

蒋家沟泥石流区新银合欢细根固土效应

郭灵辉^{1,2,3}, 王道杰^{1,2}, 陈东^{1,2,3}, 陈晓艳^{1,2,3}

(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. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 以蒋家沟泥石流区不同龄级新银合欢根系为研究对象, 在分析其垂直分布与构成特征的基础上, 运用加筋原理研究其固土效应。结果显示, 不同龄级新银合欢根系表聚现象明显, 随土层深度的增加呈减少趋势, 约 80% 集中在 0—120 cm 土层范围内; 细根 ($D \leq 1$ mm) 在整个细根根系中所占比例较大, 决定着整个细根的分布趋势; 10 年生新银合欢 $D \leq 1$ mm 细根较 5 年生增幅明显, 15 年生 $1 \text{ mm} < D \leq 2$ mm 细根较 10 年生增幅显著。根径越小, 根系的抗拉强度越大, 根径与根系的抗拉强度呈幂函数相关关系, 不同深度、不同树龄新银合欢根系固土能力变化较大, 与细根 ($D \leq 1$ mm) 关系密切。

关键词: 蒋家沟; 新银合欢; 细根分布; 固土效应

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)05-0085-05

中图分类号: X43

Effect of *Leucaena Leucocephala* Fine Root on Soil Fixation in Debris Flow Area of Jiangjia Gully

GUO Ling-hui^{1,2,3}, WANG Dao-jie^{1,2}, CHEN Dong^{1,2,3}, CHEN Xiao-yan^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Various aged *Leucaena leucocephala* in debris flow area of Jiangjia gully were chosen and the fine root systems were dug out from the surface to the bottom layers at different distances from the stem in three directions. Basing on the analysis of fine root vertical distributions and composition, the effect of fine roots on the soil shear strength were estimated according to reinforcement theory. The result show that fine roots exhibited an obvious accumulation trait in the topsoil layer, which reduced with depth. Approximately 80% of the fine root materials were found in the layer between 0—120 cm depths. Fine roots were mainly composed of smaller ones ($D \leq 1$ mm) and determined the development of root distribution. The 10-year stands had more fine roots ($D \leq 1$ mm) than 5-year ones, and the 15-year stands had obviously more intermediate roots ($1 \text{ mm} \leq D \leq 2$ mm) comparing to the 10-year stands. Root tensile strength decreased significantly with increasing diameter, following a power law function. The soil shear strength enhanced by fine roots was highly variable among depths and ages, largely depended on the smaller roots ($D \leq 1$ mm).

Keywords: Jiangjia gully; *Leucaena leucocephala*; fine root distribution; soil reinforcement effect

植被通过机械作用与水文作用影响坡体的稳定性, 虽然近年来一直强调植被水文效应的影响, 但根系机械固土作用仍被视为最重要的一方面^[1]。稠密的细根具有较高的比表面积, 能够增加根土之间的抗拉摩擦, 是植物提高固土能力的有效根系。为了有效评价细根固土效应, Waldron^[2] 和 Wu 等^[3] 认为根纤维提高土体的抗剪强度是通过根土接触面之间的摩

擦力把土体中的剪应力转化成根的拉应力, 且提出了计算模型, 目前已广为引用^[4-5]。该模型中, 根系密度、根系分布范围以及根系的抗拉性能都是根系控制土壤稳定性的重要参数, 这些因素不仅受生物遗传的影响, 也受环境因素的制约^[6]。一般认为, 分布范围较大的、拥有健壮根系的成熟树木, 具有比幼龄树木更高的固土能力。但是, 也有研究认为幼年林却比成

收稿日期: 2010-12-31

修回日期: 2011-03-03

资助项目: 国家自然科学基金项目“固氮植物防治泥石流的抑灾作用机制研究”(40771025); 中国科学院知识工程重要方向课题“震裂坡地暴雨型泥石流滑坡区生态恢复理论与技术”(kzcx2-yw-332)

