被认为是非饱和土中的独立第四相^[24]。这是因为木纤维量较低时, 土体孔隙结构受到不均匀的拉扯力而破坏, 大孔隙甚至裂隙发育形成, 水气凹液面平缓且薄弱, 水气压差变小^[30]。而掺量增加时, 木纤维填充在土粒间的孔隙内, 将大孔隙分隔成多个小孔隙, 小孔隙增多促使水气压差变大。但掺量过高时, 木纤维相互重叠, 会减小水气凹液面的接触角, 水气压力减弱^[31-32]。

混合改良剂量为 0.5%~5.0% 时的 ψ_a 在 24.63~716.73 kPa 之间, 均高于素土, 呈逐渐上升的趋势。这可能是因为胶和纤维的相互作用, 加快了土体小孔隙的发育形成, 小孔隙占比提高, 水气压力增强, 气体很难进入孔隙。

总的来看, 随掺量增加, 3 种改良剂均能提高进气值, 混合最强, 其次是糯米胶, 最后是木纤维。木纤维过多对进气值存在负效应。

2.1.4 不同改良剂红壤残余值

残余值 ψ_r 是指能够使水体进入土颗粒间的孔隙所对应的基质吸力值^[26]。残余值见图 8。

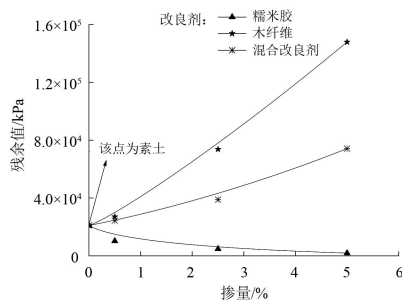


图 8 不同改良剂红壤的残余值

Fig.8 Residual values of red soil with different modifiers

糯米胶量为 0.5%~5.0% 时 ψ_r 在 1 924.51~10 288.84 kPa 之间, 低于素土的 21 064.56 kPa, 呈逐级递减的趋势。这是因为胶性物质在脱水过程中, 体积逐渐收缩固化, 土体孔隙结构发生改变, 由小变大, 水气凹液面由凹变缓, 由厚变薄, 水气压力差值变小, 水分子易进入土体, 排出气体。

木纤维量为 0.5%~5.0% 时 ψ_r 在 27 074.80~147 857.90 kPa 之间, 高于素土, 呈逐级递增的趋势。这是因为木纤维加入土体后, 使土体原有的孔隙被分隔, 孔隙

由大变小、由小变微, 微小孔隙的形成促使水气压力差值变大。另外, 在脱水过程中, 纤维对土体结构起到稳定作用, 而素土物质单一, 结构受到水气接触面的张力作用发生破坏^[30], 所以其量为 0.5% 的残余值也高于素土。

混合改良剂量为 0.5%~5.0% 时 ψ_r 在 24 417.27~74 134.60 kPa 之间, 高于素土, 呈逐级递增的趋势。这是因为在脱湿过程中, 胶性物质在收缩, 孔隙本该扩大, 但由于木纤维的分隔作用, 扩大的孔隙级数受到约束, 水气压力差值介于糯米胶和木纤维之间。

总的来看, 糯米胶会降低土体残余值, 木纤维反而增加残余值, 混合改良剂介于二者之间且高于素土。

2.1.5 不同改良剂红壤斜率

斜率 $|k|$ 指 SWCC 脱湿时的水分散失速率, 即土-水特征曲线下下降段的快慢程度, 反映了土体的脱水速率和持水性能。土水特征曲线的 3 个阶段对应有 3 个不同的斜率, 过渡段的斜率值一般最大, 是土水特征曲线的主要特征参数之一^[2]。斜率见图 9。

