

云南省东川银合欢林区重塑土三轴抗剪强度实验研究

矫震^{1,3}, 王道杰^{1,2}, 谢洪^{1,2}, 王青松³

(1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院 水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013)

摘要: 为研究固氮植物的固土机制, 在中国科学院东川蒋家沟泥石流观测研究站银合欢林区选取 5 棵树龄相当的银合欢树, 于植株附近 1 m 处分别挖取深 2 m, 宽 1 m 的土壤剖面取土并采取银合欢树根, 对含有银合欢树根的重塑土进行三轴实验。分析了抗剪强度、黏聚力及内摩擦角与含根量及根径的关系。实验结果表明, 抗剪强度与含根量及根径均呈正相关, 黏聚力与含根量及根径均呈正相关, 内摩擦角受含根量及根径的影响较小, 在一定程度上呈负相关。准黏聚力准则与该实验结果一致, 同时也存在不同之处, 即随着含根量的增多及根径的增大, 土体的黏聚力提高, 但在一定程度上土体内摩擦角有所降低。定量评价银合欢根系在提高土体抗剪强度方面所起的作用, 对利用生物工程措施在该区域进行生态修复有着重要的应用价值。

关键词: 蒋家沟; 重塑土; 三轴剪切实验; 黏聚力; 内摩擦角

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)06-0093-05

中图分类号: TU41, S157

Tri-axial Experimental Analysis of Shear Strength of Regenerated Soil in *Leucaena* Forest of Dongchuan Area of Yunnan Province

JIAO Zhen^{1,3}, WANG Dao-jie^{1,2}, XIE Hong^{1,2}, WANG Qing-song³

(1. Chinese Academy of Sciences of Mountain Hazards and Key Laboratory of the Course Surface, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute, Co. Ltd., Ji'nan, Shandong 250013, China)

Abstract: In order to understand soil reinforcement mechanisms of nitrogen-fixing plants, we chose five *Leucaena* trees with similar ages in Jiangjia Ravine of Dongchuan area of Yunnan Province, near which soil samples were collected on profiles of 2 m deep and 1 m wide. Soil and roots of *Leucaena* trees were taken for tri-axial experiments to determine the relationship among shear strength, cohesion, friction angle, root amount, and root diameter. It was found that both shear strength and cohesion related positively to the amounts and diameters of the roots. Meanwhile, the amounts and diameters of the roots negatively related to friction angles, to less extent. The results of tri-axial experiments agreed well with the cohesion principles. The cohesion of soil was enhanced by the roots; however, the friction angle of soil was degraded at the same time. According to the quantitative assessment on the roots of *Leucaena* trees in improving shear strength of soil, more attention should be paid to applying biological engineering measures to ecological restoration of this region.

Keywords: Jiangjia Ravine; remolded soil sample; tri-axial experiment; cohesion; friction angle

生物工程措施在边坡防治和水土流失治理方面起着重要作用, 在国内外得到了广泛的应用^[1-2]。关于根系固土机制及增加土体抗剪强度方面的研究开

始于 20 世纪 30 年代^[3]。20 世纪 60 年代后已有研究表明, 林木根系防止崩塌的能力随着林木的砍伐而衰退^[4-6]; Bishop 等^[7]的研究表明, 阿拉斯加山崩塌

收稿日期: 2011-12-26

修回日期: 2012-02-13

资助项目: 国家基础科学(973)重点发展计划项目“中国西部特大山洪泥石流灾害形成机理与风险分析”(2011CB409903); 国家科技支撑计划课题(2012BAC06B02); 国家自然科学基金项目(40771025)

作者简介: 矫震(1985—), 男(汉族), 山东省济南市人, 硕士, 助理工程师, 主要从事电厂、变电站及风电场地质勘查设计工作。E-mail: jiaozhen198616@163.com。

通信作者: 王道杰(1968—), 男(汉族), 四川省成都市人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持及生态修复等研究工作。E-mail: wangdj@imde.ac.cn。

的数量随着森林砍伐的数量增多呈倍数关系增长;此外,实验证明,根的存在增加了土体抗剪强度,同时,土体的抗剪强度与根密度及根的横截面积呈正相关^[8-9]。已有的研究表明^[10-11],对于抗剪强度的两大要素黏聚力和内摩擦角,黏聚力与含根量呈正相关关系,与土体颗粒粒径呈负相关关系;内摩擦角与颗粒粒径呈正相关关系^[12],与含根量的关系说法不一,有待进一步实验验证。

