

# 寒旱环境植物根系增强边坡土体抗剪强度试验研究

赵玉娇<sup>1</sup>, 胡夏嵩<sup>1,2</sup>, 刘昌义<sup>1</sup>, 窦增宁<sup>1</sup>, 李国荣<sup>1</sup>

(1. 青海大学 地质工程系, 西宁 810016; 2. 中国科学院 青海盐湖研究所, 西宁 810008)

**摘要:** 研究以地处西宁盆地的青海大学自建试验区作为研究区。采用草本、灌木植物单一种植和混合种植的方式, 对种植植物边坡及未种植植物的素土边坡在 A 层(坡面地表 0 cm)、B 层(坡面以下 20 cm)深度处的根—土复合体试样进行直接剪切试验, 探讨了单一种植和混合种植两种种植方式下边坡土体抗剪强度的变化特征。结果表明: (1) 单一种植的草本边坡在 A 层处根—土复合试样的粘聚力值分别为 24.09, 22.81 kPa, 均显著大于灌木边坡 A 层深度处根—土复合体试样的粘聚力值 19.03, 17.91 kPa, 且相对于素土试样的粘聚力值, 草本根—土复合体试样的粘聚力值的增加幅度依次为 104.67%, 93.80%, 灌木根—土复合体试样粘聚力值的增加幅度依次为 61.68%, 52.17%, 显然, 草本根—土复合体的粘聚力值增长幅度大于灌木植物; (2) 随边坡土体深度的增加, 单一种植方式下草本边坡根—土复合体试样粘聚力值呈递减趋势, 即粘聚力值依次由 24.09, 22.81 kPa 递减至 19.06, 21.02 kPa, 这在一定程度反映出草本对边坡浅层土体抗剪强度的增强作用相对较为显著; (3) 2 种草本和灌木混合种植方式下根系对边坡土体抗剪强度的贡献值, 均大于相应位置处 2 种草本和灌木单一种植方式下的贡献值, 即混合种植条件下复合体的粘聚力值较单一种植时的增加幅度为 0.13%~42.83%。该研究成果为定量评价边坡不同种植方式下植物根系增强边坡土体抗剪强度提供了理论依据, 同时为进一步探讨植物根系增强边坡土体抗剪机理具有一定理论价值和实际意义。

**关键词:** 寒旱环境; 根—土复合体; 抗剪强度; 直剪试验

**中图分类号:** TU411.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2016)04-0212-09

## Research on Soil Shear Strength Reinforced by Vegetation Roots in Slope of Cold and Arid Environments

ZHAO Yujiao<sup>1</sup>, HU Xiasong<sup>1,2</sup>, LIU Changyi<sup>1</sup>, DOU Zengning<sup>1</sup>, LI Guorong<sup>1</sup>

(1. Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xi'ning, Qinghai 810016, China;

2. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xi'ning, Qinghai 810008, China)

**Abstract:** The experimental site of this study is set up in Qinghai University, Xining Basin. We take root-soil composite systems in layer A (0 cm) and layer B (20 cm beneath the ground surface) on the slope with the planted herbs and shrubs by the approach of herbs and shrubs single planting and mixing planting, and from bare slope as shear test samples. And the characteristics of soil shear strength of the slope with herbs and shrubs are analyzed. The results show that: (1) the cohesion forces of root-soil composite systems in layer A of the slope with the 2 herbs are 24.09 kPa and 22.81 kPa, respectively, both of which are higher than the cohesion forces (19.03 kPa, 17.91 kPa) of root-soil composite systems in layer A of the slope with 2 shrubs. Compared with the cohesion force of bare slope, the increased cohesion force amplitudes of root-soil composite systems of herbs are 104.67% and 93.80%, respectively, the increased cohesion force amplitudes of root-soil composite systems of shrubs are 61.68% and 52.17%, respectively, so the increased cohesion force amplitudes of root-soil composite systems of herbs are much higher than shrubs; (2) the cohesion force of root-soil composite systems of the slope with 2 herbs decreased from 24.09 kPa, 22.81 kPa to 19.06 kPa, 21.02 kPa with the increase of soil depth, which reflects the reinforcement by herb root in the shallow layer of the slope is significant; (3) the increased

**收稿日期:** 2015-11-20

**修回日期:** 2015-12-30

**资助项目:** 国家自然科学基金项目(41162010, 41572306); 教育部长江学者和创新团队发展计划资助(IRT13074); 长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室开放基金资助(CHD2011SY016)

**第一作者:** 赵玉娇(1990—), 女, 新疆塔城人, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程与岩土体工程稳定性分析等方面的研究工作。E-mail: ZYJ\_314211639@126.com

**通信作者:** 胡夏嵩(1965—), 男, 河南开封人, 博士, 教授, 主要从事环境岩土工程与工程地质等领域的教学和研究工作。E-mail: huxiasong@tsinghua.org.cn

cohesion force of root-soil composite systems of the mixture of 2 herbs and 2 shrubs is higher than that of single plant. The increased cohesion force amplitude of root-soil composite systems of the mixture of 2 herbs and 2 shrubs is 0.13%~42.83%. This study provides theoretical support for quantifying the contribution of vegetation roots to soil shear strength under different planting patterns, and it also has theoretical value and significance in further discussing the mechanism of soil shear strength reinforcement by roots on slope.

