

# 草本植物根系对高液限土的加固效应

方诗圣, 姚鑫, 谭张琴, 陈海微

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** [目的] 探索草本植物根系对高液限土的加固效应, 为工程中合理预估植物根系在高液限土质边坡防护中的作用提供依据。[方法] 以高羊茅根系及其与高液限土壤构成的根—土复合体为研究对象, 通过一系列室内直剪试验分析高液限土含水率和含根量对抗剪强度的影响。[结果] 在土样中掺加根系可以显著提升其黏聚力, 小幅提升其内摩擦角。根系对土体的加固效果随着含水率增加呈现先上升后减小的趋势。不同含水率梯度下根—土复合体的最优含根量有所区别, 对于 20% 和 25% 含水率的土样, 其最优含根量大致在 0.3% 附近, 对 30% 含水率土样在 0.4% 附近, 对 35%~45% 含水率土样在 0.5% 附近。[结论] 草本植物根系可以有效抑制高液限土的水敏性, 且在不同含水率梯度下根系发挥的作用差异显著。

**关键词:** 高液限土; 水敏性; 直剪试验; 含根量; 含水率; 抗剪强度

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)03-0043-05

**中图分类号:** U213.1<sup>+</sup>3, P642

**文献参数:** 方诗圣, 姚鑫, 谭张琴, 等. 草本植物根系对高液限土的加固效应[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3):43-47. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.007; Fang Shisheng, Yao Xin, Tan Zhangqin, et al. Reinforcing effect of herb roots on high liquid limit soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3):43-47. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.007

## Reinforcing Effect of Herb Roots on High Liquid Limit Soil

FANG Shisheng, YAO Xin, TAN Zhangqin, CHEN Haiwei

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

**Abstract:** [Objective] The strengthening effect of herbaceous plant root system on the high liquid limit soil was explored to provide the basis for reasonable estimation of the plant root system about the effect of slope protection on the high liquid limit soil. [Methods] Root-soil complexus of tall fescue couch grass root and high liquid limit soil were taken as research object, and the influences of water content and root amount on shearing strength of the complexus were explored through a series of indoor direct shear tests. [Results] The cohesion ability can be greatly improved by adding root system to soil samples, and the internal friction angle was also increased slightly. The reinforcement effect of root system on the soil increased initially with the increase of moisture content, decreased as moisture continued increasing. There existed difference for optimal root amount with regard to reinforcement under different moisture content of the complexus. When soil moisture content was 20%~25%, 30%, and 35%~45%, the optimal root amount was around 0.3%, 0.4%, and 0.5%, respectively. [Conclusion] The herbaceous plant root system can effectively suppress the water sensitivity of high liquid limit soil. There is significant influence on different root systems for different moisture content.

**Keywords:** high liquid limited soil; water sensitivity; direct shear tests; correlation of moisture content; root content; shear strength

高液限土具有吸水膨胀软化, 吸水强度下降快, 失水收缩等特点<sup>[1]</sup>, 容易在公路施工过程中发生滑坡、塌坡等, 严重危害人身、财产安全。因此, 高液限

土质边坡的稳定性已成为中国南部山区高速公路建设中亟待解决的问题。国内外一些学者从不同角度分析阐述了高液限土抗剪强度与含水量的相关关系,

说明了高液限土所具有的水敏性是造成其强度下降进而引发边坡失稳的重要原因<sup>[2-3]</sup>。

生态护坡是一种利用植物根系涵水固土并能美化环境的新技术,是以在坡面种植植物或者使用植物与工程材料相结合的方式对边坡进行加固的新型边坡防护方法。它越来越多地被应用到中国公路工程建设中。运用植物进行固土护坡的历史可追溯到 16 世纪的西方国家<sup>[4]</sup>,当时就已有采用植被对河岸加固的先例,但其理论研究与技术应用开始较晚,始于 20 世纪初<sup>[5]</sup>。在最近 20 年,国内外学者对植物根系所具有的加筋、锚固、抑制径流等功能展开了大量研究<sup>[6]</sup>。边坡采用生态防护时,植物的根系与土体会形成一个复合受力结构,可以增强土体抗剪、抗渗、抗坡面水流的冲刷能力等<sup>[7]</sup>。

