

## 树木根系固土力学机制研究综述

宋维峰<sup>1</sup>, 陈丽华<sup>2</sup>, 刘秀萍<sup>2</sup>

(1. 西南林学院 环境科学与工程系, 云南 昆明 650224; 2. 北京林业大学 水土保持学院 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 近30 a来, 由于科学技术的发展和生态环境建设的需要, 根系固坡力学机制研究成为学科交叉的新领域。鉴于此, 概述了近30 a来固土力学机制的研究进展及今后研究方向。综观根系固坡的研究历程, 研究集中在林木根系抗拉、锚固、根系-土壤复合体提高抗剪强度等方面。今后应加强对根系纤维素、半纤维素的定量分析, 探讨不同植物根系弹性、抗拉力及应力-应变关系的差异, 加强水土保持树种搭配的理论研究, 从不同力学特性的根系相搭配的角度来研究根系固土护坡的功效。在边坡的稳定方面, 应用有限单元方法研究根土复合体边坡的应力场、位移场的变化及边坡的稳定性情况, 并用有限元的方法解决实际生产中的边坡造林中树种选择、造林密度等问题。参36

**关键词:** 土壤学; 树木根系; 固土护坡; 力学机制; 抗拉强度; 抗剪强度

**中图分类号:** S714      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5692(2008)03-0376-06

### Root reinforcement of soil: a review

SONG Wei-feng<sup>1</sup>, CHEN Li-hua<sup>2</sup>, LIU Xiu-ping<sup>2</sup>

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry College, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Combating Desertification of Ministry of Education, College of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University; Beijing 100083, China)

**Abstract:** Because of advances in science and technology as well as the need for ecological and environmental development, research on root reinforcement of soil within the last 30 years has become a new multidisciplinary field. Thus, this article summarizes the progress of the preceding 3 decades and future considerations for research direction concerning root reinforcement in soils. Early studies on soil bioengineering stabilization mainly concentrated on root anti-tensile strength, its anchoring force, and the root-soil composite for increasing shear strength. However, future study should focus on: 1) quantitative analysis of cellulose and hemicellulose in the root system, 2) discussion on elasticity of different plant root systems, 3) differences in stretch resistance and stress-strain relationships, 4) the theory behind balancing water and soil conservation of plant species, and 5) the efficiency of root reinforcement in soils from the aspect of different mechanical characteristics. For slope stability, areas of study should include: 1) stress field, 2) stability of the slope to be afforested, and 3) for the slope to be planted, selection of the best tree species and planting density for optimum production. [Ch, 36 ref.]

**Key words:** pedology; roots; root reinforcement of soil; mechanisms; tensile strength; shear strength

根系是植物直接与土壤接触的器官。根系在不断从土壤中获得养分和水分, 满足植物生长发育, 又直接参与土壤中物质循环和能量流动两大生态过程, 对土壤的结构改善, 肥力的发展和土壤生产力的发挥起着重要的作用的同时, 还具有支撑树体与固持土体的重要作用。近30 a来, 由于科学技术的发展和生态环境建设的需要, 根系固坡的研究成为根系研究的热点, 根系固坡力学机制研究, 成为

收稿日期: 2007-05-09; 修回日期: 2007-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30571531); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2002CB111502); 西南林学院重点基金资助项目(110702)

