

土壤孔隙水承压条件下4种根—土复合体抗剪特性

张欣¹, 姚喜军², 刘静², 王林和², 尹瑞平¹, 邢会文², 金彩霞³

(1. 水利部 牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 内蒙古农业大学 生态环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 3. 包头市达茂旗畜牧业局 草原工作站, 内蒙古 包头 014500)

摘要: 采用直剪仪对4种沙生植物重塑的根—土复合体及素土进行快剪试验, 探讨了其抗剪强度以及根径和垂直压力对抗剪强度的影响。结果表明, 柠条、沙柳、沙地柏、白沙蒿根—土复合体在1.5 m (25 kPa) 的浅层土体范围内抗剪强度均大于素土, 4种植物根—土复合体的内摩擦角与素土相比差异不明显; 在根径相同(1.25 mm)的情况下, 4种植物根—土复合体的黏聚力均大于素土, 其黏聚力增加率的变化范围在4.60%~46.23%之间, 大小顺序为: 柠条>沙地柏>沙柳>白沙蒿; 4种植物随着根径的增加, 复合体的抗剪强度均有不同程度的增大。

关键词: 根—土复合体; 抗剪强度; 黏聚力; 内摩擦角

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)04-0022-05

中图分类号: S157, Q947.6

Shear Strength Characteristics of Root—Soil Composites Under Bearing Pressure Condition of Soil Pore Water

ZHANG Xin¹, YAO Xi-jun², LIU Jing², WANG Lin-he², YIN Rui-ping¹, XING Hui-wen², JIN Cai-xia³
(1. Institute of Water Resources for Pasturing Area of the Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China;
2. College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China;
3. Prairie Workstation of the Damaoq Livestock Bureau, Baotou, Inner Mongolia 014500, China)

Abstract: Root-soil composites of four desert plants and pure soil were investigated by fast-shear test using direct shear apparatus to explore shear strengths of root-soil composites and the impacts of root diameter and vertical pressure on shear strength. Results showed that shear strengths of the root-soil composites for *Caragana microphylla* Lam., *Salix psammophila*, *Sabina vulgaris* Ant., and *Artemisia sphaerocephala* Krasch. are higher than shear strength of pure soil within 1.5 m shallow layer (25 kPa). Equivalent friction angles of the root-soil composites do not change obviously as compared with pure soil. For the same diameter (1.25 mm), cohesive forces of the root-soil composites are greater than pure soil and the range of increased cohesion is 4.60%~46.23% and by the cohesion, the order of the plants is *Caragana microphylla* Lam. > *Sabina vulgaris* Ant. > *Salix psammophila* > *Artemisia sphaerocephala* Krasch.. Shear strengths of the composites are increased to different extents when root diameter is increased.

Keywords: root-soil composite; shear strength; cohesion; equivalent friction angle

根—土复合体的抗剪特性是土壤及根系界面相互作用的综合表现, 不同植物的根—土复合体抗剪强度不同, 其差异主要是根系生物力学特性的不同所引起的, 随着植被固土技术的不断推广应用, 其根系固土作用的定量研究已经成为亟待解决的基础课题^[1-3]。

关于根系对土壤抗剪特性影响的研究国外起步于20世纪, Endo和Manbeian等^[4]分别采用现场测试和室内试验对含有植物根系的土体进行了抗剪强

度研究, 发现根系对土体抗剪强度有增强作用。国内的研究兴起于20世纪末, 解明曙^[5]采用根系拉拔试验法, 研究了白榆(*Ulmus pumila*)根系的固土能力, 结果认为根—土复合体的抗剪强度远高于素土。杨亚川^[6]通过对节节草(*Hippuris vulgaris*)、野燕麦(*Avena fatua* L.)、狗尾草[*Setaria viridis* (L.) Beauv.]的根—土复合体原型结构试样进行了直剪试验, 发现复合体抗剪强度随含根量增加而增大, 随

收稿日期: 2009-10-10

修回日期: 2010-03-19

资助项目: 国家自然科学基金“采煤塌陷区植物固土抗蚀生物力学特性的研究”(90610008); 中国水科院科研专项“风水复合侵蚀下灌木根系固土作用研究”

