

芒萁根系对崩岗红土层土壤抗剪强度的影响

林嘉辉¹, 黄梦元¹, 张莉婷¹, 陈艳¹, 施悦忠²,
许永明², 林金石¹, 黄炎和¹, 蒋芳市¹

(1.福建农林大学资源与环境学院,福州 350002;2.安溪水土保持委员会办公室,福建 安溪 362000)

摘要:为探究植物根系对崩岗红土层土壤抗剪强度的作用机制,采取室内直剪试验,研究不同含水率条件下芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)根系对红土层抗剪强度的影响。结果表明:(1)不同根重密度土体的抗剪强度总体随含水率增加而下降,含根土体的抗剪强度大于素土。(2)黏聚力随着含水率的增加均呈先增大后减小的趋势,而随根重密度的增加呈增大的趋势,且增量逐渐减小。(3)内摩擦角与土壤含水率之间呈线性负相关,但与根重密度之间无明显关系。(4)含水率对抗剪强度的影响大于根重密度,可用含水率和根重密度模拟根土复合体的抗剪强度(NSE=0.84)。综上,根系的作用可增加崩岗红土层土壤的抗剪强度,但高含水率条件下根系的增强效应降低,可通过减少水分注入以增加崩岗红土层土壤复合体的稳定性。

关键词:崩岗;红土层;根土复合体;抗剪强度;芒萁;根重密度

中图分类号:S157 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2020)06-0159-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.06.023

Effects of *Dicranopteris dichotoma* Roots on Soil Shear Strength of Red Soil Layer in Benggang

LIN Jiahui¹, HUANG Mengyuan¹, ZHANG Liting¹, CHEN Yan¹, SHI Yuezhong²,
XU Yongming², LIN Jinshi¹, HUANG Yanhe¹, JIANG Fangshi¹

(1.College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University,

Fuzhou 350002; 2.Office of Anxi County Water and Soil Conservation Committee, Anxi, Fujian 362000)

Abstract: In order to explore the mechanism of plant roots on the soil shear strength of red soil layer in Benggang, an indoor direct-shear-test was taken to study the effect of *Dicranopteris dichotoma* roots on the shear strength of red soil layer under different water contents. The results showed that: (1) The shear strength of soil samples with different root weights generally decreased with the increasing water contents, and the shear strength of soil samples with roots was greater than that without roots. (2) Cohesion tended to increase first and then decrease with the increase of water contents, and increased with the increase of root weight density, but the increment gradually decreased. (3) There was a linear negative correlation between the internal friction angle and soil water content, but the internal friction angle had no obvious relationship with root weight density. (4) The influence of water content on shear strength was greater than that of root weight density. Water content and root weight density could be used to simulate the shear strength of the root-soil composite (NSE=0.84). In summary, plant roots could increase the soil shear strength of red soil layer on collapsing wall, but the strengthen effect of roots was reduced under high water content, and the stability of root-soil composite on collapsing wall could be increased by reducing the water injection.

Keywords: Benggang; red soil layer; root-soil composite; shear strength; *Dicranopteris dichotoma*; root weight density

崩岗是我国南方红壤区典型的土壤侵蚀类型,是在水力和重力的共同作用下,山坡土体或岩体受破坏

而发生崩坍的土壤侵蚀现象,属于复合侵蚀^[1-2]。崩壁的坍塌是崩岗侵蚀的最主要过程^[3-4],而崩壁坍塌

收稿日期:2020-05-19

资助项目:海峡两岸红壤区水土保持协同创新中心项目(K80ND800303);国家自然科学基金项目(41571272)

第一作者:林嘉辉(1995—),男,福建福州人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail: linjh9502@163.com

通信作者:蒋芳市(1979—),男,福建大田人,讲师,博士,主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail: jfsfatu@163.com

的最关键因子是土体抗剪强度变化,其大小反映了土体在外力作用下发生剪切变形破坏的难易程度^[5-6]。已有学者^[3,5-6]研究发现,抗剪强度与含水率、颗粒和胶结物质等关系密切,并受干湿交替环境的影响^[7]。受风化程度的影响,崩壁不同部位的理化性质(水分特征、颗粒组成、胶结特性等)存在差异,其抗剪强度也不同^[5-7]。崩壁由上至下一般可划分为红土层、砂土层和碎屑层^[3],相比于底部风化程度较低的砂土与碎屑层,红土层的风化程度最高,土壤的有机质、氧化铁及黏粒等含量均较高,结构紧实,土体的抗剪强度大^[6-7],对下层的砂土层及碎屑层起着保护的作用^[5]。因此,红土层的崩塌对崩岗的形成和发育具有重要的作用,探究红土层的抗剪强度对于揭示崩壁的稳定性和崩岗发生发展具有重要的意义。

