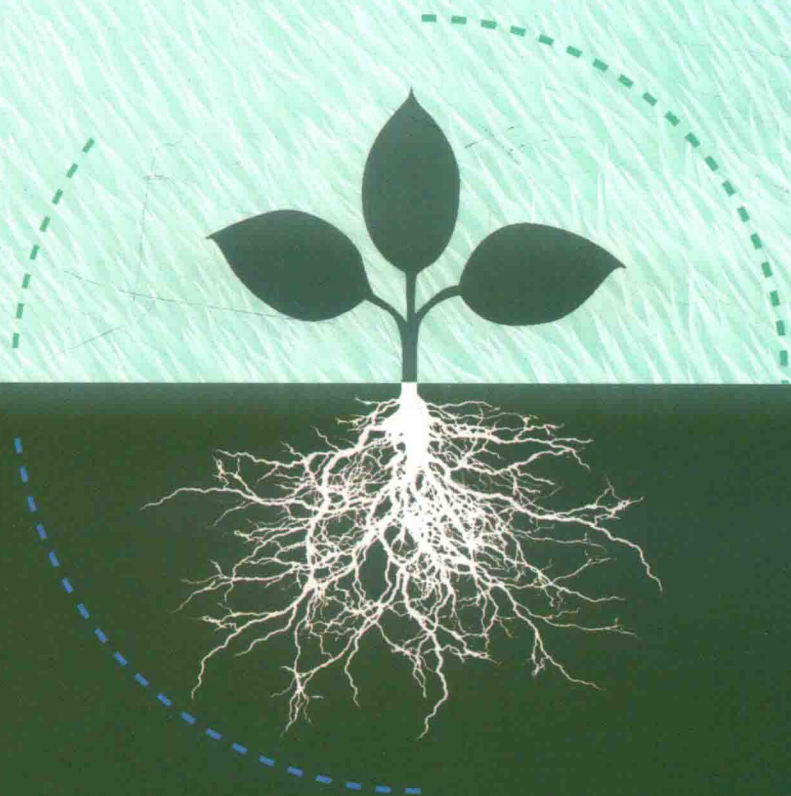


华北典型灌草植物 根系力学研究

张超波 著



非
外
借



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

华北典型灌草植物 根系力学研究

张超波 著

贵州师范学院内部使用



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书基于国家自然科学基金“黄土丘陵区灌草植物固土护坡过程中根系破坏机理试验研究”项目,对植物根系力学开展了系统研究,内容包括根系抗拉力学特性、根系抗拔力学特性、根土复合体抗剪强度特性和植物固土优势物种筛选及评价的研究方法和研究结果。

本书可供从事水土保持工程、生态恢复和区域治理等方面的工作人员及土壤学、生态学、水土保持及环境科学专业的高等院校师生及科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

华北典型灌草植物根系力学研究 / 张超波著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2019.6
ISBN 978-7-5170-7749-7

I. ①华… II. ①张… III. ①草本植物—根系—力学性质—研究—华北地区 IV. ①Q944.54

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第112863号

书 名	华北典型灌草植物根系力学研究 HUABEIDIANXING GUANCAO ZHIWUGENXU LIXUE YANJIU
作 者	张超波 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市密东印刷有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 9印张 166千字
版 次	2019年6月第1版 2019年6月第1次印刷
定 价	60.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言



随着中国全面加强生态环境保护工作的实施推进，生态建设受到高度重视。水土流失造成的土地表层侵蚀、边坡失稳和水土流失，已经成为我国重大生态环境问题。经过不懈努力，我国水土流失治理取得显著成绩，但水土流失形势依然严峻。