作者简介: 张欣(1972—), 女(满族), 河北省清河县人, 硕士, 主要从事水土保持方面的研究。E-mail: nmmkszx@163.com。

通信作者: 刘静(1958—), 女(汉族), 湖北省钟祥市人, 博士, 教授, 主要从事水土保持方面的研究。E-mail: ljing58@126.com。

含水量增多而减小; 复合体黏聚力 C 值与含根量呈正相关关系, 而复合体内摩擦角 Φ 值与含根量关系不大。朱珊^[7]通过对黄土地区红柳(*Tamarix ramosissima* Ledeb.) 根系的试验研究, 提出了抗剪强度指标黏聚力和摩擦角与根系表面积比的关系。郝彤琦等^[8]由花米草(*Spartina alterniflora*) 的根-土复合体原型结构试样直剪试验得知, 复合体抗剪强度 τ 与法向压力 σ 的关系符合库仑定律, 且 τ 随根量的增加而提高。宋维峰^[9]采用三轴试验测定了刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.) 的根-土复合体的抗剪强度, 结果表明, 复合体的抗剪强度随含水量的增加而减少。目前, 国内研究较多的是浅根系草本植物和一些护坡的深根系乔木^[10-12], 而对于干旱半干旱地区的灌木、半灌木根系固土力学特性的研究鲜见报道^[13]。本研究通过快剪试验分析孔隙水承压条件下沙地柏(*Sabina vulgaris* Ant.)、沙柳(*Salix psammophila*) 柠条(*Caragana microphylla* Lam.)、白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala* Krasch.) 这4种植物根系提高土体抗剪强度的有效性, 以期对神东矿区采煤塌陷区的生态环境建设以及干旱半干旱地区水土保持树种的选择提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古鄂尔多斯市伊金霍洛旗乌兰木伦镇境内, 属神华集团神府东胜煤炭分公司采煤塌陷区, 是毛乌素沙地的东南边缘, 研究区中心地理坐标为 $110^{\circ}07'E$, $39^{\circ}22'N$ 。属于温带干旱半干旱大陆性季风气候, 年平均温度 $7.3^{\circ}C$, 多年平均降水量约 400 mm , 年降水主要集中在7—9月, 这3个月的降水量约占全年降水量的 66.8% , 且多以暴雨的形式

出现。秋末和冬春盛行西北风, 多年平均风速 3.6 m/s , 年均大风日数 42.2 d , 年均沙尘暴日数 $17\sim 26\text{ d}$ 。成土母质主要为残积物和风积物(风成沙与风成黄土), 土壤机械组成较粗, 砂粒含量多, 物理性黏粒少, 土壤疏松, 易遭受流水侵蚀和风蚀。该区天然植物种主要有沙柳(*Salix psammophila*)、小叶杨(*Populus simonii*)、羊柴(*Hedysarum leave Maxim.*)、油蒿(*Artemisia ordosica Krasch.*)、沙竹(*Psammochloa villosa*)、虫实(*C. declinatum Steph. ex Stev.*) 和沙米[*Agripophyllum pungens* (Vahl) ex A. Dietr.] 等。目前人工植被主要有沙柳、柠条、黑沙蒿、白沙蒿、沙地柏、杨树。

2 材料与方法

2.1 试验材料

2.1.1 根系的采集 2007年8月份采用整株挖掘法采集4年生沙地柏、沙柳、柠条(*Caragana microphylla* Lam.)、白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala* Krasch) 根系作为待测根系。根据植物的生长密度, 柠条、白沙蒿选取 $8\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的样地, 沙地柏选择 $4\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的样地, 沙柳选择 $2\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的沙柳带, 在样地内选择30株待测植物, 测其株高、冠幅和地径, 分别计算其平均值, 在样地内选取5株与平均值相近的标准株挖掘其根系, 挖掘时尽量保证根系的完整性(表1)。

2.1.2 试验根的选取 对根-土复合体抗剪特性的研究针对代表根进行。

定义代表根为根长、根表面积的众值所对应的径级组(代表根的研究另文发表)。本项研究的每种植物选取3个根径, 分别为代表根径级以及代表根前后各一个径级范围(表2)^[14]。

表1 样地背景

植物种类	生长年限/a	土壤质地	样地规格/m	走向	株行距/m	待测株树/株	标准株数/株
沙柳	4	偏沙性	2×10	东—西	簇生林带	30	5
沙地柏	4	沙壤土	4×10	南—北	0.5×1	30	5
柠条	4	沙壤土	8×10	南—北	0.5×4	30	5
白沙蒿	4	沙壤土	8×10	南—北	2×4	30	5