作者简介: 宋维峰, 副教授, 博士, 从事生态环境工程和森林水文等研究。E-mail: songwf85@126.com

一个正在开发的具有学科交叉性的新领域。

## 1 根系固土研究的国内外概况

利用植物来稳定边坡至少可追溯到中国的明朝。1591 年中国就利用柳树 *Salix babylonica* 来稳定堤防<sup>[1]</sup>, 欧洲最早使用植物来固坡是在 19 世纪<sup>[2]</sup>。而有关根系固土功能、防止地表冲刷及增加坡面抗滑能力等的研究, 可追溯到 20 世纪 30 年代<sup>[2]</sup>。Holch 首次提出有关不同森林植被根系对坡面稳定的影响。Croft 等通过研究崩塌与森林的关系, 得出砍伐森林使林木根系固持土体的能力减小, 使山崩频率增加的结论。20 世纪 60 年代以后许多研究也表明, 林木砍伐后, 根系防止崩塌的能力在衰退<sup>[3-6]</sup>。Bishop 等<sup>[7]</sup>的研究表明, 阿拉斯加山崩的数量在 10 a 内由于有计划的森林砍伐增加了 4.5 倍。Ziemer 等<sup>[8]</sup>认为, 森林砍伐后, 细根在砍伐后的 2 a 后其固土能力丧失了 32%, 4 a 之后大多数小直径根完全腐烂, 10 a 后最大直径的根其固土能力显著丧失。Burroughs 等<sup>[9]</sup>的研究结论是, 森林砍伐后, 在前 3 a 内根系的数量减少非常显著。同时, 单根的抗拉强度在砍伐后 3 a 内迅速衰退。林木砍伐后 48 个月, 1 cm 粗的根丧失它的活根抗拉强度的 74%。这些数据可以显示细毛根减少的数量和单根抗拉强度的减少, 正是小于 1 cm 直径的根系特别有效地影响着砍伐后边坡的稳定。除此之外, 实验室试验证明, 根的存在增加了土地的剪切强度<sup>[10-14]</sup>, 根增强土的剪切强度随土壤内的根的密度或者根的横截面积的增加而增加。Gray 等<sup>[4,5]</sup>连续发表了森林砍伐对自然边坡稳定性的影响及植物根系抗拉提高土壤稳定性的研究报告。Wu<sup>[14]</sup>和 Waldron<sup>[15]</sup>假设植物的根为一完全弹性的材料, 且其主根直接深入一平面剪力破坏地层, 并据以抵抗该层面的滑动, 而推导出第 1 个根系力学平衡理论公式, 从此, 根系抗拉土壤的力学理念及理论依据逐渐被接受。20 世纪 80 年代, Wu 等<sup>[16,17]</sup>提出根系与土壤的胶结关系及各有关现代根系抗拉土壤的抗剪试验等研究, 根系固土力学机制的研究上了一个新的高度。

日本是进行根系固土研究较早的国家, 其研究偏重于根系调查与含根土体剪力特性方面的探讨。北村嘉一等曾收集日本 12 个县 365 处崩塌地资料, 发现其根系分布大多集中于土壤的 A 层和 B 层, 深入 C 层的比例较少; 丸谷知己等以树木的胸高直径、树龄及林分密度等来推估根系的深度、根量及分布状况。北村嘉一等及阿部和时指出杉木 *Cunninghamia lanceolata*, 水青冈 *Fagus langipeliolata* 与日本黑松 *Pinus thunbergii* 等, 其根径与拔根抵抗力大约成指数正相关。且由于根系的存在, 使土壤剪力强度增加 200 ~ 600 kg · m<sup>-2</sup>, 增加率为 11% ~ 42%。塚本良则<sup>[18]</sup>调查了森林植被和表层滑坡发生率的关系后认为, 森林采伐后 20 a 之内显现出最大的滑坡发生率。林龄在 20 年生以下的林分与壮龄林相比, 滑坡发生率高。这意味着表层滑坡的发生率在土层内部受根系状况影响较大。

