

胡 宁,刘 静,张永亮,等. 含水率对 2 种沙土根-土复合体残余强度的影响[J]. 江苏农业科学,2013,41(12):337-340.

含水率对 2 种沙土根-土复合体残余强度的影响

胡 宁¹, 刘 静¹, 张永亮¹, 苑淑娟², 周丹丹³, 袁红民⁴

(1. 内蒙古农业大学生态环境学院, 内蒙古呼和浩特 010019; 2. 内蒙古自治区灌溉排水发展中心, 内蒙古呼和浩特 010019;

3. 兴安盟水利工程质量监督站, 内蒙古乌兰浩特 137400; 4. 内蒙古森工集团, 内蒙古牙克石 022150)

摘要:针对内蒙古中部地区粉土质沙和含细粒土沙 2 种常见土壤类型及该地区典型水土保持植物小叶锦鸡儿, 通过室内直剪的快剪试验研究小叶锦鸡儿直根在不同含水率(含水率为 6.5%、15% 及饱和含水率)条件下提高 2 种土壤的残余特性。结果显示, 2 种沙土根-土复合体的残余强度随垂直荷载均呈线性增加趋势, 符合摩尔-库仑强度破坏准则; 在根系分布的浅层土(埋深为 1.5 m)范围内, 在这 3 种含水率条件下, 2 种沙土根-土复合体的残余强度与残余黏聚力均大于素土, 并随含水率的增加呈先增大后减小的变化趋势, 2 种沙土根-土复合体残余内摩擦角与素土相比变化不明显, 但随含水率的增加而逐渐减小; 2 种垂直荷载下, 含细粒土沙根-土复合体相对于相应素土的增长率大于粉土质沙根-土复合体的增长率, 含细粒土沙素土、根-土复合体增长率最大可达 17.78%、15.34%; 粉土质沙增长率最大为 11.65%、7.45%。

关键词:含水率; 沙土; 根-土复合体; 残余强度

中图分类号: S157.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2013)12-0337-04

岩土力学定义的残余强度是指土体达到强度破坏标准后(即达到抗剪强度峰值时), 继续增大剪切变形, 土体抗剪强度逐渐降低并趋于稳定, 这个稳定的终值强度即为残余强度^[1]。目前, 国内外关于残余强度的研究多集中于工程上边坡土体的稳定性分析^[2-4], 研究的对象多是素土或工程加筋土体, 而利用植物固土护坡, 植物根系对土体残余强度的研究仅有少量学者进行探讨, 未取得较完整的认识。国外学者曾对胭脂树、紫罗兰、香根草和含羞草 4 种植物群根提高土体的残余强度进行了研究, 结果表明, 根系能够提高土体的残余强

度, 且根径在 1~20 mm 范围内的细根固土效果优于粗根^[5]。毛妍婷等对狗尾草样方的原位剪切试验说明了由于根系的抗拉阻隔作用, 阻止局部的剪切破坏向连贯的剪切破裂发展, 从而使根-土复合体在达到峰值应力后仍具有一定的抵抗残余荷载能力^[6]。周云艳等对含有樟树直根系的土壤进行了现场直剪试验, 结果表明, 根系不仅提高了土体的抗剪强度, 而且还提高了土体的残余强度^[7]。这些研究多是以植物为主体, 针对不同植物根系提高相同土壤的强度特性进行的研究, 且多是对根-土复合体进行野外群根直剪试验, 野外试验虽能较真实地反映试验结果, 但它同时存在应力、应变分布不均匀, 影响试验结果因素复杂等缺点, 无法对根系-土样在特定条件下的相互作用及强度特性进行更深入地分析。因此, 本研究通过室内直剪试验, 研究特定条件(相同干密度、不同含水率)下同种植物代表根单根提高不同土壤根-土复合体的残余特性。本试验针对内蒙古中部地区粉土质沙和含细粒土沙 2 种常见土壤类型以及该地区典型水土保持植物小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam.), 通过室内直剪试验研究不同

收稿日期: 2013-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 51064021); 内蒙古基金重点项目(编号: 2010ZD16)

作者简介: 胡 宁(1988—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持。E-mail: 15849326125@163.com。

通信作者: 刘 静, 博士, 教授, 研究方向为干旱、半干旱地区的水土保持与荒漠化防治。E-mail: ljing58@126.com。

[14] 姜建萍, 高雅, 朱意麟, 等. 刺苋的显微结构研究[J]. 时珍国医国药, 2007, 18(11): 2812-2813.

