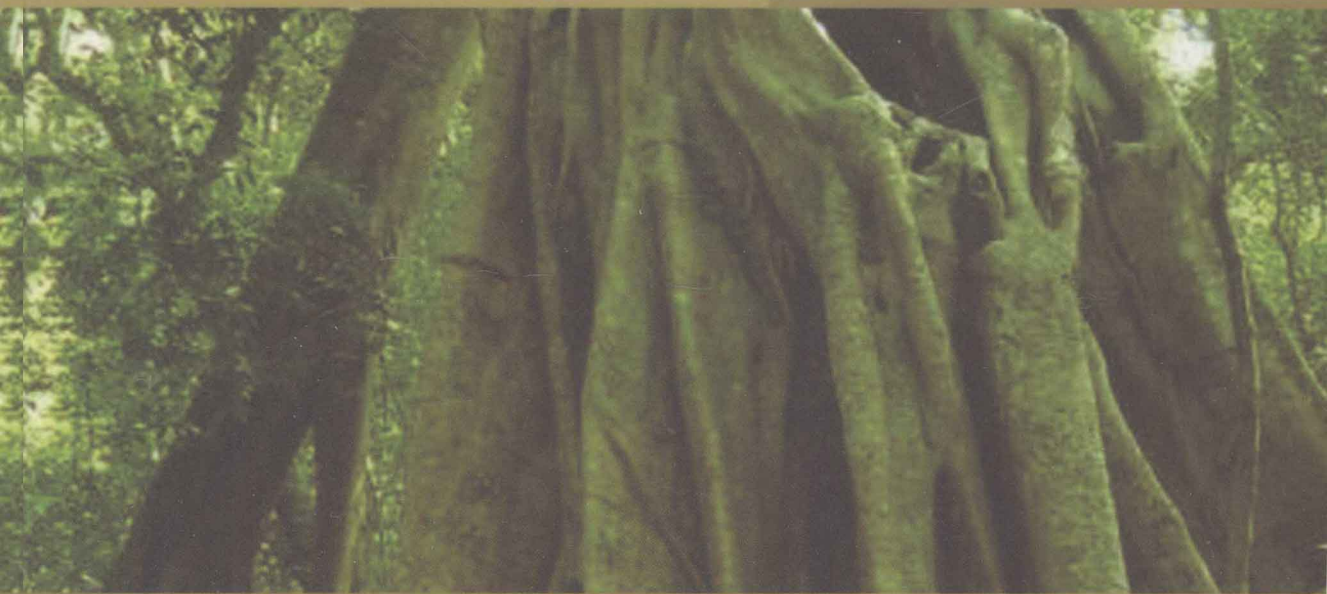


【水土保持与荒漠化防治系列专著】



林木根系基本力学性质

陈丽华 等/著



科学出版社

水土保持与荒漠化防治系列专著

林木根系基本力学性质

陈丽华 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

林木根系的力学性质是根系固土研究的基础,也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、水土保持学、数学、化学等原理和方法,采用野外试验与室内实验相结合、试验测定与理论分析相结合的技术路线,通过调查分析油松、华北落叶松、白桦、蒙古栎和榆树的根系形态,构建了这五个树种根系形态的分布模型;通过对林木根系的拉伸实验,揭示了根系的最大抗拉力、抗拉强度、弹性模量等抗拉特性与根系直径、标距和加载速度等方面的联系;运用数学统计方法,对数据进行预处理,分析数据的潜在意义,归纳出林木单根抗拉力学特性的综合模型;通过对纤维素、木质素和半纤维素含量的测定,揭示根系抗拉特性的内因,建立根系主要化学成分与抗拉特性间的关系。

本书可作为科研院所林业、水土保持等相关专业研究生的参考教材,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、科研人员和相关专业本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

林木根系基本力学性质 / 陈丽华等著. —北京:科学出版社,2012

(水土保持与荒漠化防治系列专著)

ISBN 978-7-03-034427-4

I. ①林… II. ①陈… III. ①林木-根系-力学性质 IV. ①Q944.54

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 104383 号

责任编辑:朱 丽 刘志巧 / 责任校对:张怡君

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

*

2012年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012年6月第一次印刷 印张:9 3/4

字数:220 000

定价:46.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

参加编写人员名单(按姓氏拼音排序)