**Keywords:** cold and arid environments; root-soil composite system; shear strength; shear test

随着社会经济建设的快速发展,基础工程建设的不断增加,各类不合理的工程开挖,在一定程度上造成了水土流失、滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害现象的发生,会不同程度地影响到社会经济建设与环境保护之间的和谐发展<sup>[1]</sup>。近年来,随着植物护坡理论和应用技术的广泛推广,国内外诸多学者开展了植物根系增强土体抗剪强度和提高边坡稳定性领域的系统研究工作<sup>[2-10]</sup>。陆桂红等<sup>[11]</sup>认为植物根系多分布在边坡浅层土体中,适应性强,对边坡土体稳定、坡面生态恢复、坡面浅层水土保持等方面起到显著作用。杨悦舒等<sup>[12]</sup>通过对多花木蓝(*Indigofera amblyantha* M. C. Wang et C. L. Min)根—土复合体进行了直剪试验,认为含根量为 0.1~0.8 g 时试样的抗剪强度均大于无根系试样,说明根系能显著地增加土体的抗剪强度。栗岳洲等<sup>[13-15]</sup>通过对海韭菜(*Leymus secalinus* Tzvel)、赖草(*Leymus paboanus* Claus)、毛穗赖草(*Carex enervis* C. A. Mey)、无脉苔草(*Triglochin maritima* Linn)4 种盐生植物的根—土复合体试样在不同含根量梯度下的直剪试验,认为根系增强土体抗剪强度存在最优含根量,即根—土复合体试样中的含根量处于最优含根量时,4 种植物根—土复合体的抗剪强度存在相对最大值。刘治兴等<sup>[16]</sup>以安徽安庆岳西境内岳武高速公路岳西第一标段公路边坡为研究对象,采用自制的直剪试验仪对不含根系素土及种植有紫穗槐(*Amorpha fruticosa* L)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz)、马棘(*Indigofera pseudotinctoria*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa* L)植物的纤维毯、植生袋、拱形框格梁、六棱空心砖边坡的根—土复合体抗剪强度进行原位试验测定,认为不同生长期植物根系均能显著增加边坡浅层土体的抗剪强度,指出根系增强土体的强度值大小与植物生长时间之间呈正相关关系。Katuwal 等<sup>[17]</sup>通过对种植黑麦草(*Lolium perenne* L.)的土体进行降雨试验,并用便携式叶片测试仪(pocket vane tester)对降雨试验后的根—土复合体进行抗剪强度测试,认为根—土复合体的抗剪强度与根密度之间存在正相关关系。

为了进一步深入研究植物根系对边坡土体抗剪强度的增强作用,本项试验通过对自建试验区 2 种灌

木植物、2 种草本植物采用单一种植方式以及 2 种草本和 2 种灌木植物混合种植的方式,分别对根—土复合体试样进行直剪试验,得出单一种植与混合种植 2 种条件下根—复合体试样的粘聚力值,且分析 2 种条件下对边坡土体抗剪强度的影响,对比分析边坡不同深度处根—复合体试样粘聚力值的变化规律。该研究成果可为定量评价植物增强边坡土体抗剪强度提供理论依据,且为进一步探讨植物根系增强土体抗剪强度机理具有一定的理论价值和实际意义。

## 1 试验区自然概况

试验区位于青藏高原东北部的西宁盆地,地处青藏高原河湟谷地,属祁连山系,其地理坐标为东经 101°49′、北纬 36°34′,区内海拔为 2 261 m<sup>[18]</sup>。区内年平均气温为 7.6℃,最高气温 34.6℃,最低气温零下 18.9℃,年均日照时数为 1 939.7 h,年平均降水量为 380 mm,蒸发量为 1 363.6 mm,且降水主要集中在每年的 6—9 月份,属高原半干旱大陆性气候<sup>[19]</sup>。

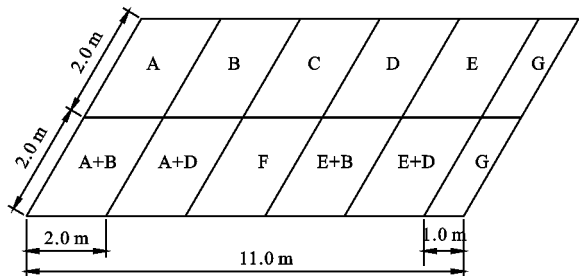
本项研究自建的青海大学试验区面积约为 22 m×4 m(长×宽),坡度为 30°,属于人工堆积边坡。选取适宜当地气候条件下生长的 2 种草本和 2 种灌木植物作为供试种,其中草本为细茎冰草(*Agropyron trachycaulum* Linn. Gaertn.)、垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.),灌木为柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)和霸王(*Zygophyllum xanthoxylon* Bunge Maxim.)。按试验种植方案试验区共划分为 12 个试验小区,其中 10 个种植植物小区面积为 2 m×2 m,2 个未种植植物的对照区面积为 1 m×2 m,草本植物采用撒播方式种植,播种量为 6 g/m<sup>2</sup>,灌木采用穴播,株距为 5 cm,每穴 3~5 粒。试验种植方案如图 1 所示,植物种植和生长情况如图 2,图 3 所示。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料

本次试验选择生长期为 150 d 的霸王、柠条锦鸡儿、细茎冰草、垂穗披碱草 4 种植物的根—土复合体,以及未种植植物的素土复合体作为研究对象。即以霸王根—土复合体试样、柠条锦鸡儿根—土复合体试样、

细茎冰草根—土复合体试样、垂穗披碱草根—土复合体试样；霸王+细茎冰草根—土复合体试样、霸王+垂穗披碱草根—土复合体试样、柠条+细茎冰草根—土复合体试样、柠条+垂穗披碱草根—土复合体试样、未种植植物裸坡复合体试样作为研究对象。



注：① A 小区代表种植霸王边坡，B 小区代表种植细茎冰草边坡，C 小区代表种植白刺边坡，D 小区代表种植垂穗披碱草边坡，E 小区代表种植柠条锦鸡儿边坡，F 小区代表种植芨芨草边坡，G 代表未种植植物的对照组裸坡；② A+B 小区代表霸王与细茎冰草混合种植的边坡，A+D 小区代表霸王与垂穗披碱草混合种植的边坡，E+B 小区代表柠条与细茎冰草混合种植的边坡，E+D 小区代表霸王与垂穗披碱草混合种植的边坡。

图 1 试验区草本和灌木植物种植方案示意图



图 2 试验区种植植物情况



图 3 试验区植物生长情况

## 2.2 取样方法

为分析试验区种植植物边坡不同深度位置处根系的浅层加筋、深部锚固作用，本项试验中制取边坡不同深度位置处的根—土复合体原状直剪试样，即依据根系在边坡土体中实际生长情况，将取样深度分为坡面以下的 A 层、B 层等 2 层分别制取试样，即 A 层

为地表 0 cm 位置处，B 层为地表以下 20 cm 位置处。在制取直剪试样的同时亦相应地制取 A 层、B 层 2 个位置处的含水率试样，每层含水率值采用烘干法测得；在每组直剪试验前需分别对环刀试样称重，以计算得出边坡 A 层、B 层 2 个位置的土体天然密度。