植物根系通过浅根加筋和深根锚固作用固持土体,从而提高土壤的抗剪强度,在抵抗侵蚀中发挥着重要作用^[8-9]。研究根系对土壤抗剪强度的影响已成为水土保持研究的新热点。Ghestem 等^[10]和 Mahannopkul 等^[11]研究发现,根长密度、生物量密度等根系参数均可以影响土壤的抗剪强度;王元战等^[12]对原状和重塑根土复合体的三轴剪切试验发现,根系可提高土壤黏聚力,原状根土复合体黏聚力随含根量增加而增大最终趋于稳定,而重塑根土复合体则存在最优含根量;田佳等^[13]对 3 种植物根土复合体力学特性研究发现,3 种植物根土复合体的黏聚力存在显著差异,而内摩擦角无显著差异。综上,由于受植物自身遗传特性及生长环境的影响,不同植物根系对土体抗剪强度的影响存在差异,不同区域及植物种类根系固土效应及机理还需进一步研究。芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)属于里白科芒萁属蕨类植物,是南方红壤区最常见的植被之一,具有耐酸、耐贫瘠等特点,地下根部发达,生命力强,是良好的水土保持植物^[14]。目前,已有对芒萁的生物学特性及其对崩岗劣地土壤肥力的影响^[15]等方面进行了研究,但从根土复合体抗剪强度角度评估芒萁水土保持作用的研究未见报道,限制了芒萁水土保持功能的充分认识。另外,已有研究^[16-18]发现,根土复合体的抗剪强度与含水率密切相关,根土复合体的黏聚力与含水率呈负相关,而内摩擦角与含水率无明显的关系^[14]。然而含水率对含根崩壁土体抗剪强度的效应如何,还未有相关的报道。鉴于此,本研究选取芒萁根系为对象,分析含水率及含根量对崩岗红土层抗剪强度的效应,探讨不同含水率条件下芒萁根系对红土层抗剪强度的作用机制,以期对崩岗的治理及生态恢复提供依据。

1 材料与方法

1.1 采样区概况

采样区为福建省安溪县龙门镇(24°57'N,118°05'E),地势为低山河谷盆地,属亚热带季风气候,年平均气温 19℃,全年无霜期约 330 d,降雨充沛,年平均降雨量约 1 800 mm。降雨受台风影响,具有明显的季节性(5—9 月)。区域植被平均覆盖度 55%,乔木植被以马尾松(*Pinus massoniana*)、桉树(*Eucalyptus robusta*)为主,林下植被有芒萁、类芦(*Neyraudia reynaudiana*)、鹧鸪草(*Eriachne pallescens*)、桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)等,其中芒萁为主要地表覆盖植被。崩岗土体发育于中粗粒花岗岩,风化壳深厚,主要由石英、正长石及高岭石等矿物组成。在裸露的情况下,风化壳极易因雨水侵蚀形成崩岗。据 2005 年调查统计,安溪县崩岗总数为 12 828 处,占全省崩岗总数约 50%,其中龙门镇崩岗数量 1 228 处,密度为 7.86 处/km²,是典型的崩岗侵蚀重灾区。

1.2 研究方法

1.2.1 野外调查及根系的采集 2019 年 7 月,在崩壁区域内划定 3 块样地,每个样地高度为 3 m,宽度为 1 m。对每个样地均划分出 1 m²(1 m×1 m)的小区,并对小区进行调查,获得芒萁覆盖度为 95%,植株平均密度、高度及冠幅分别为 7.2 株/100 cm²,28 cm 及 17 cm。根深度和根重密度最大可达 18 cm 和 1.27 g/100 cm³。在调查小区内多点采集根系样品,挖出后的根系用湿土覆盖带回室内,在低温保鲜箱内(2~4℃)保存。采集的根系在 7 天内做完试验,以保证根样的新鲜。

1.2.2 土样的采集及测定 用容积为 100 cm³(底面积 20 cm²,高度 5 cm)的环刀按“S”形采集土壤样品,每个样区分别取 3 个重复,用于测定容重。同时多点挖取足量 0—20 cm 深度红土层原状土壤,密封带回室内风干。风干后的土样一部分用于直剪试验,另一部分用于测定土壤理化基本性质。通过测定,得到红土层土壤容重为 1.35 g/cm³,液限、塑限分别为 34.57%和 17.36%,砂粒(0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)质量含量分别为 57.13%,34.20%,8.67%。

1.2.3 室内直剪试验 室内直剪试验在福建农林大学金山水土保持科教园进行。根据观测,干燥条件质量含水率约为 15%,降雨后红土层质量含水率约为 30%,故设置试验含水率参数梯度为 15%,20%,25%,30%;野外红土层芒萁最大根重密度为 1.27 g/100 cm³,故设置根重密度参数梯度为 0,0.25,0.50,0.75,1.00,1.25 g/100 cm³。试验用土为风干过 2 mm 筛的崩岗红土层土壤。各含水率土壤配制完毕后在阴凉密闭处放置 24 h,以保