陈丽华 及金楠 冀晓东 蒋坤云 刘小光
吕春娟 宋恒川 王萍花 张超波 赵红华
周 朔

丛 书 序

水土流失与荒漠化直接关系到国家生态安全。严重的水土流失与荒漠化是生态恶化的集中反映,已成为我国生态环境最突出的问题之一。水土流失与荒漠化不仅导致土地退化、毁坏耕地,制约山区社会经济发展,使人们失去赖以生存的基础,而且加剧江河湖库淤积和洪涝灾害,加剧贫困,威胁国家粮食安全和生态安全;这不仅影响当代社会的发展,而且影响子孙后代的生存。因此,加强水土保持与荒漠化防治基础理论研究,找出科学合理的防治方法与措施,开展生态环境建设、资源与社会可持续发展的理论研究与实践,已成为关系国家生态安全和经济社会可持续发展的当务之急。

《水土保持与荒漠化防治系列专著》是在北京林业大学“985”优势学科创新平台“脆弱生态系统退化机制与恢复重建”和“211”工程(三期)的资助下编写出版的,分册相对独立,以水土保持与荒漠化防治基础理论与水土流失和荒漠化综合防治实践为基础,从不同角度、综合反映了研究团队新的科研成果。该系列专著以土壤侵蚀动力学过程及其机制、生态水文过程与调控、植被力学过程与调控、土壤风蚀过程与防控、水土流失区林草植被快速恢复与生态修复关键技术、开发与建设城市化损毁土地生态系统快速恢复与重建技术等为主要研究内容,系统反映了在长期水土保持荒漠化防治实践中积累的丰富防治经验,有针对性地提出了我国水土保持荒漠化防治生态建设面临的主要问题的防治对策,为今后进一步加强水土保持荒漠化防治研究奠定了坚实的基础。

该系列著作的内容均为水土保持与荒漠化防治研究领域的热点问题,引领了该学科的发展方向,在理论框架、新方法和新技术方面做了很多开创性的工作,在推动水土流失与荒漠化防治综合防治关键技术研究方面进行了有益的探索,对我国进行水土保持与荒漠化防治综合管理研究起到了积极的推动作用。

该系列著作不仅为地学、生态学、环境学、土壤学等学科的科研和教学工作者提供有益的参考,也是我国水土保持与荒漠化防治生态建设相关技术人员、行政管理人员的一套好的参考书。该系列著作的出版,无疑将对我国水土保持与荒漠化防治生态建设的深入开展起到积极的推动作用。

中国工程院院士

李文华

2011年5月

前 言

我国山区面积占国土面积的 $2/3$,是世界上水土流失最严重的国家之一。水土流失面积大、分布范围广、流失强度大、侵蚀严重区比例高是我国目前水土流失的特点。在人与自然和谐共处的理念下,植物措施在国内外越来越受到欢迎,而且长期的科学研究和生产实践证明,植被是防治水土流失最经济、最有效、最环保的因素,其中最重要的原因是植被具有强大的、错落缠绕的根系,可固持土体,增加土壤的抗蚀抗冲性,特别是浅、细根的加筋作用和深部根系的锚固作用,犹如工程中的钢筋和桩柱,对于增强斜坡稳定,防止土体崩塌、滑坡、泥石流等具有重要的作用。但是植被根系属于生物有机体,具有不连续、不稳定、多相、非均匀、各向异性等鲜明特点,无论是在自然状态下,还是在外界荷载作用下,其力学性质均具有生命特征,因此它的本构关系要比一般工程材料复杂得多。本书针对我国华北地区常见乔木树种,进行了大量的实验研究,初步描述了不同树种根系的抗拉基本力学性质,并量化了其变化规律,有助于在今后的生态环境建设中进行水土保持护坡树种的筛选,并可为今后的生态护坡工程提供一定的理论支撑。

本书在归纳总结国内外植被根系抗拉力学性能研究成果和相关根系抗拉力学理论的基础上,主要研究根系的基本抗拉特性,并进一步分析根系的主要成分纤维素、半纤维素和木质素的含量差异及其与根系力学性质的关系,试图从根系的化学成分角度探索根系力学性质的内在原因。

本书的出版得到国家自然科学基金“林木根系基本力学性能研究(30872067)”、“林木根系对土壤摩擦锚固性能研究(30901162)”、教育部博士点基金“林木根系拉伸特性的实验研究(20090014110002)”、国家林业局行业专项“典型区域森林生态系统健康维护与经营技术研究(200804022)”的资助,在此一并表示衷心的感谢!

