

植物根系力学与固土作用机理研究综述

程洪¹, 谢涛², 唐春¹, 李凤¹

(1. 南昌工程学院 环境工程系, 江西 南昌 330029; 2. 南昌工程学院 水利土木工程系, 江西 南昌 330029)

摘要: 在总结国内外近 20 a 来关于植物根系的固土护坡作用研究基础上, 从根系提高土壤抗冲性研究方面、植物根系力学研究方面、植物根系固土作用机理研究及其应用前景和展望等方面作了综述, 明确了今后要加强对植物根系材料力学特性和根土复合体形成及作用机制方面的研究, 更重要的是从根—土微观机制上进行深入研究, 以便能揭示其本质。为植物在工程绿化、边坡稳定、生态恢复和水土保持等方面的应用提供理论指导, 为我国迅速发展的城市化、生态化进程服务。

关键词: 植物根系; 土壤; 固土护坡; 材料力学; 根土复合体

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2006)01—0097—06

中图分类号: S157.433

Overview of Mechanism of Plant Roots Improving Soil Reinforcement and Slope Stabilization

CHENG Hong¹, XIE Tao², TANG Chun¹, LI Feng¹

(1. Department of Environment, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330029, Jiangxi Province, China;

2. Department of Civil and Water Conservancy, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330029, Jiangxi Province, China)

Abstract: Plant root system plays important roles in soil stabilization and control of soil and water loss. Based on some recent information about it, an overview was taken on root anti-scourability, root materials mechanics and soil reinforcement mechanism in form of a root-soil composite, as well as its application and prospect, etc. Finally, further research in the respect is urgently needed in order to best serve our country vegetation restoration during the ecological environmental management and construction.

Keywords: plant root system; soil; slope stabilization; mechanics of material; root and soil composite

生物软措施——植物措施遏制水土流失已广泛应用, 但有关研究多偏重地上部对土壤侵蚀的防护效应, 涉及根系的研究自 20 世纪 90 年代以来成为国际生态界有关土壤与植物相互作用动态研究的重点课题, 并成为水土保持学科研究的前沿^[1-2]。近 20 a 来植物根系提高土壤抗侵蚀机制研究一直是一个比较活跃的领域, 并取得了可喜的成就。国内外这方面的研究情况可作如下几个方面进行综述。

1 植物根系提高土壤抗冲性研究方面

以李勇^[2]、刘国彬^[3]等为代表的在我国黄土高原区进行的试验研究表明, 有效根密度对 > 5 mm, $5 \sim 2$ mm 水稳性团粒的含量及非毛管孔隙度是提高稳定土层结构, 强化土壤渗透力的重要机理, 植被在恢复和演替过程中土壤抗冲得到了强化, 土壤腐殖质、水稳性团聚体数量和质量、土壤入渗能力、土壤抗剪强度均得到提高, 以及坡地退耕后, 每年可提高

$K_{10}0.04$ mm。李勇等 1998^[4]年在南方紫色土区对 3 ~ 9 a 人工刺槐林改善紫色土结构的作用进行定量分析研究, 进一步证实了有效根系密度对土壤结构改善作用最大, 对水稳性团粒改善最为明显, 对土壤结构的改善有稳定作用, 并被其它研究已证实^[5-7], 因此, 有关植物根系提高土壤抗冲性, 强化土壤渗透力, 稳定土壤结构等方面的作用无容置疑。

2 植物根系力学研究方面

目前, 国内外关于植物林草根系力学特性研究有一些资料报道, 但缺乏系统性、数据库不健全。而这方面的基础数据又很重要, 一是在人们的科普知识方面需要不断增添这方面的资料以满足人们对植物的全面了解和认识。二是在城市化迅速发展的今天, 由于大量基础建设工程项目的兴建, 造成了大量裸露边坡, 浆砌石块水泥景观急需植被化、生态化, 特别急需“植被软措施”代替和部分代替“硬性工程措施”以降

