

塔里木河流域河岸植被根系护坡的力学机制

宗全利^{1,2}, 冯 博², 蔡杭兵², 陈志康², 王建新²

(1. 水利部黄河泥沙重点实验室, 河南 郑州 450003; 2. 石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000)

摘要: 荒漠植被根系发达, 能够有效稳定边坡、遏制水土流失。以塔里木河典型岸坡植被根系为研究对象, 对塔里木河干流上、中游的 6 个典型河段进行现场勘查并取样, 共取土样 28 组, 17 组为根-土复合体, 包括红柳、甘草、骆驼刺、芦苇、胡杨、白刺 6 种植被根系。分别对 6 种不同植被的根-土复合体及相应的素土进行室内直接剪切试验, 对比分析黏聚力和内摩擦角的变化规律, 定量评价不同植被根系对河岸土体抗剪强度的增强效果; 对 6 种植被根系进行单根抗拉试验, 分析不同植被根系的抗拉强度及抗剪强度与根系直径的关系。试验结果表明: (1) 根系能提高土体抗剪强度且主要是通过提高黏聚强度来实现的, 对内摩擦角影响较小; (2) 根-土复合体黏聚力普遍比素土高, 6 种植被根系下由 3.14~16.51 kPa 提高到 9.43~28.30 kPa; (3) 根系抗拉强度随直径的增大而减小, 而抗拉力随直径增大而增大。通过分析根-土之间相互作用的力学特点, 将根系假设为刚性状态和柔性状态, 建立植物护坡中根-土相互作用的力学模型, 分别推导出刚性状态下根系提高土体抗剪强度最大值以及柔性状态下根系提高土体抗剪强度最小值的计算公式, 根据公式计算得出不同植被根系提高土体抗剪强度最大值和最小值范围, 并与试验结果进行对比分析, 结果表明: 实测土体抗剪强度增加值全部在理论计算范围以内, 说明模型计算方法的合理性, 为实际工程植被护坡效应的评价提供理论依据。

关键词: 土力学; 塔里木河干流; 植被护坡; 根-土复合体; 力学模型; 抗剪强度

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2018)05-1290-11

Mechanism of riverbank protection by desert riparian vegetation roots in Tarim River basin

ZONG Quanli^{1,2}, FENG Bo², CAI Hangbing², CHEN Zhikang², WANG Jianxin²

(1. Key Laboratory of Yellow River Sediment, Ministry of Water Resources, Zhengzhou, Henan 450003, China;

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: Desert riparian vegetation with rich roots can stabilize the slope and prevent soil erosion effectively. The vegetation of the riverside of Tarim River was studied. Six typical sections in the upper and middle reaches of Tarim River were surveyed. A total of 28 soil samples were obtained, of which 17 samples are root-soil composites including *Tamarix ramosissima*, *Phragmites australis*, *Glycyrrhiza* sp., *Alhagi sparsifolia*, *Nitraria sibirica* and *Populus euphratica*. The direct shear tests were conducted for root-soil composites of six vegetation roots and soil samples without roots respectively. The cohesion and internal friction angle were compared and the effects of different vegetation roots on shear strength were analyzed. A single root tensile test was conducted for

收稿日期: 2017-10-23; **修回日期:** 2017-12-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51569029); 水利部黄河泥沙重点实验室开放课题(2015005); 石河子大学高层次人才专项(RCZX201529)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51569029), Open Foundation of Key Laboratory of Yellow River Sediment Research (Grant No. 2015005) and Foundation of Shihezi University(Grant No. RCZX201529)

作者简介: 宗全利(1979-), 男, 博士, 2002年毕业于石河子大学土木工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事河流生态等方面的研究工作。E-mail: quanli1871@126.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1371

six vegetation types to analyze the relationships between the tensile and shear strengths and the root diameter. The roots were found to enhance the shear strength of the soil through mainly the increasing of the cohesive strength, but had little effect on the internal friction angle. The root-soil composites have cohesions of 9.43 to 28.30 kPa, higher than the rootless soil with values from 3.14 to 16.51 kPa. The tensile strength of root decreases with the increasing of root diameter, while the tensile force increases with the increasing of root diameter. Based on the analysis of mechanical characteristics of root-soil interaction, two models of the root and soil interaction were proposed with the assumptions of rigid and flexible roots respectively, representing the increased maximum and minimum shear strengths. The formulas of the increased maximum and minimum shear strengths with rigid and flexible roots were deduced. The calculated results agreed with the experimental values.

Key words: soil mechanics; the main stream of Tarim River; riverbank protection from vegetation roots; root-soil composite; mechanical model; shear strength

1 引 言

水土流失不仅造成土地资源破坏, 水灾、旱灾频繁, 而且还为下游江河带来严重的洪水泥沙危害。在我国, 水土流失引发的危害已经十分严重, 对于地处荒漠环境的西北地区更为严重。以塔里木河为例, 它是我国最大的内陆河流, 也是塔里木盆地向心水系的汇流河, 地处干旱内陆地区, 气候干旱, 降雨稀少, 蒸发强烈, 水资源匮乏, 生态环境脆弱。由于塔里木河干流缺乏堤防控制工程, 导致水土流失严重, 汛期(每年 6~9 月)洪水漫溢河段长达 400~500 km, 满溢宽度一般为 3~5 km, 最宽超过 20 km, 满溢面积为 3 000~5 000 km², 遇丰水年漫溢消耗的水量达 20~30 亿 m³[1]。

众所周知, 植被在边坡加固、控制坡面侵蚀、防治水土流失、保护生态环境等方面有显著的作用, 所以植被护坡技术被广泛地运用于固土护坡的实际工程中[2]。欧美等发达国家在 19 世纪初就开始利用植被进行边坡防护, 而国内植被护坡技术的应用始于 20 世纪 90 年代, 多用撒草种、穴播或沟播、铺草皮、片石骨架植草等护坡方法[3]。

虽然植被护坡技术早在 19 世纪初就开始应用, 但其相关理论的研究却是最近几十年才开始发展, 所以理论研究远滞后于实际工程应用。生态环境不断恶化, 促使了相关领域的学者开展植被护坡研究, 从而使得植被护坡技术能够在边坡灾害防治中得到推广。T. H. Wu 等[4-6]基于莫尔-库仑强度准则, 提出了垂直根系加筋固土的力学计算模型来评价根系固土护坡的作用, 也被称为 Wu-Waldron 模型; T. Wasterlund[7]研究表明, 根系能提高 50%~70%土体抗剪强度; D. H. Gray 和 H. Ohashi[8]通过相关土工