由于林木根系固土的研究目前尚处于起步阶段,很多方法和技术还在不断探索中,加上笔者的知识水平和理论水平有限,书中难免存在疏漏和不足之处,敬请各位读者批评指正。

著 者

2012年1月

目 录

丛书序

前言

第 1 章 根系抗拉基本力学性质研究现状	1
1.1 根系抗拉力学特性	1
1.1.1 根系拉伸断裂形态	1
1.1.2 根系抗拉强度及破坏极限荷载	1
1.1.3 根系抗拉变形特性	2
1.1.4 影响根系抗拉特性的主要因素	3
1.2 根系主要化学成分与抗拉力学特性间的关系	4
1.2.1 根系纤维素含量与抗拉特性	4
1.2.2 根系木质素含量与抗拉特性	5
1.2.3 根系半纤维素含量与抗拉特性	5
1.3 根显微结构的研究现状	5
1.3.1 根的显微结构	5
1.3.2 根的显微结构与力学特性间的关系	7
1.4 研究展望	8
第 2 章 根系力学性质分析相关理论	9
2.1 强度理论	9
2.1.1 材料破坏的两种形式	9
2.1.2 四个常用的古典强度理论	9
2.1.3 莫尔强度理论	11
2.2 本构关系模型	12
2.2.1 线弹性类本构模型	13
2.2.2 非线性弹性类本构模型	14
2.2.3 弹塑性类本构模型	16
第 3 章 试验材料与研究方法	19
3.1 研究区域概况	19
3.1.1 气候	19
3.1.2 地形地貌	20
3.1.3 土壤	20
3.1.4 植被概况	20
3.2 研究树种的选择	21
3.2.1 选择依据	21

3.2.2 研究树种的生物学及生态学特性	21
3.3 研究方法	22
3.3.1 野外取样	22
3.3.2 根系拉伸试验	22
3.3.3 根系主要化学成分分析	25
3.3.4 根系显微结构观察实验	27
第4章 根系形态	30
4.1 根系形态研究方法	30
4.1.1 根系形态调查方法	30
4.1.2 林木根系累积模型	31
4.1.3 统计方法	31
4.2 不同树种形态分析	31
4.2.1 根长-根径关系	31
4.2.2 根长-土层深度关系	33
4.2.3 根系生物量-根径关系	33
4.2.4 根系垂直分布根型	34
4.3 各树种根的形态模型	36
4.3.1 根系形态模拟步骤	36
4.3.2 根系形态模拟效果	36
4.4 小结	38
第5章 林木根系抗拉特性	39
5.1 林木根系最大抗拉力分析	39
5.1.1 不同树种抗拉力的比较	40
5.1.2 根系抗拉力与直径的关系	40
5.1.3 根系抗拉力与标距的关系	43
5.1.4 根系抗拉力与加载速率的关系	46
5.1.5 根系抗拉力影响因素分析	49
5.2 林木根系抗拉强度的分析比较	49
5.2.1 不同树种抗拉强度的比较	49
5.2.2 根系抗拉强度与直径的关系	51
5.2.3 根系抗拉强度与标距的关系	54
5.2.4 根系抗拉强度与加载速率的关系	56
5.2.5 根系抗拉强度影响因素分析	59
5.3 林木根系弹性模量	60
5.3.1 不同树种根系弹性模量比较	60
5.3.2 根系弹性模量与直径的关系	61
5.3.3 根系弹性模量与加载速率的关系	63
5.3.4 根系弹性模量影响因素分析	65

5.4 林木根系延伸率与残余应变	65
5.4.1 不同树种根系延伸率比较	65
5.4.2 不同直径根系的残余应变比较	66
5.4.3 不同标距根系残余应变比较	68
5.5 林木根系应力-应变关系	69
5.5.1 不同树种根系应力-应变关系比较	71
5.5.2 根系应力-应变关系与直径的关系	72
5.5.3 根系应力-应变关系与标距的关系	76
5.5.4 根系应力-应变关系与加载速率的关系	77
5.6 小结	78
5.6.1 根系外在形态特性	78
5.6.2 直径与根系抗拉特性	78
5.6.3 标距与根系抗拉特性	79
5.6.4 加载速率与根系抗拉特性	79
第6章 数据处理与分析方法	80
6.1 数据预处理	80
6.1.1 观测数据预处理的常用方法简介	80
6.1.2 小波降噪	82
6.1.3 移动平均平滑法	85
6.1.4 实例分析	86
6.2 数据挖掘	89
6.2.1 正态性检验	90
6.2.2 相关性分析	91
6.2.3 聚类	93
6.2.4 非参数检验	96
6.3 单根抗拉的力学模型	99
6.3.1 固定控制变量情况下,抗拉强度的回归模型	100
6.3.2 引入控制变量时,抗拉强度的综合模型	102
6.4 小结	103
第7章 根系主要成分与抗拉特性	104
7.1 根系抗拉力学特性	104
7.1.1 根系抗拉力学分布特征	104
7.1.2 同一树种不同根型的力学特性比较	108
7.1.3 不同树种同一根型的力学特性比较	111
7.2 根系主要化学成分与抗拉力学特性关系	113
7.2.1 根系纤维素含量与抗拉特性的关系	113
7.2.2 根系木质素含量与抗拉特性的关系	116
7.2.3 半纤维素含量与抗拉特性的关系	119