低成本同时又施工便利,作用不减,且有生态调节作用。因此,工程界人士急需这方面的研究资料,采用植物方法加固边坡已成为一种必然趋势。如果加强这方面的研究将获得大量的基础资料数据,必然极大促进工程项目的绿化和生态进程,也减少了工程项目的盲目性,提高效益,减少浪费,有利于生态化。植被防护工程边坡的基础之一,就是我们要了解和明确植物根系力学性质及其加固土壤的机制。植物根系加固边坡达到一种什么程度,在工程上能保证工程的安全性,与此同时又具有生态调节作用,这方面的研究无疑是我国当前植物学、水土保持学、工程学、生态学等交叉领域的新课题。

2.1 国外研究情况

据国外资料^[8]仅有少数树根力学的研究报告,如柳树 9~36 MPa,杨树 5~38 MPa,桉树 4~74 MPa,黄杉 19~6 MPa,银槭 15~30 MPa,西铁杉 27 MPa,越橘 10 MPa,大麦 15~37 MPa,地衣仅 2~7 MPa,禾草非禾本科草 2~20 MPa,香根草 40~180 MPa。但是由于树木根系统研究比较困难,这方面数据不容易获得^[9]。

在根系对斜坡稳定机制研究方面,Green Way 1987 年总结植物根系对大多数斜坡有净稳定作用,过去 30 a 时间里对树木根系作用模型有很多研究。Green & Leiser 1982 年认为在理想条件下垂直根伸展到滑动浅层的斜坡中起稳定作用。

Waldron 1977^[10], Wu 1977, Brenner & James 1977 提出数学模型,考虑到可变情况,弹塑性及延伸性,根系对土壤抗剪强度增加值

$$S_r = T_r(A_r/A)(\cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi)$$

式中: T_r ——植物根系平均抗拉强度; A_r/A ——土壤横截面中根系面积比; α ——内摩擦角; ϕ ——拉动的剪切角。

早在 1969 年 Endo and Tsuruta 通过原位直剪试验得到剪切力与树根群体密度的线性方程

$$S_r = \text{剪切力阻力增加值} = a(R + b)$$

式中: R ——土壤中根密度; a, b ——经验常数。

Ferraiolo 1999^[9]概述了植被对斜坡的稳定作用,包括水力学机制和机械力学机制,木本植物根系通过侧根、须根、缠绕加固土壤形成紧密层,垂直根锚固斜坡土壤增加滑动阻力,根系通过网络作用增加土壤受胁迫条件下的抗剪阻力。另一显著作用是增加粗糙度在抵抗变形时而不失去抗拉力。

Wu et al 1999^[11]对剪应力模型分析,一定单位面积对应的根剪应力 S_r 表示为

$$S_r = T(\cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi) \quad (1)$$

式中: T ——根系抗剪强度; α ——根的倾角; ϕ ——摩擦角。因此,评价 S_r 时需评价 T 和 α 值。
最大拉力

$$T_{uf} = f \cdot A_r \quad (2)$$

式中: f ——抗拉强度; A_r ——根的横截面积。该公式模型适用于根土交接面。 $T <$ 剪切阻力,用 Waldron and Dakesian(1981) 表达式

$$T_{u.s} = [C_i + \tan \alpha_i] DL_e \quad (3)$$

式中: C_i, α_i ——界面强度参数; α ——正常力; D ——直径; L_e ——根长度。拉力与 D, L_e 成线性的关系。

对土壤交互影响方面的模型 Wu et al 1999 作了评述如下。

(1) 简单剪切模型。指在一定剪切厚度 h , 根系随土变形, 评价为位移 y 和高度 h 的形成的角度。在 $48^\circ < \alpha < 72^\circ$, $\alpha = 35^\circ$ 时, S_r 可简化成

$$S_r = 1.2 T_u \quad (4)$$

该模型适用于土壤滑动层位于紧密层之上,根系锚固作用的条件下(Wu et al 1979, Riestenberg and sovonic Dunford 1983)。