作者简介: 郭灵辉(1983—), 男(汉族), 河南省洛阳市人, 硕士研究生, 主要从事植物生态学学习和研究。E-mail: 2277410@163.com。

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

熟林具有更高的固土能力^[7]。如何准确地掌握不同龄级树木根系的空间分布特征是正确评价其根系固土能力的关键因素。蒋家沟流域泥石流灾害活动强烈,每年雨季暴发泥石流 15~20 次,最多年达 28 次,危害严重。本文以蒋家沟流域典型支沟大凹子沟坡面上新银合欢为研究对象,分析不同龄级新银合欢根系分布特征并运用加筋原理评价其固土效应,以期为生物抑灾效应评价提供依据。

1 研究区概况

研究区位于中国科学院东川泥石流观测站所在的蒋家沟流域,地理坐标为:103°06′—103°13′E, 26°13′—26°17′N。区内多年平均气温 20.2℃,极端最高气温 40.9℃,极端最低气温 -6.2℃,干湿季分明,88%的降雨集中在湿季(8—10月),年均降雨量 691.3 mm,年均蒸发量 3 752.17 mm,蒸发量是降雨量的 5 倍多,相对湿度 54%,属于半干旱气候区^[8]。在长期的水土流失和泥石流作用下,该区石漠化严重,土壤含砾石较高。植被类型和种类组成具有明显的分异性,从谷地到分水岭可以分为三带,依次为稀树草原带、针阔叶混交林带和灌丛草甸带^[9]。主要乔木树种有新银合欢(*Leucaena leucocephala*)、赤桉(*Eucalyptus camaldulensis*)、滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucoides*)、云南松(*Pinus yunnanensis*)等,灌木树种主要有苦刺(*Sophora davidii*)、马桑(*Coriaria nepalensis*)、南烛(*Lyonia bracteatum*)等,草本植被主要有扭黄茅(*Heteropogon contortus*)、香茅(*Cymbopogon citratus*)、小叶荩草(*Arthraxon lancifolius*)等。

2 研究方法

2.1 设计与取样

试验于 2010 年 8 月进行,选择蒋家沟支沟大凹子沟半阳坡坡中位置的新银合欢为研究对象,随机设置 20 m×20 m 的调查样地,调查样地内新银合欢的胸径、树高、冠幅和枝下高并编号,从中随机选取长势良好的 5 年生、10 年生和 15 年生 3 个龄级新银合欢作为采样对象,每个龄级重复 2 株。3 个林分都为位于坡中同一高度不同林区内,由于本区新银合欢分布稀疏,本研究主要选择株距和行距超过 4 m 的标准木进行取样,尽量避免根系交叉,新银合欢林下生长着一些草本植物,由于新银合欢鲜根颜色微黄,故在水洗根样时,容易将草根除去。

采用三方位分层分段挖掘法获取根样,首先以样

向上、等高线)水平量出 2.0 m;然后,分别在距样本木 2.0 m 处开挖深 180 cm,宽 100 cm 的土壤剖面,用事先研制的取样器(10 cm×10 cm×10 cm)在剖面垂直方向每隔 20 cm 取一个根土混合样,每个剖面取 9 个样;由此分别在距样本木水平距离 1.5,1.0,0.5 m 处开挖同样深度剖面,按相同方法对不同剖面取样。将所取根土混合样放入塑料袋中,密封带回实验室,用水洗法将根系冲洗干净,分 $D \leq 1$ mm 和 $1 \text{ mm} < D \leq 2$ mm 这 2 级(其中 $D \leq 2$ mm 统称细根),分别记作细根 $D_{0.5}$ 和细根 $D_{1.5}$,70℃烘干至恒温,分别称重记录。

2.2 根系抗拉测定

根系抗拉实验使用爱普手动推拉力机台和依思达数据采集系统。推拉力仪采用螺旋式传动系统,最大测量量程为 5 kg,并配备一套夹具用于夹取根系,为避免夹取根系处受损,我们在夹具的内侧增加了一层橡胶垫,并用硅胶将其粘牢;数据采集系统通过 USB 接口与电脑相连,实时记录根系抗拉力变化,并记录抗拉峰值。