表2 试验用植物根系径级

植物种类	径级组	试验根径	mm			
			径级组	试验根径	径级组	试验根径
柠条	0~0.5	0.45	(0.5~1.0)*	0.75	1.0~1.5	1.25
沙柳	1.0~1.5	1.25	(1.5~2.0)*	1.75	2.0~2.5	2.25
白沙蒿	1.0~1.5	1.25	(1.5~2.0)*	1.75	2.0~2.5	2.25
沙地柏	0~0.5	0.45	(0.5~1.0)*	0.75	1.0~1.5	1.25

注: 加* 为代表根径级范围。

2.2 试验方法

2.2.1 原状土含水量和密度的测定 每种植物样地内选取 3 株标准株, 分别在每个标准株下挖取土壤剖面, 每个剖面分 0—20 cm, 20—40 cm 和 40—60 cm 共 3 层取样, 每层取 3 个重复, 测定含水量和干密度即为该剖面该土层的含水量和干密度, 将 3 个土壤剖面的 3 层土壤的含水量数据取平均即为试验用土的含水量 4.34% (标准差 $\pm 1.97\%$) 和密度 1.47 g/cm^3 (标准差 ± 0.076)。

2.2.2 试样制备 按上面测定的含水量和干密度制备素土和加根土, 所用土壤均为样地内采集的风干土壤, 素土试样的制备根据“土工试验规程”^[15] 进行, 加根土试样的制备根据环刀的规格以及自然状态下根密度综合考虑进行布置, 由于每种植物自然状态下的根密度不相同, 考虑到环刀截面积的大小及试验效果故只对每个环刀内布置 4 条根进行研究, 根长与环刀高相同, 为 2 cm。

2.2.3 垂直荷载的确定 本研究所取的 4 种植物根系的分布深度均在 2 m 范围内, 而对土体固持作用最大的密集分布层, 根据树种的不同一般在 80 cm 左右。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 约为 12.5 kPa, 1.5 m 约为 25 kPa 左右, 参照直剪试验的要求选取其余的两级压力为 50 和 100 kPa。

2.2.4 试验仪器及方法 使用 ZJ 型四联应变控制式电动直剪仪进行快剪试验, 模拟降雨条件下土壤含水量达到饱和, 研究土壤孔隙水承压的状况。剪切速率为 0.8 mm/min , 每组试验做 4 个荷载的试样, 每个荷载下做 3 个平行, 按“土工试验规范”进行。3 个重复的抗剪强度均值作为该荷载下的剪应力, 据此求黏聚力 C 和内摩擦角 φ 值。由于根—土复合体在剪应力作用下发生剪切变形时, 不仅产生土粒与土粒间的摩擦而且还有土粒与根系间的摩擦, 所以内摩擦角 φ 值的实质是复合体的内摩擦角。

3 结果与分析

3.1 4 种植物根系提高土壤抗剪有效性

图 1 为相同根径 ($d = 1.25 \text{ mm}$) 的 4 种植物根—土复合体抗剪参数的增长率, 即根—土复合体的各个抗剪强度指标相对于素土抗剪强度指标的增长率。从图中可以看出, 沙柳、沙地柏、白沙蒿、柠条 4 种植物的根—土复合体在 4 种垂直压力下抗剪强度增长率总体上大于 0, 仅柠条的根—土复合体在 100 kPa 下抗剪强度减小 (原因有待于进一步研究), 说明这 4 种植物的根系有效地提高了土体的抗剪能力。在

12.5 和 25 kPa 压力所代表的 1.5 m 深度范围内的浅层土体中, 沙地柏根系提高土体抗剪强度的有效性最明显, 其抗剪强度的增加率为 27.43% (12.5 kPa 压力下) 和 17.70% (25 kPa 压力下); 柠条根系提高土体抗剪强度的有效性次之, 为 13.92% (12.5 kPa 压力下) 和 10.93% (25 kPa 压力下); 沙柳根—土复合体抗剪强度的增加率为 5.71% (12.5 kPa 压力下) 和 7.97% (25 kPa 压力下); 白沙蒿抗剪强度的增加率为 2.98% (12.5 kPa 压力下) 和 3.47% (25 kPa 压力下)。这说明, 从固土抗蚀、保持水土的角度评价, 沙地柏固土效果最明显, 其次是柠条和沙柳。