(2) 锁链线形模型。在水平方向的拉力 $<$ 土壤阻力 P_p 时,剪切区有一定厚度。

$$T_{yp} = P_p \times D \times L \quad (5)$$

(3) 弹塑作用模型。根系作为一种弹塑材料丛(Jewell and Petley 1992), 计算根拉伸作用下的最大阈值可通过有限元方法(The finite element Method) 计算(EL - Khnouly, 1995)。表达式为

$$\{q\} = [c]\{u\} \quad (6)$$

式中: $\{q\}$ ——剪应力; $[c]$ ——剪切分量; $\{u\}$ ——剪切位层。利用 FEM 方法可以分析计算根的分支和不规则的形态根的影响。

一些拔拉试验表明根的分布对断裂位置产生影响, Riestenberg 1994 用带有较多分支的 Sugar maple (*Acer saccharum*) 进行拔拉表明其最大荷载位于 10 cm 深度, 这远远比理论计算的要浅的多。用带少量分支的主根型种类 white ash (*frainus Americana*) 计算在 3 cm 突然断裂, 这与计算十分接近。

Wu, 1977 年在 sitka spruce, western hemlock (*Tsuga heterophylla*), Alaska yellow cedar (*chamacy paris mootkatensis*) 试验表明在 7 cm 深产生剪应力。Wu 1999 认为 3~10 cm 处根的形态分布承担剪应力。Nilaweera 1994 由带主根的几个种类进行试验, 根系整个被拔出, 与 Wu 1979 年结果一致。表明荷载点在一定距离的位置上。但是试验情况是最终荷

载比理论计算值要小的多。Wu 1999 建议用 T_{us} 为判断值下限, T_{uf} 为上限, $C_i = c$, $i =$, 并运用到活茎的生物质结构中。

一些原位剪切试验与室内直剪表明根的形态结构对断裂面也产生影响。Wu et al, 1998 年对带根的土区进行原位剪切, 具有水平根、心形根的植物如 Monterey pine (*Pinus radiata*) 在 40 cm 处受力挤压, $> 90^\circ$ 拉动时没有断裂, 用线形模型计算根作用力接近 $1/3$ 抗拉强度 T_{uf} 。Abe and Iwamoto 1988 年测定 S_r 的值与计算值比较^[12], 计算值 $>$ 实测值。Nilaweern 1994 原位剪切试验发现带大根的种类, 主根全部被剪切断裂, 计算值大于最小估算值 S_r , 剪切发生在主根是可能的。Wu et al, 1999 年对不同剪切深度的安全因素比较发现

$$F = (S_r + C + r \times z_0 \cos \tan) / (r z_0 \cos \sin) \quad (7)$$

式中: z_0 ——饱和面的剪切深度; C , ——剪切参数; ——斜坡倾角; 安全因素 F 依赖于根的形态结构, 最低安全因素深度为 2 m 处 F 为 1.1 (根面积为 0), 在 0.5 m 处植物 *hibisuis*, *kunzea pinus*, *radiata* 分别为 3.3, 2.2, 2.0, 而在 1.0 m 处 F 分别为 1.6, 1.4, 1.3。关键深度不仅取决于浸润饱和面的最长的距离, 而且与根系密度也有关系, 比较 8 a 生, 32 a 生的 *pinus radiata* 植物生长率也对此产生影响。综上所述, 从国外相关研究来看, 无论是根系提高土壤抗剪强度, 还是从剪应力理论模型, 土壤交互模型以及植物提高斜坡稳定安全因素的评判方面都是以根剪阻力 S_r 为基础的, 而 S_r 计算依赖于根系抗拉强度或平均抗拉强度数据的获得。

2.2 国内研究状况

国内关于植物根系力学的研究是始于 20 世纪 80 年代末, 主要通过拔拉试验, 原位剪切试验和根系抗拉试验完成。有关研究情况和植物种类根系力学特性总结如下方面。

2.2.1 植物根系力学特性 植物根系力学特性是通过根系的抗拉试验、剪切试验和拉拔试验等获得的, 总的情况见表 1。

2.2.2 植物根系增加土体抗剪强度, 植物根系具有“加筋作用”研究 代全厚等 1998 试验表明牛毛草地抗剪强 0.163 kg/cm^2 ^[16], 天然草地 0.119 kg/cm^2 , 比农地 0.058 kg/cm^2 高。杨亚川等 1996 节节草上试验 d 为 0.6 mm 的根抗剪强度达 22.32 MPa 为 1 级钢筋抗拉强度 $1/10$ ^[15], 产生显著的根系“加筋作用”。史敏华等 1994 对林木根系抗拉试验满足幂函