7.2.4	综纤维素含量与抗拉特性的关系	121
7.2.5	L/C 与抗拉特性的关系	124
7.3	根系主要化学成分与极限拉伸应变的关系	127
7.3.1	5 种树种根系拉伸应变分布特征	127
7.3.2	根系主要成分与应变的关系	130
7.4	根系显微结构与抗拉特性	130
7.4.1	材料选择及其相关参数测定	130
7.4.2	植物根系的显微构造特征	131
7.4.3	植物根系显微结构与单根抗拉特性的关系	135
7.5	小结	136
7.5.1	不同树种根系化学成分分布特征	136
7.5.2	根系化学成分与抗拉力、抗拉强度的关系	137
7.5.3	根系化学成分对极限拉伸应变	137
7.5.4	根系纤维结构与抗拉特性	138
主要参考文献		139

第 1 章 根系抗拉基本力学性质研究现状

根是固着植物、并从土壤中吸收和运输水分与养分的器官。20 世纪 40 年代,美国西部的一场“黑风暴”和近年来我国北方地区沙尘暴的频繁发生及滥砍滥伐、过度垦殖导致的水土流失与生态环境恶化,催生了以植被为核心的生态环境建设工程,加速了国内外学者对植物根系固土机理和土体稳定性的研究,使植物固坡在国内外越来越受欢迎(Bischetti et al., 2005; Coppin and Richards, 1990; Gray and Sotir, 1996; Norris, 2005; 杨永红等, 2007a; 2007b; 熊燕梅等, 2007), 根系的固土力学机理也成为水土保持的新的研究领域。

1.1 根系抗拉力学特性

植物根系材料不同于一般的工程材料,根是具有生命的物体,研究其力学特性,最大的困难在于它参与代谢活动,具有多相、非均匀、各向异性等特点,在不同生理和不同生长环境下,其力学性质有很大差异。尽管如此,许多国内外专家学者还是对木本植物、草本植物、农作物的根系进行了相关抗拉特性研究试验,目前主要从室内单根抗拉,室外原位土壤水平拉拔和垂直拉拔试验来确定不同植物根系的抗拉特性以及影响根系抗拉的因素(张东升, 2002),从而得到植物根系拉伸条件下的最大载荷、应力、应变、延伸率、弹性模量等量化参数,为水土保持固坡植物选择提供理论支撑。

1.1.1 根系拉伸断裂形态

断裂是指由于新裂纹萌生或已存在的裂纹扩展而引起的一种破坏过程。根系抗拉实质是轴向荷载作用下顺纤维抗拉,当荷载达到一定程度,根系会发生断裂或连根拔出,根系抗拉断裂有弹性断裂和脆性断裂之分。朱清科等(2002)研究发现,贡嘎山森林生态系统主要树种的根系在受拉条件下断裂方式有很大的差异,冷杉(*Abies fabri*)根系与冬瓜杨(*Populus purdomii* Rehd.)根系总是在根系末端最细部断裂,断裂面参差不齐,根系断口与最大正应力一致,属于切断破坏型,且断裂处颈缩明显,根系抗拉能力与根径有很好的相关性,即冷杉、冬瓜杨根系受拉过程中的断裂方式为典型的弹性断裂。而杜鹃(*Rhododendron simsii*)根系由于存在生长节理,根系受拉后往往在节理处断裂,即根系并不是在最细部断裂,断口平滑,且与最大正应力垂直,属于正切断裂型,断裂处颈缩不明显,根系抗拉能力与根径相关性较差。杜鹃根系在拉拔过程中尚未达到根系本身材料的抗拉强度时已发生断裂,根系被拉断,即杜鹃根系受拉过程中的断裂方式表现为脆性断裂。

1.1.2 根系抗拉强度及破坏极限荷载

单根的破坏极限荷载(最大抗拉力)与根系断裂处面积的比值即为抗拉强度。单根抗

拉力随着根径的增大而增大,抗拉强度通常随着根系直径的增大而减少(O'Loughlin and Waston, 1979; Operstein and Frydman, 2000; Wu, 1976; 野久田捻郎等, 1998),这种现象已经归因于根系成分的差异,因为细根系单位干重的纤维素含量比粗根系多(Comman-deur et al., 1991)。史敏华等(1994)发现,荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)等8个树种根系的抗拉力随着根径的增加而迅速增大,不同树种根的抗拉能力有显著差异,其原因可能是根径增加,根的截面积迅速增加,导致根的极限拉力迅速增加(耿威等, 2008)。同样,众多对根系力学特性的研究均显示,根系极限拉力或抗拉强度与根径表现出幂函数或指数函数关系(朱海丽等, 2008; 李绍才等, 2006; 赵丽兵和张宝贵, 2007)。