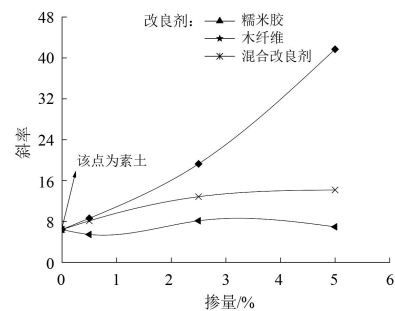


图 9 不同改良剂红壤的斜率

Fig.9 Slope of red soil with different modifiers

糯米胶量为 0.5%~5.0% 时的 $|k|$ 在 8.63~41.71 之间, 高于素土的 6.43, 呈逐渐增大的趋势。这说明胶量越多, 土体失水速率越快。这与胶对土体孔隙结构的影响有关。

木纤维量为 0.5%、2.5%、5.0% 时的 $|k|$ 分别为 5.47、8.14、6.96, 除 0.5% 外, 其余掺量的 $|k|$ 值均高于素土。这说明木纤维量增多, 有利于土体水分散失。

混合改良剂量为 0.5%~5.0% 时的 $|k|$ 在 8.12~14.18 之间, 高于素土, 呈缓慢增大的趋势。这说明混合改良剂越多, 土体失水速率越快; 但其量过高时, 失水速率变缓。

总的看来, 糯米胶能加快土体水分的散失, 混合改良剂次之, 最后是木纤维。

2.2 不同改良剂对红壤吸附强度的影响

ϕ^b 与体积含水率的界限值 (θ_s 、 θ_r) 有关。为了使不同改良剂红壤的吸附强度 τ_v 具有可比性, 我们以不同改良剂红壤的 θ_s 最小值作为上限、 θ_r 最大值作为下限, 采取平均梯度划分的方式, 划分为 5 个 θ_v , 选取中间的 3 个进行计算与比较分析, 详见表 5。

表 5 体积含水率选取

Table 5 Volume moisture content selection

处理	饱和含水率 θ_s	残余含水率 θ_r	划分及选取含水率 θ_v
素土	38.02	17.42	34.27
0.5%胶	36.80	10.78	
2.5%胶	38.10	8.21	
5.0%胶	38.78	6.77	30.76
0.5%纤维	34.27	15.10	
2.5%纤维	45.32	20.22	
5.0%纤维	41.04	16.76	27.25
0.5%混合	38.00	13.68	
2.5%混合	37.65	10.01	
5.0%混合	36.04	7.48	20.22

有学者对黏土、粉土、页岩等多种土进行土体剪切破坏试验研究 ϕ^b 的变化趋势，结合近年来一些试

表 6 不同改良剂红壤不同体积含水率的吸附强度 τ_ψ

Table 6 Adsorption intensity of different volume moisture content of red soil with different amendments

处理	内摩 擦角 ϕ (°)	$\theta_v=30.76\%$			$\theta_v=27.25\%$			$\theta_v=23.73\%$		
		ψ/kPa	$\phi^b/(\text{°})$	τ_ψ/kPa	ψ/kPa	$\phi^b/(\text{°})$	τ_ψ/kPa	ψ/kPa	$\phi^b/(\text{°})$	τ_ψ/kPa
素土	20.85	177.51	13.85	43.77	624.44	10.30	113.42	2 196.63	6.66	256.32
0.5%胶	13.96	49.61	10.81	9.47	126.63	8.94	19.92	323.27	7.05	40.01
2.5%胶	11.40	328.25	8.65	49.94	499.34	7.32	64.14	759.58	5.98	79.56
5.0%胶	6.78	512.53	5.09	45.66	622.21	4.35	47.32	755.35	3.60	47.59
0.5%纤维	18.80	36.91	15.54	10.26	161.93	12.17	34.92	710.33	8.72	108.89
2.5%纤维	17.57	3760.5	7.57	499.81	10 156.8	5.06	899.82	27 432.65	2.54	1 214.59
5.0%纤维	15.09	1 444.91	8.84	224.66	4 618.61	6.64	537.90	14 763.22	4.43	1 143.28
0.5%混合	11.61	191.57	8.21	27.63	518.68	6.54	59.42	1 404.35	4.85	119.23
2.5%混合	7.18	948.09	5.40	89.61	1 779.08	4.49	139.68	3 338.42	3.58	208.69
5.0%混合	4.18	1 687.55	3.41	100.41	2 985.14	2.89	150.81	5 280.47	2.38	219.36