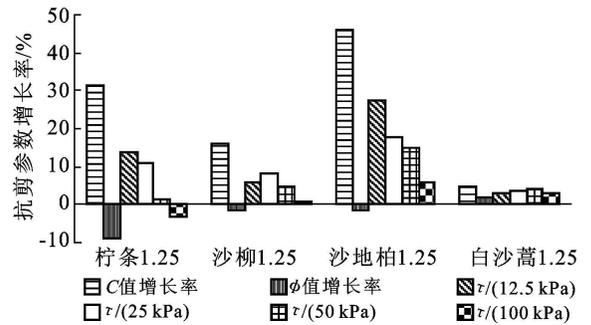


图 1 同级各植物根—土复合体抗剪参数增长率

库仑定律表明, 抗剪强度由黏聚力和内摩擦力组成^[16], 由图 1 可知 4 种植物根—土复合体的黏聚力均大于素土, 增加率分别为沙地柏 46.23%, 柠条 31.60%, 沙柳 16.02%, 白沙蒿 4.60%; 根—土复合体内摩擦角与素土相比植物种间差别较大, 白沙蒿根—土复合体内摩擦角增加率为 2.01%, 说明白沙蒿根—土界面之间的摩擦力大于土—土界面, 这有助于增大根系与土壤的黏结力。

柠条、沙柳、沙地柏的根—土复合体内摩擦角的增加率均为负值, 变化范围在 $-8.62\% \sim -1.56\%$ 之间, 即复合体的内摩擦角小于素土, 这说明试样内根—土界面形成了软弱滑动面^[17], 这一现象有可能是这 3 种植物根系表面的粗糙度较小, 与土壤的黏结力小于白沙蒿的根系, 这一点有待于试验验证。尽管柠条、沙柳、沙地柏的根—土复合体的内摩擦角小于白沙蒿, 也小于素土, 但这 3 种植物根系均使根—土复合体的黏聚力显著增大, 使得这 3 种植物根系能够有效提高土壤的抗剪性能。

3.2 垂直荷载对根—土复合体抗剪强度的影响

图 2 为土壤含水量为 4.34% 时 4 种植物代表根—土复合体抗剪强度与剪切位移关系。

从图中可以看出, 4 种植物根—土复合体的抗剪强度随着垂直压力的增大而显著增加, 但这种增大并不是线性的, 在垂直压力由 12.5 kPa 增大到 25, 50 和

100 kPa 时, 植物种之间抗剪强度的增长率有所不同。

4 种植物根—土复合体在较大的垂直压力下(50 kPa, 100 kPa), 垂直压力下随着剪切位移的增加, 抗剪强度 τ 逐渐增大, 剪切位移分别在 4 和 6 mm 左右时(如图中 A 点所示), τ 达到基本稳定的状态, 根据土力学试验规范认为此时土样被剪破, a 点的抗剪强度即为复合体的抗剪强度; 4 种植物根—土复合体在较小的垂直压力下(12.5 kPa, 25 kPa), 随着剪切位

移的增加, 抗剪强度很快达到极限值(如图中 B 点所示), 该点即为复合体的抗剪强度, 之后抗剪强度降低最终达到稳定, 此时应力黏应变曲线几乎平行于横轴。这说明在 1.5 m 深的范围内, 当表层土体发生微小错动或张裂时, 根—土复合体起到了一定的固持作用, 特别是在根—土复合体达到最大抗剪强度后根系的固土作用并未完全消失, 而是稳定在一个水平上, 这对浅层土体的固持起到了很好的作用。