国内有关根系固土的研究主要是在近 30 a。早期颜正平<sup>[19]</sup>, 研究了水土保持木本植物根系分布类型, 指出台湾赤杨 *Alnus formosana* 根系属深根性, 为台湾开垦迹地或崩塌地的主要树种, 可作为山地防崩、河沟护岸或防风植物; 而山盐菁 *Rhus chinensis* 根系为中根型, 性耐旱, 多生于陡坡切面, 为荒山复旧、固土防崩之植物。后来吴正雄等研究了根系对崩塌的影响。研究表明: 就台湾赤杨或山黄麻 *Trema tomentosa* 纯林言, 有林地较无林地多提供 300 ~ 1 700 kg · m<sup>-2</sup> 的土壤剪力强度的增量, 而安全系数提高 16% ~ 35%。这有助于抑制浅层崩塌的发生。解明曙<sup>[20,21]</sup>采用全根系拉拔试验法, 研究了白榆 *Ulmus pumila* 根系的固土能力, 结果认为根系土的抗剪强度远高于无根系土, 即使变形后的残余强度, 也高于无根系土, 因此, 根系土壤含水量饱和后, 往往能够保持土体不崩塌。朱珊等<sup>[22]</sup>通过对根系黄土的试验研究, 获得了其抗剪强度指标  $C$  值和  $\varphi$  值, 归纳总结了两者与根系面积比的关系, 导出了黄土与其中根系的各自应力强度。周跃<sup>[23-27]</sup>等系统研究了云南松 *Pinus yunnanensis* 侧根对土体的水平牵引效应、斜向牵引效应以及侧根摩擦型根土黏合键的破坏机制。研究表明, 森林植被固土护坡的机械效应主要源于树干和根系与斜坡土壤间的机械作用, 具体包括土壤加强作用、锚固作用、斜向支撑作用和坡面负荷作用等。谢春华等<sup>[28]</sup>和朱清科等<sup>[29]</sup>对长江上游贡嘎山森林生态系统不同演替阶段主要树种根系的长度、直径和根系的生长状况及在土壤中的分布状况和土壤的性状对根系抗拉强度的影响进行了研究。此外, 封金财等<sup>[30]</sup>、陈丽华等<sup>[31]</sup>、赵廷宁等<sup>[32]</sup>从不同角度对根系

抗侵蚀以及对边坡稳定性的作用等方面进行了研究。

## 2 根系固土的机制

### 2.1 根系抗拉研究

2.1.1 单根抗拉研究 林木单根是根系固土的基本单元,对单根的一系列研究是根系固土研究的起点。目前主要通过室内单根抗拉试验、室外原位土壤水平拉拔试验和垂直拉拔试验,来确定不同树种根系的抗拉强度和抗拉特点以及影响根系抗拉的因素。

根径与根系抗拉的关系。野久田捻郎、孙立达、执印康裕等的研究表明,根径和抗拉强度之间成幂函数的关系。野久田捻郎建立的杉木根系拉力  $T$  与根径  $d$  的方程为  $T = 2.754d^{2.06}$  ( $r = 0.9670$ ); 孙立达等<sup>[33]</sup>建立的沙打旺 *Astragalus adsurgens* 等根系拉力  $T$  与根径  $d$  方程为  $T = 101.06d^{1.705}$  ( $r = 0.9352$ )。根系的抗拉力与采伐后的时间有关系。杨维西等<sup>[34]</sup>对采伐后 2 a 和 4 a 的单根抗拉力进行了研究,除得出刺槐 *Robinia pseudoacacia* 根系的抗拉力与根径成幂函数外,还得出采伐后根系单根拉力明显减小,其衰减率随着伐后时间的推延而增大,并在伐后前 2 a 衰退速度很快,后 2 a 稍微缓减;执印康裕<sup>[18]</sup>的研究表明,采伐后的花旗松 *Pseudotsuga menziesii* ( $D = 0.1 \sim 1.2$  cm) 等树木采伐后的抗拉强度  $R_{is}$  为:  $R_{is} = R_L \exp(-bt)$  ( $R_L$  为采伐前根系的抗拉强度, MPa;  $R_{is}$  采伐后根系的抗拉强度, MPa;  $t$  为采伐后经过的时间,月;  $b$  为时间系数)。花旗松在采伐后大约 3 ~ 5 a 间 50% 以下的根具有抗拉强度。另外,朱清科等<sup>[29]</sup>、谢春华等<sup>[28]</sup>对长江上游暗针叶林峨眉冷杉 *Abies fabric*, 冬瓜杨 *Populus purdomii* 等的拔根试验研究表明,不同根系的抗拉阻力随着根系平均直径的增大而增加,但是,并不完全呈线性比例关系。