在根径相同的情况下,根长不同,根系的抗拉强度亦不同,表现为随着根长的增加,根系的抗拉强度减小,根系拉力与根长为幂函数关系(张东升, 2002)。朱清科等(2002)对冷杉根系和冬瓜杨根系平均抗拉强度研究也得出相同的结论。解明曙(1990a; 1990b)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。目前,对根径与抗拉强度的幂函数关系研究较多,而作为根系尺寸的另外一个因子,根系长度同样对土壤抗剪强度产生重要影响,其影响却较少被关注。

1.1.3 根系抗拉变形特性

根系应力-应变关系是描述根系力学特性的重要指标,应力-应变全曲线上的特征点可以反映出根系受力过程中不同阶段力学行为的基本特性和力学性能指标,它能反映出根系从受力到破坏过程的受力变形特点。植物根系的极限延伸率是反映根系防治土体滑坡的一个重要指标,当土体间出现滑坡裂缝、根系的极限延伸率较大时,有利于把根系所受的拉力向土体深层传递,同时,在根系伸长系数较大的情况下,受拉过程中根系的形变量较大,有利于对土壤下滑力进行缓冲,这些都有利于提高根系固土能力。

根系拉伸的应力-应变特征随树种的不同而不同。例如,紫苜蓿(*Medicago sativa*)根的应力与应变为对数函数关系,不符合胡克定律,属于弹塑性材料;而马唐(*Digitaria sanguinalis*)根的应力与应变呈显著的线性正相关关系,基本遵从于胡克定律,属于弹性材料(赵丽兵和张宝贵, 2007)。油松根系受拉后表现出两个阶段,线弹性阶段和非线弹性阶段,其应力-应变关系可以近似地采用双曲线模型来描述(刘秀萍等, 2006)。陈丽华等(2007)对冷杉、杜鹃、冬瓜杨、糙皮桦(*Betula utili*)、花楸(*Sorbus pohuashanensis*)、莢迷(*Viburnum dilatatum*)、卫矛(*Euonymus alatus*)等7种树木根系的应力-应变关系进行实验研究后得出,抛物线模型能比较理想地模拟上述不同树种根系的应力-应变关系。同一种植物在相同根径下,其应力-应变曲线也不完全相同,这与根系结构组成的差异有关(李绍才等, 2006; 朱海丽等, 2008)。刘国彬等(1996)的研究还发现,豆科沙打旺(*Astragalus adsurgens*)和禾本科无芒雀麦(*Bromus inermis*)的应力-应变为对数函数关系,应变递增速度快,不符合胡克定律,其余牧草的本构方程遵从胡克定律。

根系的极限延伸率随着根径的不同而变化(李绍才等, 2006)。羊蹄甲(*Bauhinia*)与黄荆(*Vitex negundo*)根系的极限延伸率表现为随根径增大而降低,可以理解为木质素的含量增加引起;而铁仔(*Myrsine*)根系的极限伸长率与根径的关系表现出单峰形曲线,即随根径增加,初期极限延伸率呈增加趋势,达到最大值后又逐渐降低,这种变化需对根系

进行形态解剖分析后才能作出合理的解释。同样,朱海丽等(2008)发现,四翅滨藜(*Atriplex canescens*)等四种灌木根系的极限延伸率随根径增大而降低。草本根系的极限延伸率和纤维素含量都与根系直径间存在负相关关系(赵丽兵和张宝贵,2007)。有文献记录的最大灌木极限延伸率最大约为16%。草本根系极限延伸率一般较高,紫苜蓿根在直径0.1mm时,极限延伸率可高达19.1%;马唐根在直径0.3mm时,极限延伸率可高达37.5%(赵丽兵和张宝贵,2007)。小麦根系的极限延伸率约为28%(Easson et al., 1995),但向日葵(*Helianthus annuus*)籽苗根系的极限延伸率仅7%(Ennos, 1989),番茄(*Solanum lycopersicum*)根的极限延伸率10%(Gartner, 1994)。猪殃殃(*Galium aparine*)是一种半直立一年生草本植物,下部茎具有很高的延伸性,断裂时极限延伸率高达24%(Goodman, 2005)。可见,大多陆生植物根系都具有较高的极限延伸率。