根系抗拉测定采用鲜根抗拉试验。挑选长势良好、没有受损且粗细均匀的根系,将其用夹具夹在抗拉实验台上,用数显式游标卡尺量取待测根系中部位置的根径,并记录,然后用手匀速摇动拉力仪上的螺旋式手摇柄,开始测定。测定过程中,只有根系从其中间位置被拉断才认为测定成功。为消除根长对根系抗拉数据的影响,抗拉实验根长为 5 cm。由于根径 $D > 2$ mm 的根系容易从夹具中滑脱,故选用根径 $D \leq 2$ mm 的根系进行试验。

根系抗拉强度是指单位面积根系所能承受的最大拉力,计算如下^[10]:

$$T_R = F_{\max} / \pi(D/2)^2 \quad (1)$$

式中: T_R ——根系抗拉强度(MPa); F_{\max} ——最大抗拉力(N); D ——平均根径(mm)。

2.3 根系增强土体抗剪强度值的计算

土体抗剪强度可用 Mohr—Coulomb 方程表示

$$S = C + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

式中: C ——土壤内黏聚力(kPa); σ ——法向正压力(F); φ ——土壤内摩擦角(°)。由于根系在土体中穿插,根土复合体的抗剪强度为:

$$S_r = C + \sigma \tan \varphi + S_r \quad (3)$$

式中: S_r ——根土复合体抗剪强度(kPa); S_r ——根系对土体抗剪强度的增强值(kPa)。根据加筋理论 Wu 等^[3]和 Waldron^[2],通过加筋原理概化了含根土体增强土体抗剪模型:

$$S_r = t_R (\cos \delta \tan \varphi + \sin \delta) \quad (4)$$

式中: t_R ——单位面积土体中根系的抗剪强度(kPa);

δ ——剪切面中根系受损的偏角($^{\circ}$)。而 Wu 等^[3]和 Waldron^[2]等经过试验发现 $(\cos\delta \tan\varphi + \sin\delta)$ 经常位于 1.0~1.3 之间,可以取 1.2 进行评估,因此:

$$S_r = 1.2t_R \quad (5)$$

单位面积土体中根系的抗剪强度 t_R 可由根系特征参数计算获得。公式如下

$$S_r = 1.2T_R RAR = 1.2T_R (A_R/A) \quad (6)$$

式中: T_R ——根系平均抗拉强度(MPa); A_R ——该土体中根系的横截面积(mm^2); A ——土体横截面积(mm^2); A_R/A ——根系横截面积比,记作 RAR。最后,由于不同根径根系的抗拉强度变化较大, S_r 可由不同径级根系抗拉强度与横截面积比之积分别相加的。公式如下:

$$S_r = 1.2 \sum_{i=1}^N T_{Ri} (A_{Ri}/A) \quad (7)$$

式中: $A_{Ri}, A_{Ri}/A$ ——不同根径下根系的平均抗拉强度和根系横截面积比; i ——径级类别; N ——总径级数(细根 $D_{0.5}$ 以根径 $D=0.5 \text{ mm}$ 的抗拉强度为该级平均抗拉强度,细根 $D_{1.5}$ 以根径 $D=1.5 \text{ mm}$ 的抗拉强度为该级平均抗拉强度)。

2.4 根系横截面积比计算

用分析天平称取不同径级的根系干质量,记作 m_i 。再选取根长 10 cm,根径分别为 0.5 和 1.5 mm 的标准根系 10 根,测量各自的质量取平均,记作 m_i ($i=0.5 \text{ mm}$ 或 1.5 mm)。将所获根样通过 M_i/m_i