根系长度与抗拉的关系。解明曙<sup>[20,21]</sup>的研究表明,在根系横截面积一定的情况下,长而粗的少量根系与土体间的摩擦阻力远大于短而细的多量根系。朱清科等<sup>[29]</sup>研究表明,在根系弹性形变范围内,在根径相同的情况下,根系的根长不同,其弹性模量不同。

根系表面积与抗拉的关系。朱清科等<sup>[29]</sup>的研究表明,在根径相同的情况下,须根发达的根系比主直根系抗拉强度大。须根增加根系的表面积,增加了根系与土壤的接触面积,也就增加根系与土壤间的摩擦阻力,并且,当须根较少的主直根系根端头受到线性拉力时,整个根系受到的是线性拉应力。由于须根在土壤中的不规则网状分布,当须根性根系根端头受到线性拉力时,网状须根却与土壤间发生了竖向的摩擦力与横向的挤压剪切力,因此,增大了根系与土壤间的作用力。

2.1.2 群根抗拉及其固土能力研究 群根的抗拉研究是指对整株树体根系抗拉的研究或是对单位面积土壤内所有根系的抗拉研究,可以包括不同树种的根系。对于群根抗拉研究,经历了 3 个阶段。最初用的方法是土体原位剪切箱直接剪切法。此方法对不同根系含量和不同根系性状的土壤层抗侵蚀能力的比较很有效,对定量评价根系具有重要意义,但是,该方法很难适用于丛生的灌木区的根系剪切实验,并且测定的土层水平和垂直范围很小。第 2 个阶段以解明曙<sup>[20,21]</sup>为代表,采用了现场原位水平挤出法。此方法测试剪切面积较大,可以达到 50 cm × 80 cm,并且能对黄土区丛生灌木整体根系进行直接测定。解明曙采用此方法并应用综合  $U$  法理论确定了根系固土的有效范围,并应用此方法对灌木-柠条整体根系进行了原位水平挤出法剪切测定,提出了以单位剪切面积( $A$ )中,直径大于 0.4 cm 的各根系横截面积之和( $A_r$ )所占比例( $A_r/A$ )大于 0.1%,为判定林木根系固坡力学强度有效范围的定量指标,并提出了白榆 *Ulmus pumila* 根系固坡力学强度参数值。第 3 个阶段以周跃等<sup>[24,25]</sup>为代表,应用原位剪切箱直接对土壤进行采样,并且结合解明曙原位水平挤出法剪切法的优点,用树体作为支持点,对整体浅层水平根系的斜向牵引效果进行了研究。其实验设备的优点是用位移表测出了剪切箱的平均位移,并且在牵拉过程中,应用拉力传感器将电信号传给电阻表,即可读到任一刻的电阻值,然后用公式可以算出加在土墩上的拉力、土墩剪破时的侧根牵引力和根际土层,但此方法仍然存在许多不足之处,如不能直接读出拉力值,并且不能对抗拉过程进行分析。

群根抗拉及固土能力研究成果表明,根系提高了坡面的稳定性。当斜坡上没有根系存在时,抗滑力主要由土壤颗粒的黏结力和滑动时产生的摩擦力。当有根系存在时,除上述抗滑力以外,根系的存