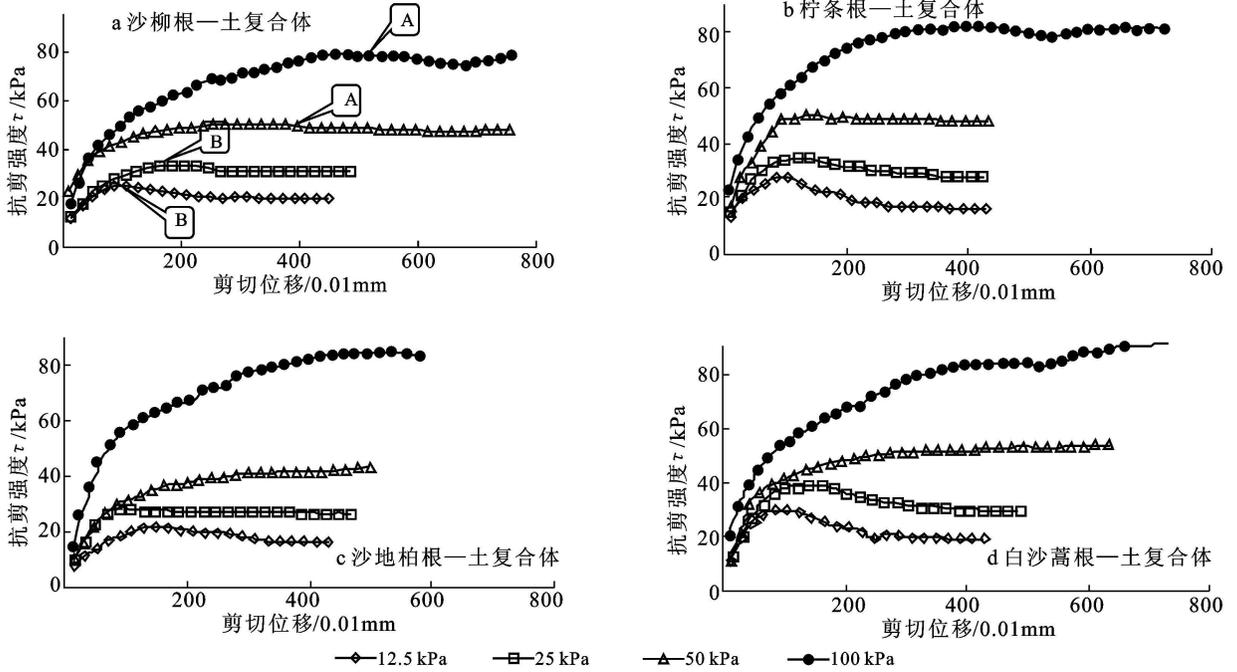


图 2 4 种植物代表根—土复合体抗剪强度与剪切位移关系曲线

3.3 根径对根—土复合体抗剪特性的影响

图 3 为素土及 4 种植物代表根及代表根前后各一个径级的根—土复合体黏聚力及内摩擦角。由图中可知, 4 种植物根径不同, 对根—土复合体黏聚力和内摩擦角的影响不同。随着根系直径的增加, 4 种植物根—土复合体的黏聚力逐渐增大, 其中沙柳的增加幅度最快, 根径在 2.25 mm 时提高黏聚力效果最好, 增加率可达 55.85%, 白沙蒿在根径为 1.25 mm 时提高黏聚力效果最差仅为 4.6%, 相同径级组条件下沙地柏根—土复合体的黏聚力总体上大于柠条的, 沙柳的大于白沙蒿的。柠条、沙柳、白沙蒿的根—土复合体的内摩擦角都随根径的增加而降低, 沙地柏根—土复合体的内摩擦角无明显变化。

直荷载 $\sigma_v > 25$ kPa 时, 随着垂直荷载的增加, 沙地柏、沙柳、白沙蒿的根—土复合体抗剪强度的增加率均呈降低趋势, 这一现象表明低荷载的情况下根系对于提高土体的抗剪强度更有效, 也反映出根系在浅层土体固土效果更好。

4 讨论

(1) 本研究讨论的 4 种植物根系分布层都在 1.5 m 范围内, 该深度土壤自重应力为 25 kPa, 而根系密集层在 60 cm 左右, 土壤自重应力约为 12.5 kPa。垂

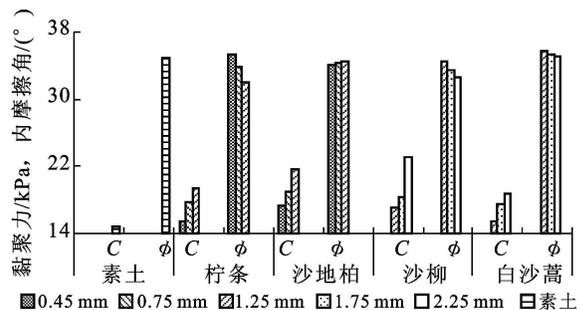


图 3 素土及 4 种植物根—土复合体黏聚力(C)及内摩擦角(ϕ)