试验, 探讨了草本植物根系含量与加筋土强度之间关系, 并得出在一定根体积密度范围内, 两者呈正相关关系; L. P. H. Van Beek 等[9-11]通过分析根-土复合体在剪切破坏时的受力特点, 运用数值分析方法评价了植被根系对边坡土体的加强作用。V. Operstein 等[12-13]通过根-土复合体的直剪试验, 得出根系密度对抗剪强度有很大影响; 李勇等[14-16]就黄土高原土壤侵蚀现象进行了专门研究, 指出植被根系能够提高土体抗冲性, 强化土体渗透力, 稳定土体结构等; 付海峰等[17]将根系增强土体强度用表观黏聚力来表示, 得出随着根体积密度的增加, 表观黏聚力也在增加, 当根体积密度到达一定程度时, 表观黏聚力几乎不再增加; 言志信等[18-20]建立了摩擦性根-土相互作用的力学模型; 余芹芹等[21]通过对不同根-土复合体进行三轴压缩试验, 评价了根系对土体的加筋效应。

T. H. Wu 等[4-5, 18]建立的根-土相互作用力学模型, 都是在指定根系类型的基础上建立的, 不具有普遍适用性; L. J. Waldron 等[6-7, 12-13]的研究是在特定环境下分析了根系所提高土体的整体抗剪强度, 只能定性得出土体抗剪强度随根系含量的增加而增大; L. P. H. Van Beek 等[9, 17]通过数值模拟的方法, 评价了根系的固土护坡作用, 同样也不具备普遍适用性。通过以上分析可知, 评价植被的护坡作用必须在特定研究背景下进行, 由于气候环境不同, 植物的生长特点及本身的力学特性等都具有较大差异, 土体的组成也有很大的不同。以上绝大多数研究都是以热带或者亚热带地区为背景进行的, 很少涉及干旱荒漠区域的研究, 而这 2 种地区无论是植被类型还是土体组成都有较大的区别, 所以有必要对其进行专门的研究。为此, 本文以塔里木河流域为研究背景, 在研究各个典型地区土体物理力学

性质及不同植被根系本身力学强度的基础上，从根-土相互作用的力学机制入手，通过定量计算建立根-土相互作用力学模型，计算出根系对土体抗剪强度的贡献值，为植被护坡作用的定量评价提供依据。

2 塔里木河干流典型河段土体组成及力学特性分析

2.1 塔里木河概况

塔里木河流域是一个封闭的内陆水循环和水平衡相对独立的水文区域，流域面积为 $43.55 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，主要由和田河、叶尔羌河、阿克苏河以及开都河—孔雀河 4 条河流组成，这 4 条河与塔里木河干流称为“四源一干”。“四源一干”是新疆地区最重要的水源之一，是保障塔里木河流域绿洲经济、自然生态和各族人民的生命线，被誉为“生命之河”^[1]。

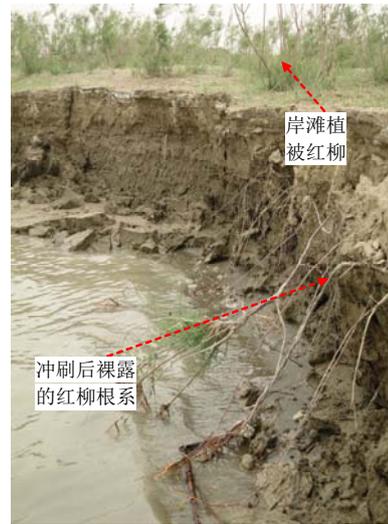
塔里木河流域内，天然乔、灌、草总面积为 $373.37 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，其中乔木植物以胡杨为优势种，灌木植物以红柳为优势种，草本植物则以芦苇、甘草、骆驼刺、罗布麻为优势种。它们的生长盛衰主要受水分条件的优劣而异，植被沿河流呈条带状分布，近河地段植被茂密，远离河道处植被生长稀疏^[22]。

塔里木河流域存在水资源无效损耗、河道泥沙淤积及河势摆动、生态环境恶化等问题。究其原因还是由于上、中游水土流失严重造成的，据统计每年的 7~9 月洪水期是水量损失最严重的时段，在这个时间段，上、中游河段多年平均水量损失占全年损失量的 74.50%，且主要为洪水漫溢。由此可见，对塔里木河上、中游河岸进行加固防护，是保证新疆乃至整个西北水资源充足的重要举措^[1]。

2.2 现场取样

为了分析塔里木河干流河岸土体组成及力学特性，2016 年 5 月和 2017 年 4 月 2 次对河岸冲刷侵蚀较为严重的河段进行了实地查勘与现场取样，分别在阿拉尔新大桥、琼吾斯库木、托帕可其提村等 6 个不同河段取样，并用手持 GPS 精确定位。图 1 给出了阿拉尔新大桥和沙雅大桥附近取样现场，表 1 给出了各取样点具体位置。

所取土样包括原状素土和不同植被覆盖的根-土复合体，取样点主要分布在河岸冲刷比较严重的河段，并且分为植被覆盖区和植被裸露区 2 个区域，在植被裸露区进行分层取样，在植被覆盖区根据不同类型植被(包括红柳、骆驼刺、芦苇、甘草、胡杨、



(a) 阿拉尔新大桥



(b) 沙雅大桥

图 1 塔里木河干流典型断面现场取样

Fig.1 Site sampling at typical section in the main stream of Tarim River

表 1 塔里木河干流典型断面位置取样情况

Table 1 Sampling of typical section in the main stream of Tarim River

编号	取样位置	岸别	取样情况	植被类型	取样点坐标	
					经度	纬度
1	阿拉尔新大桥	右岸	5 组	红柳	81°13'34.8"	40°32'08.4"
2	琼吾斯库木	右岸	5 组	红柳、甘草	81°51'24.3"	40°46'35.1"
3	托帕克科其提村	左岸	6 组	芦苇、骆驼刺	81°29'17.2"	40°42'33.3"
4	三河源	右岸	4 组	骆驼刺	80°56'59.4"	40°29'35.3"
5	沙雅大桥	右岸	4 组	胡杨	82°8'39.4"	40°51'35.5"
6	农二师 31 团 4 连	左岸	4 组	白刺、胡杨、芦苇	86°56'12.2"	40°48'50.3"

白刺)采取不同的根-土复合体土样。本次现场勘查

共取原状土样 28 筒, 其中根 - 土复合体土样 17 筒, 同时每个取样点用环刀取样并进行现场称重。所有原状土样用铁皮筒密封, 铁皮筒直径为 0.11 m、高度为 0.25 m。