## 2.3 试验方法

为了测得区内 8 种植物边坡以及未种植植物的素土边坡的抗剪强度指标，对试验区取回的 8 种根—土复合体试样以及素土试样进行直剪试验。试验采用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型应变控制直剪仪，以 0.8 mm/min 的剪切速率进行剪切至试样剪损，试样在 3~5 min 内即被剪破。直剪试验结束后，统计环刀内植物根系根径、根数等根系生长量指标。本项试验在确定根系数量时，由于试验区生长期为 150 d 的灌木植物根系数量相对较少，故采用数根方法来确定单位体积内的根系数量，相比较于灌木植物，草本植物根系数量相对较多，故在统计草本根系数量时采用估算法。其具体方法为：首先将从根—土复合体试样中清洗出的草本根系用滤纸将表面残留的水去除并称重，然后随机选取并测得其中 10 根草本根系质量，得到每根的平均根质量，最后用总根质量除以平均根质量，得到含根量，其具体计算方法为：

$$N = 10 M_{\text{tal}} / M_{10} \quad (1)$$

式中：N 表示根系的总数量（个）； $M_{\text{tal}}$  表示所统计根系的总鲜质量（g）； $M_{10}$  表示每 10 根根系鲜质量（g）。

## 3 结果与分析

### 3.1 植物根系特征分析

通过对试验区单一种植植物边坡和混合种植植物边坡的根—土复合体试样进行室内直剪试验，并在试验结束后采用清水对试样中的根系进行清洗，得到不同种植边坡根—土复合体试样中所包含的根系，并对所得到的根系进行根径、根数、根面积比 RAR 等根系生长量的统计。统计结果表明，生长期为 150 d 的单一种植和混合种植 2 种条件下根系生长量指标差异相对较小，故仅以 4 种单一种植边坡的植物根系生长量情况进行分析。

试验区草本和灌木根系生长量指标统计结果如表 1 所示，由该表可知，边坡坡面以下 A 层位置处 2 种灌木根系的平均根径依次为 1.67, 2.21 mm，根系数量均为 5 根，根面积比 RAR 依次为 0.467%，0.668%；B 层位置处 2 种灌木根系的平均根径依次为 1.41, 1.08 mm，根系数量依次为 4 根、2 根，根面积比 RAR 依次为 0.181%，0.062%。可以看出，随着边坡土体深度增加，2 种灌木根系的平均根径、根系数量、根面积比

RAR(即根系在单位面积内的含量)均有一定程度的降低,平均根径分别降低了 0.26,1.13 mm,根系数量分别降低了 1 根、3 根,根面积比 RAR 分别降低了 0.29%,0.61%,其中在 A 层位置处霸王根的平均根径、根面积比 RAR 均较柠条锦鸡儿大,而根系数量与柠条锦鸡儿相同;其在 B 层位置处的平均根径、根系数量、根面积比 RAR 均较柠条锦鸡儿小,这主要归因于霸王根系属浅根主直根型灌木,即主根粗壮不发达,侧根发达,且大部分侧根呈水平走向,与主根成 90°角<sup>[20]</sup>,而柠条锦鸡儿根系发达,为主直根型,主根明显,属于主侧根均衡发育型灌木<sup>[20]</sup>,故随着边坡土体深度增加,霸王根面积比 RAR 降低幅度较柠条锦鸡儿相对较为明显。由于草本植物根型为须状根系,其 90%的根系分布在边坡表层以下 0—20 cm 的浅层土壤内<sup>[21]</sup>,由该表可知,边坡坡面以下 A 层位置处 2 种草本根系的平

均根径依次为 0.22,0.18 mm,根系总鲜质量依次为 1.112,0.788 g,根系数量依次为 210 根、175 根,根面积比 RAR 依次为 0.275%,0.142%;B 层位置处 2 种草本根系的平均根径依次为 0.19,0.18 mm,根系总鲜质量依次为 0.039,0.174 g,根系数量依次为 22 根、45 根,根面积比 RAR 依次为 0.022%,0.036%。可以看出随着边坡土体深度的增加,2 种草本根系在坡面以下 B 层位置处的平均根径较 A 层基本保持不变,而根系总鲜质量、根系数量、根面积比 RAR 均较 A 层均有明显的降低,即根系总鲜质量分别降低了 1.073,0.614 g,根系数量分别降低了 188 根、130 根,根面积比 RAR 分别降低了 0.25%,0.11%,其中垂穗披碱草在 A 层处的平均根径、根系鲜质量、根系数量、根面积比 RAR 均较细茎冰草小,而在 B 层深度处,2 种草本的根系生长量基本相同。

表 1 试验区草本和灌木植物根系生长量指标统计结果

边坡类型	边坡取样位置	平均根径/mm	每 10 根鲜质量/g	根系总鲜质量/g	根系数量/根	根面积比 RAR/%
细茎冰草边坡	A 层	0.22	0.053	1.112	210	0.275
	B 层	0.19	0.018	0.039	22	0.022
垂穗披碱草边坡	A 层	0.18	0.045	0.788	175	0.142
	B 层	0.18	0.039	0.174	45	0.036
柠条锦鸡儿边坡	A 层	1.67	—	—	5	0.467
	B 层	1.41	—	—	4	0.181
霸王边坡	A 层	2.21	—	—	5	0.668
	B 层	1.08	—	—	2	0.062

注:① 表中根面积比(RAR)=环刀中根系面积/环刀面积,其中环刀面积为 30 cm<sup>2</sup>;② 草本根系数量的计算方法见式(1);③“—”表示该项未统计。

本研究对生长期为 150 d 的细茎冰草、垂穗披碱草、柠条锦鸡儿、霸王 4 种植物进行根系生长量的统计。统计结果表明,生长期为 150 d 的 2 种草本根系的平均根径为 0.18~0.22 mm,且由于草本植物根型为须状根系,其大部分的根系分布在边坡表面以下 0~20 cm 的浅层土体内;2 种灌木根系的平均根径为 1.08~2.21 mm,且随边坡土体深度增加,2 种灌木根系的平均根径、根系数量、根面积比 RAR 均有一定程度的降低。