在增加了土壤的抗剪力, 因而增加了坡体的稳定系数。根据杨维西研究, 当无植物生长的斜坡稳定系数为 1 时, 有灌木生长的根系其稳定系数最大可以达到 1.5。根系的分布范围对土壤的抗剪强度具有明显的增强作用。这种增强作用, 随着深度增加而减小。根系对土壤抗剪强度的增加值与穿透剪切面的根截面有关, 呈线性关系。据王礼先研究, 虽然有些根系的深度可以达到几米甚至几十米, 然而在绝大多数的情况下, 根系的可及深度为 1~3 m。对土体固持作用的最大的密集分布层次为 60 cm, 一些浅层根系分布土层为 40 cm 以上。因此, 根系固土效果仅限于浅层滑坡。近几年, 周跃等<sup>[26]</sup>将根系固土作用分解为坡上水平根系的抗拉作用, 坡下水平根系的支撑作用, 并且建立了坡上水平根系的抗拉力估算模型。其研究表明云南松坡上水平根系的牵引效果使坡体抗拉力提高了 2 倍。

## 2.2 根系锚固试验研究

2000 年, 周跃等<sup>[27]</sup>借鉴了 Trukamoto, Kusakabe, Clark 的方法, 进行了云南松垂直根剪切试验。研究结果表明, 松树垂直根的确提高了根际土层的抗剪强度: 预测结果得到的强度增量平均为 2.80 MPa, 实测结果的增量为 0.87 MPa。该值使根际土层对水平向滑动的抵抗力提高了 37.8%。

日本学者执印康裕<sup>[18]</sup>采用 2 种方法进行了根系锚固试验。方法一是将立木或根桩用动力在原地拔出, 测定其抗拉力。得出树木的抗拉阻力  $P_0(t)$  与根基直径  $D$  (cm) 的关系为  $P_0 = a_0 D_0^b$ 。方法二是将根桩拔出之后, 对斜坡土层断面上露出的单根进行抗拉阻力测定。得出抗拉根系的直径与抗拉阻力的关系式:  $P_3 = a_3 D_3^b$ ,  $P_4 = a_4 D + b_4$ 。

## 2.3 根系—土壤复合体剪切试验研究

土体的抗剪强度可用经典的库仑 (Coulomb) 定律表示:  $\tau = C + \sigma \tan \varphi$ , 其中:  $\tau$  为抗剪强度,  $C$  为根含量。根系的固土护坡作用主要表现在其对土壤抗剪强度的影响上。林木根系对土壤抗剪强度产生的影响, 主要表现在<sup>[20,21]</sup>: ①根系在土壤中生长期, 对四周土体产生轴向压力 (高达 106 Pa), 使土壤的内聚力、剪胀力和摩擦力增加。②增加了根—土接触面积, 进一步增加了摩擦阻力。③根系本身的抗拉、抗剪和抗压缩力是土壤的许多倍。④根系在生长过程中分泌物有利于土壤颗粒的胶结。有林地土壤发生移动时, 在克服土体本身的内聚力和内摩擦力的同时, 还必须克服根系表面与土体间的摩擦力或根系的抗拉力, 这也是根系固土护坡的实质所在。

代全厚等<sup>[35]</sup>通过对嫩江大堤护坡植物根系抗剪强度的测定分析, 发现同一地段表土层土壤的抗剪强度大于底土层, 根量大, 其抗剪强度就大, 土体的抗剪强度与根量呈显著的正相关 ( $r=0.9814$ )。郝彤琦等<sup>[36]</sup>运用工程力学基本理论和土力学试验方法, 剖析植物根系在增强松软饱和滩涂土壤抗剪强度中的作用机制。研究表明, 复合体抗剪强度  $\tau$  与法向正压力  $\sigma$  的关系符合库仑定律, 且  $\tau$  随含根量  $C$  的增加而提高。同时提出土壤草根的作用与钢筋混凝土结构中的钢筋类似, 参照钢筋混凝土结构抗剪承载力公式, 总结出复合体单位面积上的受剪承载力与含根量之间的关系公式为  $\tau = \tau_0 + 0.14 M_r \times f_r$ 。公式中:  $\tau$  和  $\tau_0$  分别为含根土壤与无根土壤抗剪强度 (kPa),  $M_r$  为含根量,  $f_r$  为根 (茎、叶) 的抗拉强度 (kPa)。公式表明, 根系与土壤之间的摩擦力和凝聚力会提高土壤的抗剪强度。据解明曙<sup>[20,21]</sup>的研究, 林龄 6~10 a 的白榆根系提高土体抗剪强度为  $0.04 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ ; 10~19, 20~29, 30~40, >40 a 的白榆根系, 提高土体抗剪强度分别为 0.08, 0.13, 0.15,  $0.18 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