目前,国内外对黄土区的乔木及草本植物根系的固土机制研究较多,但对泥石流发育区固氮植物的固土机制研究甚少。在云南省东川小江支流蒋家沟流域,土壤侵蚀非常严重,泥石流暴发频率高,对生态环境构成了极大威胁。本研究利用三轴实验来定量评价银合欢根系在增强土体抗剪强度方面所起的作用,对利用生物工程措施在此区域进行生态修复有着重要的应用价值。

1 研究区概况

研究区位于云南省昆明市东川区蒋家沟下游中科院东川泥石流观测研究站附近,蒋家沟为金沙江流域小江右岸支流,自东向西汇入小江。蒋家沟上游属会泽县大海乡,下游系东川区绿茂乡,其所处区域新构造运动活跃,岩层破碎,地震活动强烈;流域内大小支沟 200 多条,沟岸滑坡、崩塌非常活跃,储有大量松散固体物质。地势东高西低,相对高度达 2 227 m,山高坡陡^[13]。自然条件导致蒋家沟泥石流异常发育,使其成为小江流域泥石流暴发频率最高的沟,1919—1968 年蒋家沟泥石流曾 7 次堵断小江,造成严重灾害^[14-15]。在长期的水土流失和泥石流作用下,研究区域石漠化严重,土壤为含砾石较高的初育土。新银合欢人工恢复林于 1988 年在荒坡上以实生苗种植而成,其坡向向北,海拔约 1 320 m,种植后一直封育禁伐,截至 2006 年,成片分布的面积约 1.5 hm²,平均胸径为 6.03 cm,平均树高 9.8 m,整个群落以新银合欢为主要树种,并伴有少量桉树^[16]。

2 实验方案

2.1 土样制备

在研究区选 5 棵标准树开挖大型剖面取土样,并测定其含根量和含水量,按照测定的原状土根密度和天然含水率(4.96%),确定重塑土的根密度和含水率。采用在研究区采取的细粒土(<2 mm 颗粒),按测定的原状土干密度 1.99 g/cm³ 配制土样。

在三轴抗剪强度实验中,共取 4 个根径组,分别为 0~2 mm,2~5 mm,5~10 mm 和 10~20 mm,每

个根径组内分别取 1 条、3 条、5 条根向土样中加根;控制 0~2 mm 根径组内根长为 10 cm,其余根径组内根长为 20 cm,可防止实验时直接对根压缩,保证实验过程中土样有足够的应变空间。

将土和水充分搅拌混合后垂直插根,先往试样盒里装部分土,然后插根;为保证土样均匀,采用击实器的圆杆分 3 层对土样进行夯实;为达到统一的密实度,将试样筒的体积减去根的体积,根据试样的密度换算出需要添加的土的质量,全部分层夯实后装入试样筒。

0~2 mm 根径组的根较细,采用三轴小样规格(高为 10 cm,直径为 5 cm)制成土样,其余各根径组按三轴大样规格(高为 30 cm,直径为 15 cm)制成土样,共有 42 组土样,安装完成后分别在 40,100,200 kPa 的围压下对不同含根量及根径的土样进行三轴剪切实验,根据所得实验数据在 Excel 中绘出摩尔圆及相应的摩尔包络线,得到每个根径组内不同含根量土样的黏聚力和内摩擦角。

2.2 实验设备

三轴实验采用的仪器为英国 GDS 仪器设备有限公司生产的标准非饱和土三轴试验系统。设备主要由 3 部分组成,包括压力室、加压系统和量测与采集系统。加压系统共有 4 套,分别用以提供围压、轴力、反压(水)和反压(气);量测与采集系统包括内置式水下荷重传感器和线性位移传感器等各类传感器;数据采集板和转换器,用于数据采集和实验控制的 GDSLAB 模块软件等,所有测量数据均由计算机采集^[17]。

2.3 实验方法

在圆柱形土样上施加最大主应力(轴向压力)和最小主应力(围压),保持其中之一不变,改变另一个主应力,使土样中的剪应力逐渐增大,直至极限平衡而剪坏,由此得到土样的抗剪强度。