与本研究结果相类似的相关研究成果主要表现在:卢海静等<sup>[22]</sup>对生长期为 1 a 的垂穗披碱草(*Elymus dahuricus*)与芨芨草(*Achnatherum splendens*)的根系生长量进行了统计,结果表明 2 种草本的平均根径为 0.25~0.31 mm。乔娜<sup>[23]</sup>对生长期为 16 个月的柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)与霸王(*Zygophyllum xanthoxylon*)根系生长量特征进行了统计,结果表明柠条锦鸡儿根系长度为 0.5~1.0

m,根径为 3.0~6.5 mm,霸王根系长度为 0.4~0.8 m,根径为 4.0~8.0 mm。上述根系生长量结果均略大于本项研究中所得结果,其主要原因在于本项研究所采用的供试种的生长期相对较短所致;类似的研究还表现在:黄晓乐<sup>[24]</sup>通过对生长期为 0.5 a,1 a,1.5 a 的紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)根系生长量进行了统计,结果表明,2 种草本生长期为 0.5 a 时,其平均根长为 12~15 cm;生长期为 1 a 时,平均根长为 17~20 cm;生长期为 1.5 a 时,平均根长为 21~22 cm。李建兴等<sup>[25]</sup>通过对生长期为 6 个月的香根草(*Vetiveria zizanioides*)、百喜草(*Paspalum notatum*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)4 种草本根系进行根系生长量的统计,指出这 4 种草本根系集中分布地表以下 0~10 cm 深度范围内,且随着土层深度的增加,4 种草本根系生长量指标均表现为递减趋势。综合以上研究结果可知,草本根系多集中分布于浅层边

坡且根系生长量指标随土体深度增加而降低。

3.2 单一种植草本边坡根—土复合体抗剪强度分析

通过对区内边坡地表以下的两个深度处,细茎冰草根—土复合体试样、垂穗披碱草根—土复合体试样、素土试样进行室内直剪试验,分别得到不同深度处试样的粘聚力  $c$  值和内摩擦角  $\varphi$  值,试验结果如表 2 所示。由表 2 可知,对于 A 层,细茎冰草根—土复合体试样、垂穗披碱草根—土复合体试样的粘聚力值分别为 24.09,22.81 kPa,较素土试样的粘聚力值分别高出 12.32,11.04 kPa,粘聚力值的增加幅度依次为 104.67%,93.80%。对于 B 层,细茎冰草根—土复合体试样、垂穗披碱草根—土复合体试样的粘聚力值分别为 19.06,21.02 kPa,较素土试样的粘聚力值分别高出 4.69,6.65 kPa,粘聚力值的增加幅度依次

为 32.64%,46.28%。由此可知,2 种单一种植植物边坡在 A 层、B 层根—土复合体试样的粘聚力均高于相应位置处素土试样的粘聚力,显著地体现了草本植物根系对浅层边坡土体的加筋作用。通过对比可知相同植物种在边坡 A 层、B 层根—土复合体试样的粘聚力值,表现出 A 层根—土复合体试样的粘聚力值均高于 B 层根—土复合体试样的粘聚力值,以细茎冰草边坡为例,其在 A 层根—土复合体试样的粘聚力值为 24.09 kPa,根面积比 RAR 为 0.275%,而在 B 层根—土复合体试样的粘聚力值为 19.06 kPa,根面积比 RAR 为 0.022%。这主要归因于,2 种草本植物根面积比 RAR 随土体深度增加呈明显的降低趋势,即根—土复合体试样粘聚力值随根面积比 RAR 增加呈增长的趋势。

表 2 试验区 2 种草本根—土复合体试样的直剪试验结果

边坡类型	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$		含水率 $\omega/\%$		粘聚力 $c/\text{kPa}$		内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	
	A 层	B 层	A 层	B 层	A 层	B 层	A 层	B 层
素土边坡	1.54	1.63	17.70	15.95	11.77	14.37	20.7	22.0
细茎冰草边坡	1.79	1.72	20.10	17.47	24.09	19.06	21.5	23.8
垂穗披碱草边坡	1.82	1.85	21.78	18.99	22.81	21.02	23.7	24.1

本项研究通过对 2 种草本根—土体复合体试样进行室内直剪试验,结果表明,草本根—土复合体的粘聚力值均大于未种植植物素土的粘聚力值,且粘聚力值的增长值为 4.69~12.32 kPa,粘聚力的增加幅度为 32.64%~104.67%,说明草本根系能显著地增强边坡土体的抗剪强度,且草本根系对土体抗剪强度的贡献值与根面积比 RAR 有关,即根系对土体抗剪强度的贡献值随根面积 RAR 的增大而增大。

与本研究结果相类似的相关研究成果主要表现在:王华<sup>[26]</sup>通过对高羊茅(*Festuca elata*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、早熟禾(*Poa annua*)、黑麦草(*Lolium perenne*)4 种草本根—土复合体进行直剪试验,结果表明,4 种草本根—土复合体的粘聚力值依次为 17.31,14.57,18.54,19.24 kPa,均大于素土试样的粘聚力值 13.50 kPa。李建兴等<sup>[27]</sup>通过对香根草(*Vetiveria zizanioides*)、百喜草(*Paspalum notatum*)、紫花苜蓿、狗牙根(*Cynodon dactylon*)4 种草本根—土复合体进行直剪试验,认为根—土复合体粘聚力值较素土粘聚力值相比,增加幅度依次为 121.11%,113.94%,47.61%,12.54%。类似研究还表现在,郑启萍等<sup>[4]</sup>通过对含根量为 0.5%,1.0% 的狗牙根(*Cynodon dactylon*)根—土复合体、麦冬草(*Ophiopogon japonicus*)根—土复合体进行直剪试验,结果表明,含根量为 0.5%,1.0% 的狗牙根根—土复合体的粘聚力值依次为 29.77,35.30 kPa,麦冬草根—土复合