国内外已有较多对植物根系加固土样的研究,已有诸多专家学者通过室内试验或数值模拟探讨植物根系和土体的抗剪强度关系,Der-Guey Lin 等<sup>[8]</sup>通过三维有限元软件成功建立了根—土复合体的弹塑性模型,数值模拟结果表明牧野竹根—土复合体系统剪切强度增量的范围为 18.4~26.3 kpa。郑启萍等<sup>[9]</sup>依据试验结果提出当土壤的含水量、湿密度一定时,含根量越大,根—土复合土体的抗剪强度的增量就越大。Ma'ru'f<sup>[10]</sup>通过直剪试验探讨根—土体积比与土体抗剪强度的相关关系,结果显示随着根—土体积比的上升土体抗剪强度峰值呈线性增长趋势,根—土体积比为 5% 时土样表现出 55% 的额外抗剪强度。栗岳洲等<sup>[11]</sup>通过试验研究提出盐生植物根系对土体抗剪强度的增强作用存在最优含根量,且当根—土复合体含根量小于最优含根量时,随含根量增加,根—土复合体抗剪强度呈逐渐增加趋势。Fan Chiacheng 等<sup>[12]</sup>通过试验探讨了高含水率时根系对土体抗剪强度的提升作用,试验结果表明根效率在土壤达到高饱和度时可能会达到 1.0 及以上。

言志信等<sup>[13]</sup>通过研究分析指出植物根系中纤维素含量高于木质素含量,其力学性质表现为较高的抗拉特性。植物护坡中根对土体抗剪强度的贡献依赖于根本身的平均抗拉强度、剪切面上所有发挥作用的根系总截面积、根与剪切面的夹角、剪切面上发挥作用的根的数量。故可以近似把植物根系看做一种柔性的加筋材料<sup>[13-15]</sup>,也就是说可以把根—土复合体看做一种加筋土。根据准黏聚理论<sup>[14]</sup>可知加筋后的土体对内摩擦角改善较小,对黏聚力改善较大。试验发现,根—土复合体符合这一特点,故把根—土复合体当做一种加筋土较为合理,且通常情况下根系的弹性模量要远远大于土壤的弹性模量,所以根—土复合体

可被看做是各向异性的复合材料<sup>[15-18]</sup>。土体和根系这 2 种材料各有优势,土体的抗压能力较强但抗剪能力弱,根系的抗拉强度较强但不抗压,根—土复合体能够合理发挥 2 种材料的优点,有着更好的物理力学性能<sup>[19-21]</sup>。

已有研究证明,植物根系对土体抗剪强度的提升作用显著,包括含根量与抗剪强度的相关关系,含水量与根效率,但就根效率在不同含水率下的差异性研究较少<sup>[10]</sup>。本文拟将同时考虑含水率、含根量对土体抗剪强度的影响,通过对不同含水率下不同含根量的根—土复合体进行抗剪强度试验,对比分析根—土复合体黏聚力、内摩擦角值与含水率、含根量之间的相关关系,以期为工程中合理预估植物根系在高液限土质边坡防护中的作用提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

试验采用的土样取自安徽省望东长江公路大桥第 4 施工标段 K15+780—K15+900 路堑高边坡的高液限土,经试验分析得出其天然密度  $\rho$  为 1.85 g/cm<sup>3</sup>,天然含水量  $\omega$  为 30.5%,比重  $G_s$  为 2.75,塑限  $\omega_p$  为 33.3%,液限  $\omega_l$  为 61.2%,塑性指数为 27.9%,膨胀率为 49%。

试验选用的植物为高速公路边坡常用草本护坡植物高羊茅(*Festuca elata*)。高羊茅为禾本科多年生地被植物,茎圆形,直立,粗壮,簇生,是最耐旱和耐践踏的冷季型草之一,耐荫性中等,抗逆性好。其适应的土壤范围很广,常被作为南方山区高速公路边坡的防护植物。试验选取的高羊茅也取自本试验取土的路段,为客土喷播生长出的人工栽植植被,其生长期为 6 a。

