

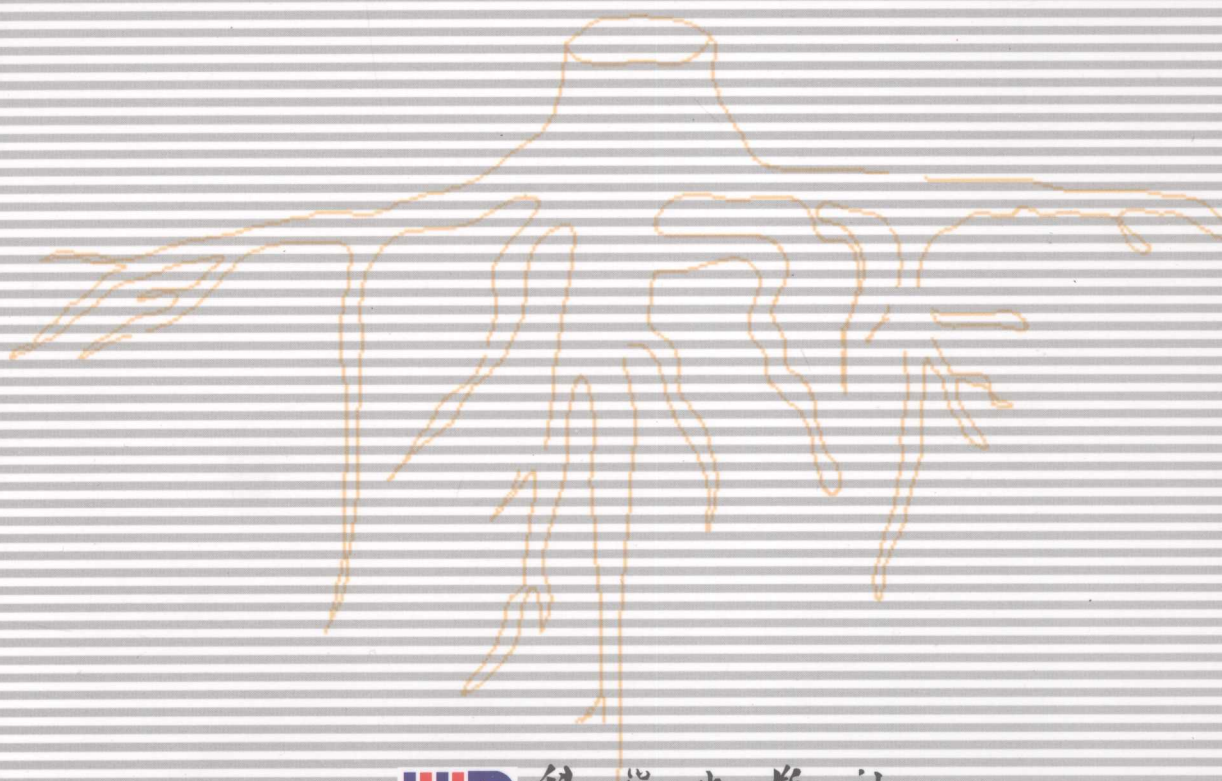
**Mechanics of
Root-Soil**

林木根系固土力学机制



陈丽华 余新晓 著
宋维峰 刘秀萍

著



科学出版社
www.sciencep.com

林木根系固土力学机制

陈丽华 余新晓 著
宋维峰 刘秀萍

国家自然科学基金项目(30571531)

国家重点基础研究发展计划项目(2002CB111502)

资助出版

科学出版社

北京

内 容 简 介

植物根系固土是近年来多学科交叉研究的热点问题,受到广泛关注。本书基于弹塑性力学、土力学、水土保持学、森林生态学、数学等原理和方法,采用野外实验与室内实验相结合、实验测定与理论分析相结合的技术路线,通过调查分析我国黄土高原地区主要造林树种——刺槐、油松的根系形态分布规律,构建了这两个树种根系形态分布模型;在研究油松根系应力应变关系的基础上,建立了油松根系的本构模型;通过对刺槐、油松根系与黄土接触面单元摩阻特性的实验研究,揭示了影响根土接触面摩阻特性的因素,确定了接触面单元的本构模型;采用三轴实验,分析了水平、垂直、复合加根方式对根-土复合体应力应变的影响;运用有限元方法,模拟了根-土复合体的位移场、应力场,分析了单株造林和群株群根对土体应力、应变的影响;揭示了根土相互物理作用的机制,为评估根系对非饱和土土坡稳定性的影响和进行边坡治理提供一定的理论依据。