体的粘聚力值依次为 26.48,30.97 kPa,故认为 2 种草本根系能显著提高土体抗剪强度,且含根量愈大固土效果愈好。黄晓乐等<sup>[28]</sup>通过对狗牙根、紫花苜蓿等 2 种草本根—土复合体进行直剪试验,结果表明,草本根—土复合体的粘聚力值较基材空白样(植被混凝土)相比,增长值为 1.35~11.81 kPa,增加幅度为 14.8%~129.4%,该结果与本研究中所得结果存在一定程度的差异,主要归因于所采用的植物供试种类型的不同,即上述试验采用的供试种为狗牙根根—土复合体、紫花苜蓿根—土复合体、植被混凝土,而本项研究主要以细茎冰草根—土复合体、垂穗披碱草根—土复合体、素土复合体为试验供试种类型。由以上试验结果可知,草本根系的存在能显著提高浅层边坡土体的抗剪强度,且贡献值随根系含量在一定范围内的增大而呈增大趋势。

3.3 单一种植灌木根—土复合体抗剪强度分析

通过对边坡地表以下两个深度处的柠条锦鸡儿根—土复合体试样、霸王根—土复合体试样进行室内直剪试验,分别得到了不同深度的试样粘聚力  $c$  值和内摩擦角  $\varphi$  值,试验结果如表 3 所示。由表 3 可知,对于 A 层,柠条锦鸡儿根—土复合体试样、霸王根—土复合体试样的粘聚力值分别为 19.03,17.91 kPa,较素土试样的粘聚力值分别高出 7.26,6.14 kPa,粘聚力值的增加幅度依次为 61.68%,52.17%。对于 B 层,柠条锦鸡儿根—土复合体试样、霸王根—土复合体试样的粘聚力值分别为 21.26,18.47 kPa,较素

土试样的粘聚力值分别高出 6.89,4.10 kPa,粘聚力值的增加幅度依次为 47.95%,28.53%。由表 3 还可知,2 种灌木根系对边坡土体抗剪强度的贡献值(即为相同位置处根—土复合体试样粘聚力值与素土试样粘聚力值之差)依次由 7.26,6.14 kPa 降低至

6.89,4.1 kPa,即体现出根系对边坡土体抗剪强度的贡献值随着土层深度的增加而呈递减趋势,这主要归因于随着土层深度的增加土体中灌木植物根面积比 RAR 有所降低,即分别由 A 层处的 0.467%,0.668%降低至 B 层处的 0.181%,0.062%。

表 3 试验区 2 种灌木根—土复合体的直剪试验结果

边坡类型	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$		含水率 $\omega/\%$		粘聚力 $c/\text{kPa}$		内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	
	A 层	B 层	A 层	B 层	A 层	B 层	A 层	B 层
素土边坡	1.54	1.63	17.70	15.95	11.77	14.37	20.7	22.0
柠条锦鸡儿边坡	1.65	1.83	18.23	17.31	19.03	21.26	21.6	23.1
霸王边坡	1.67	1.88	19.54	17.49	17.91	18.47	21.3	21.5

本项研究得出试验区 2 种灌木根—土复合体粘聚力值较素土高 4.10~7.26 kPa,粘聚力的增加幅度为 28.53%~61.68%,其中柠条锦鸡儿根系增强土体抗剪强度的贡献大于霸王根系。

与本项研究结果相类似的相关研究成果主要表现在:李国荣等<sup>[29]</sup>对柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、四翅滨藜(*Atriplex canescens*)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylon*)及白刺(*Nitraria tangutorum*)根—土复合体试样进行了三轴试验,结果表明,4 种灌木根—土复合体试样的粘聚力值依次为 13.51,9.09,3.62,4.34 kPa,较素土试样的粘聚力值依次高 10.56,6.14,0.67,1.39 kPa。姚喜军等<sup>[30]</sup>通过对柠条(*Caragana microphylla*)根—土复合体与沙地柏(*Sabina vulgaris*)根—土复合体进行直剪试验,亦发现 2 种植物根—土复合体的抗剪强度均大于素土,且粘聚力值增加幅度为 31.6%~46.23%。类似研究还表现在,廖晶晶等<sup>[31]</sup>以紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、胡枝子根系为研究对象,通过对 2 种灌木的根—土复合体进行室内直剪试验,分析比较了含根量分别为 0.1 g/60 cm<sup>3</sup>,0.3 g/60 cm<sup>3</sup>,0.5 g/60 cm<sup>3</sup>,0.7 g/60 cm<sup>3</sup>,1.0 g/60 cm<sup>3</sup> 的 5 种条件下,根—土复合体的抗剪强度特征。结果表明,在一定含根量范围内,2 种灌木根—土复合体的抗剪强度随着含根量的增加而增大,即认为根系对提高土体抗剪强度的作用存在最佳含根量。本项研究尚未开展不同含根量的根—土复合体试样抗剪强度试验,有关根系增强土体抗剪强度的最佳含根量探讨,将在后续试验中做进一步完善。

边坡地表以下的 A 层位置处,2 种单一种植草本边坡根—土复合体试样的粘聚力值,较素土试样分别高出 12.32,11.04 kPa,粘聚力值的增加幅度依次为 104.67%,93.80%;2 种单一种植灌木边坡根—土复合体试样的粘聚力值,较素土试样分别高出 7.26,6.14 kPa,粘聚力值的增加幅度依次为 61.68%,

52.17%,如表 4 所示。可以看出,4 种植物根系对边坡土体抗剪强度的增强作用由大至小依次为细茎冰草、垂穗披碱草、柠条锦鸡儿、霸王,反映出单一种植草本较单一种植灌木对边坡浅层土体抗剪强度的增强作用相对更为明显,这主要归因于草本根系多为须根型且集中于坡面以下 0—20 cm 的土体内,即在坡面以下 A 层深度范围内草本的根系数量较多,起到了明显的加筋作用。对于 B 层而言,2 种单一种植草本边坡根—土复合体试样的粘聚力值,较素土试样分别高出 4.69,6.65 kPa,粘聚力值的增加幅度依次为 32.64%,46.28%;2 种单一种植灌木边坡根—土复合体试样较素土试样的粘聚力值分别高出 6.89,4.10 kPa,粘聚力值的增加幅度依次为 47.95%,28.53%,如表 4 所示。对比 A,B 层深度处 4 种植物根—土复合体较素土试样粘聚力值的增加幅度可知,随边坡土体深度增加,4 种植物根—土复合体的粘聚力值较素土试样的粘聚力值的增加幅度均有所下降,且 2 种草本的下降幅度较 2 种灌木要大,下降幅度由大至小依次为 72.03%,47.52%,23.64%,13.73%,其对应的植物分别为细茎冰草、垂穗披碱草、霸王、柠条锦鸡儿,这体现了主直根型灌木根系对深层边坡土体的锚固作用。