数关系 $T_r = AD^B$ ^[14], 林木对土壤固结力大小决定于根系分布特征、根径、根的抗拉等因素, 认为根的抗拉力是衡量水土保持树种的一个重要指标。

封金财等 2003^[21] 认为土壤抗剪强度的提高值 s 完全依赖于根的平均抗拉强度 T_r 和根的面积比 (A_r/A) 。通过对茅草根 ($L = 4.9 \text{ cm}$, $D = 1.75 \text{ mm}$) 室内测定应力应变关系曲线, 根纤维 22 根的土体是对照 (无根) 土体 2 倍, 根的存在大大提高了浅土层 ($H < 1 \text{ m}$) 的稳定性, 但深度 $> 1 \text{ m}$ 时, 根的加筋作用逐渐减弱。

范兴科、蒋定生 1997 认为土壤抗剪强与土壤物理因素有关, 土壤抗剪强度的增加归结为植物根系存在的结果。根系在土壤中穿插能明显增大土壤的剪切强度, 其中草本植物根系密度大, 须根多, 单位须根密度的剪切强度增加值是树木根系的 2~3 倍。程洪 2002 年在香根草等暖性草本植物根系的抗拉试验表明, 香根草根系平均抗拉强度达 85 MPa, 相当于普通钢抗拉强度的 $1/6$, 香根草根径与抗拉强度关系满足幂函数关系 $P = 47.957D^{-0.9935}$ 。

国内对植物根系受力作用下的变化也有所研究。刘国彬等 1996^[2] 报道沙打旺、无芒雀麦应力—应变为对数函数关系, 应变递增快, 不符合胡克定律 (具有弹塑性材料)。长芒草、狗芽根、胡枝子、茵陈蒿遵从胡克定律 (弹性材料)。

朱清科等 2002^[17] 研究表明峨眉冷杉, 冬瓜杨根系受拉过程中为典型弹性断裂, 杜鹃根系由于存在生理节理表现为节理处断裂 (脆性断裂)。

这说明不同植物根系材料力学特征是有差异的, 因此需要从遗传学、解剖学、组织学并结合根系发育的环境状况探求乔灌草根系力学性质。

2.2.3 植物根系锚固力作用研究 植物根系除了能提高土壤的抗冲性, 抗剪性, 具有加筋作用外, 还具有锚固力作用。杨亚川等 1996 对节节草根土复合体研究表明, 当复合体的体积密度含水量一定时, 抗剪强度指标的 C 值与含根量正相关, 与根量关系不大, 原因是根含量增加时, 根系的锚固力显著增大, 根系锚固力是 C 值的重要组成部分。 C 是土粒与土粒, 土粒与根系之间的凝聚力, 以及由土的剪切应力传递给根系而引起的根系抗拔力之和 (16~60 kPa)。封金财等 2004^[21] 认为根纤维提高土的抗剪强度主要是通过根土接触面的摩擦力, 把土中的剪应力转换成根的拉应力来实现的。土的抗剪强度提高值 s 完全依赖于根的平均抗拉强度 T_r 和根的面积比 (A_r/A) 这与 Wu, 1999, Waldron, 1977 的结论一致。

