

不同布根形式对草本植物根土复合体抗剪强度试验

王保辉, 朱连奇

(河南大学环境与规划学院, 河南 开封 475004)

摘要: 为研究不同根系布置方式(方形、梅花形、环形)对草本植物根—土复合体抗剪强度影响,引入面积置换率的概念,解决了相同含根量或相同根数时无法同时满足方形、梅花形和环形布置的难题。在此基础上选取中国过渡带北侧山地土壤与莎草科植物开展植物根—土复合体抗剪强度试验研究,分析了相同布置形式下含根量对根—土复合体抗剪强度的影响、根系布置方式(方形、梅花形、环形)对草本植物根—土复合体抗剪强度增强作用以及抗剪强度指标变化规律。结果表明:根—土复合体试样的抗剪强度和黏聚力随着含根量的增大而逐渐增加;根—土复合体试样的内摩擦角随着含根量的增加变化不明显。根—土复合体试样的抗剪强度和黏聚力随着径级的增加而逐渐增大;根—土复合体内摩擦角与根系径级关系不大且规律性不明显。在法向应力较小时,根系的布置形式对根—土复合体的抗剪强度影响较小,当法向应力较大时,根系的布置形式对根—土复合体的抗剪强度影响不能忽略,且面积置换率越大,该误差越大。根—土面积置换率的较小时,方形布置的根系对黏聚力和内摩擦角影响最大,随着根—土面积置换率的增加,方形、梅花形及环形布置形式对根—土复合体黏聚力和内摩擦角的影响趋于稳定。

关键词: 根—土复合体; 抗剪强度; 面积置换率; 直剪试验

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)06-0118-05

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.06.018

Experimental Study on Shear Strength of Herbal Root-Soil Composites Under Different Arrangement Modes

WANG Baohui, ZHU Lianqi

(College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng, Henan 475004)

Abstract: In order to study the effects of different arrangement modes on shear strength of herbal root-soil composites, the difficulty that the same root amount or root number could not simultaneously satisfy different arrangement modes(square, quincunx and ring) was solved effectively. On this basis, by taking the soil and sedge family plants in the north side of north-south transition zone of china as the research object, the shear strength of herbal root-soil composites were researched. The strengthening effects of the herbal root-soil composites and the variation of shear strength index were analyzed by using laboratory test under the disturbance of different levels of root amount and arrangement modes. The results show that the shear strength and cohesion of root-soil composites increased with the root amount increasing under the same conditions. The friction angle of root-soil composites exhibits almost no variation with the root amount increasing under the same conditions. The shear strength of root-soil composites and the cohesion increased with the root diameter increasing. The friction angle of root-soil composites exhibits almost no variation with diameters increasing. The arrangement modes of herbal root had little influence on the shear strength of root-soil composites when the normal stress was comparatively small. The influence on the shear strength of root-soil composites of the arrangement modes could not be ignored when the normal stress was comparatively big. Moreover, The bigger the area replacement ratio, the larger errors. The results also showed that it was considered that the square arrangement exerted an important influence on the cohesion and friction angle of root-soil composites when the area replacement ratio comparatively small. The influence on the cohesion and friction angle of root-soil composites were gradually stabilized with the increase of the area replacement ratio.

Keywords: root-soil composites; shear strength; area replacement ratio; direct shear test

收稿日期: 2018-07-06

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(4167011169)

第一作者: 王保辉(1983—), 男, 山东济宁人, 讲师, 博士, 在站博士后, 主要从事岩土力学与岩土工程及土壤地理研究。E-mail: 7353wbh@163.com

通信作者: 朱连奇(1963—), 男, 河南郸城县人, 教授, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110007014M), 主要从事山地地理环境及资源开发利用研究。E-mail: lqzhu@henu.edu.cn

中国是多山之国。中国的山地面积占国土总面积的 33%，由于山地生态环境脆弱，山高坡陡，岩性松散，且土壤多为幼土，土层薄，暴雨频繁，加之不合理的人为干扰活动，极易引发水土流失，给山区人民造成巨大的经济损失^[1]。近年来，植被护坡技术以其恢复生态、美化环境、造价低等优点在治理水土流失恢复生态环境方面得到了广泛应用^[2-7]。