[15] Cuadra V P, Hermann P. Characterization and macropattern of calcium oxalate phytoliths in Argentinean endemic species of Chenopodiaceae (Amaranthaceae) [J]. Quaternary International, 2013, 287(2): 83-88.

[16] 耿世磊, 赵 晟, 吴 鸿. 三种草坪草的茎、叶解剖结构及其坪用性状[J]. 热带亚热带植物学报, 2002, 10(2): 145-151.

[17] 周智彬, 李培军. 我国旱生植物的形态解剖学研究[J]. 干旱区研究, 2002, 19(2): 35-40.

[18] 张 彤, 齐 麟. 植物抗旱机理研究进展[J]. 湖北农业科学, 2005(4): 107-110.

[19] 李家义, 王树安, 刘兴海, 等. 籽粒苋根系生长与抗旱性的观察[J]. 干旱地区农业研究, 1989(3): 34-41.

[20] 党荣理, 邓彦斌, 姜彦成, 等. 繁缕亚科几种植物解剖结构的研究[J]. 新疆师范大学学报: 自然科学版, 1995, 14(2): 69-76.

[21] 赵国祥, 韦仲新. 两种香荚兰茎的解剖学研究[J]. 云南植物研究, 1999, 21(1): 65-67.

[22] 周恒苍, 陈善娜, 李坤季, 等. 香荚兰茎叶解剖学特征研究[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2003, 25(增刊): 121-124.

[23] 谭 云. 植物草酸钙晶体的形成和功能[J]. 生物学通报, 2007, 42(10): 20-21.

[24] Faheed F, Mazen A, Elmoheisen S A. Physiological and ultrastructural studies on calcium oxalate crystal formation in some plants [J]. Turkish Journal Botany, 2013(37): 139-152.

[25] 刘晓凤, 谭敦炎. 荒漠植物种子黏液的生态学意义[J]. 植物学通报, 2007, 24(3): 414-424.

含水率条件下小叶锦鸡儿直根提高 2 种土壤的残余特性。本研究定义根 - 土复合体达到土力学强度破坏标准后(剪切位移约为 4~6 mm),继续对其增大位移至 10 mm 时的强度为根 - 土复合体的残余强度,探讨同种植物根系对不同土壤类型的固土能力,进而为植物根系固土机理探讨提供一些数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验根的采集

小叶锦鸡儿是一种广泛分布于干旱、半干旱地区的水土保持和固沙造林树种,它对环境条件具有极强的适应性,是该区植被的重要组成物种。2012 年 8 月在中国林业科学研究院沙漠林业实验中心采集人工种植的三年生小叶锦鸡儿根系,试验根的采集采用整株挖掘法。在样地内选择 10 株生长良好的植株,测定其株高、灌幅和地径,分别计算平均值,然后选择 3 株与平均值相近的标准株并挖掘其根系,挖掘时尽量保证每条根的完整性。试验根针对植物的代表根进行,根据

邢会文等对三四年生小叶锦鸡儿等植物代表根进行研究,得到小叶锦鸡儿代表根径级范围为 0.5~1.0 mm^[8];此外,根据笔者所在的课题组前期对小叶锦鸡儿进行的研究结果^[9-10],为形成系统对照,选择根径级为 0.75 mm 左右的直根进行试验。

1.2 试验土样

试验所用土壤分别取自内蒙古呼和浩特市和林格尔县与土默特左旗,在样地内选择地势开阔平坦的地段挖取土壤剖面,按照 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 等 5 层取样,每层取 3 次。土壤含水率(ω)和干密度(ρ_d)分别采用烘干法和环刀法;土壤的机械组成及液塑限均是将所取土样混合后进行试验,土壤机械组成采用筛分法测出各个粒径组含量,重复 3 次求平均值后得出各粒径组含量;土壤液塑限采用 LP-100 型液塑限联合测定仪测定。土样基本物理性质如表 1 所示。土样的定名是按照行业标准 SL 237—1999《土工试验规程》的要求^[11]进行的,根据土壤机械组成中各粒径组含量及土样的液塑限进行划分。

