

王金霞,杨 旸,李亚伟,等. 含根系土体抗剪强度试验研究进展[J]. 江苏农业科学,2017,45(18):36-39.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.18.008

含根系土体抗剪强度试验研究进展

王金霞¹, 杨 旸², 李亚伟³, 孙高峰⁴, 赵焱柯⁴, 段青松¹

(1. 云南农业大学水利学院, 云南昆明 650201; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098;

3. 湖南省岳阳市水利水电勘测设计院, 湖南岳阳 414000; 4. 云南农业大学国土资源科学技术工程研究中心, 云南昆明 650201)

摘要:植物根系固土护坡措施在生物学、生态学、力学等方面发挥着综合效益,且经济廉价,是水土保持工程的最佳选择。含根系土体类似于钢筋混凝土,可从其抗冲刷能力、抗侵蚀能力、抗剪切能力、渗透能力等方面对植物根系固土能力进行研究。介绍了含根系土体抗剪强度的试验研究方法,通过分析不同试验研究的理论依据,结合人们的研究成果,探讨了含根系土体抗剪强度试验研究的可行性和限制性。在今后的研究中,需要从改进试验装置以及制样方法等方面着手,以更加接近实际意义,使研究结果更加可靠。

关键词:根系固土;水土保持;抗剪强度;试验研究;可行性;限制性

中图分类号: S157 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)18-0036-04

植物根系深入土壤中,与土壤内的各个物质充分接触,二者形成有机复合体,这种方式构成了植物根系的固土性^[1]。杨亚川等将根系与土壤视为一体,提出了“土壤-根系复合体”的新概念,并将土壤-根系复合体抵抗剪切破坏的极限能力称为土壤-根系复合体的抗剪强度^[2]。植物根系固土的措施,可从多个方面发挥综合效力。从生物角度来看,植物的茎叶能够截留雨水,防止雨水溅蚀土壤表层;根系可以增加水分渗透,并对土壤起到固定和支撑的作用;根系在减小地表径流量、防止地表侵蚀方面发挥着重要作用^[1]。从生态角度分析,植物根系在水分子循环中起着桥梁作用:植物根系一方面依靠根压作用参与植物水分蒸发蒸腾与大气相联结,一方面与土壤中的水分、可溶性矿质及土壤黏粒、微生物等相关联,从而发生水分梯度矿质溶液的质流、物质的迁徙和富集现象^[3],从而参与并影响整个生态系统的变化。另外,采取植物根系固土措施见效快,持效时间长,代替不必要的工程措施,经济廉价^[4],还能提高生物多样性^[5]。植物根系网力学机制模式主要分为根系材料力学、根系网络串联作用、根系-土壤有机复合体、根系-土壤生物化学作用等4个层次^[1]。较粗的根系的抗拉强度相对较大^[6],较细的根系能够网络土壤,抗拉力发挥了抗剪力的作用^[7-8],而土体抗剪能力较弱、抗压能力较强,故由植物根系与土体共同组成的根-土复合体兼具较强抗压强度和抗剪强度^[9];含植物根系的土壤具有类似钢筋混凝土的构造^[6],能够发挥浅根加筋^[10]、深根锚固(一般指乔、灌木类植物)、侧根牵引等作用^[11-13],有利于保持水土^[14]。由于植物种类不同、根系形态^[15]及拉力力学性能各异、植物根系与土壤界面的相互制约效力不同等因

素^[16],根系所发挥的加筋^[17]、锚固、牵引等效力不尽相同,因此根系表现出的固土能力也会千差万别。近年来,国内外研究者对根系固土机制的研究^[18-23],主要集中于根-土复合体抗剪性能^[24]、抗侵蚀性能、抗冲刷性能^[25-26]、根系的抗拉性能^[17,27]以及根-土界面摩擦阻性能^[28]等方面。目前,研究含根系土体抗剪能力的方法主要有原位剪切试验研究、直接剪切试验研究、三轴压缩试验研究以及无侧限抗压强度试验等。本研究介绍了含根系土体抗剪强度的不同试验方法及其理论依据,综合分析不同试验方法的可行性与限制性,提出了更加接近根-土复合体实际受力条件的研究方法,为以后的研究提供思路和建议。