### 1.2 试样制备

将取回的原状土放入 110 ℃ 恒温烘箱,烘干 8 h 后将其置于橡皮板上用木碾碾碎,过 2 mm 筛,对过筛后的土壤含水率进行测量并记录。将土壤平铺在不吸水的铁盘内,用喷雾器分层喷洒预计的加水量并搅拌均匀,最后装入不透水的塑料袋中并密封备用。所需加水量为:

$$m_{\omega} = \frac{m}{1+0.01\omega_0}(\omega_1 - \omega_0) \quad (1)$$

式中: $m_{\omega}$ ——所需加水量(g); $m$ ——当次所取的过筛土质量(g); $\omega_0$ ——土壤过筛后测得的含水率(%); $\omega_1$ ——土样配置目标含水率(%),本试验目标含水率分别取 20%,25%,30%,35%,40%,45%。

使用剪刀将高羊茅草根与茎分离,将草根上附着

的泥土洗净后置于阴凉洁净处风干备用。将风干后的草根统一剪成 45 mm 长,然后用游标卡尺测量其直径,由于草根的直径沿长度方向是变化的,因此测量结果取两端和中间数据的平均值,测量发现 13% 的根系径级在 5~6 mm,61% 根系在 6~7 mm,26% 在 7~8 mm。然后按照原状土天然密度(1.85 g/cm<sup>3</sup>)和各试验组不同含根量要求称量土样与草根,由于草根所占质量分数极小(小于等于 0.6%)故忽略其对土样密度的影响<sup>[17]</sup>,试验使用的环刀尺寸统一为内径 50 mm,高 30 mm。制作试样时,分 6 层布设土样,使草根分别布置在试件高度的 1/6,2/6,3/6,4/6,5/6 处,在环刀内铺设首层土并将草根均匀布置于土层上,在布置草根时尽量保持草根的自然卷曲状态并注意在截面方向均匀分布,结束后再缓慢施加下一层土,使土壤颗粒缓慢地包裹住草根后再施加下一层土,如此循环直至铺完最后一层土,随后将环刀样放到压样器上压实。

### 1.3 试验仪器和测试方法

本试验采用的是由浙江省上虞市勘测土工仪器厂生产的 SDJ-IBC 型应变式电动手摇直剪仪。它由剪切盒、垂直加载设备、剪切传动装置、测力计和位移量测系统组成,剪切盒分上下盒,上盒通过量力环固定于仪器架上,下盒放在能沿滚珠槽滑动的底盘上。

直剪仪通常采用 4 个试件在不同的垂直压力下,施加剪切力进行剪切,求得破坏时的剪应力,土的抗剪强度指标(内摩擦角,黏聚力)由库仑定律确定得出。

本试验共分 42 组,每组 4 个土样。各组土样分别在 100,200,300,400 kPa 垂直压力下直剪试验。这 42 组分别为在 20%,25%,30%,35%,40%,45% 含水率梯度下分别掺入 0%,0.1%,0.2%,0.3%,0.4%,0.5%,0.6% 质量分数高羊茅根系的试样。为保证试验数据的可靠性,每组试验加做 2 组重复样,当某组试验数据明显偏离正常范围时重新补做该组试验,用所得数据代替。最终试验结果取 3 次试验的平均值。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 抗剪强度试验结果

根—土复合体剪后试样的剪切面大多数草根并未被仪器剪断,也就是说其抗拉强度在试样破坏时并未完全发挥出来,根系对土体抗剪强度强化作用并不单纯依赖其根纤维的抗拉强度,其可能与根系和土壤团粒结构<sup>[18]</sup>的相互作用有关。表 1 为各组数据处理后所得的抗剪强度指标值( $c, \varphi$ )和相对于素土组(即含根量为 0 的试验组)的黏聚力增加值  $\Delta c$  和内摩擦角增加值  $\Delta \varphi$ 。