防治水土流失的主要措施包括工程措施、农业措施和植物措施。其中植物措施是防治水土流失常用的措施，也是水土保持中最有效和最根本的方法。植物固持水土的作用主要有三个方面：水文效应、土壤生态效应和力学效应。水文效应包括植物地上部分截流降雨，减少降雨对土壤击溅，减少表层结皮，以及枯落物蓄积水分，削弱径流，延长水分入渗时间，减小产流；土壤生态效应包括减小表土产沙，提高土壤抗冲性和抗蚀性，增加土壤有机质和微生物含量，改善土壤结构；力学效应包括植物浅根将土壤变成加筋复合材料，增加土壤抗剪强度，深根锚固浅层土壤，改善坡面应力分布，提高边坡稳定性。根系的加筋与锚固力学固土效应对于边坡失稳等灾害的防治作用突出，是植物固土护坡、提高边坡稳定性最主要的力学效应。

本书作为国家自然科学基金“黄土丘陵区灌草植物固土护坡过程中根系破坏机理试验研究”项目的研究成果之一，旨在系统地研究根系固土力学效应，通过多种试验方法研究了根系抗拉力学特性、抗拔力学特性、根土复合体剪切特性和固土优势植物物种筛选和评价，分析了根系在根径、根长、含水率影响下的单根力学特性，以及在不同土壤深度中和不同含水量下，与土体共同发挥的抗剪强度特性和根土复合体剪切破坏规律，初步筛选了固土护坡优势灌草物种，提出了根系力学性能评价方法。研究结果为根系力学和植物固土力学机理研究提供了理论基础，为水土保持力学效应和生态护坡工程提供了科学依

据。全书共分为6章：第1章绪论，简要介绍本书研究背景和研究意义；第2章国内外研究现状，介绍了根系力学在国内外研究的过程和重要结果；第3章根系抗拉力学特性，分析了反映灌草植物根系自身固土力学性能的抗拉特性；第4章根系抗拔力学特性，探讨了灌草植物根系与土壤相互摩擦部分的力学特性；第5章根土复合体抗剪强度特性，研究了根系对土壤抗剪能力的增强效应；第6章植物固土优势物种筛选及评价，提出了优势力学固土物种的筛选方法并初步筛选了优势物种。

本书得到国家自然科学基金青年基金项目（31600582）、山西省基础研究面上青年基金项目（201701D221224）和山西省高等学校创新人才支持计划项目资助，为项目和本书撰写做出贡献的有太原理工大学的李东嵘、周霞、魏杨、刘鹏翀、刘雅婷，金华市水利水电勘测设计院的欧阳前超，黄河水利委员会的雷相科。在本书编写过程中，多次得到相关专家的指导和建议。在此，对所有提供资助的部门和给予帮助的人员表示衷心感谢。

由于时间短，限于作者水平，书中难免存在不足，恳请读者批评指正。

张超波

2019年3月





目录

前言



1 绪论

1.1 植物根系力学研究背景	1
1.2 植物根系力学研究意义	2



2 国内外研究现状

2.1 植物根系抗拉特性	4
2.2 植物根系抗拔特性	14
2.3 根系增强土壤抗剪性能	22



3 根系抗拉力学特性

3.1 试验材料及研究方法	36
3.2 结果与分析	44
3.3 本章小结	63



4 根系抗拔力学特性

4.1 试验材料及研究方法	64
4.2 结果与分析	69
4.3 本章小结	84



5 根土复合体抗剪强度特性

5.1 试验材料及研究方法	86
5.2 根土复合体剪切特性	90
5.3 本章小结	99



6 植物固土优势物种筛选及评价

6.1 试验材料及研究方法	100
6.2 结果与分析	110
6.3 本章小结	128

参考文献	130
------------	-----

绪 论

1.1 植物根系力学研究背景

水土流失直接关系到国家生态安全，严重的水土流失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。水土流失导致的山体滑坡是全世界常见的自然地质灾害，在中国西部山区滑坡灾害尤为严重。近年来，随着国家经济建设的发展，我们对自然资源的开发规模和强度都在不断扩大，对生态环境的破坏没有得到有效控制，加剧了山区滑坡灾害，其危害程度也在逐年增加，直接威胁周边群众的人身安全，滑坡是制约山区社会、经济发展不可忽视的因素。因此，通过在山坡上种植植物来有效地防治水土流失，是城镇建设和山区发展中一项重要的水土保持课题。