2.3 室内土工试验

室内土工试验按照《土工试验方法标准》(GBT50123—1999)进行, 试验内容主要包括干、湿密度, 含水率, 土粒相对密度及孔隙比的测定, 根据直接剪切试验得到土样的抗剪强度指标, 利用颗粒筛分试验获得土体的粒径分布等。根据摩擦加筋理论, 在根 - 土复合体的直接剪切试验过程中, 复合体在受到剪切力作用时, 根系和土体都会发生变形, 由于根系与土体变形模量有很大不同, 故在变形过程中根系和土体会产生相对滑动的趋势, 从而形成根系与土体之间的摩擦阻力。试验中根 - 土复合体是从中间被剪切破坏, 此时上层土体及下层土体与根系都会产生摩擦阻力来抵抗外界产生的剪切力, 从而对土体产生加筋作用, 为了使加筋效果更加明显, 采用直接快剪方法。

2.4 河岸土体组成及力学特性分析

(1) 河岸土体组成

分别在阿拉尔新大桥、三河源及沙雅大桥进行了分层取样, 如阿拉尔新大桥位置, 按照上、中、下 3 层, 每层土体厚度为 30~35 cm, 取土深度为 0~95 cm, 结果如表 2 所示。经现场勘查及试验结果可知, 所取土样含水率在 26.01%~32.06% 范围内变化, 干密度为 1.37~1.53 g/cm³, 说明土体比较松散, 被河流冲刷易造成水土流失。对所取土样进行颗粒筛分试验可知, 河岸土体主要由粉土质砂、含细粒土砂等组成。据相关钻孔资料显示, 塔里木河干流河岸土体可分为两层, 0.0~2.5 m 为黏土和粉细砂互层; 2.5~20.0 m 以粉细砂为主, 含有细砂及薄的黏土透镜体^[1], 这与本次试验研究结果基本一致。

(2) 河岸土体力学特性分析

抗剪强度为土体的重要力学特性, 由库仑强度理论可知, 抗剪强度包括 c (黏聚强度)和 $\tan\phi$ (摩擦强度)两部分。表 3 给出了不同取样位置不同植被覆盖下的土体抗剪强度试验结果。由表 3 可知, 无植被覆盖土体黏聚力为 3.14~16.51 kPa, 内摩擦角为 30.72°~33.93°。通过试验可知, 土体组成及含水都会影响抗剪强度大小, 相比较而言, 黏粒含量较多的土体(SM, SF)黏聚力普遍强于黏粒含量少的土体(SP), 土体组成及含水率对内摩擦角影响较小, 内摩擦角并没有明显的变化规律。由此可见, 土体

表 2 塔里木河干流河岸土体物理性质指标

Table 2 Physical indices of riverbank soil in the main stream of Tarim River

取样位置	断面分层	土体名称	天然状态下的物理指标				
			含水率 $\omega/\%$	湿密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 e	土粒相对密度 G_s
阿拉尔新大桥	上	SM	26.28	1.83	1.45	0.85	2.68
	中	SF	27.84	1.81	1.42	0.89	2.68
	下	SP	28.22	1.98	1.54	0.74	2.69
琼吾斯库木	上	SM	32.06	1.81	1.37	0.94	2.67
托帕可科其提村	上	SP	30.43	1.85	1.42	0.90	2.69
	上	SF	26.30	1.79	1.42	0.91	2.70
三河源	上	SM	26.01	1.86	1.48	0.82	2.69
	下	SF	27.00	1.86	1.46	0.84	2.70
沙雅大桥	上	SM	27.93	1.84	1.44	0.86	2.68
	下	SF	30.66	1.80	1.38	0.95	2.69
二师 31 团 4 连	上	SP	26.81	1.94	1.53	0.75	2.67

注: SM 为粉土质砂; SF 为含细粒土砂; SP 为级配不良砂。

组成及含水率对抗剪强度的影响主要是通过影响黏聚力来实现的。

3 植被根系抗拉强度测试结果及分析

根系对边坡加固作用的主要影响因素是抗拉强度, 在土体发生剪切破坏时, 土体内部产生的剪应力转移到根系上, 使之产生拉伸, 形成拉应力, 此时植被根系通过发挥其自身的抗拉特性, 增强了土体的抗剪强度^[23-24]。所以研究植被根系增加土体抗剪强度的一个重要内容, 即研究根系本身的抗拉强度。对 6 种不同干旱区植被的根系做拉伸试验, 研究这 6 种植被单根系在均匀拉伸过程中力学性能的变化, 得到并比较不同植被类型不同直径的单根在均匀拉伸情况下的最大抗断力, 是此次根系力学性能研究的主要内容。

3.1 试验方法

试验根系来自根 - 土复合体土样, 将试样按照植被类型分类, 每个土样的一部分用来做直接剪切试验, 试验完成后将土体中所有根系取出并进行测量统计。

试验采用 LWK - 500 型电子拉力试验机, 此次试验只考虑根系直径变化与抗拉力和抗拉强度的关系, 所以每次以相同间距将根系两端用锚具固定, 以固定速率(0.25 mm/min)来施加拉力。分别对不同植被根系做拉力试验并记录试验数据。

表3 不同植被根系作用下土体抗剪强度值
Table 3 Shear strengths of soils under different vegetation roots

取样位置	植被类型	取样数量/筒	根体积密度 RVD/%	抗剪强度	
				黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
阿拉尔新大桥	红柳	2	0.23	25.26	34.45
			0.13	13.15	33.74
	无	3	0.00	6.65	32.24
			0.00	9.01	33.55
琼吾斯库木	红柳	2	0.19	19.65	34.06
			0.27	28.30	31.12
	甘草	2	0.08	12.58	32.61
			0.17	22.79	26.99
托帕可科其提村	无	1	0.00	5.50	32.42
			0.00	9.64	32.53
	骆驼刺	2	0.15	17.88	33.86
			0.11	18.87	32.27
三河源	无	2	0.00	7.75	32.15
			0.00	7.86	33.93
	芦苇	2	0.18	10.22	29.71
			0.16	9.43	30.39
沙雅大桥	胡杨	2	0.08	21.22	29.57
			0.17	28.30	28.96
	无	2	0.00	16.51	31.38
			0.00	13.36	31.64
二师31团4连	白刺	1	0.36	17.29	30.79
	胡杨	1	0.09	11.79	33.24
	芦苇	1	0.10	10.22	33.87
无	1	0.00	7.07	33.18	