表 1 不同含水率、含根量下土样直剪试验结果

含水率	含根量/ %	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	C/kPa	$\Delta c$ /kPa	$\varphi$ / (°)	$\Delta \varphi$ / (°)	含水率	含根量/ %	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	C/kPa	$\Delta c$ /kPa	$\varphi$ / (°)	$\Delta \varphi$ / (°)
20%	0	1.85	234.69	0.00	41.25	0.00	35%	0	1.85	86.02	0.00	6.30	0.00
	0.1	1.85	238.42	3.73	41.31	0.06		0.1	1.85	87.89	1.87	7.25	0.95
	0.2	1.85	237.49	2.80	42.15	0.90		0.2	1.85	95.37	9.35	7.04	0.74
	0.3	1.85	242.17	7.48	43.87	2.62		0.3	1.85	97.24	11.22	7.35	1.05
	0.4	1.85	241.23	6.54	43.75	2.50		0.4	1.85	104.72	18.70	7.67	1.37
	0.5	1.85	243.10	8.41	43.87	2.62		0.5	1.85	115.00	28.98	8.72	2.42
	0.6	1.85	240.29	5.60	44.03	2.78		0.6	1.85	115.00	28.98	8.40	2.10
25%	0	1.85	189.81	0.00	29.70	0.00	40%	0	1.85	39.27	0.00	2.03	0.00
	0.1	1.85	199.16	9.35	29.94	0.24		0.1	1.85	43.01	3.74	2.36	0.33
	0.2	1.85	210.38	20.57	29.86	0.16		0.2	1.85	46.75	7.48	2.68	0.65
	0.3	1.85	215.05	25.24	30.50	0.80		0.3	1.85	48.62	9.35	3.64	1.61
	0.4	1.85	216.92	27.11	30.34	0.64		0.4	1.85	51.425	12.16	4.06	2.03
	0.5	1.85	218.79	28.98	30.02	0.32		0.5	1.85	54.23	14.96	4.38	2.35
	0.6	1.85	215.99	26.18	30.42	0.72		0.6	1.85	55.165	15.90	4.28	2.25
30%	0	1.85	129.03	0.00	11.52	0.00	45%	0	1.85	28.99	0.00	1.50	0.00
	0.1	1.85	143.99	14.96	11.73	0.21		0.1	1.85	30.86	1.88	1.82	0.32
	0.2	1.85	152.41	23.38	12.55	1.03		0.2	1.85	32.73	3.74	1.71	0.21
	0.3	1.85	159.89	30.86	12.95	1.43		0.3	1.85	34.60	5.61	1.71	0.21
	0.4	1.85	164.56	35.53	13.16	1.64		0.4	1.85	37.40	8.42	1.82	0.32
	0.5	1.85	165.50	36.47	13.06	1.54		0.5	1.85	40.21	11.22	1.71	0.21
	0.6	1.85	166.43	37.40	13.26	1.74		0.6	1.85	39.27	10.29	2.36	0.86

## 2.2 数据分析

分析素土组试验数据可知受结合水膜厚度、胶结物质、毛细水作用等因素影响<sup>[14]</sup>,在土样含水率达到塑限附近时,黏聚力下降幅度明显增大。已有研究表明在土中掺加植物根系可以显著提升其黏聚力,但对内摩擦角的影响较小<sup>[9-13]</sup>。分析表 1 数据可发现在不同的含水率梯度下,根—土复合体抗剪强度的提升都更多地体现在黏聚力上(图 1),掺加根系对内摩擦角的提升相对较小(图 2)。