证湿润均匀。因剪切环刀高度为 2 cm, 故将采回来的新鲜根样长度剪成 2 cm 左右, 之后与土样多次搅拌混合, 保证随机布根, 以模拟自然状况, 最后制成内径 61.8 mm, 高度 20 mm 的素土和根土复合体重塑样, 具体制样方法参照土工试验规程^[19]。采用 LH-DDS-4 型四联直剪仪(南京泰克奥科技公司)进行剪切试验。考虑红土层位于浅层土体所受围压较小, 故设置垂直载荷(σ)梯度为 25, 50, 75, 100 kPa 进行剪切, 同时崩壁一般为瞬时崩塌, 故采取快速剪切, 剪切速率为 0.8 mm/min, 每个垂直载荷重复 3 次。

1.2.4 数据计算 根据不同围压下试验测得的土壤抗剪强度, 利用摩尔-库伦理论^[19]计算抗剪强度相关指标:

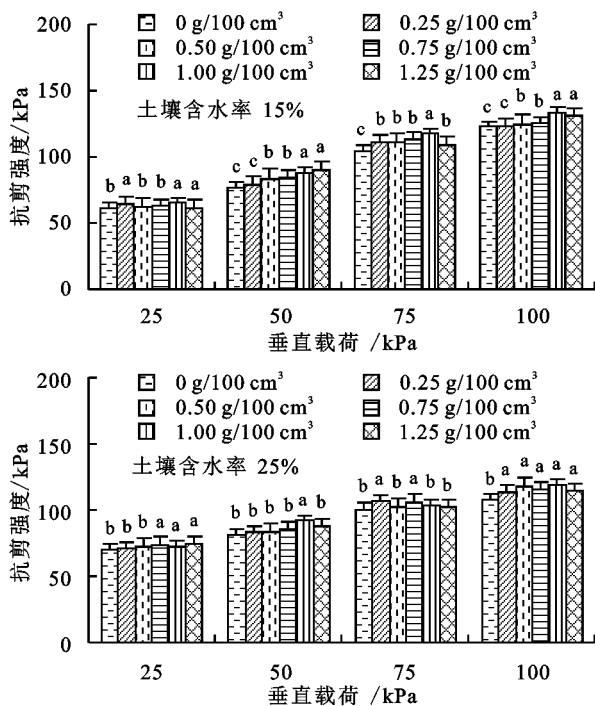
$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中: τ 为土壤抗剪强度(kPa); c 为土壤黏聚力(kPa); σ 为土壤所受垂直载荷(kPa); φ 为土壤内摩擦角($^{\circ}$)。

模拟值与实际测量值之间的拟合效果通过模型有效性系数(NSE)^[20]来检验, 公式为:

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_i - Q_{ci})^2}{\sum(Q_i - Q_m)^2} \quad (2)$$

式中: NSE 为模型有效系数; Q_i 为第 i 个试样实测值; Q_{ci} 为第 i 个试样模拟值; Q_m 为试样实测平均值。



注: 不同字母表示同一围压下不同根重密度土体抗剪强度差异达到显著水平($P < 0.05$)。

图1 红土层根土复合体抗剪强度与根重密度关系

对图1进一步分析发现, 土壤抗剪强度随垂直载荷增加而增大, 回归拟合结果符合线性正相关关系(表1), 方程决定系数 R^2 均大于0.90, 并且达到极显著水平。因此, 重塑素土与根土复合体均符合摩尔-库伦理论, 可以使用摩尔-库伦公式计算土壤黏聚力和内摩擦角。

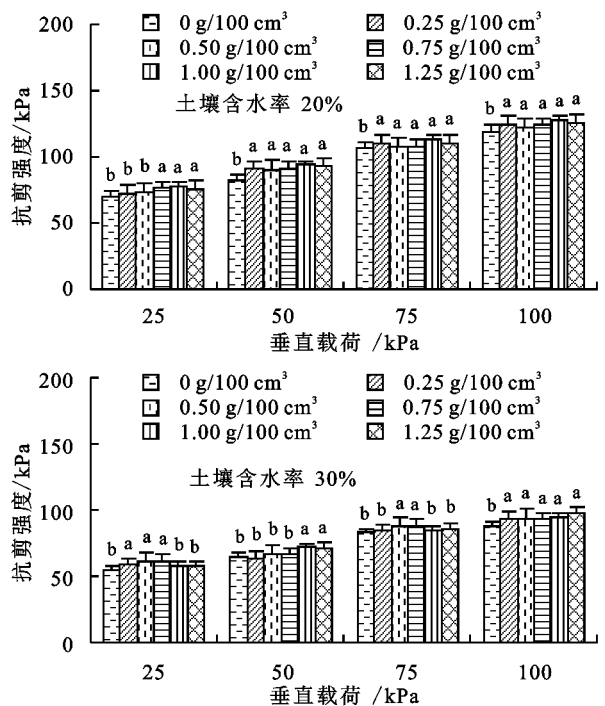
其中 $NSE \geq 0.70$ 表明模型较好; $0.40 < NSE < 0.70$ 表明模型一般; $NSE < 0.40$ 表明模型较差^[21]。