注：无表示没有植被根系。

3.2 试验结果及分析

3.2.1 不同植被根系抗拉力分析

根系在发生断裂的瞬间，提供了抵抗外界作用力的最大能力，此时的抗断力即为根系的抗拉力，此次试验6种植被根系在不同直径范围内均表现出了较强的抗拉力，如图2所示。

从图2中可以看出，不同植被根系的抗拉力随着根系直径的增加而增加，但是不同植被类型递增的幅度有所不同，白刺、红柳、甘草、胡杨、骆驼

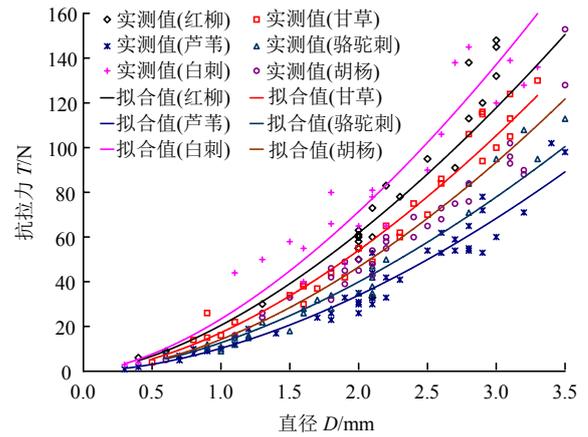


图2 不同植被根系抗拉力与直径关系
Fig.2 Relationships between tensile force and diameter under different vegetation roots

刺、芦苇的根系直径范围分别为0.3~2.8, 0.4~3.0, 0.5~3.1, 0.6~3.5, 0.6~3.0, 0.8~3.4 mm, 其抗拉力范围分别为3~145, 6~145, 6~124, 5~153, 7~95, 8~102 N。从图2中可以直观地看出，在相同直径范围内，根系抗拉力大小依次为白刺>红柳>甘草>胡杨>骆驼刺>芦苇，并且在直径大于1 mm以后，差距越来越明显。

定量分析了抗拉力与直径间的关系，建立了抗拉力与直径的回归方程，并且对回归方程进行了拟合优度检验、显著性检验和回归系数的显著性检验，结果如表4所示。

表4 不同植被根系抗拉力与直径关系回归结果
Table 4 Results of regression analysis of measured tensile force and diameter under different vegetation roots

植被类型	回归方程	拟合优度检验 R ²	回归方程检验 P	回归系数检验			
				幂指数		常数	
				t	P	t	P
白刺	$T = 23.38D^{1.6106}$	0.95	<0.0001	9.98	<0.0001	7.61	<0.0001
红柳	$F = 20.55D^{1.5899}$	0.94	<0.0001	13.20	<0.0001	6.11	<0.0001
甘草	$F = 17.29D^{1.6456}$	0.96	<0.0001	20.53	<0.0001	11.28	<0.0001
胡杨	$F = 14.22D^{1.7144}$	0.97	<0.0001	18.49	<0.0001	10.11	<0.0001
骆驼刺	$F = 12.73D^{1.6491}$	0.95	<0.0001	27.53	<0.0001	13.70	<0.0001
芦苇	$F = 10.29D^{1.7235}$	0.97	<0.0001	17.38	<0.0001	9.04	<0.0001

通过曲线拟合得出，不同植被根系直径与抗拉力之间为幂函数关系，相关系数都在0.95以上，说明两者相关性显著，回归方程能很好地拟合二者关系。

3.2.2 不同植被根系抗拉强度分析

根据 S. De Baets 等^[25]提出的根系抗拉强度计

算方法，对不同植被根系抗拉强度与直径进行回归分析，并且对回归方程进行检验，结果如表 5 和图 3 所示。S. De Baets 等^[25]计算方法为

$$\tau_T = \frac{4T}{\pi D^2} \quad (1)$$

式中： τ_T 为根系的抗拉强度(MPa)， T 为根系的抗拉力(N)， D 为根系的直径(mm)。

表 5 不同植被根系抗拉强度与直径关系回归结果
Table 5 Results of regression analysis of measured tensile strength and diameter under different vegetation roots

植被类型	回归方程	拟合优度检验 R^2	回归方程检验 P	回归系数检验			
				幂指数		常数	
				t	P	t	P
白刺	$\tau_T = 29.77D^{-0.3894}$	0.55	<0.000 1	-4.95	<0.000 1	18.15	<0.000 1
红柳	$\tau_T = 26.16D^{-0.4101}$	0.50	<0.000 1	-10.37	<0.000 1	26.57	<0.000 1
甘草	$\tau_T = 22.01D^{-0.3544}$	0.54	<0.000 1	-5.11	<0.000 1	19.58	<0.000 1
胡杨	$\tau_T = 18.1D^{-0.2856}$	0.49	<0.000 1	-5.62	<0.000 1	27.05	<0.000 1
骆驼刺	$\tau_T = 16.21D^{-0.3509}$	0.47	<0.000 1	-6.52	<0.000 1	24.05	<0.000 1
芦苇	$\tau_T = 13.11D^{-0.2765}$	0.51	<0.000 1	-6.51	<0.000 1	32.15	<0.000 1

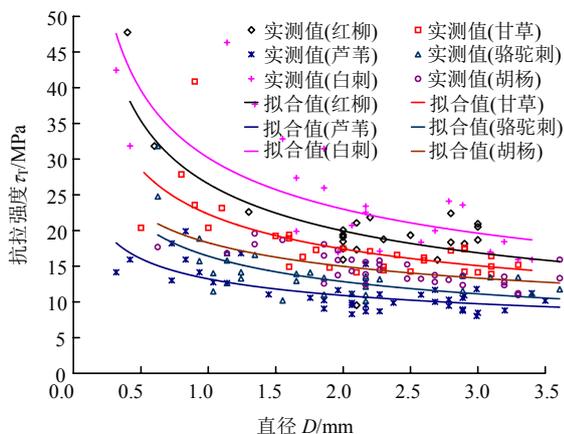


图 3 不同植被根系抗拉强度与直径关系

Fig.3 Relationships between tensile strength and diameter under different vegetation roots

从表 5 及图 3 中可以看出，随着根系直径的增大，抗拉强度在不断减小，并且呈幂函数递减。从回归方程及系数检验结果可以看出，其拟合度及显著性都较好，但是回归方程对根系直径与抗拉强度关系的拟合度不太好，即 R^2 值都不太高(0.49~0.55)。而史敏华等^[26-27]实测抗拉强度回归函数 R^2 也不高(0.23~0.56)，所以此次测试结果也在正常范围以内。

由图 3 可知，根系抗拉强度随着根系直径的增

加呈递减形式，且不同植被根系递减幅度不同，白刺、红柳、甘草、胡杨、骆驼刺、芦苇的抗拉强度范围分别为 15.90~46.30, 9.53~47.75, 14.26~40.87, 10.94~19.59, 10.19~31.83, 8.02~19.89 MPa。从图 3 中还可以明显看出，在相同直径变化范围内，根系抗拉强度强弱依次为白刺>红柳>甘草>胡杨>骆驼刺>芦苇。