3.4 混合种植边坡根—土复合体抗剪强度分析

通过对区内边坡 2 个深度处的柠条锦鸡儿+垂穗披碱草根—土复合体试样、柠条锦鸡儿+细茎冰草根—土复合体试样,霸王+垂穗披碱草根—土复合体试样、霸王+细茎冰草根—土复合体试样进行室内直剪试验,分别得到不同深度的试样粘聚力  $c$  值和内摩擦角  $\varphi$  值,试验结果如表 5 所示。由表 5,表 6 可知,混合种植类型与未种植植物的素土相比,具有显著的增强作用,同时,随着边坡土体深度增加,柠条锦鸡儿+细茎冰草、霸王+细茎冰草、柠条锦鸡儿+垂穗披碱草、霸王+垂穗披碱草 4 种混合种植根系对素土的贡献的有所降低,即由 A 层的 14.05,13.81,11.36,

11.07 kPa 依次降低至 B 层处的 9.43,11.38,7.35,7.43 kPa,分别降低了 4.62,2.43,4.01,3.64 kPa;此外,4 种混合种植边坡土体的粘聚力值较未种植植物素土边坡的粘聚力值增加幅度亦有所降低,即由边坡地表以下 A 层的 119.37%,117.33%,96.52%,94.05%依次降低至 B 层处的 65.62%,79.19%,51.15%,51.70%,其降低幅度分别为 53.75%,38.14%,45.37%,42.35%;类似地,单一种植的草本在边坡 A 层对素土的贡献为 12.32,11.04 kPa,B 层对素土的贡献为 4.69,6.65 kPa,分别降低了 7.63,4.39 kPa,粘

聚力增长幅度由 A 层的 104.67%,93.80%降低至 B 层处的 32.64%,46.27%,分别降低了 72.03%,47.53%,反映出混合植物种植的降低幅度明显低于相应草本单一种植条件下的降低幅度。这是因为混合种植条件下,边坡 B 层深度处的 2 种灌木根面积比 RAR 相对草本要高,2 种草本根面积比 RAR 趋近于零,表明此时边坡土体中仍有一定数量灌木根系的存在,而草本根系含量相对较低,即表现为随着边坡土体深度的增加草本根系对土体抗剪强度的增强作用逐渐降低,灌木根系对土体的锚固作用逐渐体现。

表 4 试验区 4 种单一种植根—土复合体试样结果对比

边坡类型	粘聚力 $c/\text{kPa}$		内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$		粘聚力增长值/ $\text{kPa}$		粘聚力增加幅度/ $\%$	
	A 层	B 层	A 层	B 层	A 层	B 层	A 层	B 层
细茎冰草边坡	24.09	19.06	21.5	23.8	12.32	4.69	104.67	32.64
垂穗披碱草边坡	22.81	21.02	23.7	24.1	11.04	6.65	93.80	46.28
柠条锦鸡儿边坡	19.03	21.26	21.6	23.1	7.26	6.89	61.68	47.95
霸王边坡	17.91	18.47	21.3	21.5	6.14	4.10	52.17	28.53

注:①表中粘聚力增长值指的是单一种植根—土复合体试样粘聚力值较素土试样粘聚力值高出的值,其具体计算方法为:种植植物边坡复合体试样粘聚力值—不含根系素土试样粘聚力值;②粘聚力增加幅度指的是单一种植复合体试样粘聚力值较素土试样粘聚力值提高的幅度,其具体计算方法为:复合体试样粘聚力增长值/不含根系素土试样的粘聚力值 $\times 100\%$ 。

表 5 试验区 4 种混合种植根—土复合体试样的直剪试验结果

边坡类型	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$		含水率 $\omega/\%$		粘聚力 $c/\text{kPa}$		内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	
	A 层	B 层	A 层	B 层	A 层	B 层	A 层	B 层
素土边坡	1.54	1.63	17.70	15.95	11.77	14.37	20.7	22.0
柠条锦鸡儿+垂穗披碱草边坡	1.79	1.84	22.48	20.48	23.13	21.72	24.7	23.6
柠条锦鸡儿+细茎冰草边坡	1.92	1.86	19.74	19.60	25.82	23.80	26.2	26.1
霸王+垂穗披碱草边坡	1.87	1.85	25.25	20.42	22.84	21.80	18.7	22.7
霸王+细茎冰草边坡	1.89	1.81	21.42	20.03	25.58	25.75	22.6	23.8

表 6 试验区 4 种混合种植根—土复合体试样与素土试样直剪试验结果对比

边坡类型	粘聚力 $c/\text{kPa}$		内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$		粘聚力增长值/ $\text{kPa}$		粘聚力增加幅度/ $\%$	
	A 层	B 层	A 层	B 层	A 层	B 层	A 层	B 层
素土边坡	11.77	14.37	20.7	22.0	0	0	0	0
柠条锦鸡儿+垂穗披碱草边坡	23.13	21.72	24.7	23.6	11.36	7.35	96.52	51.15
柠条锦鸡儿+细茎冰草边坡	25.82	23.80	26.2	26.1	14.05	9.43	119.37	65.62
霸王+垂穗披碱草边坡	22.84	21.80	18.7	22.7	11.07	7.43	94.05	51.70
霸王+细茎冰草边坡	25.58	25.75	22.6	23.8	13.81	11.38	117.33	79.19

注:①表中粘聚力增长值指的是混合种植根—土复合体试样粘聚力值较素土试样粘聚力值高出的值,其具体计算方法为:种植植物边坡粘聚力值—相应位置处素土边坡粘聚力值;②表中粘聚力增加幅度指的是混合种植根—土复合体试样粘聚力值较素土试样粘聚力值提高的幅度,其具体计算方法为:粘聚力增长值/相应位置处素土边坡试样的粘聚力值 $\times 100\%$ 。