## 3 根系固土研究展望

目前, 根系固土的研究存在的主要问题是: ①根系形态问题。目前还缺乏更加合理可行的研究根系形态的方法, 没有好的能反映根系形态和生长的模型。②根系与土的界面作用特性直接决定了根土复合体的内部稳定性, 但目前对根系与土体间的摩擦特性的研究的文献非常少。③根系固土的量化评价工作还很不深入, 没有较好的方法对根系固土的效果进行定量的评价并指导树木根系固土的设计。同时, 根对边坡的稳定性的研究都是以单树单根为基础研究的, 缺乏群树群根对边坡的加固作用的研究。

针对以上问题, 今后根系固土机制研究的发展趋势是: ①在植物根系生物力学特性的研究上, 进行不同植物根系应力—应变关系的研究。②从根的形态出发, 寻找更加合理可行的研究根的形态的方

法,建立根系形态的动态生长模型;探讨根系的几何形态及其对强度参数的影响,结合微观力学和破坏力学的原理去分析摩擦型根土黏合键的破坏机制。③在根土接触面摩擦特性的研究上,开展不同树种、不同林龄根系与不同土体介质之间的摩擦特性研究。④探讨根系固土的时间尺度效应和根系的吸水效应及其与坡体应力场的耦合影响。⑤深入开展根土相互作用机理以及根系对岩土介质的加固作用的定量化研究,应用数值方法研究根土复合体边坡的应力场、位移场的变化及边坡的稳定性,并解决实际生产中的边坡造林中树种选择、造林密度等问题。⑥加强水土保持树种搭配的理论研究,从不同力学特性的根系相搭配,不同形态学特性的根系相搭配,垂直型根系与水平型根系以及须根型根系相搭配、群树群根的角度来研究根系固土护坡的功效。

#### 参考文献:

- [1] LEE I W Y. A review of vegetative slope stabilization [J]. *J Hong Kong Inst Eng*, 1985 (13): 9-21.
- [2] ZÁRUBA Q, MENCL V. *Landslides and Their Control* [M]. Amsterdam: Elsevier Science & Technology, 1982: 54-57.
- [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 Ltd, 1996: 1-300.
- [7] BISHOP D M, STEVENS M E. *Landslides on Logged Areas in Southeast Alaska* [R]. [s. l.]: Northern Forest Experiment Station, U. S. Forest Service, Research Paper NOR-1, 1964: 18.
- [8] ZIEMER R. R, SWANSTON D N. *Root Strength Changes After Logging in Southeast Alaska* [R]. Washington: Forest Service, U. S. Department of Agriculture, Research Note PNW-306, 1977: 1-10.
- [9] BURROUGHS E R J, THOMAS B R. *Declining Root Strength in Douglas-fir After Felling as a Factor in Slope Stability* [R]. Washington: Forest Service, U. S. Department of Agriculture, Research Paper INT-190, 1977: 27.
- [10] WALDRON L J. The shear resistance of root-permeated homogenous and stratified soil [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1977, **41**: 843-849.
- [11] WALDRON L J, DAKESSIAN S. Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root properties [J]. *Soil Sci*, 1981, **132** (6): 427-435.
- [12] WALDRON L J, DAKESSIAN S. Effect of grass, legume, and tree roots and soil shearing resistance [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1982, **46**: 894-899.
- [13] WALDRON L J, DAKESSIAN S, NEMSON J A. Shear resistance enhancement of 1.22-meter diameter soil cross sections by pine and alfalfa roots [J]. *Soil Sci Am J*, 1983, **47**: 9-14.
- [14] WU T H. *Investigation of Landslides on Prince of Wales Island, Alaska* [R]. Columbus: Department of Civil Engineering, Ohio State University, Geotechnical Engineering Report No. 5, 1976: 94-101.
- [15] WALDRON L J. The shear resistance of root-permeated homogenous and stratified soil [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1977, **41**: 843-849.
- [16] WU T H, BEAL P E, LAN C. In-situ shear test of soil-root systems [J]. *J Geotech Eng*, 1988, **114** (12): 1376-1394.
- [17] WU T H, MCOMBER R M, ERB R T, et al. Study of soil-root interaction [J]. *J Geotech Eng*, 1988, **114** (12): 1351-1375.
- [18] 李铁军, 李晓华. 植被固坡机制的研究[J]. 水土保持科技情报, 2004 (2): 1-3.
- [19] 林信辉. 中横崩塌地优势植物植生特性与其根力之研究[D]. 台北: 中兴大学, 1995.
- [20] 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.
- [21] 解明曙. 乔灌木根系固坡力学强度的有效范围与最佳组构方式[J]. 水土保持学报, 1990, **4** (1): 17-23.
- [22] 朱珊, 绍军义. 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.