总的来看，不同改良剂红壤随体积含水率降低，基质吸力增加， ϕ^b 减小，吸附强度增大。在 30.8%~23.7% 体积含水率区间，添加纤维能有效增大吸附强度，而添加糯米胶对提高吸附强度的作用不大。

3 讨论

3.1 不同改良剂对土水特征曲线的影响

糯米胶具有亲水性，加入土体后会发生糊化反应，糯米淀粉分子间以及分子内部氢键逐渐断裂继而与土体中的水分子重新形成氢键，使得淀粉分子逐渐与水分子结合，糯米胶粒体积增大，分子结构无序性增强，最终分散成糊状^[34]。这使得在边界效应阶段，土体中的糯米胶会吸水膨胀，土体中的孔隙会被挤压，糯米胶量越高，则表现得越明显。另外糯米胶具有收缩性^[35]。范文军等^[36]采用糯米浆进行固化遗址土吸水与失水特性研究时还指出其体积收缩与其失水过程保持一致，糯米浆会增大体积收缩率。适量的糯米浆使得土体的孔隙尺寸变小，但过多的糯米浆反而会抑制土体其他反应而造成土体的孔隙尺寸增大。这使得在过渡段、非饱和残余段，糯米胶会失水收缩，为土体水分运移提供了更佳的孔隙通道。孙沛然等^[37]研究含水率对糯米淀粉的结构的影响，其观点与本研究一

致：随着含水率的提高，糯米淀粉的粒度增大，比表面积增大，孔径减小。当含水率较低时，淀粉颗粒发生压缩塑化，结晶结构增强。

木纤维具有不规则的扇形结构，具备超强的亲水性能。王增丽等^[13]将麦秸秆纤维粉碎成 1 mm 和 20 mm 的 2 个水平进行黄绵土低吸力段持水性研究时，表明粉碎秸秆可提高土壤饱和含水率上限。1 mm 比 20 mm 更能提高土壤持水能力。王珍等^[10]研究同样发现粉碎秸秆在低吸力段对土壤持水能力的提高作用明显高于长秸秆。本研究采用的木纤维长度为 3~10 mm，横截面直径 0.45 mm，可见木纤维在持水能力上具有一定优势。木纤维的持水能力亦反映出木纤维改变了土体的基质吸力。土体孔隙变化是引起基质吸力变化的原因之一。王增丽等^[13]指出秸秆施入土壤使土壤孔隙连通性降低。这也说明纤维加入土体会改变原有的土壤孔隙。王珍等^[10]指出 ≤ 1 mm 的粉碎秸秆及 20 mm 长秸秆处理均易造成早期失水过程中脱水速度过快，推断是秸秆本身也可以作为土壤中水分流通的通道。而本研究却发现土体加入木纤维后，土水特征曲线的斜率值只是略高于素土，而远远小于糯米胶、混合改良剂。这可能与纤维自身的结构性状有关：与秸秆纤维相比，木纤维形状更加不规则，表面积巨

大,其吸附能力更强。而掺量过多时,木纤维的持水能力则会减弱。肖兴艳等^[9]将掺入量设为5.0%时,也发现与对照相比,秸秆处理的土壤含水率则有所降低,其保水效果减弱。

本研究采用的混合改良剂为糯米胶、木纤维,均为有机材料。在边界效应阶段,糯米胶与木纤维均会吸水膨胀,使土体结构越发致密,掺入量越多,孔隙越少。冯瑞云等^[12]采用有机(秸秆)+有机(聚丙烯酰胺)进行研究时,指出改良剂刚开始施入土壤时,没有充分吸收水分,保水效应未完全发挥;在一定时间后,改良剂吸水膨胀,对土壤的结构变化产生作用,土壤开始变的疏松。张燕等^[11]采用有机(秸秆)+无机(建筑垃圾)研究时,指出改良剂会溶胀,吸水速率高于对照,失水速率慢于对照。这与本研究的表观一致,但结果有所差别。这是因为本研究的试样体积是固定的,混合改良剂吸水后反而阻塞了土壤孔隙,外部的水分难以进入,饱和含水率较低,这也使得水气交换变得困难,土体进气值远高于素土。