1.2.5 数理统计 采用 Excel 2007 软件统计试验数据及绘制图表, 用 SPSS 18.0 软件对试验参数进行方差分析、相关性分析以及回归分析。

2 结果与分析

2.1 根系对红土层土壤抗剪强度的影响

由图1可知, 在 25, 50 kPa 的低围压下, 根土复合体抗剪强度随含水率升高, 表现为先上升后下降趋势。随围压增大(75, 100 kPa), 低含水率根土复合体抗剪强度增幅明显大于高含水率时, 故在高围压下根土复合体抗剪强度随含水率升高单调递降, 而 30% 含水率时抗剪强度急剧降低, 这是由于含水率接近土壤液限, 土壤稳定结构开始破坏。同时, 不同情况下根土复合体抗剪强度均大于无根素土, 高围压下抗剪强度随根重密度增幅总体大于低围压下, 15% 和 20% 含水率时, 抗剪强度随根重密度增加呈较稳定的上升趋势, 而在 25% 和 30% 含水率时, 抗剪强度随根重密度依然总体上升, 但部分出现先上升后下降的波动趋势。因此, 在低含水率和高围压下根系对抗剪强度的作用效果相对更明显, 这与宋维峰等^[22]对林木根土复合体的研究得出的结论相同。



2.2 根系对红土层土壤黏聚力的影响

由图2a可知, 20% 和 25% 含水率土壤黏聚力显著大于 15% 和 30% 含水率($P < 0.05$), 黏聚力均随含水率增加呈先增大后减小趋势, 二者也符合二项式函数关系(表2), 且达到显著或极显著水平。这与格日

乐等^[16]利用剥皮制样进行土—土和根—土界面剪切试验得出的结果一致。由表 2 可知,不同根重密度的根土复合体黏聚力对应最优含水率相差不大,均为

22%~23%,但最优含水率对应的黏聚力最大值随根重密度增大呈增加趋势,这与刑会文等^[23]对柠条、沙柳的根土界面摩擦特性的研究结果相似。

表 1 土壤抗剪强度与垂直载荷拟合方程

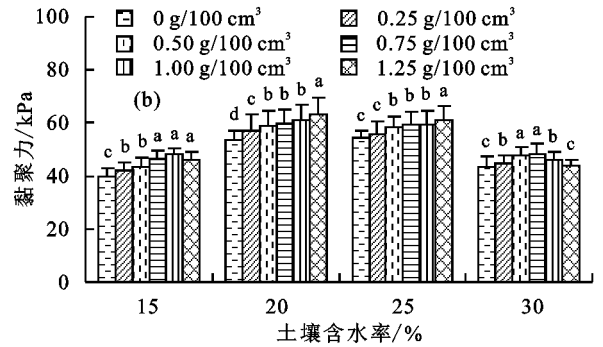
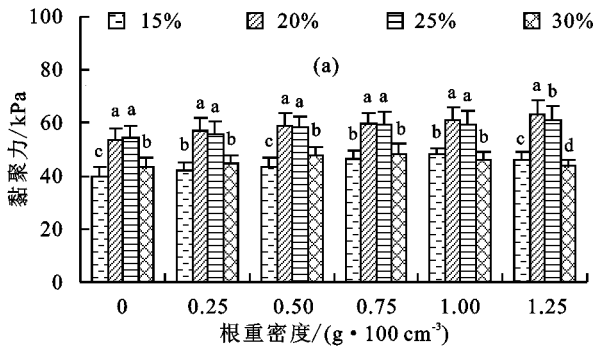
根重密度/ (g · 100 cm ⁻³)	土壤含水率 15%		土壤含水率 20%		土壤含水率 25%		土壤含水率 30%	
	拟合方程	R ²	拟合方程	R ²	拟合方程	R ²	拟合方程	R ²
0	$\tau=0.84\sigma+39.89$	0.94**	$\tau=0.70\sigma+51.43$	0.91**	$\tau=0.60\sigma+54.42$	0.94**	$\tau=0.47\sigma+43.56$	0.92**
0.25	$\tau=0.83\sigma+42.15$	0.92**	$\tau=0.64\sigma+62.16$	0.93**	$\tau=0.59\sigma+58.84$	0.90**	$\tau=0.55\sigma+42.10$	0.91**
0.50	$\tau=0.86\sigma+41.43$	0.95**	$\tau=0.70\sigma+54.09$	0.93**	$\tau=0.52\sigma+58.40$	0.90**	$\tau=0.48\sigma+47.74$	0.90**
0.75	$\tau=0.86\sigma+42.86$	0.93**	$\tau=0.63\sigma+59.84$	0.95**	$\tau=0.59\sigma+59.08$	0.94**	$\tau=0.46\sigma+48.83$	0.90**
1.00	$\tau=0.94\sigma+42.66$	0.93**	$\tau=0.68\sigma+60.92$	0.94**	$\tau=0.60\sigma+59.25$	0.95**	$\tau=0.48\sigma+46.15$	0.91**
1.25	$\tau=0.91\sigma+41.04$	0.93**	$\tau=0.67\sigma+59.24$	0.94**	$\tau=0.54\sigma+61.19$	0.94**	$\tau=0.55\sigma+43.63$	0.95**