4 根 - 土复合体抗剪强度分析

4.1 不同植被根 - 土复合体抗剪强度增加值

对 6 种不同植被共 17 组根 - 土复合体进行直接剪切试验，结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出，根 - 土复合体的 c 值普遍要比素土的大，而内摩擦角并无明显的变化，说明根系对 ϕ 的影响不大，土体抗剪强度提高主要体现在黏聚力 c 值的增加，D. H. Gray 和 H. Ohashi^[8]通过相关试验也证实了根系对土体内摩擦角几乎没有影响，所以抗剪强度增加值 $\Delta\tau$ 近似等于黏聚力增加值 Δc 。对 17 组不同根体积密度 RVD 的根 - 土复合体抗剪强度的增加值 $\Delta\tau$ 进行计算，结果如表 6 所示。从表中可以看出，6 种植物根系抗剪强度增加值 $\Delta\tau$ 均随着根体积密度 RVD 的增大而增加。

表 6 不同植被根系抗剪强度增加值
Table 6 Increased values of shear strength under different vegetation roots

植被类型	$RVD/\%$	抗剪强度增加值 $\Delta\tau/\text{kPa}$	植被类型	$RVD/\%$	抗剪强度增加值 $\Delta\tau/\text{kPa}$
红柳	0.27	22.80	骆驼刺	0.15	10.13
	0.23	18.61		0.14	10.09
	0.19	14.15		0.11	9.23
	0.13	6.50		0.08	2.47
甘草	0.17	17.29	芦苇	0.18	7.08
	0.08	7.08		0.16	6.29
胡杨	0.17	11.79	白刺	0.10	3.15
	0.09	4.72		0.36	10.22
	0.08	4.71			

4.2 不同含水条件下土体抗剪强度的变化

由于根系提高土体抗剪强度主要是通过提高黏聚力来实现，对内摩擦角影响较小，所以在考虑不同含水条件下土体抗剪强度变化时，只分析土体的黏聚力变化。将获得的根 - 土复合体和素土在不同含水率下进行直接剪切试验，得到土体黏聚力随着含水率的变化规律，试验过程中含水率变化范围为

10.65%~30.10%，结果如图4所示。从图4中可以看出，在含水率变化范围内，根-土复合体的黏聚力普遍大于素土，并且两者黏聚力变化趋势相似，均随含水率增加先增大后减小；在某一临界含水率，黏聚力会达到最大值。从图4中可以看出，根-土复合体和素土各自黏聚力达到峰值时的临界含水率基本相同，在20%左右。

4.3 植被根系增强土体抗剪强度范围

此次根-土复合体取样的植被根系包括草本、灌木植物的根系以及木本植物的侧根，而这几类根系与土体的相互作用是类似的，都是起摩擦加筋的作用，所以可以一起建立力学模型。在建立此类根系-土体相互作用的力学模型时，往往将根系假设为2种极限状态，即为刚性状态和柔性状态^[28]，这样分别对2种状态进行计算，就可以得到根系所增加的土体抗剪强度的最大值和最小值。通过上述分析可知，根系的加筋作用主要取决于根系分布情况、根系力学性能、根系与土体接触程度以及土体组成等因素。为了简化计算，在分析根-土相互作用时，不考虑土体孔隙水压力影响。

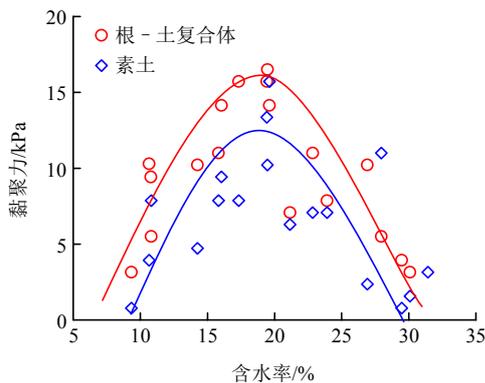


图4 土体在不同含水条件下黏聚力的变化情况

Fig.4 Cohesion for root-soil composites and no-root soil vary with water contents

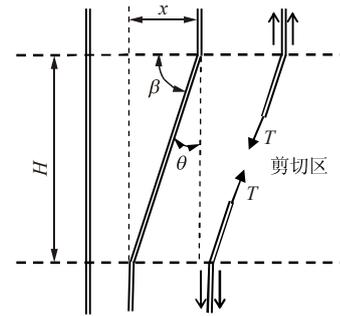
(1) 刚性假设

将根系受力假设为刚性状态，如图5所示，并建立力学模型，具体推导过程如下：

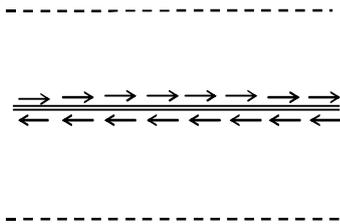
$$\tau_r = \frac{T}{A'} \cos \beta + \frac{T}{A'} \sin \beta \tan \varphi \quad (2)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{1}{k + (\tan i)^{-1}} \right] \quad (3)$$

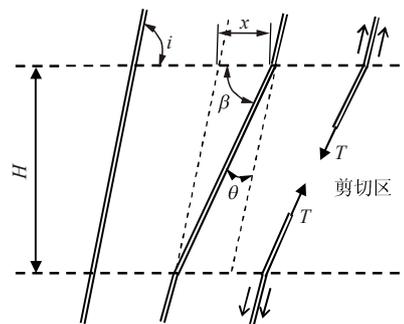
式中： τ_r 为根系提高土体的抗剪强度； T 为单根的抗拉力(N)； A' 为单根作用的土体面积； β 为剪切变形角($^\circ$)； φ 为土体的内摩擦角($^\circ$)； k 为剪切变形比， $k = x/H$ ； i 为根与剪切面的初始夹角($^\circ$)。



(a) 垂直



(b) 平行



(c) 斜交

图5 不同角度单根加筋力学模型(刚性状态)

Fig.5 Mechanical model of single reinforcement under different angles(rigid state)

① 当 $i = 90^\circ$ 时，根系与土体剪切面处于正交状态，如图5(a)所示，此时有

$$\tau_r = \frac{T}{A'} \sin \theta + \frac{T}{A'} \cos \theta \tan \varphi \quad (4)$$

② 当 $i = 0^\circ$ 时，根系与土体剪切面平行，如图5(b)所示，此时有

$$\tau_r = \frac{T}{A'} \quad (5)$$

③ 当 $0^\circ < i < 90^\circ$ 时，根系与土体剪切面处于斜交状态，如图5(c)所示，此时有

$$\tau_r = \frac{T}{A'} \cos \beta + \frac{T}{A'} \sin \beta \tan \varphi \quad (6)$$

若在面积为 A 的土体内，有 n 个根，根的抗拉强度分别为 $T_1, T_2, T_3, \dots, T_j, \dots, T_n$ ，变形后与剪切面夹角分别为 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_j, \dots, \beta_n$ ，根