防治水土流失主要分工程措施和植物措施两种。经过长期的研究和实践证明：植被具有改善生态环境、涵养并改良水源和气候、固土护坡以及减少水土流失等作用，这些影响作用是工程措施所不具有的，种养植被来防护水土是一种经济环保的防治方法。植物措施通过以下三个方面达到水土保持的效果：第一，水文效应，植物地上部分能截流降雨，减少降雨对土壤的击溅作用，减少表层结皮及枯枝落叶层蓄积的水分，削弱了径流，延长水分入渗时间，减少了产流；第二，土壤生态效应，植物能改善土壤结构，减少表土产沙，提高表层土壤的抗冲性和抗蚀性；第三，力学效应，植物的根系部分能有效加强土壤抗剪强度，改善坡面浅层土体应力并降低坡面土体应力集中现象，起到锚固表层土壤的效果，降低坡面土体水压力、提高边坡稳定性。植物根系固土的力学效应体现在植物浅层根系的加筋作用和深层根系的锚固作用：浅层根系的加筋作用为植物根系在土壤中错综盘结，是坡面土体在根系延伸范围内成为土与根系的复合材料，根系视为三维加筋材料，增加了土



体黏聚力,同时根系的张拉作用限制了土体侧向变形;深层根系的锚固作用为植物根系穿过坡面浅层的松散风化层,锚固到深处较为稳定的土层中,此效果类似锚杆系统,在植被覆盖的坡面上,侧向根系之间相互缠绕形成了具有一定抗力强度的网状结构,将土体固结成为一个整体,垂直根系与深层土壤之间形成的锚固系统则增强了整个土体的稳定性。

根是植物直接与土壤接触的营养器官,能与土壤颗粒形成根网,将植物体牢牢固定于土壤中,在稳定土壤结构、提高土壤抗蚀性、防止土壤侵蚀方面的作用非常显著,是地上部分所无法替代的。植物根系是高分子有机体,根系纤维素分子键使植物在沿根长方向具有一定的抗拉性,在拉应力作用下表现出一定的弹性(或称黏弹性),以适应轴向拉力。在没有林木生长的边坡上,土体下滑除了首先克服土壤粒子间的黏结力以外,还必须克服滑动时产生的摩擦力,如果把克服黏结力和摩擦力统一理解为破坏时对土体的剪力,则这时的黏结力和摩擦力即为土体的抗剪力。有林地边坡土体滑动时除了克服上述两种力外,还必须克服根系的固持力——根系与土体间的摩擦阻力或根系的抗拉力。坡体滑动时由于根系受拉而导致根系表面与土粒之间发生摩擦,这种摩擦产生的摩擦力阻止根系位移并通过根系表面把摩擦阻力传递给树根,如果树根的抗拉力大于根系表面与土体间的摩擦阻力,则根系被滑动体在滑动时从滑动面以下的土体中抽拉出来。如果根系的抗拉力小于这个摩擦阻力,根系便被拉断而不会抽出。植物固坡措施的力学效应主要集中在根系发挥的力学作用上,因此,针对力学效应的研究被称之为植物固土护坡根系力学研究。

1.2 植物根系力学研究意义

滑坡按滑动体的厚度大体上可以分为浅层滑坡和深层滑坡两种类型。深层滑坡与浅层滑坡相比其滑坡体方量大,深层滑坡通常属于大型滑坡,但发生的频率与浅层滑坡相比要少得多。浅层滑坡的滑坡体方量小,但发生频率大,分布面积广。传统的浅层滑坡治理是采用工程措施。与植被护坡措施相比,工程措施具有能较准确地进行定量设计计算、防治效果明显等优点,但同时也具有耐久性差、防治成本高、破坏原有植被、景观效果差等缺点。植被措施具有防治成本低、景观效果和环境效益明显等突出优点。在越来越注重保护生态环境、人与自然和谐相处的今天,植被措施正逐步成为国内外普遍使用的浅层滑坡治理技术。