- [23] 周跃, 张军, 林锦屏, 等. 西南地区松属侧根的长度特征对其防护林固土护坡作用的影响[J]. 生态学杂志, 2002, **21** (6): 1-4.
- [24] 周跃, 徐强, 络华松, 等. 乔木侧根对土体的斜向牵引效应研究( I )原理和数学模型[J]. 山地学报, 1999, **18** (1): 4-9.
- [25] 周跃, 徐强, 络华松, 等. 乔木侧根对土体的斜向牵引效应研究( II )野外直测[J]. 山地学报, 1999, **18** (1): 10-15.
- [26] 周跃, 陈晓平, 李玉辉, 等. 云南松侧根对浅层土体的水平牵引效应的初步研究[J]. 植物生态学报, 1999, **23** (5): 458-465.
- [27] 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): 110-113.
- [28] 谢春华, 关文彬, 张东升, 等. 长江上游暗针叶林生态系统主要树种的根系结构与土体稳定性研究[J]. 水土保持学报, 2002, **16** (2): 76-79.
- [29] 朱清科, 陈丽华, 张东升, 等. 贡嘎山森林生态系统根系固土力学机制研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, **24** (4): 64-67.
- [30] 封金财, 王建华. 植物根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.
- [31] 陈丽华, 余新晓, 张东升. 整株林木垂向抗拉试验研究[J]. 资源科学, 2004, **26** (增刊): 39-43.
- [32] 赵廷宁, 王玉杰, 解明曙, 等. 林木根系的抽拉过程及抗抽拉力[M]//贺庆棠, 远藤泰造. 中国黄土高原治山技术培训项目合作研究论文集, 北京: 中国林业出版社, 1994: 198-203.
- [33] 孙立达, 朱金兆. 水土保持林体系综合效益研究与评价[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- [34] 杨维西, 赵廷宁, 李生智, 等. 人工刺槐林采伐后根系固土作用的衰退状况[J]. 水土保持学报, 1990, **4** (1): 6-10.
- [35] 代全厚, 张力, 刘艳军, 等. 嫩江大堤植物根系固土护堤功能研究[J]. 水土保持通报, 1998, **18** (6): 8-11.
- [36] 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]. 南京农业大学学报, 2000, **21** (4): 78-80.

## 浙江林学院组织专家参加送科技下乡活动

2008年3月28日, 浙江林学院科技处组织专家参加了在建德市举行的“百项技术千名干部进万村送科技下乡活动”。

在此次活动中, 专家带去了经济林培育、森林生态、森林保护、药用植物开发、木材加工、数字林业等 100 多项林业实用技术, 以指导和帮助建德市林业雨雪冰冻灾害后的重建。科技下乡活动现场气氛热烈, 学校专家为前来咨询的林农详细解答, 发放相关资料, 受到林农的热烈欢迎。