本书可作为科研院所林学、水土保持等专业研究生教材,也可作为从事林业、水土保持、生态、环境等方面研究的专业技术人员、科研人员和本科生的主要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

林木根系固土力学机制/陈丽华等著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-020391-5

I. 林… II. 陈… III. 林木-根系-应用-边坡稳定-土力学-研究

IV. S714.7 TU413.6, 2

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第028311号

责任编辑:赵 峰 沈晓晶 / 责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2008年3月第一次印刷 印张:9 3/4

印数:1—1 500 字数:231 000

定价:45.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

序

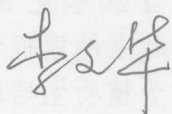
森林作为陆地生态系统的主体,在物质生产、维系生态系统的有序结构及环境保护中的作用日益被人们所认识和重视,因此,森林与土壤相互作用研究自 20 世纪 90 年代以来成为国际关注的焦点之一。随着研究的深入,人们越来越重视作为森林生态系统的重要组成部分——林木根系的研究。根系作为植物主要器官之一,在其生长发育和生理活动中,发挥着支撑地上部分、吸收土壤水分和养分、储存物质和能量等功能。但由于植物根系纷繁复杂,处于不易观察的地下,工作难度很大,且经常需要采用破坏性的采样方法等原因,限制了人们对植物根系的深入系统研究。目前,对林木根系的研究主要集中在根系的形态和数量,改善土壤物理、生物化学特性的有效性研究方面,其中包括根系调查的手段、设备、统计模型等方法研究,根系形态的分类与动态模拟研究,根系生物量研究,根系与周边土壤环境(像土壤温度、碳分配、土壤微生物等)的相互作用研究,而从力学角度进行林木根系固土作用的研究目前还很少。

林木根系的一个很主要的生态功能就是固持土体。它包括增强土壤抗冲能力,防止层状面蚀,稳定斜坡,防止重力侵蚀和防止河岸、库岸的冲淘等作用。灌木的毛根密度大且集中在土体上部,通过与土壤盘结紧密,大大增强了土壤的抗冲性,对于防止表层侵蚀具有重要意义;乔木根系发达、树与树之间的根系纵横交错,粗壮根系网络构成了地下坚固的“钢筋”网,具有很大的固土固坡作用。从机制上搞清林木根系固土作用的特征和本质,特别是从工程力学的角度进行研究,这无疑具有很大的理论意义和实用意义。

该书作者对于所写内容进行了认真、细致、深入地研究,通过大量的野外观测和室内试验,系统研究了黄土高原地区主要造林树种刺槐、油松的根系形态分布规律,构建了这两个树种的根系形态分布模型;通过根系拉伸试验,研究了根系应力应变关系,建立了根系的本构模型;通过根系与黄土接触面直剪试验,揭示了影响根土接触面摩阻特性的因素,确定了根土接触面单元的本构模型;综合分析了含根方式、根径、围压、土壤含水量和土壤干密度对根土复合体应力应变关系的影响;运用有限元等数学方法,模拟了根土复合体的应力场、位移场,分析了造林密度、树种、边坡形态和降雨等对边坡稳定性的影响。可以预测,该书的内容和结果对于黄土高原的土壤侵蚀防治、边坡治理和造林优化设计具有非常重要的意义。

该书是作者进行林木根系固土作用研究所获成果的系统归纳和总结，资料翔实、观点明确、针对性强，具有很高的学术水平，是一部理论与实践紧密结合的科技论著，它的出版能对我国水土流失的防治和生态、环境的建设提供很好的帮助。另外，需要强调的是作者的研究态度和作风无疑是非常严谨和踏实的，这也是非常难能可贵的，并因此使该书具有可信的参考价值。

中国工程院院士



2007年9月

前 言

严重的水土流失将导致耕地减少,土地退化,沙尘暴频繁发生,泥沙淤积,生态、环境恶化,危及国土和国家的生态安全,给国民经济发展和人民群众生活带来严重危害。长期以来的科学和实践证实,植被永远是防止水土流失最积极的因素,植被具有改善生态、环境,减少水土流失,涵养水源,固土固坡等其他工程措施所不具有的作用,是一种经济、环保的防治方法与措施,具有不可替代的重要作用。林木根系的生长和形态分布极其复杂,树种不同,其根系形态分布特征不同;立地条件不同,根系的强度特征和固土作用不同。通过根系固土力学机制的研究,探索根系形态、根系的抗拉能力、根土作用面的摩阻特性以及根土复合体的本构关系,从而定量研究根土复合体的应力场、位移场和边坡的变形稳定问题,是本书的目的所在。