注: τ 为土壤抗剪强度; σ 为垂直载荷; ** 表示相关性达极显著水平 ($P < 0.01$)。

由图 2b 可知,各根重密度下的根土复合体黏聚力均显著大于素土 ($P < 0.05$),表明增加芒萁根重密度可显著提高崩岗红土层土壤黏聚力。从图 2b 还可知,黏聚力随根重密度增加总体上升,但增幅逐渐趋于平缓,15%和 30% 含水率下黏聚力随根密度增加出现回落。

对各含水率下黏聚力与根重密度进行回归分析(表 3)表明,15%和 30% 含水率下根土复合体黏聚力随根重密度的增加均呈二项式函数关系,这与王元战等^[12]对重塑加筋土的研究结果相同;但 20%和 25%

含水率下,黏聚力随根重密度的增加呈线性函数增加的关系。这可能是由于 15%和 30% 含水率时土壤自身黏聚力较低,导致重塑根土复合体结合效果不佳,土体对根系的容纳能力较低。同时,各根土复合体黏聚力总增幅随含水率升高逐渐减少,说明根系的作用效果随含水率升高而降低。这可能是由于当低含水率时土壤本身黏聚力低,且土壤颗粒与根系表面之间摩擦特性好,根系通过拉力提供额外黏聚力;而高含水率时,土壤颗粒与根系间水膜增厚产生润滑效果,导致根土结合程度降低,因此作用效果减弱^[16]。



注:(a)中不同字母表示同一根重密度不同含水率下黏聚力差异显著 ($P < 0.05$);(b)中不同字母表示同一含水率不同根重密度下黏聚力差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 各含水率土壤黏聚力与根重密度关系

表 2 各根重密度土壤黏聚力与土壤含水率拟合方程

根重密度/ (g · 100 cm ⁻³)	拟合方程	R ²	最优	黏聚力
			含水率/%	最大值/kPa
0	$c = -0.25w^2 + 11.31w - 74.34$	0.92**	22.93	55.38
0.25	$c = -0.26w^2 + 11.74w - 75.58$	0.88*	22.86	58.60
0.50	$c = -0.26w^2 + 12.02w - 77.73$	0.89*	23.11	61.10
0.75	$c = -0.24w^2 + 10.97w - 63.71$	0.90*	22.86	61.72
1.00	$c = -0.26w^2 + 11.55w - 66.58$	0.90*	22.28	61.69
1.25	$c = -0.35w^2 + 15.42w - 106.99$	0.91**	22.39	64.48

注: c 为土壤黏聚力; w 为土壤含水率; * 表示相关性达显著水平 ($P < 0.05$); ** 表示相关性达极显著水平 ($P < 0.01$)。

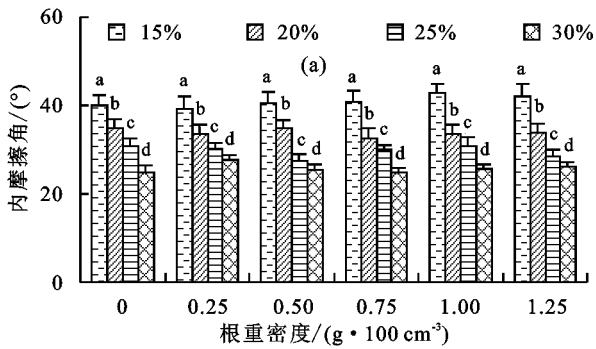
2.3 根系对红土层土壤内摩擦角的影响

由图 3a 可知,随着含水率的升高,内摩擦角总体呈对数函数下降(表 4)。这是因为含水率的增大造

成水分在土壤颗粒表面的润滑作用增强,使颗粒之间的咬合度降低,从而造成内摩擦角的下降^[24]。这与林金石等^[24]对崩岗红土层土壤内摩擦角随含水率变

化研究结果相似,但格日乐等^[18]对内蒙古煤田露天矿排土场的研究却发现,柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)及杨柴(*Hedysarum mongolicum*)的根土复合体随含水率没有明显规律,说明不同植物根系对土壤内摩擦角的影响存在差异。

由图 3b 可知,各根重密度梯度的根土复合体内摩擦角之间无显著差异,说明芒萁根系对红土层土壤内摩擦角的影响不显著,这与刘春红等^[25]对加筋后的紫色土内摩擦角研究结果相同。这可能由于根系主要通过转化自身抗拉力以改变土壤应力特性,并不