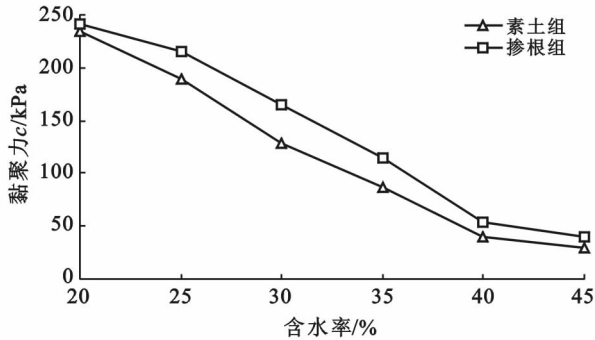


图 1 素土和掺草根土的黏聚力与含水率的关系

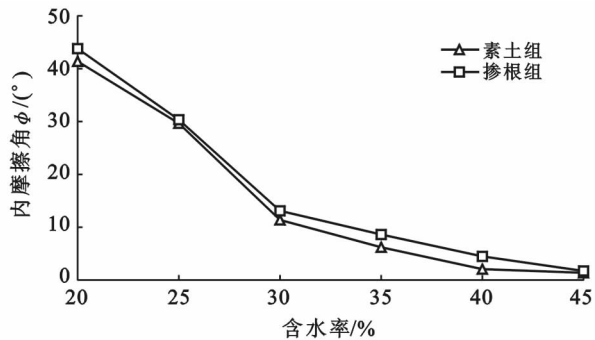


图 2 素土和掺草根土的内摩擦角与含水率的关系

图 1—2 的掺草根组数据取自各含水率下最优含根量时的试验结果。由表 1 数据及图 1—2 可以看出,素土组和加根组在不同含水率下抗剪强度指标的变化趋势基本一致,掺加草根后的土体抗剪强度仍随着含水率的上升而快速下降,但加根组的整体抗剪强度要高于素土组,加固效应显著。从增加值上来看掺加草根的试样  $c$  值最多增加了 37.4 kPa,但内摩擦角最多仅提升了 2.42°。从增加幅度上来看,掺加草根的试样  $c$  值最多可较素土试样提升 40.5%,内摩擦角增加幅度最多可达 115.8%,但这是在高含水率时素土内摩擦角本来就不大的情况下,此时其内摩擦角增加值仅有 2.35°,根系对土体的内摩擦角的提升作用其实并不明显。由以上分析可知,不论在什么含水率情况下,根—土复合体对于黏聚力的提升效果都要明显强于内摩擦角。因此本文着重分析了  $\Delta c$  与土样含

水率、含根量的相关关系。

植物根系加固土体可以有效抑制高液限土的水敏性,提升土体抗剪强度指标,本次试验研究发现相比于素土,根—土复合体的黏聚力提升效果显著,但内摩擦角的增加并不明显。由图 3 可见,不同含水率土样的  $\Delta c$  值总体均随着含根量的上升而增加,但到达一定含根量时上升趋势会减缓,再增加土样中的草根含量并不能显著提升其黏聚力,也就是说土样的黏聚力不会随着草根的增多无限制地增加下去,即存在最优含根量<sup>[14]</sup>。结果显示,最优含根量与土样的含水率高也有着一定相关关系,对于 20% 和 25% 含水率的土样最优含根量大致在 0.3% 附近,对 30% 含水率土样在 0.4% 附近,35%~45% 含水率土样在 0.5% 附近(图 3)。

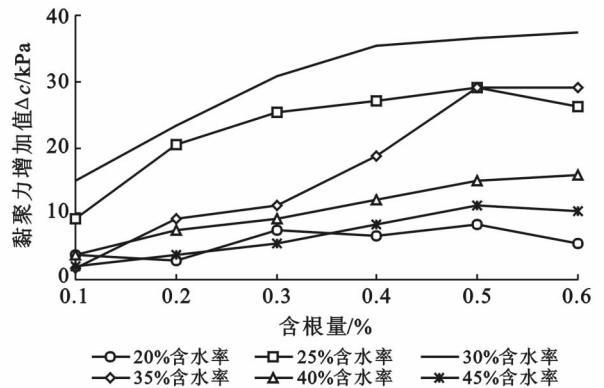


图 3 不同含水率梯度下黏聚力增加值  $\Delta c$  随含根量的变化趋势

图 3 也能反映不同含水率情况下,植物根系对土体抗剪强度提升作用的差异性,由图 3 可见,在 30% 含水率情况下,根—土复合体的黏聚力提升效果最为显著,土样的  $\Delta c$  值有总体随含水率上升呈现先增大后减小的趋势。通过对表 1 数据及图 3 分析可知  $\Delta c$  值在 20%~30% 含水率区间内快速提升,随后在 30%~35% 急剧下降,最后在 35%~45% 平缓下降。且在不同含根量情况下均于 30% 含水率达到最大值,而此含水率恰好接近土样的塑性极限值。

## 3 结论

(1) 高羊茅根系虽不能阻止高液限土因含水量上升引起的强度下降,但在不同含水率下都能有效提高土体的抗剪强度,就对高液限土的水敏性具有有效的抑制作用。

(2) 不同含水率梯度下,草本植物根系对黏聚力  $c$  的提升作用明显,土样在添加草根含量达到最优含根量附近时  $\Delta c$  达到 7.48~35.53 kPa, $c$  值较素土组增幅最多可达 40.5%;在添加草根含量达到最优含

根量附近时  $\Delta\varphi$  的数值为  $0.21^\circ \sim 2.62^\circ$ , 说明不管在何种含水率下, 掺加草根对内摩擦角  $\varphi$  的提升作用都较小。