1 原位剪切试验研究

原位剪切试验过程是首先以根系中心点为中心,沿中心周围开挖出矩形槽,将根系作用的土体同根系作用以外的土体分离,然后将预制的模子套在根系作用的土体上,最后对模子施加水平推力,那么,模子底边所在的平面即为土体的剪切面,水平推力同模子底面的面积的比值,即为含根系土体的抗剪强度。以同样的方法计算出素土的抗剪强度,然后将含根系土体的抗剪强度同素土的抗剪强度进行对照,得出根系固土能力。其计算公式如下:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中: τ 为土体抗剪强度,kPa; F 为作用于模子的水平推力,kN; A 为模子的底面面积,m²。

人们利用原位剪切试验对植物根系固土能力做了大量的研究,得出了一系列的结论。赵丽兵等通过对黄土高原丘陵沟壑区山西省河曲县砖窑沟流域内4种有代表性的草本植物进行野外剪切测试和模型预测,证实和量化了草本植物根系增强土壤抗剪强度的作用^[29]。周云艳等通过对南望山山脚下樟树的4个含根土样和素土样在现场进行原位剪切试验,对比素土样和4个含根土样的强度值、位移值,分析评价植物根系的固土护坡效应^[30]。王斌等应用自行设计改进的

收稿日期:2016-11-04

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项经费项目(编号:201511003)。

作者简介:王金霞(1990—),女,河南镇平人,硕士研究生,研究方向为土地整治与保持工程。E-mail:1213666414@qq.com。

通信作者:段青松,博士研究生,副教授,主要从事农业水土工程、土地利用工程研究。E-mail:258437886@qq.com。

剪切箱,原位测定了不同深度(10 cm,20 cm)分蘖期香根草根根系固土,认为香根草具有一定的固土能力,并且根系入土越深,植物固土能力越强^[31]。朱锦奇等采用大盒直剪试验与物理模型,对重庆缙云山地区6种常见植物马尾松、香樟、广东山胡椒、四川大头茶、白毛新木姜子、四川山矾根系的增强抗剪强度进行对比,利用Wu模型对6种植物的根系固土效能进行模型计算,结果表明,不同的植物根系类型对增强抗剪强度值的影响非常显著^[32]。

原位剪切试验在根系原生长环境中进行,没有因重塑而破坏根和土的构造,保留根、土之间的构造关系,使试验结果更具实际意义;在相同环境下的素土和含根系土体受外界环境的影响接近相同,唯一的差别在于有无根系,几乎可以认为抗剪强度的变化只跟根系有关,突出根系的固土能力。无论是素土还是含根系土体,都使用同一个模子,保证剪切破坏面在同一厚度,避免剪切厚度不同,使剪切面土体的构造、密实度等存在差异,使变量增加,从而不能确定根系就是固土能力提升的影响因素。

然而,这种试验方法也存在一定的缺陷:模子圈套的范围有限,其范围以外的根系由于被挖断,不能检测到其对固土能力的贡献,从而有可能使根系固土能力的检测结果偏小;含根系土体达到素土土体的破坏状态后,随着剪力的增加影响抗剪强度继续提升的因素除了根系以外,还有土体的作用(比如摩擦力),而在计算中全部归功于根系,将其固土能力扩大化;抗剪强度以模子的底面面积为基准,忽略了剪切过程中剪切面积的变化,使抗剪强度小于实际情况,且素土破坏面的面积大于含根系土体的破坏面面积,使根系的固土能力进一步减小。由于不同的学者针对不同植物、不同环境条件所采用的装置及参数不尽相同,从而使得试验结果间的可对比性和参考性不显著^[33]。

2 直接剪切试验

直接剪切试验通过应变控制式直剪仪,采用4个试样,分别在不同的垂直压力 P 下,施加水平剪切力进行剪切,求得破坏时的剪应力 τ 。然后根据库仑定律确定土的抗剪强度参数:黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。