表 1 土壤基本物理性质

土样	土壤机械组成(%)						塑限 W_P	塑性指数 I_P	液限 W_L
	>2 mm	1.99~1 mm	0.99~0.5 mm	0.49~0.25 mm	0.249~0.075 mm	<0.075 mm			
粉土质沙	0.53	0.13	3.28	21.20	64.84	10.02	—	—	—
细粒土沙	11.26	5.32	12.73	11.02	29.11	30.56	17.16	4.15	21.31

1.3 试样制备

为使试验结果具有可比性,本试验设计 3 种含水率梯度,分别为 2 种沙土天然含水率所对应的均值 6.5%、2 种沙土饱和含水率(自然吸水至饱和状态)及介于天然和饱和含水率之间的对照含水率 15%。干密度选择 2 种土的均值 1.35 g/cm³,在室内完成重塑土的配置。试样的制备根据 SL 237—1999《土工试验规程》的要求进行,加根土试样的制备根据环刀的规格以及自然状态下的根密度在每个环刀内垂直布设 4 条试验根,根长与环刀高相同,为 2 cm。

1.4 试验仪器

试验采用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型四联应变控制式数采电动直剪仪,根据试验要求,由厂家将仪器的剪切位移加大至 13 mm。用快剪(剪切速率为 0.8 mm/min)来模拟暴雨过程中或暴雨过后土壤含水率迅速提高且短时间内无法排出,孔隙水在承受压力状况下土体发生位移或错动时的强度。

1.5 垂直荷载的确定

本研究所选取的三年生小叶锦鸡儿根系的分布深度约在 0~1.5 m 范围内,而对土体固持作用最大的密集分布层约在 80 cm,根据土力学中自重应力公式推求出根系分布层的自重应力在 80 cm 处约为 12.5 kPa,1.5 m 处约为 25 kPa,参照直剪试验的要求选取其余的 2 级压力为 50、100 kPa^[12]。

2 结果与分析

2.1 根 - 土复合体残余强度与垂直荷载的关系

由图 1 可知,随着垂直荷载的增加,2 种土壤根 - 土复合体的残余强度与垂直荷载均呈线性增加趋势。含水率为 6.5%、15%、饱和的粉土质沙的线性回归方程分别为 $y_1 = 0.836 6x_1 + 1.983 5$ ($r_1^2 = 0.989 3$)、 $y_2 = 0.822 4x_2 + 6.090 9$

($r_2^2 = 0.988 1$)、 $y_3 = 0.769 6x_3 + 1.075 7$ ($r_3^2 = 0.957 8$);含水率为 6.5%、15%、饱和的含细粒土沙的线性回归方程分别为 $y_4 = 0.912 9x_4 + 4.035 7$ ($r_4^2 = 0.971 9$)、 $y_5 = 0.891 6x_5 + 9.945 2$ ($r_5^2 = 0.960 2$)、 $y_6 = 0.634 x_6 + 1.749 6$ ($r_6^2 = 0.954 4$)。