等效成标准根系(根长为 10 cm,根径为 0.5 mm 或 1.5 mm)的数量 n_i ($i=0.5 \text{ mm}$ 或 1.5 mm),通过 $\sum_{i=1}^N n_i (\pi D_i^2)/4$ 计算其根系横截面积,然后比上取样器的横截面积从而获取根系横截面积比。

3 结果与分析

3.1 细根横截面积分布特征

3.1.1 细根 $D_{0.5}$ 横截面积比垂直分布 图 1 可知,不同树龄新银合欢细根 $D_{0.5}$ 横截面积比变化较大,但随深度的增加均呈减小趋势。5 年生、10 年生、15 年生新银合欢细根 $D_{0.5}$ 平均横截面积比分别为 0.000 995%, 0.015 928%, 0.021 428%, 5 年生至 10 年生细根 $D_{0.5}$ 横截面积比增幅较大,增加了 15 倍多,10 年生至 15 年生也有所增加,但幅度较小(30%)。横截面积比最大值都出现在表层(0—20 cm),分别占整个剖面细根 $D_{0.5}$ 横截面积比的 21%, 29%, 34%; 0—100 cm 土层分别集中了整个面积比的 68%, 83%, 82%; 随着深度的增加,细根 $D_{0.5}$ 横截面积比分别由表层(0—20 cm)的 0.001 85%, 0.041 70% 和 0.066 059% 减少到底层(160—180 cm)的 0.000 306%, 0.003 230% 和 0.005 606%。回归分析发现,不同树龄新银合欢细根 $D_{0.5}$ 横截面积比随深度的增加呈对数函数递减($y = a \ln x + b$, 其中, y 为细根 $D_{0.5}$ 横截面积比, x 为土层深度, a 与 b 分别为参数)。

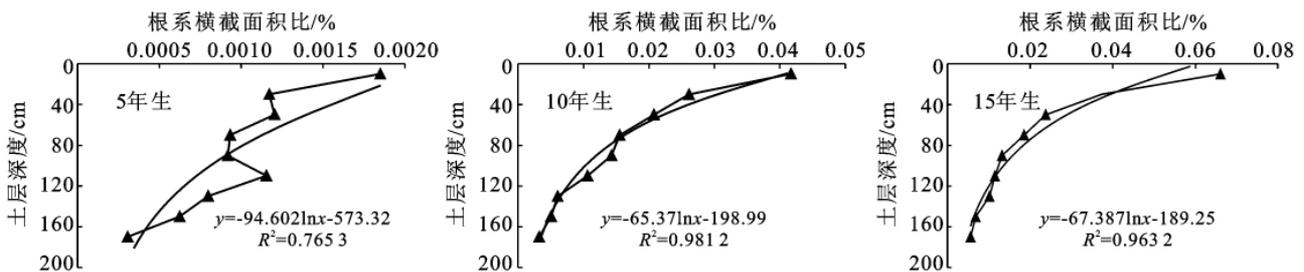


图 1 细根 $D_{0.5}$ 横截面积比垂直分布特征

3.1.2 细根 $D_{1.5}$ 横截面积比垂直分布 新银合欢细根 $D_{1.5}$ 横截面积比变化规律不如细根 $D_{0.5}$ 明显(图 1, 图 2)。5 年生细根 $D_{1.5}$ 分布范围小,仅出现在 0—140 cm 土层中,主要集中在 60—120 cm 深度范围内,0—180 cm 土层内平均细根 $D_{1.5}$ 横截面积比仅为 0.000 213%; 10 年生细根 $D_{1.5}$ 分布深度有所增加,整个剖面中均有分布,最大横截面积比出现在 0—20 cm 土层中,且多分布于 0—80 cm 土层中,整个剖面中平均细根 $D_{1.5}$ 横截面积比急增到 0.001 632%,是 5 年生平均细根 $D_{1.5}$ 横截面积比的 7 倍多;15 年生细根 $D_{1.5}$ 与