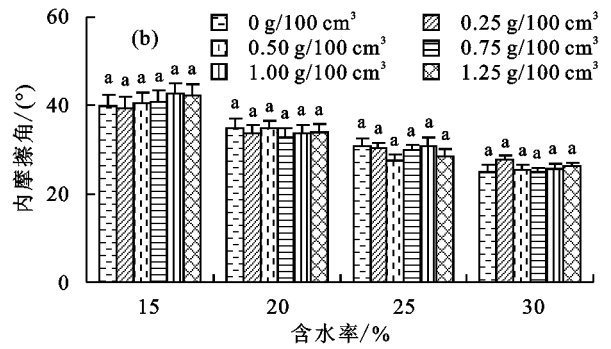


能明显改变土壤之间的摩擦咬合作用^[17]。

表 3 各含水率土壤黏聚力与根重密度拟合方程

土壤含水率/%	拟合方程	R ²	黏聚力总增幅/%
15	$c = -5.51RWD^2 + 12.78RWD + 39.48$	0.89 *	20.43
20	$c = 5.14RWD + 54.81$	0.96 **	17.86
25	$c = 6.93RWD + 54.58$	0.94 *	12.45
30	$c = -11.35RWD^2 + 14.75RWD + 43.01$	0.88 *	11.18

注: c 为土壤黏聚力; RWD 为根重密度; * 表示相关性达显著水平 ($P < 0.05$); ** 表示相关性达极显著水平 ($P < 0.01$); 样本数为 6。



注: (a) 中不同字母表示同一根重密度不同含水率下内摩擦角差异显著 ($P < 0.05$); (b) 中不同字母表示同一含水率不同根重密度下内摩擦角差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 各含水率土壤内摩擦角与根重密度关系

表 4 内摩擦角与土壤含水率拟合方程

根重密度/ ($g \cdot 100 \text{ cm}^{-3}$)	拟合方程	R ²
0	$\varphi = -0.98\omega + 54.72$	0.91 **
0.25	$\varphi = -16.69\ln(\omega) + 84.18$	0.90 *
0.50	$\varphi = -23.07\ln(\omega) + 103.13$	0.92 **
0.75	$\varphi = -22.05\ln(\omega) + 99.98$	0.91 **
1.00	$\varphi = -23.79\ln(\omega) + 106.50$	0.90 *
1.25	$\varphi = -23.49\ln(\omega) + 105.04$	0.89 *

注: φ 为内摩擦角; ω 为土壤含水率; * 表示相关性达显著水平 ($P < 0.05$); ** 表示相关性达极显著水平 ($P < 0.01$); 样本数为 4。

2.4 红土层根土复合体抗剪强度方程的构建

由表 5 可知,根重密度和含水率对红土层土壤黏聚力的影响均达到极显著水平 ($P < 0.01$),含水率对应 F 值明显大于根重密度,说明含水率对红土层黏聚力的影响大于根重密度。由表 5 还可看出,土壤内摩擦角受含水率影响显著 ($P < 0.01$),但受根重密度不显著 ($P > 0.05$),说明内摩擦角主要受含水率的影响。因此,选择含水率和根重密度双变量对黏聚力进行拟合,而选择含水率单个变量对内摩擦角进行拟合。

表 5 根重密度和含水率对黏聚力和内摩擦角影响的方差分析

因素	差异源	离均差平方和	自由度	均方差	F	P
黏聚力	含水率	3280.01	3	1093.34	631.12 **	0
	根重密度	368.86	5	73.77	42.58 **	0
	误差	83.16	48	1.73		
	总计	3732.03	56			
内摩擦角	含水率	2265.86	3	755.29	1878.43 **	0
	根重密度	4.66	5	0.93	2.32	0.58
	误差	19.30	48	0.40		
	总计	2289.82	56			

注: ** 表示差异达极显著水平 ($P < 0.01$)。

根土复合体抗剪强度可在摩尔—库伦理论的基础上表示为^[26]:

$$\tau_{rs} = \Delta S_r + c_s + \sigma \tan \varphi \quad (3)$$

式中: τ_{rs} 为根土复合体抗剪强度 (kPa); ΔS_r 为根系

提供的抗剪强度增量 (kPa); c_s 为素土黏聚力 (kPa); σ 为法向垂直载荷 (kPa); φ 为土壤内摩擦角 (°)。

由分析可知,根系增加土体抗剪强度的作用主要体现在黏聚力,而对内摩擦角影响不明显,故用 Δc_r

(根系提供的黏聚力增量)替代 ΔS_r , 方程替换为:

$$\tau_{rs} = \Delta c_r + c_s + \sigma \tan \varphi \quad (4)$$

对方程(4)进行合并得到根土复合体抗剪强度的最简式为:

$$\tau_{rs} = c_{rs} + \sigma \tan \varphi \quad (5)$$

式中: τ_{rs} 为根土复合体抗剪强度(kPa); c_{rs} 为根土复合体的黏聚力(kPa); c_s 为素土黏聚力(kPa); σ 为法向垂直载荷(kPa); φ 为土壤内摩擦角($^\circ$)。

结合 2.2, 2.3 部分, 建立红土层根土复合体黏聚力和内摩擦角与含水率或根重密度的关系方程:

$$c_{rs} = -0.28w^2 RWD^{-0.08} + 12.82w - 87.10 \quad (6)$$

$$\varphi = -22.03 \ln(w) + 100.52 \quad (7)$$

式中: c_{rs} 为根土复合体的黏聚力(kPa); w 为土壤含水率(%); RWD 为根重密度($g/100 \text{ cm}^3$); φ 为根土复合体的内摩擦角($^\circ$)。