的延伸方向与剪切面的初始夹角分别为 $i_1, i_2, i_3, \dots, i_j, \dots, i_n$, 剪切变形比分别为 $k_1, k_2, k_3, \dots, k_j, \dots, k_n$, 则增加的抗剪强度为

$$\tau_r = \frac{\sum_{j=1}^n T_j \cos \beta_j}{A} + \frac{\sum_{j=1}^n T_j \sin \beta_j}{A} \tan \varphi \quad (7)$$

$$\beta_j = \tan^{-1} \left[\frac{1}{k_j + (\tan i_j)^{-1}} \right] \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (8)$$

(2) 刚性状态根系增加土体抗剪强度计算

当根系被拉断时, 电子拉力机显示的数据即为刚性假设条件下根系对土体所提供的最大剪应力。由式(7)可知, 计算不同根系对土体增强的抗剪强度大小, 需要确定参数 n, T_j, β_j, φ 和 A 。其中, φ 可由土的抗剪试验获得, 此次试验中素土与根-土复合体平均内摩擦角分别为 32.49° 和 31.91° , 说明根系对土体内摩擦角影响不大, 所以为了方便计算, 内摩擦角统一取 30° ; A 为取样筒横截面积; n 通过对试样中根系统计获得; T_j 取相应根系的平均拉力。具体参数值的确定如表 7 所示。

表 7 上限计算相关参数

Table 7 Related parameters of upper limit calculation

植被名称	取样数量 (筒)	根系个数 n	单根平均拉力/N	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	横截面积 A/m^2	RVD/%
白刺	1	22	79	30	0.009 5	0.36
红柳	2	23	76			0.21
甘草	2	31	64			0.13
胡杨	3	34	61			0.11
骆驼刺	2	30	38			0.12
芦苇	3	41	39			0.15

将表 7 中相关数据代入式(7)可得

$$\tau_r = \frac{n\bar{T} \cos \beta_j}{A} + \frac{n\bar{T} \sin \beta_j}{A} \tan \varphi = \frac{n\bar{T}}{A} (\cos \beta + \sin \beta \tan \varphi) \quad (9)$$

内摩擦角取 30° , $\beta = 0 \sim 90^\circ$, 所以 $(\cos \beta + \sin \beta \cdot \tan \varphi)$ 的范围为 $0.58 \sim 1.16$ ^[6]。白刺、红柳、甘草、胡杨、骆驼刺、芦苇等不同植被的根系可增强土体的最大抗剪强度范围分别为 $106.11 \sim 212.22$, $53.36 \sim 106.72$, $60.56 \sim 121.13$, $42.21 \sim 84.42$, $34.80 \sim 69.60$, $32.54 \sim 65.08$ kPa。

(3) 柔性假设

当假设根系为柔性状态建立力学模型时, 根系除了受到拉力之外, 还受到土体对根系的竖向及侧

向作用力, 根据土力学原理^[29], 土体对根的侧向压力大小为

$$\sigma_x = k_0 \sigma_z = k_0 \gamma z \quad (10)$$

式中: σ_x 为土体水平向应力, σ_z 为土体竖向应力, K_0 为土的静止压力系数, γ 为土的容重, z 为土的厚度。

对图 6 进行受力分析可知, 对埋深为 z 、长度为 l 的根段进行微观分析, 微段根所受抗拉力 T' 为

$$T' = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_z^2)} \quad (11)$$

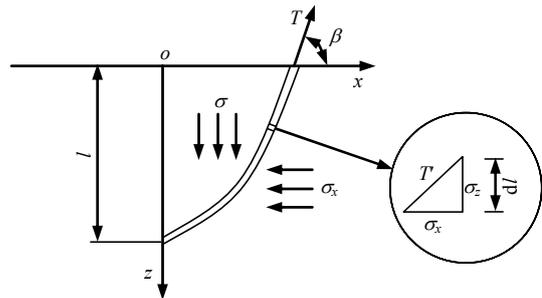


图 6 单根加筋力学模型(柔性状态)

Fig.6 Single reinforcement mechanical model(flexible state)

对整个根系受力分析, 单位长度根系所受的抗拉力 T_0 为

$$T_0 = \int_z^{z+l} \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_z^2)} dz = \int_z^{z+l} \sqrt{[(K_0 \sigma_z)^2 + \sigma_z^2]} dz = \frac{\sqrt{(K_0^2 + 1)\gamma(2zl + l^2)}}{2} \quad (12)$$

则

$$T_0 = \frac{\sqrt{(K_0^2 + 1)\gamma(2zl + l^2)}}{2} \quad (13)$$

$$T = T_0 l \quad (14)$$

从而可以得到单根所增加土体抗剪强度为

$$\tau_r = \frac{T \cos \beta}{A'} + \frac{T \sin \beta \tan \varphi}{A'} \quad (15)$$

式中: T_0 为单位长度单根抗拉力(N/m), T 为单根抗拉力(N)。

假设在面积为 A 的土体内, 共有 n 个根, 根-土复合体所增加的抗剪强度为

$$\tau_r = \frac{\sum_{j=1}^n T_j \cos \beta_j}{A} + \frac{\sum_{j=1}^n T_j \sin \beta_j}{A} \tan \varphi \quad (16)$$

在实际情况下, 土体内的根系既不是全部处于刚性状态也不是全部处于柔性状态, 而是 2 种特性

兼备。通过上述力学模型计算出的结果为根系增加土体抗剪强度的上、下临界值，而实际根系增加土体的抗剪强度应该处于两者中间状态。

(4) 柔性根系状态增加土体抗剪强度计算

当根-土复合体受到外荷载作用时，在根系没有发生断裂的情况下，摩擦阻力小于根系所能提供的最大抗拉力，此时的摩擦阻力即为根系能够提供给土体的最小抗剪应力。由式(16)可知，根系提供的拉应力与 K_0 , γ , z , l , β 等参数有关。查表可知当土体为砂土孔隙比 $e(0.8)$ 时，静止土压力系数 K_0 为 0.60^[29]；此次试验采取的土样绝大多数为砂土，且孔隙比 e 的范围为 0.74~0.95，所以为了简化计算， K_0 统一取 0.60。根据柔性根系受力原理，对试样剖面图进行分析，如图 7 所示，图中 ox 为试样上表面， oz 为土体深度，根-土复合体中根系顶端几乎接近地表，即 oz 为 0， l 取根系平均长度，具体参数值的确定如表 8 所示。