1.1.4 影响根系抗拉特性的主要因素

根系抗拉特性与树种和立地因子(如当地的环境、季节、土壤环境等)有关(Gray and Sotir, 1996),不同树种的抗拉特性有明显区别。

Genet等(2005)、Tosi(2007)、De Baets等(2008)等对地中海区域不同乔灌木根系的抗拉强度研究表明,不同树种根系抗拉强度之间存在较大差异。

根系的抗拉阻力受种植模式的影响,如自然欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)林的根系比人工欧洲赤松(*Pinus sylvestris* L.)林根系的抗拉力更大。

土壤环境也会影响抗拉强度,生长在松软土壤中的玉米根系比生长在紧密土壤中的玉米根系的抗拉力要大(Goodman and Ennos, 1999)。季节变化也会影响根系抗拉强度,由于水分含量的减少,冬季根系的抗拉强度比夏季的大(Turmanina, 1965)。室内模拟不同含水量土壤中根系拉力研究表明,粗根(1.9~2.4mm)的极限拉力随土壤含水量的增加而增加;中根(0.9~1.2mm)极限拉力的变化则因树种而异(耿威等, 2008)。

Makarova等(1998)比较了1994年12月21日和1995年2月7日两次采集的山毛榉(*Fagus sylvatica*)的抗拉应力发现,第二次采集的根系抗拉应力比第一次采集的根系的抗拉应力要大。Cofie等(2000)测试了与Makarova等(1998)在同一采集地点采集的根系发现,根系抗拉强度比Makarova等(1998)获得的数据相对要高,推测可能原因是季节变化对根系力学特性产生了影响。

不同的拉伸速率对根系抗拉强度也有影响,Cofie和Koolen(2001)发现拉伸速率从10mm/min增加到400mm/min时,根系拉伸应力值增加了8%~20%。

根系的表面积大小也对根系抗拉阻力有较大影响。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,也就增加了根系与土壤的摩擦阻力;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,网状须根却与土壤发生了竖向的摩擦力和横向的挤压剪切力,增大了根系与土壤间的作用力(朱清科等, 2002)。

根系的鲜活度对其力学特性有显著影响。Ziemer和Swanston(1977)的研究结果表明,森林砍伐后,细根2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年后最大直径的根的固土能力显著丧失。Burroughs和Thomas(1977)的研究结果显示,在森林砍伐后的头3年内,根系的数量显著减少,同时单根的抗拉强度迅速衰退。林木砍伐48个月时,根径1cm根的抗拉强度只有活根抗拉强度的26%。杨维西等(1990)对采伐后2年、4年的单根进行了抗拉研究得出,刺槐(*Robinia pseudoacacia*)采伐后,其单根抗拉力明显减小,抗拉力衰减率随着伐后时间的推延而增大,并在伐后前两年很快衰退,后两年衰退进度稍微缓减。

1.2 根系主要化学成分与抗拉力学特性间的关系

木材细胞壁主要由纤维素、半纤维素和木质素三种成分构成。

纤维素以分子链聚集成束和排列有序的微纤维丝状态存在于细胞壁中,起着骨架物质作用,相当于钢筋水泥构件中的钢筋。半纤维素以无定形状态渗透在骨架物质之中,起着基体黏结作用,故称其为基体物质,相当于钢筋水泥构件中捆绑钢筋的细铁丝。木质素是在细胞分化最后阶段的木质化过程中形成的,它渗透在细胞壁的骨架物质和基体物质之中,可使细胞壁坚硬,所以称其为结壳物质或硬固物质,相当于钢筋水泥构件中的水泥。因此,细胞壁的主要成分与根系力学属性密切相关,目前已成为揭示根系力学特性新的切入点,但研究成果较少。

1.2.1 根系纤维素含量与抗拉特性

目前,从根系成分的角度来解释根系抗拉特性的不同,主要集中于纤维素含量和结构的差异。R. L. Hathaway早在1975年就研究了杨树(*Populus*)和柳树(*Salix*)根系的抗拉强度,及与其相关的解剖结构和化学组成,Sjostrom在1993年进一步研究了植物根系力学性质与纤维素性质的关系,但此后直接把根系力学特性和纤维素联系起来的研究进展并不乐观,直到近几年,此方面的研究才开始受到关注(Genet et al., 2005;赵丽兵和张宝贵, 2007; Hales et al., 2009)。