根据摩尔-库伦理论对方程(6)和(7)进行合并, 得到根土复合体抗剪强度与含水率和根重密度的关系方程:

$$\begin{aligned} \tau_{rs} = & -0.28w^2 RWD^{-0.08} + 12.82w + \\ & \sigma \tan [-22.03 \ln(w) + 100.52] - 87.10 \\ R^2 = & 0.87, P = 0.02, NSE = 0.84, n = 96 \end{aligned} \quad (8)$$

式中: τ_{rs} 为根土复合体的抗剪强度(kPa); σ 为法向垂直载荷(kPa); w 为土壤含水率(%); RWD 为根重密度($g/100 \text{ cm}^3$)。

式(8)表明, 方程决定系数 R^2 为 0.87, NSE 指数为 0.84 (> 0.70), 抗剪强度模拟值与实测值的比值接近 1:1 线(图 4), 说明以该方程模拟红土层土壤抗剪强度与含水率和根重密度之间关系效果较好。

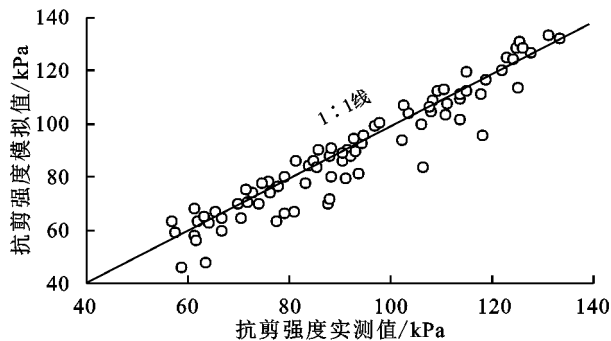


图4 红土层土壤抗剪强度拟合方程模拟值与实测值对比

3 结论

(1) 低围压下(25, 50 kPa)根土复合体抗剪强度随含水率增加先上升后下降, 高围压下(75, 100 kPa)则持续下降。根土复合体的抗剪强度均大于素土, 低含水率(15%和 20%)土壤抗剪强度随根重密度稳定上升, 而高含水率下(25%和 30%), 抗剪强度随根重密度出现先上升后下降的趋势。

(2) 芒萁根系对红土层土壤黏聚力有显著增加作

用, 黏聚力的增强效果随根重密度的增加逐渐减弱。方程拟合表明, 15%和 30%含水率下根土复合体黏聚力随根重密度的增加均呈二项式函数关系, 20%和 25%含水率下黏聚力随根重密度的增加呈线性函数增加。

(3) 崩岗红土层土壤内摩擦角随含水率升高而持续降低, 二者之间总体符合对数负相关关系, 但不同根重密度的根土复合体内摩擦角无明显差异, 根系对红土层内摩擦角无明显作用。

(4) 通过模拟可得到含水率和芒萁根重密度与红土层根土复合体抗剪强度关系方程, 方程决定系数 R^2 为 0.87, 效性系数(NSE)为 0.84, 方程实测值与模拟值相近, 模拟效果较好。

综上所述, 植物根系对崩岗红土层具有明显的固定作用, 芒萁根系可以通过加筋和锚固的作用明显提升土壤黏聚力, 增强土壤抗剪强度, 从而有效抵抗土体坍塌的剪切重力。但土壤水分的影响不容忽视, 它不仅通过直接改变红土层土壤的黏聚力和内摩擦角来减弱土壤抗剪强度, 还会削弱根系对土壤的加固作用, 当土壤含水率升高时, 根系对土壤的增强作用会急剧减弱甚至消失。因此, 崩岗即使有植物根系固定, 但如果长时间处于高含水率下, 也有发生坍塌的危险, 野外调查也发现了此类情况。对此, 可人为在集水坡面修建排水沟等方法排除过量雨水, 减少土壤水分的注入量, 从而使芒萁根系发挥更大的固土效果。

参考文献:

- [1] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 104-106.
- [2] Xia D, Deng Y S, Wang S L, et al. Fractal features of soil particle-size distribution of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region, south China[J]. Nature Hazards, 2015, 79(1): 455-478.
- [3] 林敬兰, 黄炎和, 张德斌, 等. 水分对崩岗土体抗剪特性的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 55-58.
- [4] 刘希林, 邱锦安, 张大林. 崩岗侵蚀区崩壁土体湿化机理及影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 80-84.
- [5] Chen J L, Zhou M, Lin J S, et al. Comparison of soil physicochemical properties and mineralogical compositions between noncollapsible soils and collapsed gullies [J]. Geoderma, 2018, 317: 56-66.
- [6] 冯舒悦, 王军光, 文慧, 等. 赣南崩岗侵蚀区不同部位土壤抗剪强度及影响因素研究[J]. 土壤学报, 2020, 57(1): 71-83.
- [7] 张晓明, 丁树文, 蔡崇法. 干湿效应下崩岗区岩土抗剪强度衰减非线性分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 241-245.
- [8] Hubble T C T, Docker B B, Rutherford I D. The role of riparian trees in maintaining riverbank stability: A review of Australian experience and practice[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(3): 292-304.