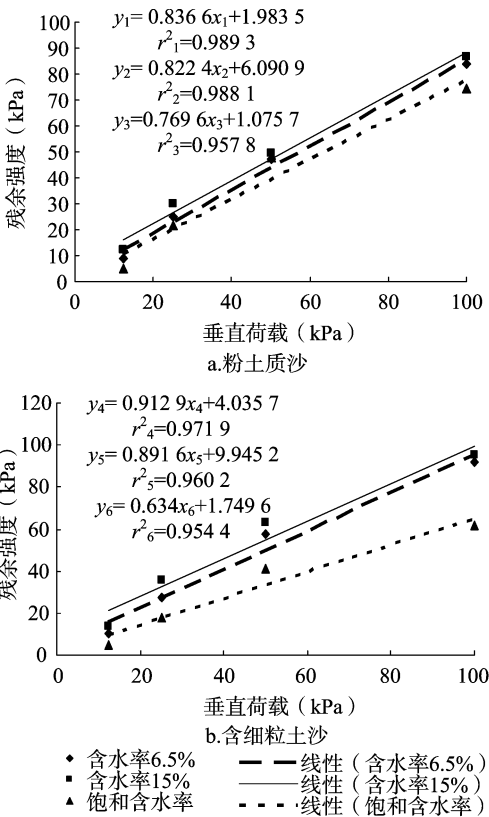


图1 垂直荷载对 2 种土壤残余强度的影响

2 种土壤残余强度与垂直荷载的相关系数最小为 0.954 4,最大可达 0.989 3,说明用直线回归拟合根-土复合体的残余强度效果较好,与库伦强度公式一致,即 $\tau = \sigma \tan \varphi + c$,其中 τ 表示抗剪强度(kPa); σ 表示垂直荷载(kPa); φ 表示内摩擦角($^{\circ}$); c 表示黏聚力(kPa)。试验结果表明,这 2 种沙土根-土复合体的剪切关系服从土力学上的摩尔-库仑强度破坏准则,反映残余强度的残余黏聚力和残余内摩擦角 2 个综合指标可采用摩尔-库仑强度破坏准则推算,这与周丹丹关于 3 种植物单根提高土体残余抗剪特性的研究结果^[10]一致。

2.2 含水率对 2 种土壤根-土复合体残余强度的影响

从图 2 可以看出,2 种垂直荷载下(即根系埋深 1.5 m 范围内),3 种含水率下根-土复合体的残余强度值均大于素土的残余强度,说明根系的存在使土体的残余强度得到了有效提高。与植物根系相比,土体耐压性较强而抗拉性较弱;相反,植物根系则表现出较强的抗拉性和较弱的耐压性,当二者相结合时,可形成耐压抗拉的根系-土壤综合体,从而提高土体的强度^[13]。由图 2 还可看出,随着土壤含水率的增加,2 种沙土根-土复合体的残余强度均呈现出先增大后减小的变化趋势,均在含水率为 15% 时达到最大,粉土质沙素土、根-土复合体的残余强度为 12.16、30.1 kPa,含细粒土沙为 13.71、35.34 kPa。

2.3 含水率对 2 种土壤根-土复合体残余强度指标的影响

从表 2 可以看出,2 种沙土根-土复合体残余黏聚力均大于素土,并且随土壤含水率的提高,根-土复合体及素土的残余黏聚力均呈现出先增大后减小的变化趋势。在含水率为 15% 时,粉土质沙、含细粒土沙根-土复合体残余黏聚力达到最大,分别为 6.09、9.95 kPa。在 3 种含水率下,含细粒土沙根-土复合体的残余黏聚力均大于粉土质沙。

表 2 含水率对 2 种土壤根-土复合体残余强度指标的影响

沙土类型	土壤种类	不同含水率的黏聚力(kPa)			不同含水率的内摩擦角($^{\circ}$)		
		6.5%	15%	饱和	6.5%	15%	饱和
粉土质沙	素土	1.47	4.86	1.00	39.73	39.53	36.61
	根-土复合体	1.98	6.09	1.08	39.92	39.43	37.58
含细粒土沙	素土	3.20	7.23	1.61	41.80	41.61	31.91
	根-土复合体	4.04	9.95	1.75	42.39	41.72	30.38

2.4 含水率对 2 种土壤根-土复合体残余强度有效性的研究

图 3 为 3 种含水率下 2 种土壤根-土复合体残余强度及残余指标相对于素土的增长率,从图 3-a 可以看出,两种垂直荷载下(即根系埋深 1.5 m 范围内),根系的存在使 2 种沙土残余强度均不同程度得到了提高,对粉土质沙而言,增长率最大可达 11.65% (垂直荷载为 12.5 kPa) 和 7.45% (垂直荷载为 25 kPa);对于含细粒土沙而言,最大可达 17.78% (垂直荷载为 12.5 kPa) 和 15.34% (垂直荷载为 25 kPa)。通过对 2 种土壤根-土复合体在 3 种含水率下的增长率可以看出,含细粒土沙根-土复合体的增长率大于粉土质沙复合体,并且垂直荷载为 12.5 kPa 时 2 种土壤根-土复合体残余强度的增长率均大于荷载为 25 kPa 时的增长率,这说明对土壤的残余强度而言,根系对土壤埋深 80 cm 时的固土效果优于埋深 150 cm 时的固土效果。由图 3-b 可以看出,在浅层土(埋深 1.5 m)范围内,在 3 种含水率下,2 种沙土根-土复合体残余