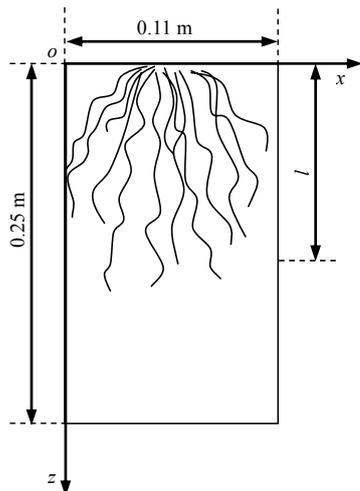


图 7 根-土复合体土样纵向切面图

Fig.7 Vertical section of soil-root composite

表 8 下限计算相关参数

Table 8 Parameters for lower limit calculation

植被名称	取样数量/筒	根系个数 n	根系平均长度 l/mm	土体静止压力系数 K_0	土体容重 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$
白刺	1	22	78	0.6	19.0
红柳	2	23	95		17.8
甘草	2	31	52		17.7
胡杨	3	34	48		18.5
骆驼刺	2	30	54		17.9
芦苇	3	41	64		18.6

将表 8 中相关数据代入式(16)可得

$$\tau_r = \frac{nT \cos \beta}{A} + \frac{nT \sin \beta}{A} \tan \varphi = \frac{nT}{A} (\cos \beta + \sin \beta \tan \varphi) \quad (17)$$

将表 8 中相关参数代入式(13)和(14)可得白刺、红柳、甘草、胡杨、骆驼刺、芦苇等不同植被的单根抗拉力 T 分别为：5.3, 9.0, 1.5, 1.2, 1.7, 2.9 N，增加的最小抗剪强度 τ_r 范围分别为：7.12~14.24, 6.32~12.64, 1.42~2.84, 0.83~1.66, 1.56~3.11, 2.42~4.84 kPa。

4.4 根系增加土体抗剪强度理论值与实测值对比

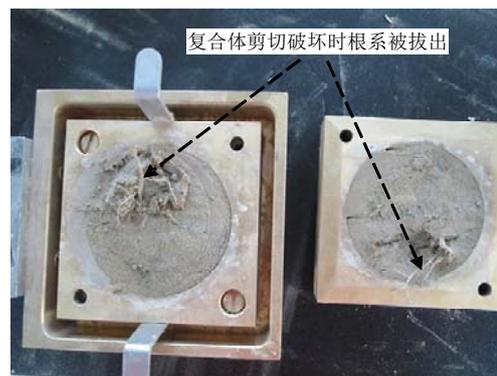
对不同植被根系增加土体抗剪强度的理论计算值与试验测试值进行整理，如表 9 所示。

表 9 试验结果与计算结果对比分析

Table 9 Comparison of test results with calculated results

植被类型	理论增加最小值/kPa	理论增加最大值/kPa	实测抗剪强度增加值/kPa
白刺	7.12~14.24	106.11~212.22	10.22
红柳	6.32~12.64	53.36~106.72	7.08, 14.15, 19.69, 22.80
甘草	1.42~2.84	60.56~121.13	7.08, 17.29
胡杨	0.83~1.66	42.21~84.42	4.71, 4.72, 11.79
骆驼刺	1.56~3.11	34.80~69.60	2.36, 10.02, 10.21, 18.07
芦苇	2.42~4.84	32.54~65.08	3.15, 6.29, 7.08

由表 9 可知，实测抗剪强度增加值全部在理论计算值范围内，且实测值更接近理论增加最小值，说明试验中根系更偏向于柔性假设状态，此时根系是没有发生断裂的，在复合体的直接剪切试验中，大部分根系同样没有断裂，如图 8 所示。而从现场勘查来看(见图 1)，复合体发生剪切破坏时根系大部分也是被拔出的，并没有发生断裂。试验结果、现场勘察结果与计算结果三者相吻合，充分说明了模型的计算方法具有合理性，符合研究植被根系增加土体抗剪强度的实际情况。在计算根系增加土体抗



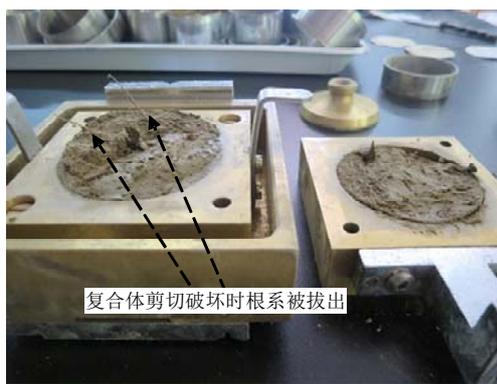


图 8 根 - 土复合体土的直接剪切试验

Fig.8 The direct shear test of soil-root composite

剪强度理论值上、下限时，考虑到根系在土体中为多角度排列，所以分别给出了上限值与下限值的范围。

5 结 论

本文以塔里木河岸坡植被为研究对象，对塔里木河上、中游河岸植被护坡机制进行了定性的分析以及定量的计算，具体结论如下：

(1) 塔里木河上、中游河岸表层土体主要由粉土质砂、含细粒土砂等组成，一般分为 2 层：0.0~2.5 m 为黏土和粉细砂互层；2.5~20.0 m 以粉细砂为主。通过试验可知，土体组成及含水都会影响抗剪强度大小，其中无植被覆盖土体的黏聚力为 3.14~16.51 kPa，内摩擦角为 30.72°~33.93°；说明土体组成及含水率对土体黏聚力影响较大对内摩擦角影响较小。

(2) 根据根 - 土复合体和素土的对比试验结果可知，根 - 土复合体黏聚力普遍比素土高，6 种植被根系下黏聚力由 3.14~16.51 kPa 提高到 9.43~28.30 kPa，而内摩擦角变化不明显，说明根系提高土体抗剪强度主要是通过提高黏聚强度来实现的。对 17 组不同 RVD 的根 - 土复合体抗剪强度增加值计算结果表明：6 种植被根系抗剪强度增加值均随着 RVD 的增大而增加。

(3) 对不同植被根系(包括红柳、芦苇、胡杨、骆驼刺、白刺、甘草)进行单根抗拉试验，得到根系的抗拉强度随直径的增大而减小，而抗拉力随直径增大而增大。通过定量计算，给出了根系直径与抗拉强度和抗拉力的回归方程，并对其进行了显著性

检验，结果表明，根系直径与抗拉力相关性显著，与抗拉强度相关性较差。

(4) 在分析了河岸土体组成及不同植被根系力学特性的基础上，将根系假设为刚性状态和柔性状态，建立了根 - 土相互作用的力学计算模型，刚性假设代表根系提高土体抗剪强度最大值，柔性假设代表根系提高土体抗剪强度最小值。分别推导出了根系提高土体抗剪强度最大值和最小值的计算公式，根据公式计算得出了不同植被根系提高土体抗剪强度最大值和最小值范围，并与试验结果进行了对比分析，结果表明：实测土体抗剪强度增加值全部在理论计算范围以内，说明了模型计算方法的合理性，可以作为定量评价荒漠地区植被根系增加土体抗剪强度值的理论依据。