10 年生分布规律较相似,但集中深度有所增加,主要集中在 0—120 cm 土层中,整个剖面中平均细根 $D_{1.5}$ 横截面积比也有所增加,增加幅度仅为 81%。

3.1.3 细根横截面积比构成 表 1 显示,不同树龄新银合欢细根横截面积比构成中,细根 $D_{0.5}$ 横截面积比都占绝对优势,都在 80% 以上,但是不同树龄间又有所不同。5 年欢根系中细根 $D_{1.5}$ 横截面积比所占比例最大,为 16%; 10 年生细根 $D_{0.5}$ 生长迅速,根系横截面积比中细根 $D_{1.5}$ 只占 12%; 15 年生细根 $D_{1.5}$ 的比重有所上升,所占比例为 15%。

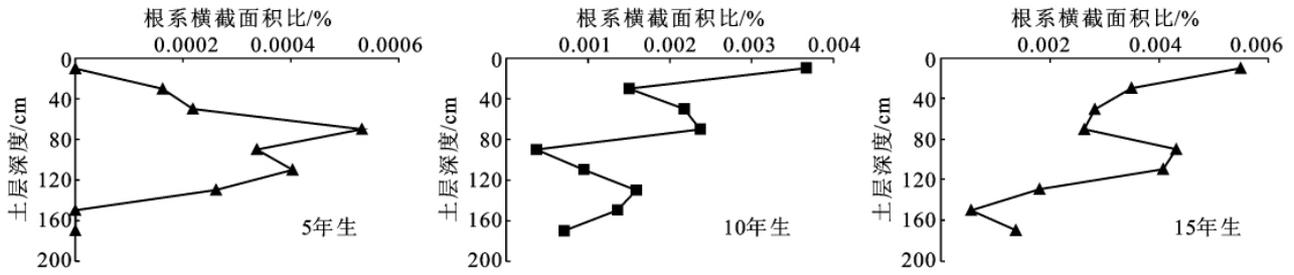


图 2 细根 $D_{1.5}$ 横截面积比垂直分布特征

表 1 不同树龄新银合欢细根横截面积比构成

树龄/ a	径级	土层深度/cm									
		0—20	20—40	40—60	60—80	80—100	100—120	120—140	140—160	160—180	平均
5	$D_{0.5}$	100	88	85	64	73	74	75	100	100	84
	$D_{1.5}$	0	12	15	36	27	26	25	0	0	16
10	$D_{0.5}$	92	95	91	87	97	92	79	79	82	88
	$D_{1.5}$	8	5	9	13	3	8	21	21	18	12
15	$D_{0.5}$	92	91	89	88	75	74	85	92	80	85
	$D_{1.5}$	8	9	11	12	25	26	15	8	20	15

3.2 根系抗拉性能

图 3 显示,根系抗拉强度随着根径的增加呈减小趋势。所测根系中,根径 $D \leq 0.5\text{mm}$ 的根系平均抗拉强度可达 47.02 MPa, 根径 $0.5\text{mm} < D \leq 0.7\text{mm}$ 、根径 $0.7\text{mm} < D \leq 0.9\text{mm}$ 以及根径 $0.9\text{mm} < D$ 的根系平均抗拉强度依次减小,分别为 25.12, 21.15 和 18.65 MPa。通过线性拟合发现其减小服从幂数函数规律($T_R = \alpha D^\beta$, 其中 α 为根系抗拉强度, D 为根径, α 与 β 为参数)。

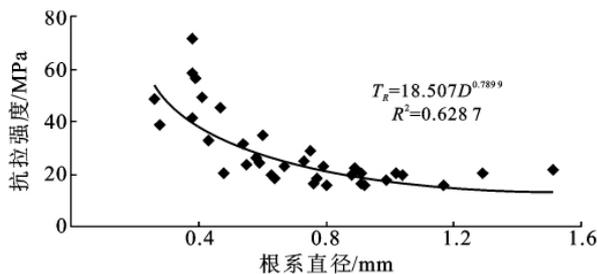


图 3 新银合欢细根抗拉强度与根径的关系

3.3 根系增强土体抗剪强度效应

我们利用根系抗拉强度与根径拟合曲线,分别计算出根径为 0.5 和 1.5 mm 时根系的抗拉强度值(31.0, 13.4 MPa),然后用上述公式来推算整个根系对土体抗剪强度的增强值。