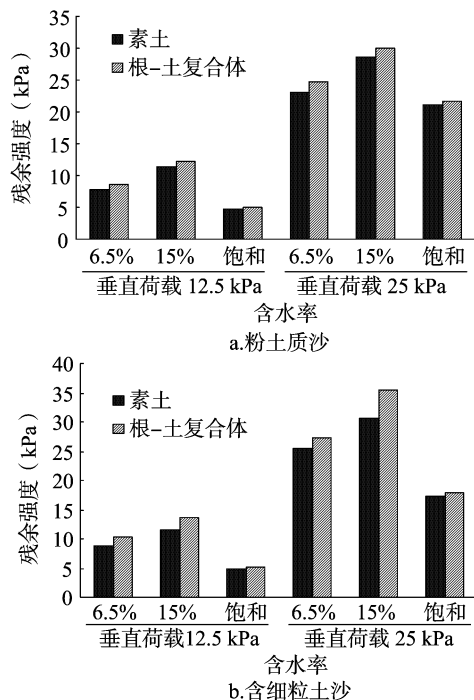


图 2 含水率对 2 种土壤残余强度的影响

在 3 种含水率梯度下,2 种沙土根-土复合体残余内摩擦角与相应素土相比变化不明显,但均随土壤含水率的增大而逐渐减小。含水率为 6.5%、15% 时,含细粒土沙根-土复合体的残余内摩擦角大于粉土质沙根-土复合体;当含水率达到饱和时,含细粒土沙根-土复合体的残余内摩擦角则小于粉土质沙根-土复合体,说明含水率对含细粒土沙根-土复合体的影响较粉土质沙根-土复合体大。

黏聚力的增长率明显大于残余内摩擦角,说明 2 种沙土残余强度的增长主要是由残余黏聚力的增长引起的。

3 结论与讨论

植物根系作用于土壤中,增强了土体抵抗剪切破坏的能力,其作用相当于加筋土中的加筋材料,而土与筋材界面存在摩擦力和咬合力,外力产生的土压力传递给筋材,土体与筋材间的摩擦力阻止土体的侧向变形,因此只要加筋材料本身具有足够的强度和抗变形能力,筋材与土体间能产生足够的摩阻力,筋材就可以提高土体的强度和稳定性^[14]。苑淑娟对小叶锦鸡儿根系的抗拉力学特性进行了深入研究,结果显示,在 0.3 mm 的根径范围内,小叶锦鸡儿单根抗拉力与根径的回归模型为 $y = 44.77x^{1.7813}$,当小叶锦鸡儿根径为 0.75 mm 时,其单根抗拉力为 26.82 N,单根的平均抗拉强度为 39.10 MPa;在 0~2 mm 径级范围内,小叶锦鸡儿根系的平均弹性极限应力为 24.03 MPa^[15]。与 I 级钢筋相比,小叶锦鸡儿根系抗拉