通过直接剪切试验,人们对影响植物根系固土能力的不同因素进行研究。毛伶俐、Ali等选取不同含根量土体进行大量室内直剪试验,结果发现少量根的存在就会提高土层的抗剪强度,从而对边坡的稳定性产生很大的影响^[34-35]。栗岳洲等通过对4种盐生植物根-土复合体在不同含根量梯度下的直接剪切试验,认为根系增强土体抗剪强度存在最优含根量^[5]。胡文利等以典型的沙地柏群落中选取的土样与根系作为研究对象,通过实验室直接剪切试验方法对比分析在不同含水率下无根系扰动土和有沙地柏根系存在的根土复合土样的抗剪性能^[36]。凡凡通过土样的含水量测定试验和直剪试验,建立了桉树林地土壤含水量与抗剪强度指标,并认为土体抗剪强度参数值均随着土壤含水量的增加而减小^[37]。王泽华对制成的几个试样进行了直接剪切试验,认为植物根系的存在对于土壤起着明显加筋作用,明显提高了土体的抗剪强度,并且植物根系加筋后的土体仍然符合摩尔-库仑定律,即 $\tau = c + \sigma \tan \varphi$ ^[38]。黄晓乐等分析了狗牙根和紫花苜蓿

2种草本植物根系分形特征,并对根-土复合体进行了直接剪切试验,认为根系对植被混凝土抗剪强度有增强作用,并且根-土复合体抗剪强度的增幅与根系分形特征存在显著的关系,即根-土复合体抗剪强度增幅随根系分形维数增加呈现出先增加后减少的趋势^[39]。吴鹏等采用室内剪切试验方法,对不同根系分布形态的植物根系固土护坡的有关规律进行研究,认为不同的根系分布形态,对根系固土强度和边坡稳定性的影响不同^[40]。李光莹等对小嵩草、紫花针茅、矮火绒草、二裂委陵菜、细叶亚菊、盐地风毛菊等6种草本植物的根-土复合体原状试样和素土试样分别进行了直接剪切试验,并结合植物的单根抗拉力、抗拉强度,评价其固土护坡能力与贡献^[41]。

进行直接剪切试验时,许多研究者往往重塑素土和含根系土,以控制土体含水量、含根量、根系布置形态等,根据需要研究某个影响因素;当研究某个影响因素时,其作用结果不受其他因素干扰,试验结果更具可靠性;相同剪切条件下,试样的破坏面可保持一致,就素土和含根系土体同一高度的破坏面进行比较,方具有可比性。比如朱锦奇等采用大盒直剪试验与物理模型,控制重塑土的密度、含水率、紧实度等与原状土相一致,利用Wu模型对几种植物的根系固土效能进行模型计算,认为不同的植物根系类型对增强抗剪强度值的影响非常显著^[32]。但是,“重塑”破坏了原土体的构造,以及根-土之间相互作用形态,忽略了根系和土体之间的生物化学作用和根系网络的串联作用,且其试验装置能够容纳的根系直径和根长有限^[42],使试验结果偏离了实际意义。也有学者原地采样,对原状根-土复合体进行直接剪切试验,这样保持了根系和土体的相互作用形态及根系、土壤的原始构造,发挥了根系对土体的生物化学作用及根系网的串联作用。比如李光莹等对试验区不同草本植物的根-土复合体原状试样和素土试样分别进行了直接剪切试验,对不同根-土复合体的抗剪强度进行了比较,并结合不同植物的单根抗拉力、抗拉强度评价了不同草本植物固土护坡能力与贡献^[41]。但是,对原状土就地取样,不能保证不同土体的紧实度、含水量、密度等因素相同,从而不能准确控制单一变量;取样过程中,同一种复合体选取的位置不同,试验的结果就有可能出现差异,而且不能保证取样的土体代表本土体的最强作用指标;无论是直剪试验还是原位试验,土样的受剪面是固定的,它不一定是最薄弱面,且在剪切破坏过程中逐渐变小^[43]。

3 三轴压缩试验

三轴压缩试验时测定土的抗剪强度的一种方法,通常采用3~4个圆柱形试样,分别在不同的恒定周围压力(即小主应力 σ_3)下,施加轴向压力(即产生主应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$),进行剪切,直至破坏,然后根据摩尔-库仑理论,求得抗剪强度参数。其中,不固结不排水剪试验(UU)对应于直接剪切试验的快剪试验,在实际工程条件中,相当于饱和软黏土中快速加荷时的应力情况。固结不排水剪试验(CU)适用的实际工程条件常常是土层在自重或正常荷载下已达到充分固结,然后受到突然加荷作用时所对应的受力情况。