3.2 不同改良剂对土体吸附强度的影响

不同改良物质对土体内部结构的影响机理不一。固化剂进入土体后主要发生气态、液化等化学反应,黏结作用最为突出^[14];纤维类进入土体后主要发生交织、缠绕等物理反应,束缚作用较为普遍^[16]。本研究发现掺有同一掺量的改良剂饱和土体,其内摩擦角表现为:木纤维>糯米胶>混合改良剂,且掺量越高,内摩擦角越小。这与熊寿德等^[38]采用相同木纤维进行抗剪强度研究的结果一致。推断是木纤维与土粒的接触、咬合作用相对土粒之间要小得多。孙沛然等^[37]采用电镜扫描进行糯米淀粉含水率研究时,得出含水率过高,淀粉颗粒表面变得光滑。颗粒间的相互作用机会减小,颗粒膨胀程度较大,但不互相黏连,颗粒丧失自身的完整性。这与本研究的结论一致。糯米胶在高含水率时,其胶黏作用未得到有效发挥,反而会软化土体结构。混合改良剂可能是因为在高含水率时糯米胶包裹住了木纤维,间隔土粒,以致失去了咬合作用。这说明采用改良剂改善土壤坡面结构时,特别要注意坡面含水率的控制。

4 结 论

1)糯米胶能提高土体饱和含水率、进气值、斜率,减小残余含水率、残余值;木纤维能增加饱和含水率、进气值、残余值,斜率接近素土,适当的掺量可以增加残余含水率,反之减小;混合改良剂能增加进气值、残余值、斜率,减小饱和含水率、残余含水率。

2)不同改良剂红壤随 θ_v 降低, ψ 增加, τ_{ψ} 增大, ϕ^b 值减小。木纤维能有效增大吸附强度,糯米胶对提

高吸附强度的作用不大。混施糯米胶和木纤维介于二者之间。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- [1] 何秋奇. 基于土水特征曲线的非饱和橡胶颗粒改良粉煤灰土强度研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
HE Qiuqi. The study on strength in unsaturated fly ash soil modified by rubber crumbs based on the soil-water characteristic curve[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [2] 黄英, 程富阳, 金克盛. 干湿循环下云南非饱和红土土水特性研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 97-106.
HUANG Ying, CHENG Fuyang, JIN Kesheng. Study on soil-water characteristics of unsaturated Yunnan laterite under wet-dry cycle[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(6): 97-106.
- [3] 朱咏莉, 刘军, 王益权. 国内外土壤结构改良剂的研究利用综述[J]. 水土保持学报, 2001, 15(S2): 140-142.
ZHU Yongli, LIU Jun, WANG Yiquan. Summary of soil structure conditioners utilization[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(S2): 140-142.
- [4] 潘英华, 雷廷武, 谷晓岩. 坡地间隔覆盖配施土壤改良剂的实用性研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(3): 187-191.
PAN Yinghua, LEI Tingwu, GU Xiaoyan. Study on practicability of interval coverage combined with soil conditioner on slope land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(3): 187-191.
- [5] 贾栋钦, 裴向军, 张晓超, 等. 改性糯米灰浆固化黄土的微观机理试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(6): 90-96.
JIA Dongqin, PEI Xiangjun, ZHANG Xiaochao, et al. A test study of the microscopic mechanism of modified glutinous rice mortar solidified loess[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(6): 90-96.
- [6] 吴军虎, 任敏. 羟丙基甲基纤维素作土壤改良剂对土壤溶质运移的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 141-147.
WU Junhu, REN Min. Effect of hydroxypropyl methyl cellulose as soil modifier on solute migration in soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(5): 141-147.
- [7] 吴军虎, 陶汪海, 王海洋, 等. 羧甲基纤维素钠对土壤团粒结构及水分运动特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 117-123.
WU Junhu, TAO Wanghai, WANG Haiyang, et al. Influence of sodium carboxyl methyl cellulose on soil aggregate structure and soil water movement[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(2): 117-123.
- [8] 李崇清, 刘清秉, 项伟, 等. SH 固化剂复配无机材料加固黄土抗侵蚀试验研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(8): 90-94, 101.
LI Chongqing, LIU Qingbing, XIANG Wei, et al. Anti-erodibility of loess subgrade slope reinforced with SH-polymer and inorganic material[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(8): 90-94, 101.
- [9] 肖兴艳, 张雷一, 刘方, 等. 两种土壤改良剂对3种牧草生长及土壤含水量的影响[J]. 草业科学, 2015, 32(11): 1 887-1 891.
XIAO Xingyan, ZHANG Lei, LIU Fang, et al. Effects of soil conditioners on growth of different forage species and soil moisture in Karst region[J]. Pratacultural Science, 2015, 32(11): 1 887-1 891.
- [10] 王珍, 冯浩, 吴淑芳. 秸秆不同还田方式对土壤低吸力段持水能力及蒸发特性的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 533-539.
WANG Zhen, FENG Hao, WU Shufang. Effect of different straw-incorporation methods on soil water retention capacity and evaporation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(3): 533-539.
- [11] 张燕, 冯浩, 汪有科, 等. 新型土壤结构改良剂水分特性及其对玉米苗期的影响研究[J]. 节水灌溉, 2008(5): 6-9.