3.5 单一种植根—土复合体抗剪强度与混合种植物根—土复合体抗剪强度结果对比

由表 7 可知,区内 4 种混合种植的根—土复合体试样的粘聚力值均大于相应位置处 4 种单一种植根—土复合体试样的粘聚力值。以柠条锦鸡儿+细茎冰草边坡为例,在坡面以下 A 层处,柠条锦鸡儿+细茎冰草混合种植根—土复合体试样粘聚力值为

25.82 kPa,较柠条锦鸡儿单一种植根—土复合体试样粘聚力值和细茎冰草单一种植根—土复合体试样粘聚力值分别高出 6.79,1.73 kPa,粘聚力值的增加幅度依次为 35.68%,7.18%;在坡面以下 B 层处,柠条锦鸡儿+细茎冰草混合种植根—土复合体试样粘聚力值为 23.80 kPa,较柠条锦鸡儿单一种植根—土复合体试样粘聚力值和细茎冰草单一种植根—土复



合体试样粘聚力值分别高出 2.54,4.74 kPa,粘聚力值的增加幅度依次为 11.95%,24.87%。类似地,其他 3 种混合种植的边坡类型较相应的单一种植边坡,在坡面以下 A 层处,根—土复合体试样粘聚力增长值为 0.03~7.67 kPa,粘聚力增加幅度为 0.13%~42.83%,如表 7 所示。由以上对比可知,混合种植条

件下的植物根系对边坡土体抗剪强度的贡献值,均大于相应位置处相应 2 种植物单一种植条件下的贡献值,其原因归因于边坡土体内灌木和草本根系交错分布,实现浅层根系和深层根系在土体空间分布的相互补充,在边坡土体中形成网状根系结构,体现出了浅根加筋作用和深根锚固作用的相互弥补作用<sup>[32]</sup>。

表 7 试验区单一种植根—土复合体抗剪强度与混合种植物根—土复合体抗剪强度结果对比

混合种植边坡类型	单一种植边坡类型	粘聚力增长值/kPa		粘聚力增加幅度/%	
		A 层	B 层	A 层	B 层
柠条锦鸡儿+垂穗披碱草边坡	柠条锦鸡儿边坡	4.1	0.46	21.54	2.16
	垂穗披碱草边坡	0.32	0.7	1.40	3.33
柠条锦鸡儿+细茎冰草边坡	柠条锦鸡儿边坡	6.79	2.54	35.68	11.95
	细茎冰草边坡	1.73	4.74	7.18	24.87
霸王+垂穗披碱草边坡	霸王边坡	4.93	3.33	27.53	18.03
	垂穗披碱草边坡	0.03	0.78	0.13	3.71
霸王+细茎冰草边坡	霸王边坡	7.67	7.28	42.83	39.42
	细茎冰草边坡	1.49	6.69	6.19	35.10

注:① 表中粘聚力增长值指的是混合种植边坡与相应单一种植边坡粘聚力相比高出的值,其具体计算方法为:混合种植根—土复合体粘聚力值—相应单一种植根—土复合体粘聚力值;② 粘聚力增加幅度指的是混合种植边坡与相应单一种植边坡粘聚力相比高出的幅度,其具体计算方法为:粘聚力增长值/相应单一种植根—土复合体试样的粘聚力值×100%。

本项研究通过对 4 种单一种植根—土复合体试样及 4 种混合种植根—土复合体试样进行室内直剪试验,结果表明:4 种混合种植的根—土复合体试样的粘聚力值均大于相应位置处 4 种单一种植根—土复合体试样的粘聚力值,故认为采用草本和灌木混合种植的方式对提高边坡土体抗剪强度起到相对更为显著的作用。

与本研究结果相类似的相关研究成果主要表现在:肖宏彬等<sup>[33]</sup>通过对香根草(*Vetiveria zizanioides*) + 小叶女贞(*Ligustrum quihoui*)根—土复合体进行直剪试验,探索了在不同含水率及不同含根比的条件下,植物根系对复合体抗剪强度的影响规律。试验结果表明,在总含根量为 10.1~15.71 mm<sup>2</sup>,含根比为 16 : 4,12 : 8 的情况下,香根草 + 小叶女贞根—土复合体试样的粘聚力值依次为 90.97,88.89 kPa,均高于小叶女贞根—土复合体的粘聚力值 66.61 kPa。余芹芹等<sup>[34]</sup>通过对芨芨草(*Chnatherum splendens*)根—土复合体、柠条锦鸡儿根—土复合体、柠条锦鸡儿 + 芨芨草根—土复合体进行三轴压缩试验,得到 3 种根—土复合体的粘聚力值,且粘聚力值由大至小依次为柠条锦鸡儿 + 芨芨草根—土复合体、芨芨草根—土复合体、柠条锦鸡儿根—土复合体、素土,增长幅度依次为 94.1%,66.6%,39.2%,故认为植物根系对边坡土体具有显著的加筋作用,同时也指出采用草本与灌木组合种植方式,对试验区土体的加筋效果较单一种植草本或灌木植物显著。

4 结 论

(1) 8 种类型植物边坡在坡面以下 A 层处的根—土复合试样粘聚力为 17.91~25.82 kPa,素土边坡在 A 层处的试样粘聚力为 11.77 kPa,即 8 种类型植物边坡在坡面以下 A 层处的根—土复合试样粘聚力均大于素土边坡在 A 层试样的粘聚力;坡面以下 B 层处的根—土复合试样粘聚力值为 18.47~25.75 kPa,亦均大于素土边坡在 B 层深度处试样的粘聚力值 14.37 kPa,说明植物根系能显著提高边坡土体的抗剪强度。

(2) 单一种植条件下草本植物边坡在坡面以下 A 层处的根—土复合试样的粘聚力值分别为 24.09,22.81 kPa,均大于单一种植时的灌木植物边坡在 A 层处的根—土复合试样的粘聚力值 19.03,17.91 kPa,说明草本植物根系较灌木植物根系对边坡表层土体起到相对较强的土体抗剪强度的作用。