表 1 植物根系力学及作用的研究情况

植 物	试验建立的抗拉力评判方程	直 径	抗拉或抗剪强度	文 献
白 榆	根系提高土体抗剪强度值			解明曙 1988 ^[13]
荆 条	$T_r = 4.5379D^{1.5755}$			史敏华等 1994 ^[14]
虎榛子	$T_r = 1.8815D^{1.8566}$			
黄荆梅	$T_r = 2.9292D^{1.9255}$			
山 杏	$T_r = 3.0353D^{1.8983}$			
山 桃	$T_r = 6.0768D^{1.1267}$			
黄牙刺	$T_r = 4.4310D^{1.7370}$			
连 翘	$T_r = 2.2015D^{1.7506}$			
油 松	$T_r = 1.5058D^{1.9063}$			
沙打旺	$T_r = 0.3936e^{2.9592D}$	0.1 ~ 1.3 mm		刘国彬等 1996 ^[12]
紫花苜蓿	$T_r = 8.9507D^{1.5803}$	0.1 ~ 1.0 mm		
胡枝子	$T_r = 0.6160e^{4.545D}$	0.2 ~ 0.7 mm		
无芒雀麦	$T_r = 0.1114e^{12.88D}$	0.1 ~ 0.3 mm		
长芒草	$T_r = 1.4476e^{4.2858D}$	0.1 ~ 0.4 mm		
狗尾草	$T_r = 0.1645e^{9.913D}$	0.1 ~ 0.4 mm		
谷 子	$T_r = 12.976D^{-1.015}$	0.1 ~ 1.0 mm		
茵陈蒿	$T_r = 4.1989D^{+0.1667}$	0.2 ~ 0.9 mm		
芨 蒿	$T_r = 0.5532e^{2.1955D}$	0.3 ~ 0.7 mm		
铁杆蒿	$T_r = 0.1880e^{6.639D}$	0.2 ~ 0.5 mm		
绵 蓬	$T_r = 0.0629e^{9.729D}$	0.1 ~ 0.6 mm		
节节草		0.6 mm	22.32 MPa (抗拉强度)	杨亚川等 1996 ^[15]
牛毛草			0 ~ 10 cm 0.163 (抗剪强度)	
			10 ~ 40 cm 0.108 (抗剪强度)	代全厚等 1998 ^[16]
天然杂草			0 ~ 10 cm 0.1905 (抗剪强度)	
			10 ~ 40 cm 0.0627 (抗剪强度)	
冬瓜杨	$T_r = 1.6880D^{1.5418}$			朱清科等 2002 ^[17]
峨眉冷杉	$T_r = 0.4030D^{2.3626}$			陈丽华等 2004 ^[18]
冷 杉			整株拔拉力 150 kg	垂向(侧向垂直根系发达)
杜 鹃			整株垂向拔拉力 170 kg	(水平根发达)
冬瓜杨			整株垂向拔拉力 176 kg	(垂直根发达)
青冈属			10 ~ 40 MPa	周跃等 2001 ^[19]
松 属			5 ~ 30 MPa	
沙 草			24.5 ± 4.2 MPa	程洪 2002 ^[20]
宜安草			19.74 ± 3.00 MPa	
白三叶			24.64 ± 3.36 MPa	
香根草	$T_r = 47.9570D^{-0.9935}$		85.10 ± 31.2 MPa	
假俭草			27.3 ± 1.74 MPa	
百喜草			19.23 ± 3.59 MPa	
马尼拉			17.55 ± 2.85 MPa	
狗芽根			17.45 ± 2.18 MPa	
茅草根				封金财 2003 ^[21]

从以上数据资料可看出对植物根系力学特性的研究正越来越引起研究者关心,有关植物根系的固土特性和机理的研究正吸引众多研究者投身到这一热点问题,从植被生态恢复角度,从植物学、工程力学及水保学角度汇集到这一交叉点上。但是国内外关于

植物根系固土的力学特性研究上,还有待深入,仍然还有许多种类的植物根系尚待进行深入研究。并需要逐步建立这方面的数据库,完善植物科学的基本知识,以及为植物在工程中绿化、边坡稳定、生态恢复和水土保持等方面的应用提供理论指导。

3 植物根系固土作用机理研究

Ferraiolo 1999^[9]概述了植被对斜坡稳定作用机制和机械力学机制,数学模型上根系加固土壤抗拉阻力转变成剪应力的增加值

$$S = T_r(A_r/A)(\cos \tan + \sin)$$

式中: T_r ——根系平均抗拉强度; A_r/A ——单位土壤横截面根系面积; ——内摩擦角; ——倾角。

刘国彬 1996 在研究草本植物根系固结土壤^[2],根系缠绕、固结土壤、强化抗冲性作用有 3 种方式:网络串连作用、根土黏结作用及根系生物化学作用。根系化学作用效应通过植物繁生改善土体构型来实现。黄绵土中其效应达 51%,根土黏结作用是网络串连作用的 2 倍,二者都随有效根面积增加而增加。