图 4 显示,不同林龄新银合欢根系增强土体抗剪强度值随深度的增加呈减小趋势。5 年生、10 年生、15 年生新银合欢根系增强土体抗剪强度最大值都分布在表层(0—20 cm), 最大值分别为 0.71, 16.60, 26.25 kPa, 随着深度的增加,增强值逐渐减小,到 160—180 cm 土层中,增强值分别减小到了 0.12, 1.35, 2.37 kPa; 整个剖面来看,5 年生、10 年生、15 年生根系增强土体抗剪强度均值为 0.42, 6.38 和 8.70 kPa, 5 年生至 10 年生根系增强土体抗剪强度值增加较快,增加了 14.3 倍,而 10 年生至 15 年生有所增加,但幅度较小,仅为 36%。其中,细根 $D_{0.5}$ 对整个根系增强土体抗剪强度的贡献较大,整个剖面中都大于 80%(表 2)。

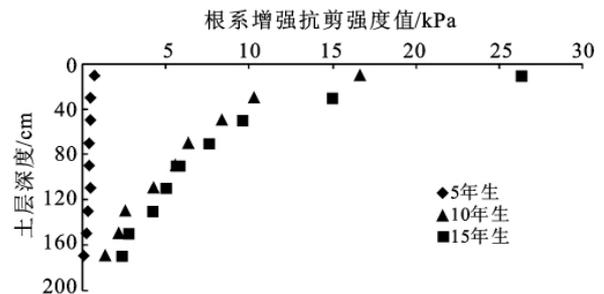


图 4 根系增强土体抗剪强度垂直分布特征

表 2 细根 D_1 对土体抗剪强度增强值贡献百分比

树龄/ a	土层深度/cm									
	0—20	20—40	40—60	60—80	80—100	100—120	120—140	140—160	160—180	平均
5	100	95	93	81	87	87	88	100	100	92
10	96	98	96	94	99	96	90	90	92	95
15	97	96	95	94	88	87	93	97	91	93

4 结论

根系的抗拉强度受根径的影响,根径越小根系的抗拉强度越大,根径与根系的抗拉强度呈幂函数相关关系^[10-11]。 α (尺度因素)和 β (递减率)的大小对于比较不同植物的抗拉效应,筛选有效的固土植物非常重要^[12],Hudek等^[10]在研究根系增强土体抗剪强度时,总结了前人的一些研究,黑松、柔毛栎等乔木根系抗拉强度与根径关系函数中尺度因素 α 分别为12.41和17.37,递减率 β 分别为-0.69和-0.62。与之相比,本研究新银合欢根系抗拉强度与根径关系函数中,尺度因素 α 为18.50,递减率 β 为0.063,根系抗拉性能较强。

土壤表层有较好的养分、通风和水分条件,且随着土层厚度的增加,土壤养分特性和生物环境都有所变化,土壤阻力有所增加^[13],根系横截面积比表层积聚,随着深度的增加呈对数函数递减^[5]。5年生、10年生、15年生新银合欢细根($D \leq 1$ mm)横截面积比都呈对数型函数递减,细根($1 \text{ mm} < D \leq 2 \text{ mm}$)虽然分布规律不强,但是所占比重较小,不影响整个根系的变化趋势。10年生比5年生根系横截面积比增幅较大,15年生与10年生相比也有所增加,但幅度较小。其中,10年生比5年生细根($D \leq 1$ mm)横截面积比比细根($1 \text{ mm} < D \leq 2 \text{ mm}$)增幅快,前者增幅15倍多后者增幅为7倍多;15年生比10年生细根($1 \text{ mm} < D \leq 2 \text{ mm}$)横截面积比比细根($D \leq 1$ mm)增幅快,前者增幅为80%,后者仅为30%。Claus^[14]认为树萌发以后根系会迅速增长,在树木成熟早期达到最大,之后有所减小,在树木成熟后期达到平衡。植物生长早期,植物需要分配更多的资源给细根以获取植物生长所需要的水分和养分,当生长到一定阶段后,更多的细根就会转化为较粗根以提供更多的支撑作用。