国内外众多学者围绕植物根系提高土壤抗剪强度的研究做了许多杰出的工作，并取得了重要的成果。Bourrier 等^[8]利用离散元方法对根系固土机制开展相关研究，分析了根系力学特性(弯曲模量、内摩擦角、根数量和张拉强度)对根土复合体抗剪强度的影响；胡其志等^[9]以草本植物狗牙根根系为研究对象，通过室内直剪试验分析了含根量和竖向压力对根—土复合体抗剪强度的影响，给出了根—土复合体的抗剪强度存在最优含根量区域的结论；胡文利等^[10]以沙地柏根系为研究对象，将沙地柏根均匀垂直插入土样制作直剪试样进行室内直剪试验，研究有根与无根土体的抗剪强度差异，试验结果表明，沙地柏根系可显著提高土壤的抗剪强度；李为萍等^[11]将沙地柏根均匀分布插入土体制备根—土复合体试样，然后通过室内直剪试验开展沙地柏根系径级对根—土复合体抗剪强度的影响研究，试验结果表明，沙地柏根系可显著提高土壤的抗剪强度并且根—土复合体的抗剪强度复合库伦定律，与文献^[10]结论相一致；陈春晖等^[12]在保证试样含根量相同的前提下将植物根系均匀放置土体制备根—土复合体试样，通过室内直剪试验研究了含水率对有根和无根的扰动土体抗剪强度的影响，给出了有根土体的抗剪强度随含水率的增大而减小的重要结论；廖晶晶等^[13]将根系垂直均匀倒插入环刀面积范围内制备根—土复合体试样，通过室内直剪试验比较了不同 3 种护坡植物根系和不同含根量对土壤抗剪强度贡献的大小，试验结果表明，根—土复合体的抗剪强度并非随着含根量的增加逐渐增大即存在一个最优含根量范围，与文献^[9]结论相一致；同时，根系的加入可提高土壤的黏聚力，对土壤内摩擦角影响较小；栗岳洲等^[14]采用扦插法将海韭菜根系垂直等距插入环刀试样制备根—土复合体试样，通过室内试验开展其根系固土护坡力学效及其最优含根量的分析研究，试验结果表明，根系增强土体抗剪强度存在最优含根量并且根系的加入可提高土壤的黏聚力；黄钢等^[15]针对 4 处边坡的原状土和无根扰动土开展不同平均含根量下的直剪试验研究，认为随着含根量的增加，土体的黏聚力增

大，抗剪强度增大，内摩擦角提高不明显。

通过对根—土复合体抗剪强度研究现状与进展的分析可以看出，目前针对根—土复合体的试验研究主要集中在将根系均匀放置土体内制备根—土复合体试样的前提下开展研究，忽略了根系均匀布置形式不同(方形、梅花形、环形)对根—土复合体抗剪强度影响，并且在研究含根量对根—土复合体抗剪强度的影响时并未给出明确的布置形式。目前，关于根系布置形式对根—土复合体抗剪强度影响的研究还未见报道。因此，本文在前人研究成果的基础上，选取中国过渡带北侧(三浙高速周家嘴隧道与邵家山大桥之间(209 国道处)山地土壤与莎草科植物(针藁草)开展植物根—土复合体抗剪强度试验研究，分析根系布置方式(方形、梅花形、环形)对草本植物根—土复合体抗剪强度增强作用以及抗剪强度指标变化规律，为进一步认识根系加筋机理提供了理论依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选择山浙高速周家嘴隧道与邵家山大桥之间(209 国道处)(111°02′48.17″N, 34°24′40.06″E)山地土壤作为研究对象，海拔 730 m，坡度为 30°，坡向为西南方向。采样点代表性土样的天然含水率为 24.95%，土体密度为 1.37 g/cm³，将选取采样点处的代表性土样放入烘箱进行烘干，烘箱温度设置 105~110 ℃，恒温下烘 8 h，然后将其碾碎并过 2 mm 筛。按预定含水率 24.95%用喷水设备往土样上均匀喷洒所需水量并装入密封黑色塑料袋中静置 24 h，使土料各处含水率均匀。采用液塑限联合测定仪测定土样的液塑限，采样点处山地土壤液限为 56%，塑限为 16%，液性指数为 0.33，塑性指数为 40，综合判定该山地土壤为黏土。针藁草根直径(平均直径 0.7 mm)抗拉强度为 5.99 MPa，中粗根直径(平均直径 0.5 mm)抗拉强度为 4.61 MPa，细根直径抗拉强度(平均直径 0.3 mm)为 3.54 MPa。