程洪 2003^[23-24]提出植物根系固土机制模式具有 4 个层次,即根系材料力学、根系网络串连作用、根系—土壤有机复合体的黏结作用及根系—土壤间生物化学作用。认为植物根系与土粒接触面上产生的胶结物质,通过土体中多价阳离子 Ca^{2+} , Fe^{2+} , Al^{3+} 形成的阳离子桥,多糖—OH, H 键及范德华力等有机胶体、无机胶体作用,共同构成根系—土壤有机复合体系。但这方面有待进一步研究证实。

国内外植物根系的固土机理研究尚处于前期研究,各方面有待深入。仅仅从作用力方面或抗冲性提高、抗剪性提高、锚固力提高进行研究,离揭示根系固土的本质还存在距离,因为根系与土的相互作用和关键机制没有被揭示。杨亚川 1996 年提出了“土—根复合体”的概念,但从工程力学角度揭示不了这种复合体的实质^[15]。根系具有加筋作用,并不等于真正的钢筋,根系在土壤中进行生长发育属于活性材料,同时根与土粒之间形成统一体。根土之间实现完整的结合,其界面形成有机—无机复合体之后,才能进行水分运输、物质转移,形成土壤—植物—大气连续体。所以今后要加强对植物根系材料力学特性和根土复合体形成的机制的研究,更重要的是从根—土微观机制上进行研究,才能揭示出其固土本质。

如果以草本植物根系为研究对象,是否更能反应根系固土的实质?因为一方面,草本植物根系大都以须根为主, $d < 1 \text{ mm}$ 比率高(乔木 d 更大),抗冲性强,根系材料力学特性好,如根系抗拉强度,固土护坡作用显著;另一方面,研究方法简便、容易实现目标。

4 该方面研究的意义和应用前景

植物根系稳定土壤结构方面的研究是一个崭新的领域,通过多学科、多领域联合攻关深入系统研究

植物根系稳定土壤、防治土壤侵蚀必将为我国生态环境恢复与重建,实现可持续发展战略发挥重要作用。这也是水土保持及荒漠化防治理论深入发展的需要。

植物根系固土机制或模式问题的解决,有助于揭示植被措施防治水土流失基础关键问题的解决,这对我国实施生态环境战略目标的完成和实现都具有重要积极的意义,不仅促进小流域治理、植被生态的自然修复和人工生态工程的实施,而且有助于沙漠化、荒漠化等严重生态问题的解决,对我国迅速发展城市化过程中大量基础建设遗留下来的工程边坡、弃石土场及尾矿等人工生态恢复和生态化进程,也同样具有重要理论指导作用。

[参 考 文 献]

- [1] 马世骏. 展望 90 年代的生态学[J]. 中国科学院院刊, 1990, 5(1): 29—32.
- [2] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟, 等. 黄土高原植物根系强化土壤渗透力的有效性[J]. 科学通报, 1992(4): 366—369.
- [3] 刘国彬, 蒋定生, 朱显谟. 黄土区草地根系生物力学特性研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996(3): 21—28.
- [4] 李勇, 武淑霞, 夏侯国风. 紫色土区刺槐林根系对土壤结构的稳定作用[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(2): 1—7.
- [5] 吴彦, 刘世全, 王金锡. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J]. 应用与环境生物学报, 1997, 2(2): 119—124.
- [6] 张金池, 康立新, 卢义山, 等. 苏北海堤林带树木根系固土功能研究[J]. 水土保持学报, 1994, 8(2): 43—55.
- [7] 曾信波. 贵州紫色土上植物根系提高土壤抗冲性能的研究[J]. 贵州农学院学报, 1995, 14(2): 20—24.
- [8] Diti Hengchaovanich. 15 years of bioengineering in the wet tropics from A (acacia auriculiformis) to V (vetiveria zizanioides) [C]. Proceedings of the First Asia Pacific Conference on Ground and Water. Bioengineering Erosion Control and Slope Stabilization, 1999. 54—63.
- [9] Dr. ing. Fransesco, Ferraiolo. Application of inert materials in bioengineering [C]. Proceedings of the First Asia Pacific Conference on Ground and Water. Bioengineering Erosion Control and Slope Stabilization, 1999. 18—53.
- [10] Waldrom L J. The shear resistance of root permeated Homogeneous and stratified [J]. Soil Science Society of American Proceedings. 1991. 843—849.
- [11] Tien H Wu, Alex Watson, Mohamed A, El - khoully. Soil—root interaction and slope stability [C]. Proceedings of the First Asia Pacific Conference on Ground and Water. Bioengineering Erosion Control and Slope Stabilization, 1999. 514—521.
- [12] Abe K, Iwamoto, M. Preliminary experiment on shear in soil layers with a large direct - shear apparatus [J]. Jape-