植物根系的固土、抗滑、护坡作用已经受到国内外学者的一致研究认



可。大量的研究已经证实植物根系所具有的抗拉、抗拔力学特性是增加边坡稳定性的重要因素和根系固土抗蚀的重要指标。目前植被护坡应用还基本限制在定性和经验的发展阶段,理论研究落后于工程实践。人们还不能用严密的科学理论来描述植物护坡的原理,还不能较为准确地评价植物护坡效果,进而选择合适的植物应用于固土护坡工程。

本书采用多种试验方法全面系统地开展植物根系力学研究,对根系抗拉力学特性、抗拔力学特性、根土复合体抗剪强度特性和植物固土优势物种筛选及评价开展了研究,分析了根系在根径、根长、含水率影响下的单根力学特性,以及在不同土壤深度中和不同含水量下,与土体共同发挥的抗剪强度性质和根土复合体剪切破坏规律,初步筛选了固土护坡优势灌草物种,提出了根系力学性能评价方法。研究结果为根系力学和植物固土力学机理研究提供了理论基础,为水土保持力学效应和生态护坡工程提供了科学依据。

国内外研究现状

2.1 植物根系抗拉特性

2.1.1 植物根系抗拉试验方法

不同植物根系的形态和力学性能差异很大,目前学术界还没有关于根系抗拉试验的规范和标准,国内外研究根系抗拉性能采用的方法和设备各不相同。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探究不同植物根系的抗拉强度及其影响因素。

2.1.1.1 植物根系的采集及保存

对于植物根系抗拉试验中根系的采集和保存,国内外学者往往根据实际条件而采取不同的方法。采集试验备用根系主要有两种主要方法:完全挖掘法和剖面壁法。采用完全挖掘法采集根系时,应尽量防止对根系的机械损伤,采集主直根系时先从基部将根系切断然后将根系慢慢拉出,采集须根时把根系从基部切断后将根系水平整体托出,保证根系的完整性。若将根系连同土体一块采集,运回实验室后,为减小植物蒸腾作用,应除去部分枝叶,定期补充水分,尽量使植物保持生物活性。宋维峰(2006)和王磊(2011)的研究中采用了完全挖掘法采集根系。采用挖掘剖面壁法采集根系时,剖面壁一般挖掘深度为1.0~1.5m,同时保留植株地上部分,随后植入试验盆内带回实验室。为了最大限度地保证根系与挖掘前的状态一致,实验人员通常会在试验盆内放入与根系周围土壤平均含水率接近的试验区土壤,使根系稳固地立于试验盆中。朱海丽等(2008)的研究采用了挖掘剖面壁法挖取根系。笔者通过整理发现,大多数学者采用完全挖掘法采集根系。与挖掘剖面壁法相比,完全挖掘法虽然工作量较大,但其适用性更强,也能有效防止对



根系的机械损伤。

根系水分是指根系含水量的多少,其值为新鲜根系含水质量与其在 105°C 的烘箱内干燥 24h 后干根质量的比值。由于根系含水量较低会使根系纤维素降解而导致根系死亡,且 Hales 等 (2013) 发现根系含水量是影响根系应力与应变的主要控制因素之一。因此为了保持根系强度,挖出后根系的保存方法尤为重要。目前有 5 种保存根系的方法 (Bischetti 等, 2005; Hales 等, 2013)。

(1) 将根系保存在它生长的土壤中或将含有根系的土壤核心在 -20°C 下冷冻。

(2) 将根系在 60°C 的温度下干燥 24h,并在试验前将干燥后的根系浸泡在水中大约 1h 直至达到饱和状态或者浸泡 24h。

(3) 将根系冷冻在装满水的塑料袋中。

(4) 在 -20°C 下冷冻根系样本。

(5) 为了防止微生物降解根系,将根系放在 15% 的酒精溶液中或将其放在冰箱中 4°C 冷藏。

由于木质素和纤维素作为提供根系强度的化合物,所以应用上述根系的储存方法可以延缓根系挖出后根系木质素和纤维素的降解速率。但是,通常拉伸试验一般采用取样后一周内的新鲜根。