采用不固结不排水(快剪)实验方法,控制方法为应变控制式,土样在完全不排水条件下施加围压后,快速增大轴向压力直至土样破坏。

2.4 准黏聚力原理

该原理是根据无筋土样土和水平布置筋材的加筋土样三轴实验结果分析而提出的。加筋土结构可以看成是各向异性的复合材料,纯土为单质材料。在三轴实验中,由于拉筋对土体的摩阻力起着限制土体侧向变形的作用,相当于在土体中增加了一个侧向应力。根据莫尔—库伦定理,使土的抗剪强度增大。

根据库伦理论,土的极限抗剪强度为:

$$T_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中, T_f ——土的极限抗剪强度(kPa); c ——土体黏聚力(kPa); σ ——作用在剪切面上的法向应力(kPa); φ ——土体内摩擦角。

根据土样破坏时土样的摩尔应力圆与土样库伦强度线相切条件可得:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c \tan(45^\circ + \varphi/2) \quad (2)$$

将 σ_1 和 σ_3 换算成剪切面上的法向应力, 得到相应的剪应力公式:

$$T_f = (c + \Delta c) + \{(\sigma_1 - \sigma_3) \times [1 - \sin\varphi] / 2 + \sigma_3\} \times \tan\varphi \quad (3)$$

式中: σ_1 ——土样破坏时的最大主应力; σ_3 ——土样破坏时的最小主应力。

在三轴对比实验中, 如果未加筋土样在 σ_1 和 σ_3 作用下达极限平衡, 保持 σ_3 不变, 则加筋土在相同应力状态下未破坏, 而是 σ_1 增至 σ_{1f} 时才达到极限状态。

假定土样在加筋前后 φ 值不变, 加筋后土的抗剪强度提高。比较未加筋土和加筋土实验的极限平衡条件, 加筋土比未加筋土黏聚力增加了 $c'^{[18]}$ 。

3 结果分析

3.1 抗剪强度分别与含根量及根径的关系

(1) 由表 1 可知, 在根径相同的情况下, 随着含根量的增加, 抗剪强度峰值总体上呈增大趋势, 200 kPa 围压时, 含 5 条 10~20 mm 根的土样比含 1 条 10~20 mm 根的土样最大增幅为 35.20%; 其中在 200 kPa 围压时, 0~2 mm 根径组内土样随着含根量的增加抗剪强度峰值增大趋势不明显, 2~5 mm 根径组内土样随着含根量的增加抗剪强度峰值呈减小趋势, 说明围压的增大导致加根效果不明显。同时随着围压的增大, 同一土样的抗剪强度峰值增大, 并在 200 kPa 时达到最大值, 为 122.37 kPa。由图 1 知, 不同围压下 5~10 mm 根径组土样抗剪强度峰值均随着含根量的增多呈增大趋势; 同时随着围压的增大, 抗剪强度峰值依次增大; 比较 3 条曲线, 围压在 40 kPa 时土样抗剪强度峰值与含根量关系曲线斜率最大, 说明在周围约束力较小的情况下, 根系越多, 土体抗剪强度增强效果越显著。

(2) 由表 1 及图 2 可知, 在含根量相同的情况下, 随着根径增大, 土样抗剪强度峰值呈增大趋势, 可见粗根可以有效提高土体抗剪强度, 含 5 条 10~20 mm 根的土样比含 5 条 2~5 mm 根的土样相比, 最大增幅为 47.70%; 同时, 随着围压增大, 抗剪强度峰值逐级提高, 并且在 3 条曲线中, 围压为 200 kPa 时土样抗剪强度峰值与根径的关系曲线斜率最大, 说明

在周围约束力较大时, 根径越大, 土体抗剪强度增加效果越明显。

表 1 不同围压下各土样抗剪强度峰值 kPa

土 样	围压/kPa		
	40	100	200
无根小样	59.22	73.28	83.06
含 1 条 0~2 mm 根	61.69	72.84	77.48
含 3 条 0~2 mm 根	62.61	76.17	83.90
含 5 条 0~2 mm 根	69.07	81.59	85.73
无根大样	46.57	63.90	76.57
含 1 条 2~5 mm 根	49.68	61.57	79.26
含 3 条 2~5 mm 根	52.59	64.60	78.11
含 5 条 2~5 mm 根	64.93	75.31	82.85
含 1 条 5~10 mm 根	63.76	77.21	84.80
含 3 条 5~10 mm 根	70.41	84.35	94.73
含 5 条 5~10 mm 根	87.11	97.48	105.38
含 1 条 10~20 mm 根	68.12	82.90	90.51
含 3 条 10~20 mm 根	88.82	100.44	108.81
含 5 条 10~20 mm 根	96.67	107.97	122.37