- ZHANG Yan, FENG Hao, WANG Youke, et al. Preliminary research on moisture characteristic of new soil conditioner and its influences on seeding stage of corn[J]. *Water Saving Irrigation*, 2008(5): 6-9.
- [12] 冯瑞云, 王慧杰, 郭峰, 等. 秸秆型土壤改良剂对土壤结构和水分特征的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(9): 44-48, 65.
- FENG Ruiyun, WANG Huijie, GUO Feng, et al. Effects of modified straw soil amendment on soil structure and water characteristics[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(9): 44-48, 65.
- [13] 王增丽, 冯浩, 方圆. 麦秸预处理方式对黄绵土结构及低吸力段持水性的影响[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(7): 56-62, 72.
- WANG Zengli, FENG Hao, FANG Yuan. Effect of pretreated wheat straw on soil aggregate and water-holding capacity within low suctions in loess soil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(7): 56-62, 72.
- [14] 尚应妮, 胡斐南, 赵世伟, 等. 不同胶结物质对黄绵土团聚体形成的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 204-208, 239.
- SHANG Yingni, HU Feinan, ZHAO Shiwei, et al. Effects of cementing materials on the formation of loessial soil aggregates[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2): 204-208, 239.
- [15] LIU J F, SU Y H. Analyses of the strength characteristics of solidified desert aeolian sandy soil[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, 2017, 11(2): 32-36.
- [16] 胡小庆, 洪柳, 徐光黎, 等. 纤维含量及长度对纤维加筋土强度的影响研究[J]. *安全与环境工程*, 2015, 22(2): 139-143.
- HU Xiaoqing, HONG Liu, XU Guangli, et al. Impacts of fiber content and fiber length on the strength and deformation of fiber reinforced soil[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2015, 22(2): 139-143.
- [17] 刘月梅. EN-1 固化剂对黄土性土壤与黑麦草的效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- LIU Yuemei. Effect of EN-1 ionic stabilizer on loess soil and ryegrass[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2013.
- [18] TANG C S, SHI B, GAO W, et al. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, 25(3): 194-202.
- [19] 吴珺华, 杨松. 滤纸法测定干湿循环下膨胀土基质吸力变化规律[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(15): 126-132.
- WU Junhua, YANG Song. Changes of matric suction in expansive soil under drying-wetting cycles using filter paper method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(15): 126-132.
- [20] MARINHO FERNANDO A M, OLIVEIRA ORLANDO M. The filter paper method revisited[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2006, 29(3): 250-258.
- [21] SPOSITO G. The thermodynamics of soil solutions[M]. Oxford: Oxford University Press, 1981.
- [22] 唐栋, 李典庆, 金浩飞, 等. 国产“双圈”牌滤纸吸力率定曲线研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2016, 49(1): 1-8, 53.
- TANG Dong, LI Dianqing, JIN Haoifei, et al. Research on calibration curves of home-made “Double Circle” filter papers[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2016, 49(1): 1-8, 53.
- [23] 南京水利科学研究院. 中华人民共和国行业标准: 土工试验方法标准 GB/T50123—1999. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [24] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R. Stress state variables for unsaturated soils[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1977, 103(5): 447-466.
- [25] 姚攀峰. 再论非饱和土的抗剪强度[J]. *岩土力学*, 2009, 30(8): 2 315-2 318.
- YAO Panfeng. Discussion on shear strength of unsaturated soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2 315-2 318.
- [26] 李兆瑞. 合肥地区重塑膨胀土土水特征曲线研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2018.