本书主要包括以下几方面的内容:首先是基础性研究准备工作,在归纳、整理的基础上建立了林木根系固土的力学基础,接下来介绍了研究方法和试验材料、林木根系形态分布,并在对黄土高原优势树种根系形态特征分析的基础上建立了根系形态模型。其次是模型的建立和对试验结果的分析,包括林木单根抗拉强度和影响因素的分析及本构模型的建立,根土复合体抗剪强度特性、根土接触面摩阻特性及影响因素的分析。最后是根据模型利用不同的计算方法模拟计算,计算比较了不同造林方式、不同林龄情况下土中不同剖面的应力分布,另外,利用有限元的方法模拟计算了根土复合体的应力场、位移场,分析了造林密度、树种、边坡形态和降雨等条件对边坡稳定性的影响。

感谢李文华院士的鼓励,由此我们确定了开展此项研究的信心和决心;感谢台湾中州技术学院张俊斌博士,他的无私帮助使我们在研究的开始阶段能够较全面地了解国内外相关研究成果;感谢黄河水利委员会天水水土保持监督局李建牢局长、张满良高级工程师在野外现场根系调查时所给予的多种方便与细心关怀;感谢中国农业大学水利与土木学院土力学实验室张心平老师,北方工业大学建筑工程学院孙世国教授、高振林高级工程师,他们的大力支持为全部实验的圆满完成提供了重要保证;感谢清华大学土木与水利工程学院王清友教授、杜丽惠副教授、熊欢博士,他们的帮助保证了有限元计算和分析的高效、精确、顺利进行。感谢中国科学院地质与地球物理研究所的祁生文博士和兰州大学吕挚峰博士,国家林业局林产工业设计院科技所所长张东升博士,北京林业大学胡雨村副教授、饶良懿副教授、在读硕博连读研究生张超波等,他们均在本书的研究阶段或成书过程中,给予了我们帮助,在此一并致谢。

本书的出版得到了国家自然科学基金“黄土高原林木根系固土力学机制研究(30571531)”和国家重点基础研究发展计划(973课题)项目“西部典型区域森林植被对农业生态环境的调控机理(2002CB111502)”的资助,在此表示衷心的感谢。由于林木根系固土作用的研究目前尚处于起步阶段,且涉及土力学、材料力学、弹塑性力学、

森林生态学、水土保持学、工程数学等学科领域,加上作者的认识水平、知识水平和理论水平有限,书中不足之处在所难免,敬请各位专家、学者、同行以及有兴趣的人士批评指正。

陈丽华

2007 年 9 月

目 录

序

前言

第 1 章 研究现状与发展趋势	1
1.1 根系的研究历史	1
1.2 根系固土	2
1.2.1 研究概述	2
1.2.2 根系抗拉	5
1.2.3 根系锚固作用	6
1.2.4 根系-土壤复合体抗剪强度	7
1.3 存在的主要问题与发展趋势	8
第 2 章 林木根系固土的力学基础	10
2.1 加筋理论	11
2.1.1 根土复合体的强度特性及破坏模式	12
2.1.2 根土复合体的根土相互作用理论	15
2.2 锚固理论	20
2.3 根系固土研究模型	24
2.3.1 须根理论模型 (W 氏模型)	24
2.3.2 垂直根系木本植物根-土相互作用力学模型	26
2.3.3 水平根系根-土相互作用力学模型	27
第 3 章 实验材料与研究方法	29
3.1 研究地区概况	29
3.1.1 土壤状况	29
3.1.2 气象与水文	30
3.1.3 植被	30
3.1.4 土壤侵蚀	31
3.2 研究树种的选择	32
3.3 研究方法	34
3.3.1 林木根系形态分布	34
3.3.2 树木根系拉伸试验	34
3.3.3 根系与土的接触面特性试验	36
3.3.4 根土复合体的抗剪切试验	37
第 4 章 林木根系形态分布	42
4.1 林木根系形态和根型	42