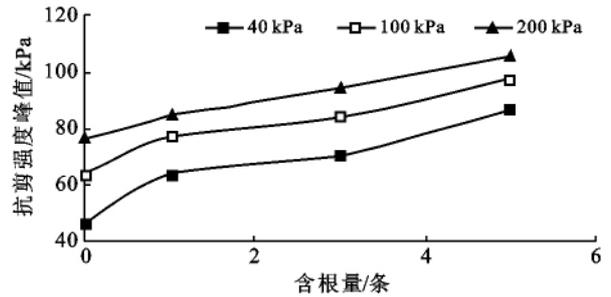


图 1 不同围压下 5~10 mm 根径组的土样抗剪强度峰值与含根量关系

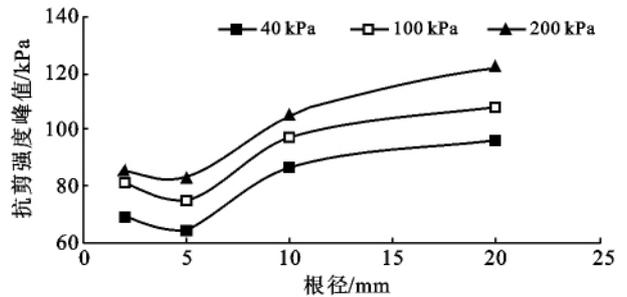


图 2 不同围压下含 5 条根土样抗剪强度峰值与根径的关系

3.2 内摩擦角及黏聚力与含根量的关系

重塑土黏聚力及内摩擦角与含根量及根径有着密切关系, 通过对含根土样进行不同围压下的三轴剪切实验, 得到各土样的黏聚力及内摩擦角值(表 2)。

由表 2 可知, 在根径相同的情况下, 随着含根量的增多, 黏聚力呈增大趋势, 变化幅度比相应内摩擦角的变化幅度大的多, 含 5 条 20 mm 根的土样与含 1

条 20 mm 根的土样相比,黏聚力最大增幅为 43.81%;同时,内摩擦角呈减小趋势,在 10 mm 根径组内含根量最大时出现最小值为 5.68°。5~10 mm 根径组土样黏聚力与含根量呈正相关,并在含根量为 5 条时达到峰值。三轴剪切实验中根系锚固力在很大程度上提高了土体的黏聚力,原因在于根量越多,土颗粒越能较好地集结在一起,锚固力提升,从而有效提高土体颗粒之间以及土颗粒与根系之间的黏结力,使得复合体黏聚力提高。5~10 mm 根径组土样内摩擦角与含根量呈负相关,即随含根量的增加,内摩擦角呈减小趋势。根系与土颗粒间也有摩擦力,但小于土颗粒之间的摩擦力,并容易沿着根系方向形成软弱结构面,在剪切实验时土样倾向于顺此结构面发生剪切破坏,导致内摩擦角有所降低;相应的摩尔圆及包络线如图 3 所示。由图 3 可知,5~10 mm 根径组内随着含根量的增加,不同含根量土样摩尔强度包络线总体上相互平行,说明内摩擦角变化较小;各包络线与纵轴的截距随着含根量的增加依次增大,表明黏聚力逐渐增大。

表 2 三轴剪切实验土样的黏聚力及内摩擦角

土样	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
无根小样	44.75	7.45
含 1 条 2 mm 根	49.51	5.85
含 3 条 2 mm 根	48.68	6.88
含 5 条 2 mm 根	56.40	5.80
无根大样	32.65	8.85
含 1 条 5 mm 根	33.14	8.96
含 3 条 5 mm 根	37.18	8.12
含 5 条 5 mm 根	51.09	6.25
含 1 条 10 mm 根	49.80	6.80
含 3 条 10 mm 根	54.79	7.14
含 5 条 10 mm 根	71.67	5.68