人们利用三轴压缩试验,对植物根系的加筋效应等方面作了一系列研究。宋维峰等基于加筋理论,采用三轴压缩试

验的方法,探索林木根系的固土机制,认为在根系分布的不同深度,根系都增强了土体的强度^[44]。余芹芹等通过对寒旱环境4种类型试样即素土、草本-土复合体、灌木-土复合体、灌木-草本-土复合体试样分别进行三轴压缩试验,对比分析这4种试样的强度及其相应的应力-应变特征,认为植物根系对边坡土体具有显著的加筋作用,而草本与灌木植物组合种植的形式对土体的加筋效果较单一种植草本或灌木植物显著^[45]。嵇晓雷运用GDS三轴试验系统,首次研究了根系在土体中倾斜、水平、垂直、相交、混合5种不同布置方式对根土复合体强度的影响规律,认为不同布置方式对土体强度增强程度不同^[46]。周云艳等利用长江科学院研制的CT三轴仪,分别对素土样和2种含根土样进行不固结不排水的CT实时三轴剪切试验,揭露了根系的阻裂作用和桥联作用,最后得出根系固土的细观力学机制主要表现为根系对土体的阻裂作用和桥联作用^[47]。曹云生通过三轴试验,认为根系直径和围压越大、根系布设方式越复杂则根土复合体的抵抗荷载的能力越强^[16]。岳栗洲通过三轴试验研究了粒径对含根系土体抗剪强度的影响,认为粒径越小越有利于抗剪能力^[48]。

相较于以库伦定律为理论依据的直接剪切试验,三轴压缩试验以摩尔-库伦理论为基础,其理论依据更加充分,关注压缩过程中试样的横向和纵向变化。三轴试验中的破坏面是真正的最薄弱面,且可以模拟不同排水状况下剪切应力的变化,区分空隙水压力和有效应力^[43]。但是,一种土体往往需要多个试样才能得出土体的特征系数,多个特征系数的平均值才能代表土体的特性,最终,需要对大量的试样进行试验,工作量过大;试验中施加的围压过大,对实验设备和条件提出了很高的要求;在水土保持中,土体往往不会受到很大的围压,所以采用三轴试验时,施加的过大的围压与实际不符,属于“小题大做”。

4 无侧限抗压强度试验

无侧限抗压强度试验是一种特殊的三轴压缩试验,同样以摩尔-库伦理论为依据,围压为0,只要测出试样的最大主应力,即可确定摩尔应力圆,其顶点的切线即为库仑直线,该直线在纵轴上的截距即为黏聚力,内摩擦角为0。

对于裸土来说,土层足够深时,其黏聚力会有所增加^[49-50],但是,Hales等认为土壤抗剪能力和土层深度没有关系,植物根系作用范围为浅层土体,根-土复合体承受的围压很小,可忽略不计^[51]。聂影等、Hu等认为根系提高土体抗剪强度主要是因为根系增强了土体的黏聚力,因此,可以忽略根系对内摩擦角的影响,只着手于对黏聚力增量的研究^[52-53]。在无侧限抗压强度试验中,对土柱施加的围压为零,接近根-土复合体的实际受力情况;只需要测出试样的最大主应力,即可确定摩尔应力圆,进而画出库仑曲线,确定黏聚力,符合实际情况,且简单易行,试样用量少,工作量小。但是,无侧限抗压强度试验采用的土柱往往太细,且是重塑土,在一定的根、土含量比例条件下,允许加入的根系太少,很有可能使其他未知因素对试验结果的影响超出根系的影响,进而得出错误的结论。另外,通过试验测得的抗压强度常常略低于原状素土,尽管重塑的含根系土体同原状土的紧实度、密度、含水量等要素相同,但是由于受到扰动,不能确定抗压性能的降低是因

为根系还是因为扰动。比如,周成等对含香根草根系土体进行了无侧限抗压强度试验,并与纯土进行比较,结果显示有根系土体的抗压强度略低于纯土,对土的无侧限抗压强度几乎没有影响,但明显地改善了土的延展性^[54]。