4.2 林木根系形态特征	43
4.2.1 各种形态根系的数量特征	43
4.2.2 水平根和垂直根基部直径与胸径关系	45
4.2.3 水平根和主根不同长度部位直径变化规律	46
4.2.4 单株根系生物量及相对生长模型	47
4.3 林木根系形态模型	48
4.3.1 模型描述	48
4.3.2 方法评价	49
4.3.3 模型拟合	49
第5章 林木单根抗拉强度	57
5.1 根系受拉应力-应变关系分析	57
5.2 林木根系本构模型	59
5.2.1 双曲线模型	59
5.2.2 二阶抛物线模型	60
5.2.3 三阶抛物线模型	61
5.3 影响根系抗拉特性的主要因素	63
5.3.1 根系外在形态特性	63
5.3.2 根径	63
5.3.3 根长	63
第6章 根土复合体的抗剪强度	65
6.1 根系与土壤接触面特性	65
6.1.1 不同因素对根土接触面摩阻特性的影响	66
6.1.2 根土接触面应力-应变关系	69
6.2 根土复合体抗剪强度特性分析	71
6.2.1 根系对土体抗剪强度的影响	71
6.2.2 根土复合体的抗剪强度分析	73
6.2.3 根土复合体抗剪强度的多因素方差分析	76
6.3 根土复合体强度特性分析	81
6.3.1 根系对应力-应变关系的影响	81
6.3.2 根土复合体极限主应力差分析	92
6.3.3 根系固土效果评价	94
第7章 林木荷载下土体应力分布研究	98
7.1 计算理论	98
7.1.1 计算模型	98
7.1.2 基本假定	99
7.1.3 计算参数的确定	99
7.2 林木荷载下土体应力分布	99
7.2.1 单株林木荷载	99

7.2.2 不同造林方式	102
7.2.3 不同林龄	103
第8章 林木根系固土的有限元数值模拟	106
8.1 基本理论	106
8.2 有限元模拟的几何模型	108
8.2.1 根系简化模型	108
8.2.2 计算剖面及边界约束条件	108
8.2.3 计算方法及荷载分级	109
8.3 根土复合体的有限元计算模型	111
8.3.1 根土复合体的有限元离散化模型	111
8.3.2 根土复合体各类型单元的本构模型	112
8.4 有限元计算的基本参数	120
8.5 林木根系固土作用分析	121
8.5.1 造林对边坡稳定性的影响	121
8.5.2 造林密度对边坡稳定性的影响	125
8.5.3 树种对边坡稳定性的影响	129
8.5.4 坡度对边坡稳定性的影响	130
8.5.5 坡长对边坡稳定性的影响	132
8.5.6 降雨对边坡稳定性的影响	134
小结	137
主要参考文献	140

第1章 研究现状与发展趋势

根系是植物直接与土壤接触的器官,根系在不断地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,对土壤结构的改善、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(刘建军,1998)。近30年来,由于科学技术的发展和生态、环境建设的需要,根系固土研究成为根系研究的热点,根系固土力学机制研究成为一个正在拓展的具有学科交叉性的新领域。

1.1 根系的研究历史

国外对植物根系进行的系统研究可追溯到18世纪20年代英国对栽培植物根系利用土壤空间范围所进行的探讨。Hales(1727)应用简单挖掘技术挖掘出栽培作物的根系,进行了形态学的观察,并测定其重量和长度。然而,对根系开展广泛研究是在19世纪后半叶农业重视矿物质肥料的施用之后(薛文鹏,2003)。Miller(1974)在《根的植物学与形态学》一书中的引用了2975篇论文,有2900篇是1890年以后发表的,可见与植物学和其他学科一样,从科学的角度来研究根系是19世纪末开始的(刘晓冰等,2001)。当时,德国、美国及俄国应用不同的方法,对农作物、果树、林木和草本植物根系进行了经典的野外观察研究,主要对根毛的形成、根的生长、无机养分的吸收及与根形成有关的植物激素等方面开展了研究。进化论的创立者达尔文也曾对根的生产运动做过研究。对根系的初期研究大多数是针对单根的生长生理学的研究(薛文鹏,2003)。

20世纪30年代以后,人们不再满足于对根系自身特点的认识,开始重视根系生长与土壤、水分、空气和养分等根系赖以生长的生态条件的关系研究,即根系生态学研究(伯姆,1985)。有关田间根系形成的研究,以Weaver(1926)的《大田作物根系的发育》、《蔬菜作物根系发育》两本书为代表,开创了根系生态研究的先河(薛文鹏,2003)。Kutschera(1960)继承了Weaver等的研究内容,在自然条件下,对根系的生态学方面进行了研究(刘晓冰等,2001)。对木本植物,如辐射松(*Pinus radiata*)、西特喀云杉(*Picea sitchensis*)等树种根系的大量研究也是从这个时期开展起来的。20世纪60年代以后,人们对包括根系在内的植物动态发育研究投入了更多的力量,在英国、加拿大、澳大利亚、联邦德国等国家建立了一批现代化的根系实验室,对木本植物根系的生长发育规律、与地上部分的生长关系及其对土壤生态因子的影响等诸多方面进行了卓有成效的研究(薛文鹏,2003)。