1.2 试验方法

草本植物与木本植物不同，一般没有强大的主根，通常以须根为主或细根为主($\Phi < 1 \text{ mm}$)^[16]。为解决环刀面积范围内相同含根量或相同根数时不同根系布置方式(方形、梅花形、环形)所需的根系数量不同的难题，本文引入面积置换率的概念。所谓的面积置换率是指在根—土复合体中，所有根的横断面积与其所对应的复合土体的面积之比。如图 1 所示，假设根—土复合体面积为 A ，根的数量为 N ，则根径相同的根—土复合体中的面积置换率可表示为：

$$m = \frac{NA_p}{A}$$

根径不相同(图 2),根-土复合体中的面积置换率可表示为:

$$m = \frac{(N-1)A_{pi} + A_{pj}}{A}$$

式中: N 复合土体中根的数量; A_{pi} 、 A_{pj} 分别代表 2 种不同的直径根面积。

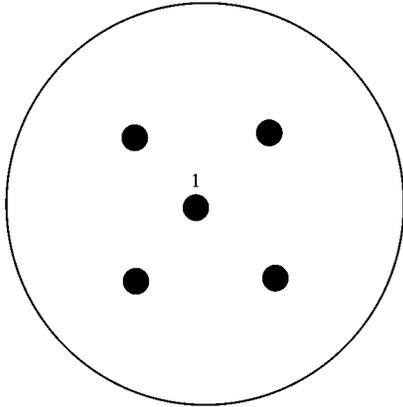


图 1 相同根径的根-土复合土体面积置换率计算示意

在相同面积置换率的前提下,每组试验制作 4 个试样,试样制备依据《土工试验方法标准》^[17],根-土

复合体制备具体过程为:按照试验所采用的环刀(内径为 61.8 mm,高度为 20 mm)将试验用根裁剪成 20 mm。本试验采用扦插法垂直布根,即先用击实法制备素土土样,然后按照预先设定的布置形式(方形、梅花形和环形)利用直径 1 mm 的钢钎垂直插入素土土样,在保证根-土复合体所受到的击实功相同的前提下,分别制作方形、梅花形和环形根-土复合体试样,根系布置形式见图 3,采用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪开展不同压力下的(100, 200, 300, 400 kPa)直剪试验。

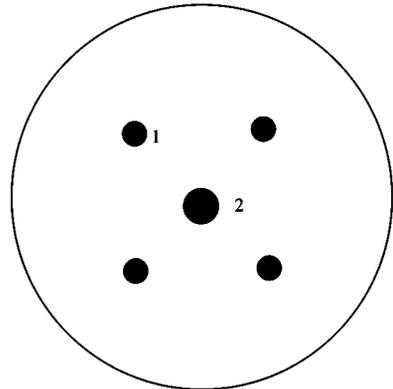
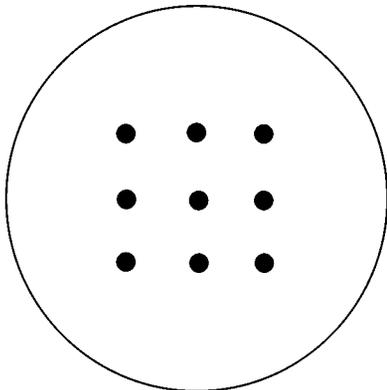
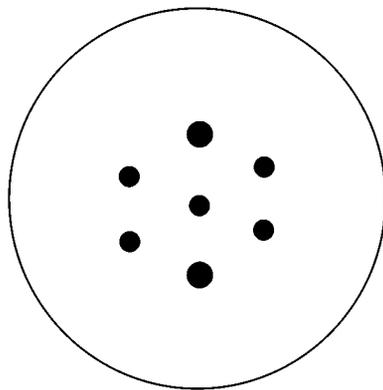


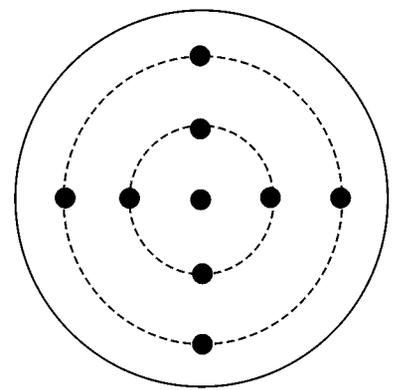
图 2 不同根径的根-土复合土体面积置换率计算示意



(a) 方形



(b) 梅花形



(c) 环形

图 3 中粗根系布置形式示意

2 结果与分析

2.1 环形布根形式下含根量对根-土复合体抗剪强度的影响

从图 4 可以看出,相同法向应力下,根-土复合体试样的抗剪强度随着含根量的增大而逐渐增加。法向应力 300 kPa、含根量从 60 mg 增加到 120 mg 时,根-土复合体试样的抗剪强度从 179.72 kPa 增加到 212.40 kPa,增加 18.18%。