5 未来研究展望

三轴压缩试验需要几种不同的围压,且围压较大,不符合浅层土体的受力情况,况且试验量大。无侧限抗压强度试验简单,且符合实际情况,但是柱体太细,受扰动后,土体的构造等的改变对土体的影响放大。无侧限抗压强度试验实际上是特殊的三轴压缩试验,因此,可以使用三轴仪的装置,做无侧限试验,含根系土体可以足够粗大。为了消除土壤受扰动的影响,可以在试验之前直接制备较粗的土柱,并根据研究需要种植草本植物,或者改进装置,加粗试验土柱,以满足对灌木等植物根系固土能力的研究。

参考文献:

- [1]程洪,颜传盛,李建庆,等. 草本植物根系网的固土机制模式与力学试验研究[J]. 水土保持研究,2006,13(1):62-65.
- [2]杨亚川,莫永京,王芝芳,等. 土壤-草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究[J]. 中国农业大学学报,1996,1(2):31-38.
- [3]朱建强,李靖. 陕南膨胀土分布区土坎梯地建设探讨[J]. 中国水土保持,1998(12):34-35.
- [4]杨永红,王成华,刘淑珍,等. 不同植被类型根系提高浅层滑坡土体抗剪强度的试验研究[J]. 水土保持研究,2007,14(2):233-235.
- [5]岳栗洲,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):1370-1383.
- [6]Chen L, Wang P, Yang Y, et al. Constitutive model of single root system's resistance to tensile stress - taking *Pinus tabulaeformis*, *Betula platyphylla*, *Quercus mongolica* and *Larix gmelinii* as experimental objects[J]. PloS one,2014,9(4):e93066.
- [7]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.
- [8]Zhang C, Jiang J, Ma J, et al. Evaluating soil reinforcement by plant roots using artificial neural networks[J]. Soil Use and Management, 2015,31(3):408-416.
- [9]Thornes J B. Vegetation and erosion. Processes and environments [M]. USA: John Wiley and Sons Ltd,1990.
- [10]Wang Y, Shu Z, Zheng Y, et al. Plant root reinforcement effect for coastal slope stability[J]. Journal of Coastal Research, 2015, 73(Sp1):216-219.
- [11]乔娜,余芹芹,卢海静,等. 寒旱环境植物护坡力学效应与根系化学成分响应[J]. 水土保持研究,2012,19(3):108-113.
- [12]Zhang C B, Chen L H, Jiang J. Vertical root distribution and root cohesion of typical tree species on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Land,2014,6(5):601-611.
- [13]Abdi E, Majnounian B, Rahimi H, et al. Distribution and tensile strength of Hornbeam (*Carpinus betulus*) roots growing on slopes of Caspian Forests, Iran[J]. Journal of Forestry Research, 2009, 20