20世纪60年代以后,以欧洲为中心召开了有关根系研究的国际研讨会,随着对根系研究的深入,1982年在澳大利亚召开国际会议的同时,成立了国际根研究学会(ISRR),从此以后,每隔数年ISRR举办一次国际会议。

在世界范围内,对根系的研究以欧洲的研究者居多,研究业绩也相当突出;除此之外,斯洛伐克的植物生理学家研究小组的研究也非常出色。中国科学院南京土壤研究所刘芷宇先生的研究也为国际学术界所认可。近年来,每年都召开有关根的学术研究国际会议。世界范围内对根的研究可分为对根系的研究及对组成根系的单条根的研究两部分(刘晓冰等,2001)。

近30年来,木本植物根系研究朝着专业化、综合化方向发展,其研究方向可大致划分为以下几个方面:①以开发利用根及根皮的天然次生产物等为目的的植物根系化学研究;②植物根系的固土作用及其与坡面土体稳定性关系的根系力学研究;③以根系生长发育、水分生理和根渗出物为主要对象的根系生理学研究;④探讨根系分布、分解、竞争、损伤及生态因子对根生长影响的根系生态学研究;⑤有关切根等措施在苗木质量管理中的作用等问题的应用生态学研究;⑥以根系腐烂为主要内容的根系病虫害研究;⑦以根系研究过程中设备、测定方法、统计学等为内容的根系研究法。

迄今,根系的研究大都应用土钻法或其他方法获取样品,测定根长、根重、根表面积等根系参数。放射性示踪原子技术的出现大大促进了根系研究,特别是根系生理学研究的进展。为了更多地获取根系生长的动态资料,20世纪60年代,在英国 East Malling 建立了现代化的根系实验室原型;70~80年代,伯姆等先后出版了有关根系研究的著作,系统总结了世界范围内有关根系研究的主要方法,极大地推动了根系研究的深入展开。同时,现代科学技术的应用也为根系研究提供了新的途径,在经典研究方法的基础上,如挖掘法、土块法、土钻法、玻璃壁法等,产生了放射自显影技术、微速摄影法、核磁共振扫描法、微根区管法(minirhizotron)等新方法,使得在保持根系及根系原始状态条件下精确地测定有关根系参数(如根系生长速度、根系分支、根的长度、根系的死亡和分解等)成为可能。同时,根系扫描技术及根系图像分析软件(如 WIN-Rhizo 软件)的广泛应用,进一步为根系参数(如根系分级、根系长度、根系表面积、根系分支等)的精确测定提供了有力的科学依据(薛文鹏,2003)。

1.2 根系固土

1.2.1 研究概述

利用植物来固持土壤稳定边坡至少可追溯到我国的明朝,1591年,我国就利用柳树(*Salix* spp.)来稳定堤防(Lee, 1985),欧洲最早使用植物来固坡是在19世纪(Záruba et al., 1982)。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则始于20世纪30年代。Holch (1931)首次提出有关不同森林植被根系对坡面稳定的影响。Croft 和 Adams (1950)研究了崩塌与森林的关系,认为砍伐森林使林木根系固持土体的能力减小,随之而来的是山崩频率的增加。20世纪60年代和70年代初期的许多研究也表明林木砍伐后其根系的防止崩塌的能力也会衰退(Gray, 1970, 1973; Swanston, 1967, 1969; Bishop et al., 1964)。根据 Bishop 等(1964)的研究,阿拉斯加山崩的数量在10年内由于森林砍伐而增加了4.5倍。Ziemer 等(1977)的研究结果表明,森林砍伐后,细根在砍伐两年后其固土能力丧失了32%,4年之后大多数

小直径根完全腐烂, 10年后最大直径根的固土能力完全丧失。Burroughs等(1977)的研究结果表明, 在森林砍伐后的前3年根系数量减少得非常显著, 同时单根的抗拉强度也迅速衰退。林木砍伐48个月后, 与活根相比直径为1cm根丧失74%的抗拉强度。这些数据显示了细毛根减少数量和单根抗拉强度减少之间的关系, 正是直径小于1cm的根系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体的剪切强度(Waldron, 1977; Waldron et al., 1981, 1982; Manbeian, 1973; Endo et al., 1969; Kassiff et al., 1968), 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大而增大。Gray等(1970, 1974, 1977, 1978, 1980, 1996)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特性提高土壤稳定性的研究报告。在林木根系固土理论的探索方面, Wu和Waldron做出了很大贡献。Wu等(1979)和Waldron(1977)等假设植物的根为一完全弹性的材料, 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, 推导出第一个根系力学平衡理论公式, 从此根系抗拉土壤的力学观念及理论依据逐渐被接受。20世纪80年代, Wu等(1988a、b, 1979)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升到了一个新的高度。