- [9] 马鹏飞, 夏栋, 许文年, 等. 植物根系固土作用对崩岗稳定性影响的数值模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(2): 354-364.
- [10] Ghestern M, Veylon G, Bemard A, et al. Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance[J]. *Plant and Soil*, 2014, 377(1/2): 43-61.
- [11] Mahannopkul K, Jotisankasa A. Influences of root concentration and suction on *Chrysopogon zizanioides* reinforcement of soil[J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(2): 500-516.
- [12] 王元战, 刘旭菲, 张智凯, 等. 含根量对原状与重塑草根加筋土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1405-1410.
- [13] 田佳, 卞莹莹, 于江珊, 等. 贺兰山3种乔木单根及根土复合体力学特性[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 123-129.
- [14] 刘迎春, 刘琪璟, 汪宏清. 芒萁生物量分布特征[J]. 生态学杂志, 2008, 27(5): 705-711.
- [15] 李小飞, 陈志彪, 陈志强, 等. 南方红壤侵蚀区芒萁生长特征及其对环境因子的响应[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3): 33-37.
- [16] 格日乐, 刘艳琦, 左志严, 等. 土壤水分对植物根-土界面相互作用特性的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 135-140.
- [17] Khairuddin M N, Md I, Zakaria A J, et al. Shear strength and root length density analyses of Entisols treated with palm oil mill effluent sludge[J]. *Soil and Environment*, 2017, 36(2): 131-140.
- [18] 格日乐, 张成福, 蒙仲举, 等. 3种植物根土复合体抗剪特性对比分析[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 85-90.
- [19] 南京水利科学研究院土工研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [20] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part 1: A discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10: 282-290.
- [21] Wu B, Wang Z L, She N, et al. Modelling sediment transport capacity of rill flow for loess sediments on steep slopes[J]. *Catena*, 2016, 147: 453-462.
- [22] 宋维峰, 陈丽华, 刘秀萍. 树木根系固土力学机制研究综述[J]. 浙江林学院学报, 2008, 25(3): 376-381.
- [23] 邢会文, 刘静, 王林和, 等. 柠条、沙柳根与土及土与土界面摩擦特性[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(1): 87-91.
- [24] 林金石, 庄雅婷, 黄炎和, 等. 不同剪切方式下崩岗红土层抗剪特征随水分变化规律[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 106-110.
- [25] 刘春红, 韦杰, 史炳林, 等. 加筋材料对紫色土坡耕地埂坎土壤抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 103-109, 175.
- [26] Gray D H. Reinforcement and stabilization of soil by vegetation[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1974, 100(6): 695-699.
- (上接第158页)
- [26] Johnston S G, Burton E D, Aaso T, et al. Sulfur, iron and carbon cycling following hydrological restoration of acidic freshwater wetlands[J]. *Chemical Geology*, 2014, 371(5): 9-26.
- [27] 赵宇华, 叶央芳, 刘学东. 硫酸盐还原菌及其影响因子[J]. 环境污染与防治, 1997, 19(5): 41-43.
- [28] 李新华, 郭洪海, 杨丽萍, 等. 黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫排放动态研究[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 786-791.
- [29] 张雪雯, 莫熠, 张博雅, 等. 干湿交替及凋落物对若尔盖泥炭土可溶性有机碳的影响[J]. 湿地科学, 2014, 12(2): 134-140.
- [30] Ghani A, McLaren R G, Swift R S. Sulphur mineralization and transformation in soil as influenced by additions of carbon, nitrogen and sulphur[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, 24(4): 331-341.
- [31] 徐成凯, 胡正义, 章钢娅, 等. 石灰性土壤中硫形态组分及其影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(4): 416-423.
- [32] 张太平, 王奎锋, 王强, 等. 黄河三角洲水盐演化及补给来源: 基于水化学与同位素分析[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(4): 231-239.
- [33] Zhao Q Q, Bai J H, Gao Y C, et al. Effects of freshwater inputs on soil quality in the Yellow River Delta, China[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 619-626.
- [34] Yamane I. Reduction of nitrate and sulfate in submerged soils with special reference to redox potential and water-soluble sugar content of soils[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 15(4): 139-148.
- [35] Liu F Q, Zhang Y P, Liang H, et al. Long-term harvesting of reeds affects greenhouse gas emissions and microbial functional genes in alkaline wetlands[J]. *Water Research*, 2019, 164: 114936.
- [36] 赵亚杰, 张建霞. 黄河三角洲湿地恢复区芦苇复壮[J]. 山东林业科技, 2015, 45(6): 66-68.
- [37] 马华, 陈秀芝, 潘卉, 等. 持续收割对上海九段沙湿地芦苇生长特征、生物量和土壤全氮含量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(2): 209-213.