- (2):105-110.
- [14] Saifuddin M, Osman N. Hydrological and mechanical properties of plants to predict suitable legume species for reinforcing soil [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(35): 5123-5128.
- [15] Schwarz M, Phillips C, Marden M, et al. Modelling of root reinforcement and erosion control by 'Veronese' poplar on pastoral hill country in New Zealand [J]. New Zealand Journal of Forestry Science, 2016, 46(1): 1-17.
- [16] 曹云生. 冀北山地油松根系固土机制的影响因素研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [17] 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 & Mechanics, 2010, 31(5): 617-622.
- [18] Bourrier F, Kneib F, Chareyre B, et al. Discrete modeling of granular soils reinforcement by plant roots [J]. Ecological Engineering, 2013, 61(1): 646-657.
- [19] Burylo M, Hudek C, Rey F, et al. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France) [J]. Catena, 2010, 84(1): 70-78.
- [20] 陆桂红, 杨顺, 王钧, 等. 植物根系固土力学机理的研究进展 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(2): 151-156.
- [21] 钟贞明, 桂勇, 罗嗣海, 等. 植物护坡对边坡稳定性作用机理研究综述 [J]. 路基工程, 2013(6): 1-7.
- [22] 解明曙. 林木根系固坡土力学机制研究 [J]. 水土保持学报, 1990, 4(3): 7-14, 50.
- [23] Bischetti G B, Bassanelli C, Chiaradia E A, et al. The effect of gap openings on soil reinforcement in two conifer stands in northern Italy [J]. Forest Ecology and Management, 2016, 359: 286-299.
- [24] Schwarz M, Rist A, Cohen D, et al. Root reinforcement of soils under compression [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2015, 120(10): 2103-2120.
- [25] Li P, Li Z B. Soil reinforcement by a root system and its effects on sediment yield in response to concentrated flow in the Loess Plateau. [J]. Agricultural Sciences, 2011, 2(2): 86-93.
- [26] Chen F, Zhang J, Zhang M, et al. Effect of *Cynodon dactylon* community on the conservation and reinforcement of riparian shallow soil in the Three Gorges Reservoir area [J]. Ecological Processes, 2015, 4(1): 1-8.
- [27] 雷相科, 张雪彪, 杨启红, 等. 植物根系抗拉力学性能研究进展 [J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33(4): 703-711.
- [28] 张春晓, 陈终达. 香根草根-土界面的单根拉拔摩擦阻特性研究 [J]. 江苏科技信息, 2016(26): 69-71.
- [29] 赵丽兵, 张宝贵, 苏志珠. 草本植物根系增强土壤抗剪切强度的量化研究 [J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 718-722.
- [30] 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.
- [31] 王斌, 范茂攀, 郑毅, 等. 香根草根系固土拉力的原位测定 [J]. 云南农业大学学报, 2012, 27(2): 257-262.
- [32] 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(2): 449-458.
- [33] Zhang C B, Chen L H, Liu Y P, et al. Triaxial compression test of soil-root composites to evaluate influence of roots on soil shear strength [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(1): 19-26.
- [34] 毛伶俐. 生态护坡中植被根系的力学分析 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [35] Ali F H, Osman N. Soil-root composite: correlation between shear strength and some plant properties [J]. Electron J Geotech Eng, 2007, 12.
- [36] 胡文利, 李为萍, 陈军. 不同含水率水平下根-土复合体抗剪强度试验研究 [J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2011, 32(1): 215-219.
- [37] 巩凡. 生态护坡中桉树根系的固土效果试验研究 [J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2013, 33(1): 61-63.
- [38] 王泽华. 黄土地区公路边坡植物根系加筋特性研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [39] 黄晓乐, 周正军, 许文年. 植被混凝土基材中草本植物根-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.
- [40] 吴鹏, 谢朋成, 宋文龙, 等. 基于根系形态的植物根系力学与固土护坡作用机理 [J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(5): 139-142.
- [41] 李光莹, 虎啸天, 李希来, 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.
- [42] 杨苑君. 华北典型乔木根系抗拉及土壤抗剪性能研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [43] 杨畅, 字淑慧, 余建新, 等. 植物根系固土机理及模型研究进展 [J]. 云南农业大学学报, 2014, 29(5): 759-765.
- [44] 宋维峰, 陈丽华, 刘秀萍. 林木根系的加筋作用试验研究 [J]. 水土保持研究, 2008, 15(2): 99-102.
- [45] 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(增刊1): 3216-3223.
- [46] 嵇晓雷. 基于植被根系分布形态的生态边坡稳定性研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2013.
- [47] 周云艳, 徐琨, 陈建平, 等. 基于CT扫描与细观力学的植物侧根固土机理分析 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 1-9.
- [48] 栗岳洲, 付江涛, 胡夏嵩, 等. 土体粒径对盐生植物根-土复合体抗剪强度影响的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 403-412.
- [49] Fan C C, Su C F. Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content [J]. Ecological Engineering, 2008, 33(2): 157-166.
- [50] Normaniza O, Faisal H A, Barakbah S S. Engineering properties of *Leucaena leucocephala* for prevention of slope failure [J]. Ecological Engineering, 2008, 32(3): 215-221.
- [51] Hales T C, Ford C R, Hwang T, et al. Topographic and ecologic controls on root reinforcement [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2009, 114(F3): 554-570.
- [52] 聂影, 陈晓红, 付征耀, 等. 生态护坡根系纤维土强度和变形特性实验研究 [J]. 铁道工程学报, 2011, 28(7): 6-8.
- [53] Hu X S, Gary B, Zhu H L, et al. An exploratory analysis of vegetation strategies to reduce shallow landslide activity on loess hillslopes, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(4): 668-686.
- [54] 周成, 张继宝, 周荣官, 等. 香根草生态护坡的根系固土试验研究 [C]// 第二届全国环境岩土工程与土工合成材料技术研讨会论文集. 2008.