日本是开展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(1974)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、B层, 深入C层的比例较少; 丸谷知己等(1990)以树木的胸高直径、树龄及立木密度等来推估根系的深度、根量及分布状况。北村嘉一等(1981)及阿部和时等(1994a、b)指出杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、山毛榉(*Fagus* spp.)与日本黑松(*Pinus thunbergii*)等的根径与拔根抵抗力大约成指数正相关。且由于根系的存在而使土壤剪力强度增加 $200\sim 600\text{kg/m}^2$, 增加率为 $11\%\sim 42\%$ (Abe, 1986)。塚本良则(1987)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年之内显现出最大的滑坡发生率。林龄在20年生以下的幼龄林与壮龄林相比滑坡的发生率高。这意味着表层滑坡的发生率与土层内部根系状况的关系较大。

中国台湾受日本的影响, 侧重于根系对崩塌影响的研究。颜正平(1974)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; 而山盐荳(*Rhus chinensis*)根系属中根型, 性耐旱, 多生于陡坡切面, 为荒山复旧、固土防崩的植物。后来, 吴正雄等(1989)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 orientalis*)纯林而言, 有林地较无林地多提供 $300\sim 1700\text{kg/m}^2$ 的土壤剪力强度, 有效提高 $16\%\sim 35\%$ 的安全系数(F)值(吴正雄, 1993), 这有助于抑制浅层崩塌的发生。蔡光荣(1992)针对台湾西南部泥岩坡地试验出根系力学平衡方程式的根系系数。

中国内地关于根系固土力学的研究在近十几年来非常活跃, 呈现出多部门、多学科共同研究的局面, 研究集中于单根抗拉、整株抗拔、根土复合体抗剪强度的提高等方面。解明曙(1990a、b)采用全根系拉拔试验法, 研究了白榆(*Ulmus pumila*)根系的固土能力, 结果认为有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。刘国彬等(1996)对黄土高原12种常见牧草0.1~1.0mm毛根生物力学特性进行了系统研究,结果表明,牧草毛根具有强大的抗拉能力,直径为0.1~0.2mm的禾本科根系抗拉力达1.37N,毛根抗拉力随直径的增加而增大。杨亚川等(1996)以草本植被为研究对象,提出了“土壤-根系复合体”的新概念,将根系与土壤视为一体,研究认为复合体的抗剪强度与法向压力的关系符合库仑定律,复合体抗剪强度随含根量增加而增大,随含水量增多而减少;土壤黏聚力值与含根量呈正相关,而内摩擦角与含根量关系不大。朱珊等(1996)通过对根系黄土的试验研究,获得了其抗剪强度指标黏聚力 C 值和内摩擦角 φ 值,归纳总结了二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。王可钧等(1998)讨论了植物固坡中的有关力学问题,分析了树根抗拉性能、生长方向与土坡稳定性的关系,探讨了固坡植物与人工结构物共同作用的问题,指出植物固坡的双向作用和适用条件。代全厚等(1998)认为植物根系有较强的固持土壤功能,抗冲指数与根长、根量之间有明显的相关性。吴淑安等(1999)指出,土壤中植物根系的存在可以增强土壤的抗蚀性,具有植物根系的土壤,其崩解速率远比少根系或缺少根系的土壤慢。郝彤琦等(2000)提出土壤中草根的作用与钢筋混凝土结构中的钢筋类似,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式为 $\tau = \tau_0 + 0.14M_r f_r$ 。周跃等(1999a、b, 2000, 2002)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,并研制出土壤牵引测试系统;并基于莫尔-库仑破坏准则建立了极限平衡条件下的摩擦型根土黏合键破坏模型。还研究了云南松垂直根的土壤增强作用,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、坡面负荷作用等。程洪等(2002)通过试验测定了生物措施草本植物根系的最大拉力及最大拉力作用下根系断裂面直径,计算植物根系最大抗拉强度,探讨了草本植物根系网的固土性能,提出用根系最大抗拉强度代表根系材料的受力潜能,可作为评判根系网的固土特性的一个有效指标。张祖荣等(2002)就植物根系对土壤结构的影响进行了初步研究,认为林木根系通过径级小于或等于1mm须根的作用,可以提高土壤的抗侵蚀能力,其原因在于死根提供有机质、活根提供分泌物作为土粒团聚的胶结剂,配合须根的穿插和缠结,促进了土粒的团聚,从而增强了土壤抗分散、悬浮的能力。谢春华等(2002)利用分形理论对长江上游暗针叶林生态系统中主要树种根系的不同根系结构稳定的土体的能力进行了量化比较,结果表明:根系结构与稳定土体的能力明显相关,根系直径或树干基径与根系抗拉阻力受环境条件的影响,关系较为复杂;而根系分形维数更能揭示根系的结构与发育动态,根系分形维数与抗拉阻力的对数呈比较稳定的指数函数关系。此外,朱清科等(2002)、李勇等(1998)、陈士银等(2000)、刘定辉等(2003)、封金财等(2003)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。