综纤维素(holo-cellulose),也称全纤维素,是植物纤维原料中的碳水化合物的全部,即纤维素与半纤维的综合。

大多研究发现,无论是草本植物还是木本植物,根系的抗拉强度和直径之间存在幂函数递减关系。但这种现象不仅反映了断裂力学中的尺度效应,还与综纤维素或纤维素含量有关。杨树和柳树根系的纤维壁强度(fibre wall strength)与纤维素含量正相关($r=0.87^*$),弹性模量与纤维素含量显著正相关($r=0.87^*$),与木质素/纤维素比值负相关($r=-0.80^*$)(Hathaway and Penny, 1975)。Genet等(2005)研究发现,海岸松(*Pinus pinaster* Ait.)和欧洲栗(*Castanea sativa* Mill.) 0~4mm去皮根系中综纤维素含量与抗拉强度均随着根系直径的减少而增加,美国红橡(*Quercus. rubra*)和北美鹅掌楸(*Liriodendron tulipifera*) 0~2mm带皮根系中综纤维素含量随直径的变化表现出相同的规律(Hales et al., 2009),并且不同直径间综纤维素含量变异性较大,其中美国红橡和北美鹅掌楸最细根($D<0.5\text{mm}$)和最粗根($D>2\text{mm}$)的综纤维素含量相对差异高达40%。草本植物紫苜蓿根系($D=0\sim7\text{mm}$)和马唐($D<1\text{mm}$)根系纤维素含量随直径变化与木本植

物根系中综纤维素的研究结果相似,但两种草本植物根的纤维素含量相差不大,抗拉强度差异却较大,表明植物根的抗拉强度不仅与纤维素含量有关,还取决于根的纤维排列紧密、疏松程度以及根的其他物质组成(赵丽兵和张宝贵,2007)。

1.2.2 根系木质素含量与抗拉特性

木质素也能影响强度特性,尤其在水分含量高的根系中(Hathaway and Penny, 1975)。Scippa等(2006)研究发现,长在斜坡和平地上的鹰爪豆(*Spartium junceum*)根系的生物力学性质可能由于机械组织或成分的变化而加强。对于8个月龄的幼苗,光学显微切片显示,二者的机械组织并没有任何不同,但斜坡上植物根系木质素的浓度比较高。而且8个月龄时,斜坡上鹰爪豆根系和平地上的木质素浓度差异明显,这时破坏负荷也是比较高的。这些发现与以前的报道一致,为了增加稳定性确保植物锚固,根系通过增加木质素含量(Stokes and Mattheck, 1996)或者通过改变细胞壁(Showalter et al., 1992; Telewski, 1995; Shirsat et al., 1996; Zipse et al., 1998; Jamet et al., 2000)对外界荷载做出回应。

1.2.3 根系半纤维素含量与抗拉特性

对于植物抗拉力学性质影响的研究,大多从造纸角度来分析不同半纤维素含量对纸浆力学性能的影响(Mukherjee et al., 1993; Duchesne et al., 2001),从根系固土的角度,对半纤维素含量的研究尚未见报道。