从图 5 可以看出,根-土复合体试样的黏聚力随着含根量的增加而逐渐增大。含根量从 60 mg 增加到 120 mg 时,根-土复合体试样的黏聚力从 11.44 kPa 增加到 39.64 kPa,增加了 2.47 倍。根-土复合体试样的内摩擦角随着含根量的增加变化不明显。

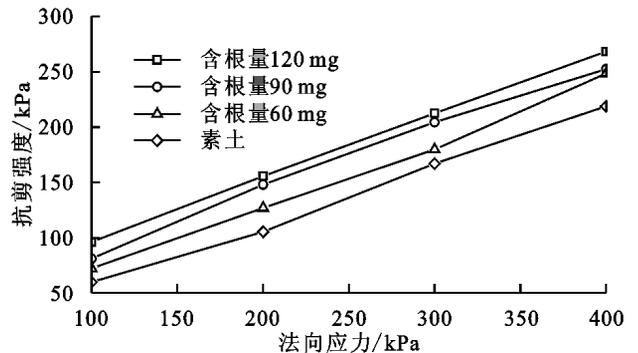


图 4 根-土复合体抗剪强度与法向应力关系

从图 6 可以看出,根-土复合体试样的抗剪强度随着径级的增加而逐渐增大;相同径级时,根-土复合体试样的抗剪强度随着法向应力的增加而逐渐增大。根径 $d=0.5$ mm 时,法向应力从 100 kPa 增

加到 200 kPa 时,根—土复合体试样的抗剪强度从 82.97 kPa 增加到 151.53 kPa,增加了 82.63%。

从图 7 可以看出,随着根系径级的增加,根—土复合体试样的黏聚力渐增大。根径 d 从 0.3 mm 增加到 0.7 mm,根—土复合体试样的黏聚力从 20.26 kPa 增加到 50.78 kPa,增加了近 2 倍。根—土复合体内摩擦角与根系径级关系不大且规律性不明显。

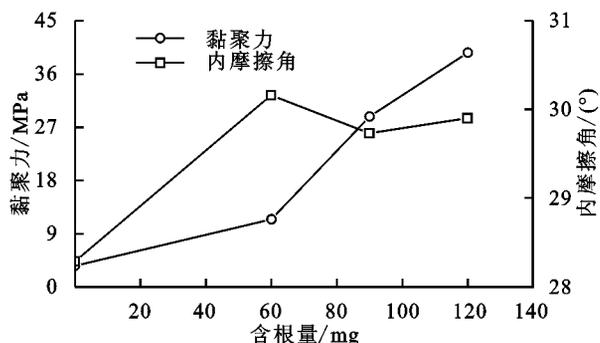


图 5 根—土复合体抗剪强度与含根量关系

2.2 不同根系布置形式对根—土复合体抗剪强度的影响

为了研究不同根系布置形式对根—土复合体抗剪强度的影响,按照预先设定的面积置换率(本次试验按照 0.026 和 0.059)制备根—土复合体试样,然后进行直剪试验。从图 8 可以看出,在法向应力较小时(300 kPa 内),根系的布置形式对根—土复合体的抗剪强度影响较小,当法向应力较大时,根系的布置形式

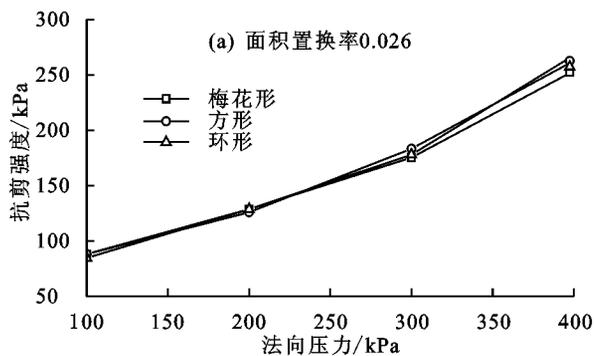


图 8 根—土复合体抗剪强度与法向应力关系

2.3 不同根系布置形式对根—土复合体抗剪强度指标的影响

在直接剪切试验结果的基础上,本文对根—土复合体试样抗剪强度指标进行了分析(图 9)。从图 9 (a)可以看出,根系的布置形式对根—土复合体的黏聚力影响较大。根—土面积置换率的较小时,方形布置的根系对黏聚力影响最大,随着根—土面积置换率的增加,方形、梅花形及环形布置形式对根—土复合体黏聚力的影响趋于稳定。根—土面积置换率为 0.026 时,方形布置的根系产生的黏聚力为 19.66 kPa,环形为 31.13 kPa,梅花形为 25.55 kPa,最大相对极差达 45.0%。根—土面积置换率为 0.059 时,方形布置的