已有研究表明,根系的固土作用主要表现为3种方式:①网络作用:由于根系的交织穿插把较小结构的土块组成大的土块,在水流冲击作用下,不易被分散解体;②护挡作用:受水流的冲刷而导致部分根系外露的根系,对上面冲来的土块起阻挡缓冲的作

用;③牵拉作用:有些土粒紧密的附着在根系的四周,即使根系在水中飘动,土粒也不易被冲走。

1.2.2 根系抗拉

1.2.2.1 单根抗拉

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(张东升,2002)。

野久田捻郎(1998)认为根系的拉力随着根径的增加而增加,并建立了杉木根系拉力 T 与根径 d 的关系方程 $T=2.754d^{2.06}$ ($r=0.967$);孙立达等(1995)对黄土高原沙打旺(*Astragalus adsurgens*)等根系进行抗拉研究得出根系拉力 T 与根径 d 关系方程 $T=101.06d^{1.706}$ ($r=0.9352$);杨维西等(1990)对采伐后2年、4年的单根抗拉进行了研究,除得出刺槐(*Robinia pseudoacacia*)根系的抗拉力与根径成幂函数外,还得出采伐后单根拉力明显减小,其衰减率是随着伐后时间的推延而增大的,并在伐后前两年衰退速度很快,后两年稍微减缓;执印康裕(2002)的研究结果是根的抗拉强度一般为10~80MPa。同一树种根的根径(D , mm)和抗拉强度(R_L , MPa)之间的关系为 $R_L=nD^m$,式中, R_L 为抗拉强度(MPa), D 为根直径(mm), n 、 m 为树种参数。大约在采伐后40个月松树根的抗拉强度消失,花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)在采伐后大约3~5年50%以下的根具有抗拉强度。对松树根系的弹性系数测定结果表明,弹性系数与自身采伐后所经过的时间几乎没有关联,松树根系的弹性系数大体取值190MPa。

朱清科等(2002)对长江上游暗针叶林峨眉冷杉(*Abies fabri*)、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,但并不完全呈线性关系,当根系平均直径增加到一定值时,由于根系本身的抗拉特性在受拉过程中产生了从弹性形变到塑性形变的飞跃,根系的抗拉阻力会发生一个明显的跃迁。在不同土壤环境中,土壤密度特征(如石砾含量不同)影响土体与根系表面的摩擦系数,致使出现平均直径较大的根系反而抗阻拉力较小的现象。而根系的抗拉阻力与树干基径在双自然对数坐标下,无论是峨眉冷杉还是高山柳(*Salix cupularis*),都表现出比较明显的指数函数关系。周跃等(2002)采测的云南松、华山松(*P. armandii*)和思茅松(*P. kesiya* var. *langbianensis*)侧根根样的直径范围为1~17mm,分布在16个直径分组,研究了侧根抗张强度,结果表明,3种松树的侧根具有较为明显的抗张强度,具有较为明显的抗张强度,量值多为5~20MPa,其大小随根直径的增加而增加。

1.2.2.2 群根抗拉及其固土能力

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,包括不同树种的根系。对于群根抗拉研究经历了3个阶段。最初用的研究方

法是土体原位剪切箱直接剪切法。这种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。许多专家学者应用此方法对根系固土有效性进行了验证和肯定,同时为根系固土研究奠定了基础。但是上述方法很难适用于丛生的灌木区根系剪切实验,并且测定的土层水平和垂直范围很小。第二个阶段为解明曙(1990)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 $50\text{cm} \times 80\text{cm}$,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 μ 法理论确定了根系固土的有效范围,同时用此方法对灌木-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 0.4cm 的各根系横截面积之和(A_r)所占比重(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,并提出了白榆根系固坡力学强度参数值。第三个阶段为以周跃等(1999)为代表,应用最初实验装置中使用的剪切箱直接对土壤进行采样这一方法,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。