参考文献(References):

- [1] 胡春宏, 王延贵, 郭庆超, 等. 塔里木河干流河道演变与整治[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 17 - 20.(HU Chunhong, WANG Yangui, GUO Qingchao, et al. Fluvial process and regulation of the main stem Tarim river[M]. Beijing: Science China Press, 2005: 17 - 20.(in Chinese))
- [2] 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 64 - 76.(ZHOU Depei, ZHANG Junyun. Slope protection engineering technology with vegetation[M]. Beijing: China Communications Press, 2003: 64 - 76.(in Chinese))
- [3] 戚国庆, 胡利文. 植被护坡机制及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2 220 - 2 225.(QI Guoqing, HU Liwen. Study on mechanism and application of slope protection with vegetation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2 220 - 2 225.(in Chinese))
- [4] WU T H, MCKINNELL W P, SWANSTON D N. Strength of tree roots and landslides on Prince Of Wales Island, Alaska[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(1): 19 - 33.
- [5] WU T H, MCOMBER R M, ERB R T, et al. Study of soil-root interaction. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 14(12): 1 351 - 1 375.
- [6] WALDRON L J, DAKESSIAN S. Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root properties[J]. Soil Science, 1981, 132(6): 427 - 435.
- [7] WASTERLUND I. Strength components in the forest floor restricting maximum tolerable machine forces[J]. Journal of Terramechanics, 1989, 26(2): 177 - 182.
- [8] GRAY D H, OHASHI H. Mechanics of fiber reinforcement in sand[J].

- Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(3): 335 - 353.
- [9] VAN BEEK L P H, WINT J, CAMMERAAT L H, et al. Observation and simulation of root reinforcement on abandoned Mediterranean slopes[J]. Plant and Soil, 2005, 278(1/2): 55 - 74.
- [10] OPERSTEIN V, FRYDMAN S. The stability of soil slopes stabilized with vegetation[J]. Proceedings of The Ice-Ground Improvement, 2002, 6(4): 163 - 168.
- [11] GREENWOOD J R. SLIP4EX-A program for routine slope stability analysis to include the effects of vegetation, reinforcement and hydrological changes[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, 24(3): 193 - 202.
- [12] OPERSTEIN V, FRYDMAN S. The influence of vegetation on soil strength[J]. Proceedings of The Ice-Ground Improvement, 2000, 4(2): 81 - 89.
- [13] MICKOVSKI, S B, STOKES A, VAN BEEK, et al. Simulation of direct shear tests on rooted and non-rooted soil using finite element analysis[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(10): 1 523 - 1 532.
- [14] 李 勇, 徐晓琴, 朱显漠, 等. 黄土高原植物根系强化土壤渗透力的有效性[J]. 科学通报, 1992, (4): 366 - 369.(LI Yong, XU Xiaoqin, ZHU Xianmo, et al. Effectiveness of enhancing soil infiltration with plant roots in Loess Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 1992, (4): 366 - 369.(in Chinese))
- [15] 刘定辉, 李 勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机制研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 34 - 37.(LIU Dinghui, LI Yong. Mechanism of plant roots improving resistance of soil to concentrated flow erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 34 - 37.(in Chinese))
- [16] 刘国彬, 蒋定生, 朱显漠. 黄土区草地根系生物力学特性研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(3): 21 - 28.(LIU Guobin, JIANG Dingsheng, ZHU Xianmo. Study on grasses root bio-mechanics in Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 2(3): 21 - 28.(in Chinese))
- [17] 付海峰, 姜志强, 张书丰. 植物根系固坡效应模拟及稳定性数值分析[J]. 水土保持通报, 2007, 27(1): 92 - 94.(FU Haifeng, JIANG Zhiqiang, ZHANG Shufeng. Numerical simulation of root reinforcement to stability of slope[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(1): 92 - 94.(in Chinese))
- [18] 言志信, 宋 云, 蔡汉成, 等. 草本植物加固边坡的力学原理[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(2): 30 - 34.(YAN Zhixin, SONG Yun, CAI Hancheng, et al. Mechanical analysis of herbaceous plant strengthening slope[J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2010, 32(2): 30 - 34.(in Chinese))
- [19] YAN Z X, SONG Y, JIANG P, et al. Mechanical analysis of interaction between plant roots and rock and soil mass in slope vegetation[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2010, 31(5): 617 - 622.
- [20] 宋 云, 言志信, 段 建. 摩擦型根—土作用模型[J]. 岩土力学, 2005, 26(增): 171 - 174.(SONG Yun, YAN Zhixin, DUAN Jian. A model of interaction between roots and soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(Supp.): 171 - 174.(in Chinese))
- [21] 余芹芹, 乔 娜, 卢海静, 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(增1): 3 216 - 3 223.(YU Qinqin, QIAO Na, LU Haijing, et al. Effect study of plant roots reinforcement on soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Supp.1): 3 216 - 3 223.(in Chinese))
- [22] 陈亚宁. 新疆塔里木河流域生态水文问题研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 517 - 520.(CHEN Yaning. Study on ecological and hydrological problems in Tarim River of Xinjiang[M]. Beijing: Science Press, 2010: 517 - 520.(in Chinese))
- [23] ABE K, IWAMOTO M. An evaluation of tree-root effect on slope stability by tree-root strength[J]. Journal of the Japanese Forestry Society, 1986, 68(12): 505 - 510.
- [24] GYSSELS G, POESEN J, BOCHET E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review[J]. Progress in Physical Geography, 2005, 29(2): 189 - 217.
- [25] DE BAETS S, POESEN J, GYSSELS G, et al. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow[J]. Geomorphology, 2006, 76(1/2): 54 - 67.
- [26] 史敏华, 王 棣, 李 任. 石灰岩区主要水保灌木根系分布特征与根抗拉力研究初报[J]. 山西林业科技, 1994, (1): 17 - 19.(SHI Minhua, WANG Di, LI Ren. Preliminary report on root distribution characteristics and root tensile force of main water-secreting shrubs in limestone area[J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 1994, (1): 17 - 19.(in Chinese))
- [27] GENET M, STOKES A, SALIN F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots[J]. Plant and Soil, 2005, 278(1/2): 1 - 9.
- [28] 言志信, 宋 云, 江 平, 等. 植物摩擦型根—岩土相互作用的初步研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(9): 1 109 - 1 113.(YAN Zhixin, SONG Yun, JIANG Ping, et al. Preliminary study on interaction between plant frictional root and rock-soil mass[J]. Science China: Technical Science, 2010, 40(9): 1 109 - 1 113.(in Chinese))
- [29] 李广信, 张丙印, 于玉贞, 等. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 221 - 223.(LI Guangxin, ZHANG Bingyin, YU Yuzhen, et al. Soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 221 - 223.(in Chinese))