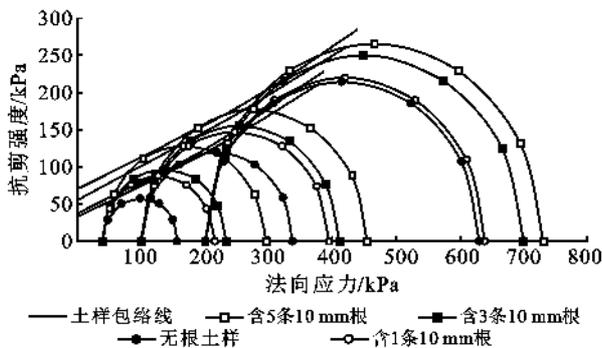


图 3 5~10 mm 根径组土样摩尔圆及强度包络线

3.3 内摩擦角及黏聚力与根径的关系

由表 2 知,在含根量相同的情况下,随着根径的

增加,黏聚力呈增大趋势,含 3 条 20 mm 根的土样与含 3 条 10 mm 根的土样相比,增幅为 96.10%;同时,内摩擦角呈减小趋势,减幅为 5.68%。根径增大时,根径较大的根能够更有效地将土颗粒集结在一起,锚固力显著提升,从而土根复合体的黏聚力有较大幅度的提高;同时较粗的根与土颗粒间的接触面积增大,摩擦力有所提升,但也更容易形成软弱结构面,在实验中土样易于沿着此结构面发生剪切破坏,导致内摩擦角降低。由图 4 可知,在含根量相同的情况下,随着根径的增加,土样摩尔强度包络线的截距依次增大,表明土样黏聚力由较大提高;同时,土样的摩尔强度包络线的斜率变化较小,相互近于平行,说明根土复合体内摩擦角变化不大。准黏聚力原理与本次三轴剪切实验结果一致,同时也存在不同之处,即根系提高了土体的黏聚力,但在一定程度上降低了土体内摩擦角。

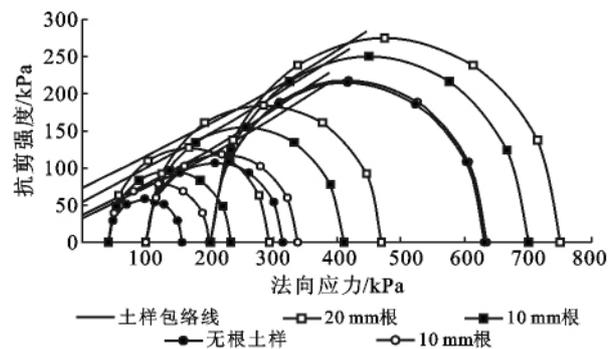


图 4 含有 3 条根土样摩尔圆及强度包络线

由表 2 可知,含有 5 条 20 mm 根径根的土样比无根大样黏聚力高 44.66 kPa,而内摩擦角低 2.17°,将 $\sigma_1 = 466.45$ kPa, $\sigma_3 = 100$ kPa, $\varphi = 8.85^\circ$, $c = 32.65$ kPa 代入公式(3)得到抗剪强度增值为: $\Delta T = 107.98 - 63.92 = 44.06$ kPa。可见,根系的存在有效提高了土体的抗剪强度。

4 结论

(1) 根系对土体内摩擦角及黏聚力的影响试验结果表明,根系降低了土体的内摩擦角,同时提高了土体的黏聚力,总体上提高了土体的抗剪强度。

(2) 在根径相同(均为 20 mm)的情况下,含根量从 1 条增至 5 条时,土体内摩擦角呈减小趋势,减幅为 2.62%;在含根量相同(均为 3 条)的情况下,根径从 10 mm 增大至 20 mm 时,土体内摩擦角亦呈减小趋势,减幅为 5.68%。复合体的摩擦力不仅包含土体颗粒与根系之间的摩擦力以及土体颗粒之间的摩擦力,还包含根系本身的抗剪力或锚固力^[19]。在三

轴实验中,由于剪切方向与根系方向近乎平行,根系锚固力不能转化为相应剪切面上的摩擦力,并且土体很容易顺着较粗根形成软弱结构面并沿其发生破坏,使得土体剪切面上摩擦力降低,最终导致内摩擦角降低。