新银合欢根系增强土体抗剪强度范围在0.12~26.25 kPa间。Greenway对通过类似的研究,发现一些乔木根系增强土体抗剪强度值约为0~40 kPa。De Baets等通过对大量的灌丛、乔木和草本植物根系增强土体抗剪强度值研究,发现很多乔灌木根系增强土体抗剪强度值也为0~40 kPa,显著小于浅根草本(50~300 kPa)^[15]。但是植物根系能不能有效地增强土体的抗剪强度,关键在于其是否穿过土体中的滑动面,在这一点深根的乔灌木有较大的优势。其实,Wu模型认为所有的植物根系同时垂直穿过剪切面,并且在同一时间达到了抗拉极限,这可能过高地估计了根系的固土作用^[16]。但是,由于根系在土壤中穿插角度比较复杂,该模型求得的根系固土能力往往被

低估20%~33%^[7]。10年生比5年生根系增强土体抗剪强度的幅度大,15年生比10年生也有所增加,幅度较小。细根($D \leq 1$ mm)不仅有较大的抗拉强度,而且横截面积比也有绝对优势,对整个根系增强土体抗剪强度的贡献较大,从而决定了根系增强土体抗剪强度值的垂直变化与龄级趋势。

[参考文献]

- [1] Simon A, Collison A J C. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on stream-bank stability[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2002, 24: 527-546.
- [2] Waldron L J. The shear resistance of root-permeated homogenous and stratified soil[J]. *Journal of the Soil Science Society of America*, 1977, 41: 843-849.
- [3] Wu T H, Mckinnell W P, Swanston D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, 35: 579-590.
- [4] Abernethy B, Rutherford I D. The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement[J]. *Hydrol. Proc.*, 2001, 15: 63-79.
- [5] Mattia C, Bischetti G B, Gentile F. Biotechnical Characteristics of Root Systems of Typical Mediterranean Species[J]. *Plant and Soil*, 2005, 278: 23-32.
- [6] Schmid I. The influence of soil type and interspecific competition on the fine root system of Norway spruce and European beech[J]. *Basic. Appl. Ecol.*, 2002, 3 (339-346).
- [7] Genet M, Kokutse N, Stokes A, et al. Root reinforcement in plantations of *Cryptomeria japonica* D. Don: Effect of tree age and stand structure on slope stability [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008 (256): 1517-1526.
- [8] 崔鹏,王道杰,韦方强.干热河谷生态修复模式及其效应:以中国科学院东川泥石流观测研究站为例[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(3): 60-64.
- [9] 张有富.蒋家沟流域的森林植被与泥石流[J]. *山地研究*, 1987, 5(4): 213-217.
- [10] Hudeka C, Burylob M, Rey F. Root system traits of *Mahonia aquifolium* and its potential use in soil reinforcement in mountain horticultural practices[J]. *Scientia Horticulturae.*, 2010, 125(3): 504-511.
- [11] Genet M, Stokes A, Salin F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots[J]. *Plant and Soil.*, 2005, 278: 1-9.
- [12] Bischetti G B, Chiaradia E A, Simonato T, et al. Root strength and root area ratio of forest species in lombardy (Northern Italy)[J]. *Plant and Soil*, 2005, 278: 11-22.