(2) 土层深度的不同(即垂直荷载不同), 决定了其根—土复合体达到最大抗剪强度所发生的位移不同, 在试验中表现出随着垂直荷载的增加, 达到根—

土复合体最大抗剪强度的位移增加。对于浅层土体来说,剪破位移仅1~2 mm。但是,在剪破后,复合体的抗剪强度还能保持一个稳定值,即在6 mm位移范围内,维持抗剪强度基本不变。这说明虽然从土力学的角度,根—土复合体在结构上已经被剪破,但是从水土保持的角度,还能起一定的固持土体的作用。

(3) 植物在一个生长期,随着根系的生长,根径不断增加,表现在力学性能上是抗剪强度不断加大,然而,对于根—土界面的内摩擦角,随着根系直径的增加有降低趋势或基本不变,分析其原因可能是根系在呼吸过程中需要养分和水分,使根系周围形成了一个湿润的微环境,周围的孔隙使根系与土体的接触面积减小,根系周围的水又起到了润滑剂的作用,使根系与土的接触面趋向于软弱滑动面,导致复合体的内摩擦角较素土有不同程度的减小。

5 结论

(1) 对于代表根或接近代表根的根径(1.25 mm),柠条、沙柳、沙地柏、白沙蒿4种植物的根—土复合体在低荷载下,抗剪强度与素土相比均有不同程度的提高,增加率在3.47%~27.43%。黏聚力 C 与素土相比也有显著提高,增加率范围在4.6%~46.23%之间,4种植物根系提高土体抗剪能力的大小依次为:沙地柏>柠条>沙柳>白沙蒿;4种植物根—土复合体的内摩擦角 φ 变化不明显,与素土相比白沙蒿根—土复合体的内摩擦角有所增加,其它3种植物根—土复合体的内摩擦角都有不同程度的减小。

(2) 随着垂直荷载的增加,根—土复合体抗剪强度的增长率是非线性的,当垂直压力增大到25 kPa后,根—土复合体的抗剪强度增长率明显减小,抗剪强度趋于平稳,这表明根系在土体浅层1.5 m范围内起到了很好的提高土体抗剪强度的作用,但随土层深度的加大,根系提高土体抗剪强度的作用逐渐减弱。

(3) 对于代表根或接近代表根的根径范围,随着根径的增加,复合体黏聚力有不同程度的增大,增加率范围在4.6%~55.85%之间,随根径的增加复合体抗剪强度增大的排序是沙地柏>柠条、沙柳>白沙蒿。

致谢:在直剪实验中,内蒙古农业大学水利与土木工程学院刘挨刚老师,李为萍老师和贺兵老师给予了很大帮助,特此致谢。

[参考文献]

- [1] 杨永红,刘淑珍,王成华,等.含根量与土壤抗剪强度增加值关系的试验研究[J].水土保持研究,2007,14(3):13-15.
- [2] 刘定辉,李勇.植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J].水土保持学报,2003,17(3):34-37.
- [3] 封金财,王建华.植物根系的存在对边坡稳定性的作用[J].华东交通大学学报,2003,20(5):42-45.
- [4] Endo T, Tsurutu T. The effect of the tree's roots upon the shear strength of soil[R]. Forest Experiment Station, U.S. Dep. Agric. For. Serv. Arcata, 1968: 167-182.
- [5] 解明曙.林木根系固坡力学机制研究[J].水土保持学报,1990,4(3):7-14.
- [6] 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.
- [7] 朱珊,邵军义.根系黄土抗剪强度的特性[J].青岛建筑工程学院学报,1997,18(1):5-9.
- [8] 郝彤琦,谢小妍,洪添胜.滩涂土壤与植物根系复合体抗剪强度的试验研究[J].华南农业大学学报,2000,21(4):78-80.
- [9] 宋维峰,陈丽华,刘秀萍.林木根系固土作用数值分析[J].北京林业大学学报,2006,28(2):80-84.
- [10] 刘国彬,蒋定生,朱显谟.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):24-28.
- [11] 程洪,张新全.草本植物根系网固土原理的力学试验探究[J].水土保持通报,2002,22(5):20-23.
- [12] 周跃,李宏伟,徐强.云南松幼树垂直根的土壤增强作用[J].水土保持学报,2000,14(5):110-121.
- [13] 史敏华,王棣,李任敏.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(2):17-19.
- [14] 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,2008,29(4):22-25.
- [15] 南京水利科学研究所.土工试验规程(SL237-1999)[S].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [16] 李广信.高等土力学[M].北京:清华大学出版社,2004:159-161.
- [17] 施有志,马时冬.土工格栅的界面特性试验[J].岩土力学,2003,24(2):296-299.