- LI Zhaorui. Study on soil-water characteristic curve of remolded expansive soil in Hefei area[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2018.
- [27] 马征, 董晓霞, 张柏松. 不同保水剂对土壤团聚体组成及微生物量碳、氮的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(5): 122-128.
- MA Zheng, DONG Xiaoxia, ZHANG Bosong. Effects of different kinds of super absorbent polymers on distribution and stability of clay soil aggregate and soil microbial biomass C, N[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(5): 122-128.
- [28] 李云仙, 郑志锋, 徐娟, 等. 混合淀粉保水剂的制备及保水性能研究[J]. *西南林业大学学报*, 2016, 36(4): 171-174.
- LI Yunxian, ZHENG Zhifeng, XU Juan, et al. Study on preparation and water retention property of mixed starch water retaining agent[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2016, 36(4): 171-174.
- [29] 程冬兵, 蔡崇法, 彭艳平, 等. 根据土壤粒径分形估计紫色土水分特征曲线[J]. *土壤学报*, 2009, 46(1): 30-36.
- CHENG Dongbing, CAI Chongfa, PENG Yanping, et al. Estimating soil water retention curve based on fractal dimension of soil particle size distribution of purple soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1): 30-36.
- [30] 杨松, 吴珺华, 黄剑峰. 表面张力与接触角对膨胀土干缩开裂影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(9): 1 645-1 652.
- YANG Song, WU Junhua, HUANG Jianfeng. Effects of pore water surface tension and contact angle on dry-shrinkage cracking of expansive soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(9): 1 645-1 652.
- [31] CZACHOR H, DOERR S H, LICHNER L. Water retention of repellent and subcritical repellent soils: New insights from model and experimental investigations[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 380(1/2): 104-111.
- [32] 杨松, 龚爱民, 吴珺华, 等. 接触角对非饱和土中基质吸力的影响[J]. *岩土力学*, 2015, 36(3): 674-678.
- YANG Song, GONG Aimin, WU Junhua, et al. Effect of contact angle on matric suction of unsaturated soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(3): 674-678.
- [33] FREDLUND D G, RAHARDJO H, 陈仲颐. 非饱和土土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [34] 李温静, 尹玉云. 浅谈糯米淀粉的性状及应用[J]. *粮食与食品工业*, 2017, 24(3): 29-34.
- LI Wenjing, YIN Yuyun. Brief introduction on characteristics and applications of glutinous rice starch[J]. *Cereal & Food Industry*, 2017, 24(3): 29-34.
- [35] 胡悦, 魏国锋, 方世强, 等. 骨料种类对糯米灰浆性能的影响[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(3): 134-140.
- HU Yue, WEI Guofeng, FANG Shiqiang, et al. Influence of aggregate type on the properties of traditional sticky rice-lime mortar[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(3): 134-140.
- [36] 范文军. 糯米浆-石灰复合材料固化遗址土吸水与失水特性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- FAN Wenjun. Study on water absorption and water loss characteristics of soil consolidated by sticky rice-lime composites for earthen site[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [37] 孙沛然, 姜斌, 沈群. 水分含量对籼米和糯米淀粉颗粒结构的影响[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(3): 40-49.
- SUN Peiran, JIANG Bin, SHEN Qun. Effect of different moisture content on the structure of indica rice and glutinous rice starch granules[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015, 15(3): 40-49.
- [38] 熊寿德, 段青松, 刘武江, 等. 加筋率和含水率对木纤维红黏土边坡稳定性的影响[J]. *农业工程*, 2021, 11(9): 55-60.
- XIONG Shoude, DUAN Qingsong, LIU Wujiang, et al. Influence of wood fiber reinforcement ratio and moisture content on stability of red clay slope[J]. *Agricultural Engineering*, 2021, 11(9): 55-60.