(下转第214页)

- 9-14.
- [20] 陈维英,肖乾广,盛永伟. 距平植被指数在 1992 年特大干旱监测中的应用[J]. 环境遥感,1994,9(2):106-112.
- [21] Liu W T, Negrón Juárez R I. ENSO drought onset prediction in northeast Brazil using NDVI[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001,22(17):3483-3501.
- [22] Weiss E, Marsh S E, Pfirman E S. Application of NOAA-AVHRR NDVI time-series data to assess changes in Saudi Arabia's rangelands[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001,22(6):1005-1027.
- [23] Barbosaa H A, Huetea A R, Baethgenb W E. A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil [J]. Journal of Arid Environments, 2006,67(2):288-307.
- [24] 宋怡,马明国. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析[J]. 中国沙漠,2007,27(1):89-93.
- [25] 杜灵通,李国旗. 基于 SPOT-VGT 的宁夏盐池县近 8 年生态环境动态监测[J]. 北京林业大学学报,2008,30(5):46-51.
- [26] 蔡博峰,于嵘. 基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价[J]. 遥感学报,2009,13(6):1170-1186.
- [27] Herrmann S M, Anyamba A, Tucker C J. Recent trends in vegetation dynamics in the African sahel and their relationship to climate[J]. Global Environmental Change, 2005,15(4):394-404.
- [28] 杜灵通. 基于遥感技术的宁夏南部山区 LUCC 研究[J]. 地理科学进展,2006,25(6):94-101.

（上接第 89 页）

- [13] Genet M, Kokutse N, Stokes A, et al. Root reinforcement in plantations of *Cryptomeria japonica* D. Don effect of tree age and stand structure on slope stability [J]. Forest Ecology and Management. 2008, 256: 1517-1526.
- [14] Claus A G E. Effect of stand age on fine-root biomass and biomass distribution in three European forest chronosequences[J]. Can. J. For. Res., 2005(35):1617-1625.
- [15] De Baets S, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength[J]. Plant Soil, 2008,305:207-226.
- [16] Pollen N. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks accounting for soil shear strength and moisture[J]. Catena, 2007,69:197-205.

（上接第 203 页）

- [13] 谷洁,李生秀,秦清军. 农业废弃物静态高温堆腐过程中的生物化学变化[J]. 中国农业科学,2005,38(8):1699-1705.
- [14] 蒋波,傅佳骏,蔡伟民. 阳离子表面活性剂改善污泥脱水性能的机理研究[J]. 中国给水排水,2006,22(23):59-62.
- [15] 张国占,方静,仝恩从. 污泥复合有机肥的生产与应用[J]. 中国给水排水,2003,19(6):66-67.
- [16] 何绪生,廖宗文,黄培钊,等. 保水缓/控释肥料的研究进展[J]. 农业工程学报,2006,22(5):184-190.
- [17] 姜丽芬,石福臣,王化田,等. 叶绿素计 SPAD-502 在林业上应用[J]. 生态学杂志,2005,24(12):1543-1548.
- [18] 钟全林,程栋梁,胡松竹. 刨花楠和华东润楠叶绿素含量分异特征及与净光合速率的关系[J]. 应用生态学,2009,20(2):271-276.
- [19] 吴涛,张荣标,冯友兵. 土壤水分含量测定方法研究[J]. 农机化研究,2007(12):213-218.
- [20] 刘学师,宋建伟,任小林,等. 水分胁迫对果树光合作用及相关因素的影响[J]. 河南职业技术学院学报,2003,31(1):45-47.
- [21] 余杰,田宁宁,王凯军. 城市污水厂污泥处理与处置技术的新思路[J]. 中国给水排水,2008,24(6):11-14.
- [22] 林云琴,周少奇. 我国污泥处理处置与利用现状[J]. 能源环境保护,2004,18(6):15-18.
- [23] 卢宁,文一波,魏婧娟. 污泥的电渗透脱水技术研究进展[J]. 环境科学与管理,2010,35(3):85-87.
- [24] 张伟军,陈超,王达力. 利用生物方法改善污泥脱水性能[J]. 安徽农学通报,2010,16(3):37-39.