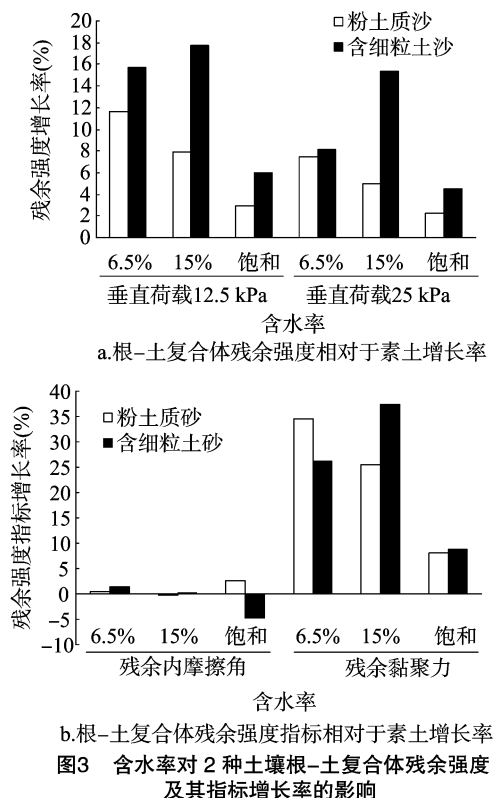


图3 含水率对2种土壤根-土复合体残余强度及其指标增长率的影响

强度达到了Ⅰ级钢筋抗拉强度(240 MPa)的16.29%,屈服强度为Ⅰ级钢筋(235 MPa)的10.23%,这充分说明小叶锦鸡儿根系具有足够的强度和抗变形能力。此外,邢会文对4种植物根-土界面摩阻特性进行了研究,结果显示在自然生境下根系主要分布层内(埋深为1.5 m以内),根-土界面的摩擦系数均大于土-土界面的摩擦系数,其中小叶锦鸡儿根-土界面的摩擦系数为0.71,而土-土界面的摩擦系数为0.65,因此小叶锦鸡儿根-土结合面抵抗位移的能力大于土-土界面^[16]。小叶锦鸡儿根系由于具有以上特性,充分发挥了加筋材料的作用,有效地提高了土体的残余特性,进而提高了土体的强度和稳定性。

2种沙土根-土复合体的残余强度随垂直荷载呈线性增加的趋势,可采用摩尔-库仑强度破坏准则推求根-土复合体的残余黏聚力和残余内摩擦角。在根系分布的浅层土(埋深为1.5 m)范围内,在3种含水率下,2种沙土根-土复合体的残余强度均大于素土的残余强度,并均随土壤含水率的提高呈现出先增大后减小的变化趋势;2种沙土根-土复合体的残余黏聚力也符合以上规律;2种沙土根-土复合体的残余内摩擦角与素土相比变化不明显,但随含水率的提高而逐

渐减小。

在根系分布的浅层土(埋深为1.5 m)范围内,在3种含水率下,小叶锦鸡儿根提高含细粒土沙根-土复合体的增长率大于粉土质沙根-土复合体,粉土质沙增长率最大可达11.65%(垂直荷载为12.5 kPa)、7.45%(垂直荷载为25 kPa);含细粒土沙增长率最大可达17.78%、15.34%。

参考文献:

- [1] 武汉水利电力学院. 土力学及岩石力学[M]. 北京:水利电力出版社,1979.
- [2] 唐朝生,施斌,高玮,等. 纤维加筋土中单根纤维的拉拔试验及临界加筋长度的确定[J]. 岩土力学,2009,30(8):2225-2230.
- [3] 谭文辉,任奋华,苗胜军. 峰值强度与残余强度对边坡加固的影响研究[J]. 岩土力学,2007,28(增刊):616-618.
- [4] Wen B P, Aydin A, Duzgoren-Aydin N S, et al. Residual strength of slip zones of large landslides in the three Gorges area, China[J]. Engineering Geology, 2007, 93(3/4):82-98.
- [5] Ali F H, Osman N. Shear strength of a soil containing vegetation roots[J]. Soils and Foundations, 2008, 48(4):587-596.
- [6] 毛妍婷,李永梅,Fullen M A,等. 狗尾草根系固土拉力的原位测定[J]. 土壤通报,2009,40(3):580-584.
- [7] 周云艳,陈建平,杨倩,等. 植物根系固土护坡效应的原位测定[J]. 北京林业大学学报,2010,32(6):66-70.
- [8] 邢会文,姚喜军,刘静,等. 4种植物代表根的研究[J]. 内蒙古农业大学学报:自然科学版,2008,29(4):22-25.
- [9] 姚喜军. 四种植物根系提高土体抗剪强度有效性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
- [10] 周丹丹. 3种植物单根提高土体残余抗剪特性的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.
- [11] 南京水利科学研究院. 土工试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,1999.
- [12] 成向荣,黄明斌,邵明安. 神木水蚀风蚀交错带主要人工植物细根垂直分布研究[J]. 西北植物学报,2007,27(2):321-327.
- [13] Simon A, Pollen N, Langendoen E. Influence of two woody riparian species on critical conditions for stream bank stability: Upper Truckee River, California[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2006, 42(1):99-113.
- [14] 徐光黎,刘丰收,唐辉明,等. 现代加筋土技术理论与工程应用[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2010:48-57.
- [15] 苑淑娟. 4种植物单根抗拉力学特性的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- [16] 邢会文. 4种植物根-土界面摩阻特性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.