群根抗拉及土壤固土能力研究成果首先表现在根系提高了坡面的稳定性。当斜坡上没有根系存在时,抗滑力主要为土壤颗粒的黏结力和滑动时产生的摩擦力,但是当有根系存在时除以上抗滑力以外,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。国内外70多年关于林木根系固土功能及提高坡面抗滑能力的研究表明,林木根系可以提高坡面的稳定性,能起到抗滑桩作用,对浅表层滑坡具有有效的治理和预防作用(周跃等, 1999a、b、c, 2002; Clarke et al., 1999; 孙立达等, 1995; Comman-deur et al., 1991; 解明曙, 1990; 杨维西等, 1990; Wu et al., 1979, 1988a、b、c; Anderson et al., 1989; Abe et al., 1986; Beke et al., 1984; Gray et al., 1981, 1982, 1983; Waldron 1977; Waldron et al., 1981; Burroughs et al., 1977; Hath-away et al., 1975; Gray 1970, 1973; Endo et al., 1969; Lutz et al., 1939)。根据杨维西(1993)的研究,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,研究表明,根系对土壤抗剪强度的增加值与穿透剪切面的根截面呈线性关系。当然根系控制滑坡稳定性有其局限性,表现为根系对斜坡稳定性的增强作用只是存在于植物根系分布界限以上,对于深层滑坡就不起作用了,据王礼先(1990)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,根系的分布深度为 $1\sim 3\text{m}$ 。对土体固持作用最大的密集分布土层为 60cm ,一些浅层根系分布土层为 40cm 以上。因此,根系固土效果仅限于浅层滑坡。周跃等(1999)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两倍。

1.2.3 根系锚固作用

有关根系锚固作用的研究表明,垂直根系可把浅层根际土层锚固到深层土体,具有土体增强作用。1999年,周跃等借鉴了 Trukamoto 和 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 2.80MPa,实测结果的增量为 0.87MPa,该值使根际土层对水平向滑动的抵抗力提高了 37.83%。云南松进入成年期后主根直径可达 9~20cm 以上,穿入 1.2~1.6m 的土层,垂直加强作用将更为显著。

日本学者执印康裕(2002)采用两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 $P_0=a_0D^{b_0}$ 。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: $P_3=a_3D_3b$, $P_4=a_4D+b_4$ 。

随着采伐后根系的腐朽,其抗拉阻力发生变化,栽植后其抗拉阻力也要发生变化,1981 年北村以人工林为对象,对栽植后及采伐后经过的年限 y 与抗拉阻力 P 关系的研究结果为:栽植后的抗拉阻力 $P_1=a_1y^{b_1}$,采伐后的抗拉阻力 $P_2=a_2\exp(-b_2y)$,式中, P_1 、 P_2 为抗拉阻力 (t), y 为经过的年限 (a), a_1 、 a_2 及 b_1 , b_2 为系数。研究表明,自采伐后到栽上树为止,在采伐后的 10 年抗拉阻力最小。

1.2.4 根系-土壤复合体抗剪强度

当土体受到剪应力作用时,土体对剪应力增大所产生的阻力称为抗剪强度。土体的抗剪强度可用经典的库仑 (Clulomb) 定律表示: $\tau=C+\sigma\tan\varphi$ 。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。而目前研究根系土抗剪强度的测定方法主要有:直接剪切试验法、原位水平挤出法、全株根系拉拔试验法和室内模拟剪切试验法等。林木根系对土壤的抗剪强度产生的影响,主要表现在:①根系在土壤中成长,对四周土体产生轴向压力 (高达 10^6Pa),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、抗剪和抗压强度是土壤的许多倍。④根系在生长过程的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。

土壤的物理性质对土壤的抗剪切强度影响很大,范兴科等(1997)认为,土壤的抗剪强度与土壤的颗粒组成、土壤容重、土壤含水率等因素密切相关。植物根系的存在能明显地改善土壤的物理性质,因而在一定条件下,可以把土壤抗剪强度的增加归结为植物根系存在的结果。代全厚等(1998)通过对嫩江大堤护坡植物根系抗剪强度的测定分析,发现同一地段土壤的抗剪强度表土层大于底土层,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(2000)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 τ 与法向正压力 σ 的关系符合库仑定律,且 τ 随含根量 M_r 的增加而提高;同时提出土壤中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 $\tau=\tau_0+0.14M_rf_r$,式中, τ , τ_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) 的抗剪强度 (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(1990)的研究,林龄 6~10 年