1.3 根显微结构的研究现状

根是植物体长期适应陆地生活的过程中发展起来的器官,外形一般呈圆柱形,在土壤中生长越向下越细,并向四周分枝,形成复杂的根系。

1.3.1 根的显微结构

根的类型可以分为主根、侧根和纤维根,根的显微结构可以分为根尖结构、初生结构、次生结构和根的正常结构。

1. 根尖结构

不论主根或侧根,其最先端到生有根毛的部分称根尖。根尖具有吸收和保护作用。根据根尖细胞生长和分化的程度不同,根尖可划分为根冠、分生区、伸长区和成熟区(图1-1)。

2. 根的初生结构

根尖分生区的细胞经分裂、生长和分化形成的组织,称为初生组织。由初生组织构成的结构,称为初生结构。根的初生结构由表皮、皮层和中柱三部分组成(图1-2)。

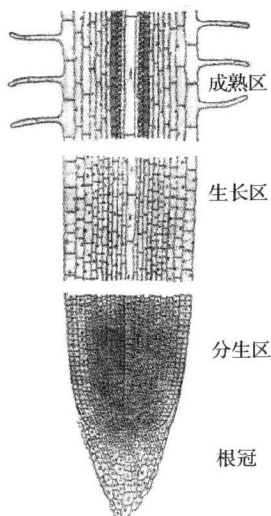


图 1-1 根尖结构

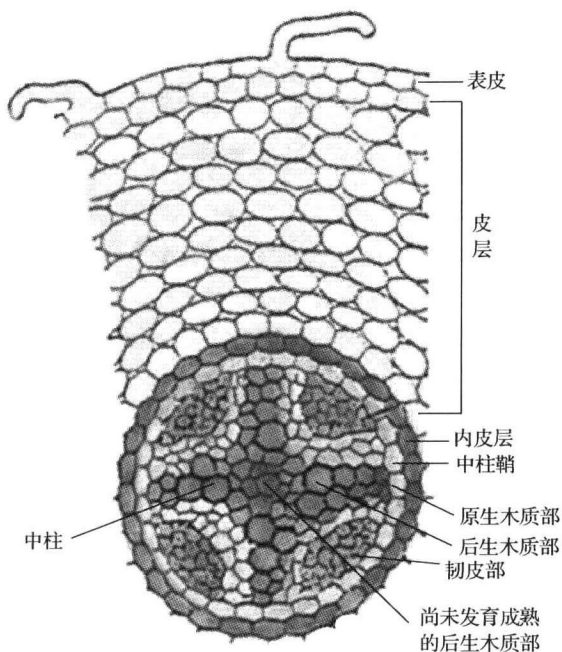


图 1-2 根的初生构造

3. 根的次生结构

大多数植物的主根和较大的侧根,在完成了初生生长之后,由于侧生分生组织(维管形成层和木栓形成层)的发生与活动,根不断地增粗,这种生长过程称为次生生长。由它们产生的次生维管组织和周皮共同组成的结构,叫次生结构(图 1-3)。根的次生结构与

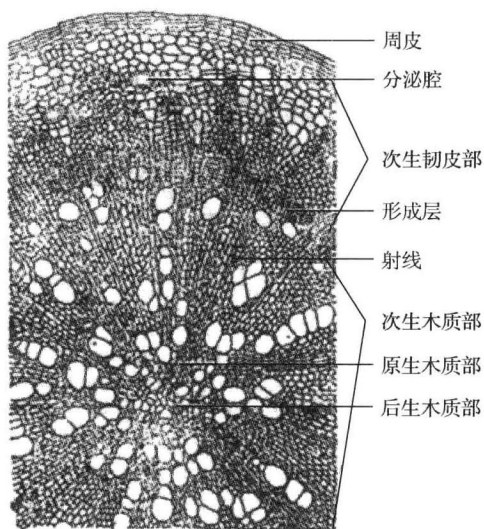


图 1-3 根的次生结构

初生结构不同,次生结构中的周皮代替了初生结构中的表皮,无限外韧型维管束代替了辐射型维管束。

4. 根的异常结构

在次生生长以后,木质部或韧皮部的薄壁细胞恢复分裂能力成为副形成层,又称三生形成层,三生形成层产生三生木质部和三生韧皮部。三生维管束又称异型维管束,见图1-4。

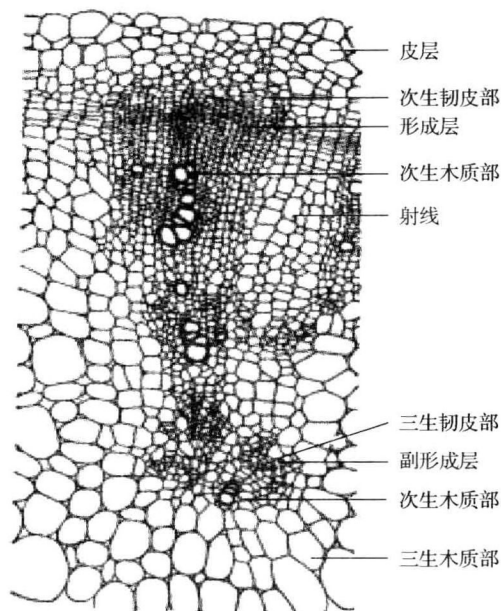


图 1-4 根的异常结构

1.3.2 根的显微结构与力学特性间的关系

根通常生长在土壤之中,是种子植物重要的地下营养器官,在植物的生命周期中担负着吸收、疏导、固着、支持、贮藏和繁殖等多种功能。近几十年来,随着植被护坡技术的不断推广、应用以及护坡理论研究的不断深入,植被在防治土壤侵蚀、稳固坡体、水土保持等方面的作用已被广泛认可。植物根系具有扩张、抗压和抗曲折性能,起坚固和支持作用,而根内部的维管组织、支持着地上部分的茎干和分枝繁多的枝叶,维持整个植物重力的平衡。

根的所有功能都和根的显微结构有一定关系。对根显微结构的观察,可以了解植物的生境需求,辛华等(2002)对盐生植物根结构和通气组织进行研究,为盐生植物的利用和盐土改良提供科学依据;李柏年和高金城(1993)对大花杓兰(*Cypripedium tibeticum* King ex Rolfe)根结构的扫描电镜研究,提供了栽培土壤要求的解剖学依据。

近年来,国内外研究学者先后对多个科、属植物的单根抗拉特性、根-土复合体的抗剪特性及根系固土的力学增强效应进行了大量的研究,刘国彬、程洪等多位学者提出,植物根系强度、延伸率和弹性模量等特性与其微观结构、化学组分存在相关性。由于根系材料