对根—土复合体的抗剪强度影响不能忽略,且面积置换率越大,该误差越大。当法向应力为 400 kPa 时,面积置换率从 0.026 增加到 0.059 时,相对误差从 6.1% 增加到 7.0%。试验结果发现,相同条件下,面积置换率较大的根—土复合体的抗剪强度较小,该现象是由于根土的面积比较大,削弱了根的加筋效果造成的。

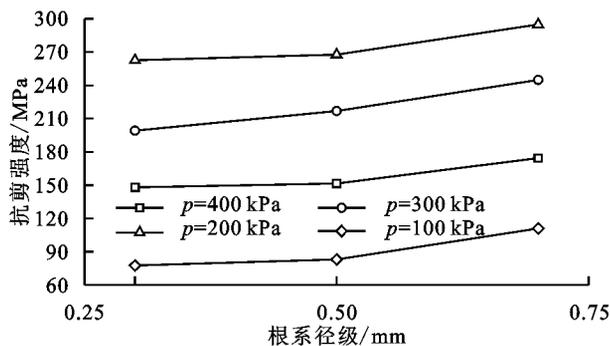


图 6 根—土复合体抗剪强度与根系径级关系

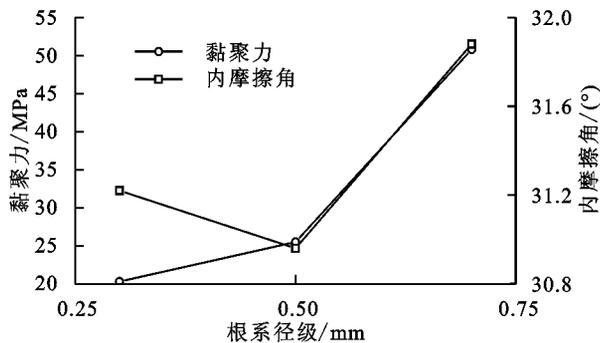
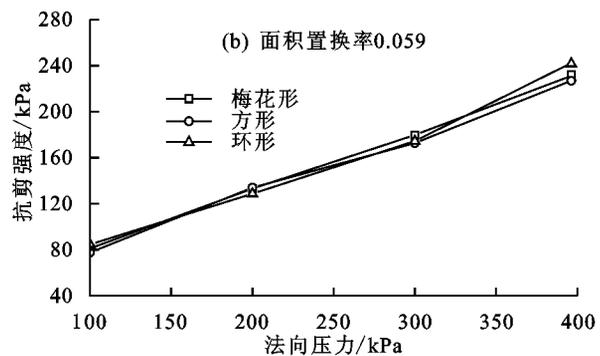


图 7 根—土复合体抗剪强度与根系径级关系



根系产生的黏聚力为 29.96 kPa,环形为 26.64 kPa,梅花形为 30.99 kPa,最大相对极差为 14.9%。从图 9 (b)可以看出,根—土面积置换率的较小时,根系的布置形式对内摩擦角有影响。方形布置的根系对内摩擦角影响最大,随着根—土面积置换率的增加,方形、梅花形及环形布置形式对根—土复合体内摩擦角的影响较小。根—土面积置换率为 0.026 时,方形布置的根系产生的内摩擦角为 30.20°,环形为 26.66°,梅花形为 28.55°。根—土面积置换率为 0.059 时,方形布置的根系产生的内摩擦角为 26.24°,环形为 27.79°,梅花形为 26.70°。就本试验结果来说,植物根系的分布形式对土体内摩擦角的贡献较小。