- nese Forestry Soc, 1998, 68(2): 61—65.
- [13] 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.
- [14] 史敏华, 王棣, 李任敏. 石灰岩土主要水保灌木根系分布特征与根抗拉力研究初报[J]. 山西林业科技, 1994(1): 17—19.
- [15] 杨亚川, 莫永京, 等. 土壤—草本植物根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度试验研究[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(2): 31—38.
- [16] 代全厚, 张力, 等. 嫩江大堤植物根系固土护坡功能研究[J]. 水土保持通报, 1998, 18(6): 8—11.
- [17] 朱清科, 陈丽华, 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(4): 64—67.
- [18] 陈丽华, 余新晓, 张东升. 整株林木垂向拔拉试验研究[J]. 资源科学, 2004(1): 39—43.
- [19] 周跃, 张军, 等. 松属、青冈属乔木侧根的力量在防护林固土作用中的意义[J]. 植物生态学报, 2001, 25(1): 105—109.
- [20] 程洪, 张新全. 草本植物根系网固土原理的力学实验探究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(5): 20—23.
- [21] 封金财, 王建华. 植物根系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.
- [22] 封金财, 王建华. 乔木根系固坡作用机理的研究进展[J]. 铁道建筑, 2004(3): 29—31.
- [23] Hong Cheng, Xiaojie Yang, et al. A study on the performance and mechanism of soil-reinforcement by Herb root system[C]. Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition Vetiver and Water. An eco-technology for water quality improvement. Land stabilization and environmental enhancement. 2003. 403—410.
- [24] Cheng Hong, Liu Aiping. Comparison of root strength of different plant species. Water-saving Agriculture and sustainable use of water land Resources[C]. Vol. . Proceedings of International Conference on Water-saving. Agriculture and Sustainable Use of Water and Land Resources. Edited by Shaozhong Kang et al, Shaanxi Sci and Tech Press. 2003. 149—152.
- [25] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀机理研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 34—37.

(上接第 79 页)

- [7] Walling D E, Quine T A. Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion data[J]. Land Degradation and Rehabilitation, 1990. 161—175.
- [8] Walling D E, He Q. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements[J]. Environmental Quality, 1999, 28: 611—622.
- [9] He Q, Walling D E. Interpreting the particle size effect in the adsorption of ^{137}Cs unsupported ^{210}Pb by mineral soil and sediments[J]. Environ. Radioact. 1996, 30: 117—137.
- [10] Zhang X B, Walling D E, He Q. Simplified mass balance models for assessing soil erosion rates on cultivated land using Caesium-137 measurements [J]. Hydrological Science, 1999, 44(1): 33—45.
- [11] 杨浩, 等. 基于 ^{137}Cs 地表富集作用的土壤侵蚀速率的定量模型[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999(3): 42—48.
- [12] Elliott G L, Campbell B L, Loughran R J. Correlation of erosion measurements and soil Caesium-137 and erosion rate[J]. Environmental Quality, 1984, 3(2): 301—304.
- [13] Loughran R C, Campbell B L. The identification of catchment sediment sources. In Foster I D L, Gurnell A M, Webb (Eds.) B W. Sediment and water quality in river catchments[M]. Chichester: Wiley 1995. 189—205.
- [14] Zhang X B, Higgitt D L, Walling D E. A preliminary assessment of the potential for using caesium-137 to estimate rates of soil erosion in the Loess Plateau of China. Hydrological Science[J]. 1990, 35: 267—277.
- [15] Pegoyev A N, Fridman Sh D. Vertical profiles of cesium-137 in soils (English translation) [J]. Pochvove deniye, 1978, 8: 77—81.
- [16] 周维芝. ^{137}Cs 法研究不同地貌类型土壤侵蚀强度分异[C]. 成都: 中国科学院西北水土保持研究所, 1996.