The Effect of Soil Conditioners on Water Characteristic Curves and Adsorption Strength of Red Loam Soil

LIU Wujiang¹, DUAN Qingsong², YANG Song²,
XIONG Shoude³, BAO Ruiqin⁴, LI Liyang⁵, ZHANG Chuan^{2,6*}

(1. Yunnan Academy of Agricultural Engineering, Kunming 650215, China; 2. College of Hydraulic Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3. Yunnan Geological Engineering Survey and Design Research Institute Limited Company, Kunming 650041, China; 4. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 5. Yunnan Yuanke Land Consolidation and Rehabilitation and Planning & Design Limited Company, Kunming 650201, China; 6. Research Center for Transition Development and Rural Revitalization of Resource-based Cities in China, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: 【Objective】 Amending degraded soils with soil conditioners is a technique widely used to improve soil quality. Different conditioners are commercially available but their effect on soil release curve is less understood. The purpose of this paper is to compare change in water characteristic curves of a red loam soils amended using different soil modifiers. 【Method】 The soil was amended by glutinous rice gum, wood fiber, and their mixture at different ratios. We measured the change in matrix suction (ψ) and volumetric soil water content (θ_v) of each soil sample. The internal friction angle (φ) of the soil at saturation was determined using the direct shear test method, from which we calculated the adsorption strength (τ_ψ) of the soil using the Fredlund double stress variable shear strength. 【Result】 ① Glutinous rice gum and wood fiber both increased the saturated soil water content (θ_s), while their mixture reduced θ_s . Glutinous rice gum and its mixture with wood fiber reduced the residual soil water content (θ_r), while the wood fiber working alone only reduced the residual water content when the amendment ratio was low or high. All three modifiers increased the air-entry value (ψ_a), with the increase ranked in the order of the mixture > glutinous rice gum > wood fiber. Glutinous rice gum reduced the residual matric potential (ψ_r), while the wood fiber increased ψ_r , with the mixture in the between with its ψ_r higher than that of the non-amended soil. The matric potential decreased fastest as soil water content increased in the glutinous rice gum treatment, followed by the mixture and wood fiber. ② All conditioners increased the adsorption strength τ_ψ , and the shear strength decreased with the increase in ψ . For soil water content in the range of 23.73%~30.76%, amending the soil with 2.5%~5.0% of wood fiber gave the highest adsorption strength, followed by non-amended soil, the amendment by 2.5%~5.0% of mixture, and the amendment by 0.5%~5.0% of glutinous rice gum. 【Conclusion】 ① Glutinous rice gum mainly reduced the ability of the soil to hold water. Wood fiber influenced θ_s , θ_r and ψ_r most and improved the ability of the soil to hold water. The mixture of wood fiber and glutinous rice gum increased ψ_a most, improving the ability of soil to hold water in the wet-end, but reduced water-holding capacity of the soil in the middle range. ② The effect of different modifiers in increasing τ_ψ is ranked in the order of wood fiber > glutinous rice gum > their mixture.

Key words: soil amendments; red loam; matric suction; soil-water characteristic curve; the adsorption strength

责任编辑: 赵宇龙