(3) 随着边坡土体深度增加,4 种混合种植根系对素土抗剪强度贡献的降低幅度分别为 53.75%,38.14%,45.37%,42.35%,相比较于单一种植草本根系对素土抗剪强度贡献的降低幅度 72.04%,47.52%要低。即随着边坡土体深度增加,草本根系对土体抗剪强度的增强作用呈降低趋势,相应地灌木根系的锚固作用开始逐渐发挥出来。

(4) 在边坡表层以下的 2 个深度处混合种植的根—土复合体试样粘聚力值,较 2 种植物单一种植



根—土复合体试样的粘聚力值高,说明混合种植根系对边坡土体抗剪强度的贡献均大于相应位置处2种单一种植,故采用草本和灌木混合种植的方式对提高边坡土体抗剪强度起到相对更为显著的作用。

#### 参考文献:

- [1] 韦仕川,栾乔林,黄朝明,等.地质灾害防治的土地利用规划软措施研究综述及展望[J].自然灾害学报,2014,23(3):159-165.
- [2] 惠尚,张云伟,刘晶,等.丛生竹根系抗拉力学特性[J].山地学报,2013,31(1):65-70.
- [3] Katuwal S, Vermang J, Cornelis W M, et al. Effect of root density on erosion and erodibility of a loamy soil under simulated rain[J]. Soil Science,2013,178(1):29-36.
- [4] 郑启萍,徐得潜.草本植物护坡机理及其固土效应试验研究[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2014,37(2):225-228.
- [5] 余芹芹,胡夏嵩,李国荣,等.寒旱环境灌木植物根—土复合体强度模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(5):1020-1031.
- [6] 赵玉娇,胡夏嵩,刘昌义,等.植物根—土复合体剪切试验及其力学模型研究现状与展望[J].中国水土保持,2015(10):51-55,80.
- [7] 李国荣,陈文婷,胡夏嵩,等.青藏高原东北部黄土地区降雨入渗对土质边坡稳定性的影响研究[J].水文地质工程地质,2015,42(2):105-111.
- [8] 李光莹,胡夏嵩,虎啸天,等.黄河源玛沁地区高寒草地植物固土护坡的力学效应[J].山地学报,2014,32(5):550-560.
- [9] 朱锦奇,王云琦,王玉杰,等.基于试验与模型的根系增强抗剪强度分析[J].岩土力学,2014,35(2):449-458.
- [10] Loades K W, Bengough A G, Bransby M F, et al. Planting density influence on fibrous root reinforcement of soils[J]. Ecological Engineering,2010,36(3):276-284.
- [11] 陆桂红,欧国强,杨顺,等.泥石流源区典型草本植物根系抗拉试验[J].山地学报,2014,32(6):725-731.
- [12] 杨悦舒,夏振尧,肖海,等.多花木蓝根—土复合体抗剪强度试验研究[J].长江科学院院报,2014,31(4):72-76.
- [13] 栗越州,付江涛,余冬梅,等.寒旱环境盐生植物根系固土护坡力学效应及其最优含根量探讨[J].岩石力学与工程学报,2015,34(7):1371-1383.
- [14] Ghestem M, Veylon G, Bernard 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.
- [15] 郭翬,王云琦,王青兰,等.根系逐渐破坏过程中固土效果研究[J].北京林业大学学报,2014,38(6):1-8.
- [16] 刘治兴,杨建英,杨洋,等.高速公路不同植物防护边坡根土复合体抗剪能力研究[J].生态环境学报,2015,24(4):631-637.
- [17] Katuwal S, Vermang J, Cornelis W M, et al. Effect of root density on erosion and erodibility of a loamy soil under simulated rain[J]. Soil Science,2013,178(1):29-36.
- [18] 梅朵,高原,马艳,等.近50 a 青海西宁气温变化特征[J].干旱气象,2013,31(1):100-106.
- [19] 王颖华,张鑫.西宁降水量特征及变化趋势分析[J].水土保持研究,2011,18(5):156-160.
- [20] 中国科学院西北高原生物研究所.青海植物志(第2卷)[M].西宁:青海人民出版社,1997.
- [21] 梁泉,廖红,严小龙.植物根构型的定量分析[J].植物学通报,2008,24(6):695-702.
- [22] 卢海静,余芹芹,胡夏嵩,等.西宁盆地黄土区草本植物群根效应及其护坡贡献[J].中国水土保持,2013(12):55-59,77.
- [23] 乔娜.寒旱环境植物根系增强边坡土体强度力学效应研究[D].西宁:青海大学,2012.
- [24] 黄晓乐.草本植物根系对植被混凝土基材浅层抗剪强度的影响[D].湖北宜昌:三峡大学,2011.
- [25] 李建兴,何丙辉,湛芸,等.不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J].农业工程学报,2013,29(10):144-152.
- [26] 王华.植被护坡根系固土及坡面侵蚀机理研究[D].成都:西南交通大学,2010.
- [27] 李建兴,何丙辉,湛芸.不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J].生态学报,2013,33(5):1535-1544.
- [28] 黄晓乐,周正军,许文年.植被混凝土基材2种草本植物根—土复合体抗剪强度与根系分形特征研究[J].三峡大学学报:自然科学版,2012,34(2):59-62.
- [29] 李国荣,胡夏嵩,毛小青,等.青藏高原东北部黄土区灌木植物根系护坡效应的数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2010,29(9):1877-1884.
- [30] 姚喜军,刘静,王林和,等.快剪条件下柠条和沙地柏根系提高土壤抗剪特性研究[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2008,29(4):82-86.
- [31] 廖晶晶,罗绪强,罗光杰,等.三种护坡植物根—土复合体抗剪强度比较[J].水土保持通报,2013,33(5):118-122.
- [32] 李国荣,毛小青,倪三川,等.浅析灌木与草本植物护坡效应[J].草业科学,2007,24(6):86-89.
- [33] 肖宏彬,田青青,李珍玉,等.林草混交根—土复合体的抗剪强度特性[J].中南林业科技大学学报,2014,34(2):1-5.
- [34] 余芹芹,乔娜,胡夏嵩,等.植物根系对土体加筋效应研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(S1):3216-3223.