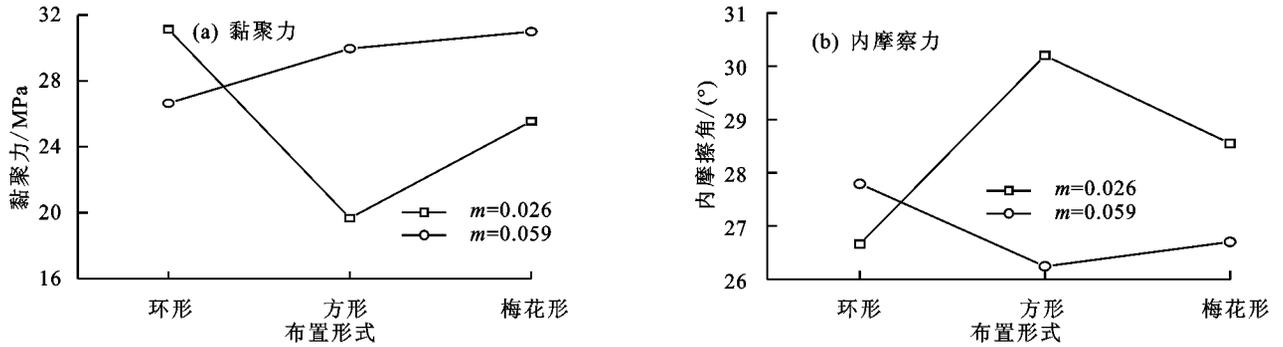


图 9 根—土复合体抗剪强度指标与根系布置形式关系

3 结论

(1) 根—土复合体试样的抗剪强度随含根量的增大而逐渐增加; 根—土复合体试样的黏聚力随着含根量的增加而逐渐增大; 根—土复合体试样的内摩擦角随着含根量的增加变化不明显;

(2) 在法向应力较小时, 根系的布置形式对根—土复合体的抗剪强度影响较小, 当法向应力较大时, 根系的布置形式对根—土复合体的抗剪强度影响不能忽略, 且面积置换率越大, 该误差越大;

(3) 根—土面积置换率的较小时, 方形布置的根系对黏聚力和内摩擦角影响最大, 随着根—土面积置换率的增加, 方形、梅花形及环形分布形式对根—土复合体黏聚力和内摩擦角的影响趋于稳定。

参考文献:

- [1] 王利民, 翁伯琦, 罗涛, 等. 山地水土流失的影响因素及其若干机理[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(19): 70-75.
- [2] 张同鑫, 潘毅, 张壮, 等. 加筋生态护坡技术的应用与发展[J]. 水利水运工程学报, 2017(6): 110-117.
- [3] 孙路遥. 植被护坡技术及其应用研究[J]. 路基工程, 2012(4): 189-191.
- [4] 肖高华, 范海军, 赵青, 等. CFT 生态双重网植植被护坡及其工程应用[J]. 公路工程, 2012, 37(2): 153-157.
- [5] 于小娟, 张涛. 航道植物生态护坡固土模式与结构稳定性研究现状及发展[J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(3): 144-148.
- [6] 张桂荣, 赵波, 饶志刚, 等. 土质岸坡生态防治技术研究

[J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(5): 87-91.

- [7] 岑国平, 洪传平, 李林, 等. 植被生长初期机场生态边坡抗冲刷性能[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(5): 99-104.
- [8] Bourrier F, Kneib F, Chareyre B, et al. Discrete modeling of granular soils reinforcement by plant root[J]. Ecological Engineering, 2013, 61(1): 646-657.
- [9] 胡其志, 周政, 肖本林, 等. 生态护坡中土壤含根量与抗剪强度关系试验研究[J]. 土工基础, 2010, 24(5): 85-87.
- [10] 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.
- [11] 李为萍, 史海滨, 胡敏. 沙地柏根系径级对根土复合体抗剪强度的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(4): 934-937.
- [12] 陈春晖, 晏鄂川. 植物根系对土体抗剪强度影响的研究[J]. 地质科技情报, 2012(4): 126-129.
- [13] 廖晶晶, 罗绪强, 罗光杰, 等. 3 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.
- [14] 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.
- [15] 黄钢, 彭晶, 肖衡林. 根系含量对土壤抗剪强度的影响[J]. 中国水土保持, 2016(5): 42-44.
- [16] 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.
- [17] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准(GB/T 50123—1999)[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.

(上接第 27 页)

- [18] Zhou J, Fu B J, Gao G Y, et al. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2016, 137: 1-11.
- [19] Rey F. Effectiveness of vegetation barriers for marly sediment trapping [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29(9): 1161-1169.
- [20] Darboux F, Davy P H, Gascuel-Oudoux C, et al. Evolu-

tion of soil surface roughness and flow path connectivity in overland flow experiments [J]. Catena, 2001, 46(2): 125-139.

- [21] Jin K, Cornelis W M, Gabriels D, et al. Residue cover and rainfall intensity effects on runoff soil organic carbon losses [J]. Catena, 2009, 78(1): 81-86.
- [22] 卢纹岱. SPSS for Windows 统计分析 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.