(3) 受结合水膜厚度、胶结物质、毛细水等影响, 高液限土素土在塑限附近时黏聚力下降幅度明显增大。掺根组土样的  $\Delta c$  值随着含水率的增加呈现先上升后减小的趋势, 其拐点在土样塑限值附近, 即在土样含水率达到塑限值附近时  $\Delta c$  值也可达到最大。

(4) 草本植物根系对高液限土的加固作用与含水率有关。20%和25%含水率的土样最优含根量大致在0.3%, 对30%含水率土样在0.4%附近, 对35%~45%含水率土样在0.5%附近, 表现为含水率越高则最优含根量越高。

本试验研究表明, 高液限土中掺加草本植物根系可显著抑制其水敏性, 使其抗剪强度随含水率上升而急剧下降的趋势得到极大缓解。结果也表明不同含水率梯度下植物根系所发挥的作用差异显著, 说明在实际工程中, 对植物根系加固土体的作用不应局限在某个含水率下研究, 在理论计算和数值模拟中应重视含水率变化的影响。本文没有对  $\Delta c$  值随含水率变化的原因作进一步研究分析, 今后应深化该方面研究, 为科学使用植物防治边坡水土流失、加固土体提供更多理论依据。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 温泉. 山区高液限土边坡稳定性分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
- [2] 刘顺青, 洪宝宁, 方庆军, 等. 高液限和红黏土的水敏感性研究[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2013, 30(1): 78-83.
- [3] 刘顺青, 洪宝宁, 徐奋强, 等. 高液限土边坡稳定性影响因素的敏感性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(5): 589-596.
- [4] Temgoua A G T, Kokutse N K, Kavazovic Z. Influence of forest stands and root morphologies on hillslope stability[J]. Ecological Engineering, 2016, 95: 622-634.
- [5] 付江涛, 李光莹, 虎啸天, 等. 植物固土护坡效应的研究现状及发展趋势[J]. 工程地质学报, 2014, 22(6): 1135-1146.
- [6] 余芹芹, 乔娜, 胡夏嵩, 等. 植物根—土复合体固坡力学效应及模型研究现状与进展[J]. 中国水土保持, 2011(7): 51-54.
- [7] 廖晶晶, 罗绪强, 罗光杰, 等. 三种护坡植物根—土复合体抗剪强度比较[J]. 水土保持通报, 2013, 33(5): 118-122.
- [8] Lin Derguey, Huang Borshun, Lin Shinhwei. 3-D numerical investigations into the shear strength of the soil-root system of Malcino bamboo and its effect on slope stability[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(8): 992-1006.
- [9] 郑启萍, 徐得潜. 草本植物护坡机理及其固土效应试验研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2014, 37(2): 225-228.
- [10] Ma'ruf M F. Shear strength of Apus bamboo root reinforced soil[J]. Ecological Engineering, 2012, 41: 84-86.
- [11] 栗岳洲, 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.
- [12] Fan Chiacheng, Su Chihfeng. Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content[J]. Ecological Engineering, 2008, 33(2): 157-166.
- [13] 言志信, 曹小红, 张刘平, 等. 植物护坡的力学机制分析[J]. 铁道建筑, 2011, 8(4): 92-94.
- [14] 程洪, 谢涛, 唐春, 等. 植物根系力学与固土作用机理研究综述[J]. 水土保持通报, 2006, 26(1): 97-102.
- [15] 何光春. 加筋土结构与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [16] 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(S1): 3216-3223.
- [17] 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): 287-288.
- [18] 姚喜军, 王林和, 刘静, 等. 3种植物单根对土体残余抗剪强度影响的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(2): 110-114.
- [19] Bordonni M, Meisina C, Vercesi A, et al. Quantifying the contribution of grapevine roots to soil mechanical reinforcement in an area susceptible to shallow landslides[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 163: 195-206.
- [20] Mazzuoli M, Bovolenta R, Berardi R. Experimental investigation on the mechanical contribution of roots to the shear strength of a sandy soil[J]. Procedia Engineering, 2016, 158: 45-50.
- [21] Comino E, Druetta A. The effect of Poaceae roots on the shear strength of soils in the Italian alpine environment[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 106(2): 194-201.