(3) 在根径相同(均为 20 mm)的情况下,含根量从 1 条增至 5 条时,黏聚力呈增大趋势,增幅为 43.81%;在含根量相同(均为 3 条)的情况下,根径从 10 mm 增大至 20 mm 时,黏聚力呈增大趋势,增幅为 96.10%。对于黏聚力,随着根量增多及根径的增大,根的锚固力提升,土颗粒能够较好地集结在一起,并且在开始的压缩过程中变得更加紧密,从而有效提高土体颗粒之间以及土体颗粒与根系之间的黏结力,使得复合体黏聚力提高。

(4) 随着含根量的增多和根径的增大,土体抗剪强度显著提升,最大增幅为 107.58%。一方面是由于根系本身尤其是粗根(根径 >5 mm 的根)的抗剪强度要优于土体,有效抵抗了垂直于根系方向的剪应力,同时增大了根土界面的摩擦力,削减了平行于根系方向的应力;另一方面,随着含根量增多,土体中产生群根效应,根系的锚固力在很大程度上转化为根土复合体剪切面上的抗剪强度,有效提高了素土的抗剪强度。

(5) 本研究没有分析根系分布方向及不同根径的根相互组合对土体内摩擦角及黏聚力的影响,对于更符合实际根系分布的根土复合体的抗剪强度有待进一步研究。

致谢:在野外实验和室内实验过程中,得到了何淑芬老师、洪勇站长、李战鲁老师、杨德伟博士、张云红硕士及中国科学院东川泥石流观测研究站和中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室全体工作人员的大力支持,在此表示衷心感谢!

[参 考 文 献]

- [1] 张谢东,石明强,赵来,等.公路边坡植物根系固土的力学分析研究[J].交通科技,2008(1):50-52.
- [2] 肖东升,张涛.边坡土体强度与植被根系作用的研究[J].路基工程,2008(1):135-137.
- [3] Beke G J, McKeague J A. Influence of tree windthrow on the properties and classification of selected forested soils from Nova Scotia[J]. Can. J. Soil Sci., 1984, 64(2):195-207.
- [4] Gray D H, Leiser A T. Biotechnical slope protection and erosion control[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1982:271.
- [5] Gray D H, Megahan W F. Forest Vegetation Removal and Slope Stability in the Idaho Batholith [R]. Washington: Forest Service, U. S. Department of Agriculture, Research Paper INT-271, 1981:23.
- [6] Gray D H, Sotir B R. Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: A Practical Guide for Erosion Control[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 1996:1-300.
- [7] Bishop D M, Stevens M E. Landslides on Logged Areas in Southeast Alaska[R]. Northern Forest Experiment Station: U. S. Forest Service, Research Paper NOR-1, 1964:18.
- [8] Waldron L J. The shear resistance of root-permeated homogenous and stratified soil[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1977, 41(5):843-849.
- [9] Wu T H. Investigation of Landslides on Prince of Wales Island, Alaska[R]. Columbus: Department of Civil Engineering, Ohio State University, Geotechnical Engineering Report, 1976:94-101.
- [10] 杨亚川,莫永京,王芝芳,等.土壤—草本植被根系复合体抗水分散性强度与抗剪强度的实验研究[J].中国农业大学学报,1996,2(1):31-38.
- [11] 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实验研究[J].水土保持研究,2007,14(3):288-291.
- [12] 蔡奕,施斌,刘志彬,等.团聚体大小对填筑土强度影响的实验研究[J].岩土工程学报,2005,27(12):1483-1486.
- [13] 吴积善,康志成,田连权.云南蒋家沟泥石流观测研究[M].北京:科学出版社,1990:1-52.
- [14] 陈奇伯,费希亮.土壤侵蚀预报研究的新进展[J].中国水土保持,1996(2):20-22.
- [15] 马修军. GIS支持下小流域次降雨侵蚀动态模拟研究: LISEM在黄土高原的应用[D].北京:北京师范大学,1999.
- [16] 林勇明,崔鹏,葛永刚,等.泥石流频发区人工恢复新银合欢林种内竞争:以云南东川蒋家沟流域为例[J].北京林业大学学报,2008,30(3):13-17.
- [17] 李晓云,赵宝平.基于 GDS 的非饱和土强度三轴试验研究[J].灾害与防治工程,2008(1):25-29.
- [18] 刘红军,杨东海.土工合成材料在公路工程中的应用[J].低温建筑技术,2005(3):68-69.
- [19] 刘秀萍,陈丽华,宋维峰.林木根系与黄土复合体的三轴试验[J].林业科学,2007,43(5):54-58.