2.1.1.2 试验仪器

由于目前没有植物根系抗拉试验的标准,因此进行室内根系抗拉试验采用的仪器也不尽相同,有弹簧秤和自制试验仪器,也有万能材料试验机。

万能材料试验机以其测量精度高、测量范围广、试验控制制度高等优点已被广泛应用于根系抗拉试验,特别是其对拉伸速率的控制、变形位移测量的精确度是自制试验仪器无法比拟的。张超波 (2011)、吕春娟 (2011)、王萍花 (2012) 进行根系抗拉试验时采用的是 WDW-100E 微机控制式万能电子试验机,仪器测力范围为 $0.4\sim 100\text{kN}$,加载速率范围为 $0.005\sim 500\text{mm/min}$,最大拉伸行程为 600mm ,且这三项数据的测量准确度均为 $\pm 0.5\%$,该仪器测量范围较广、精度高。耿威 (2008) 采用的是 YG (B) 026H-25 型织物强力机,测力量程为 $0\sim 2500\text{N}$;嵇晓雷 (2013) 开展狗牙根根系拉伸试验时采用的是 WZL-300 纸张拉力仪,仪器最大量程 100N ,最小分度值 0.001N ,精确度较高;王磊等 (2012) 开展夹竹桃根系拉伸试验时,采用的是 TGH-2B 型微机控制万能试验机,最大拉力量程为 10kN 。弹簧秤和自制仪器以其便携、适应性强等特点被应用于根系抗拉试验。国内较早使用自制仪器的是杨维西 (1988),他采用简单的类似弹簧秤的仪器测定根系的抗拉



力。此后,史敏华等(1996)也采用类似的仪器进行植物根系抗拉力的研究;李会科等(2000)、程洪等(2002)均采用弹簧拉力机测定根系的抗拉力;田佳(2007)和刘耀辉(2007)测定根系抗拉力时,采用了数字测力仪。同时,Hales等(2013)的研究表明简单的弹簧拉力机测量方法是估计根系抗拉强度行之有效的方法。刘国彬等(1996)自制了一个野外快速测定抗拉力的简易工具,该工具利用化学分析滴定管,配以铝质水杯、特制的根夹和标尺等,通过缓慢加砝码和滴定管加水作为拉力源,来测量根系抗拉力;郝彤琦等(2000)在参考刘国彬等(1996)的试验仪器基础上,自制了测量抗拉力的试验装置。近年来自制试验仪器得到了极大的发展,其测量精度也得到了极大提高。在国内采用测量精度为 0.01% 、灵敏度为 $0.2\text{UV}/\text{分度}$ 的电子测量仪和美国产 20kN 的S剪切型拉力传感器以及一些自制的配套装置进行试验,该仪器测量精度、控制度较高(朱清科,2002;陈丽华,2012;刘秀萍,2008;宋维峰,2006)。此外,朱海丽等(2008)根据电子万能试验机的工作原理和基本结构研制了室内单根拉伸试验仪,主要由数据采集系统和工作系统两个部分组成。惠尚(2013)自制了竹子根系抗拉力学特性野外便携试验系统,该系统由机械部分和电子测控部分组成,测力量程 $0\sim 2000\text{N}$,最小分度值 0.01N 。在国外,很多学者也利用自制仪器进行相关试验。Bischetti等(2005)采用自制仪器研究意大利北部主要造林树种根系的抗拉强度。Tosi(2007)采用的仪器主要分为5部分:固定根两端的钢夹、施加拉力的活塞机、 2kN 测力计、位移计以及固定上述设备的仪器台。

2.1.1.3 试验注意事项

(1) 根系直径测定。由于植物根系结构的特殊性,根系沿根轴向存在粗细变化,同时根截面并非规则的圆形,因此同一点处不同测量方向的根径并不相同,但目前的根系抗拉试验都把根系截面当做圆形处理,这必然会带来误差。计算根系抗拉强度时,各学者对直径的取值也各不相同。张超波(2011)采用测定根系两端和根系中部3个位置的直径,取平均值作为该根段的直径的方法;李晓凤(2012)采用了同样的方法。耿威(2008)、苑淑娟(2010)在根系上每隔某一个相等距离做一个标记,在每个标记点正交方向上各测量一次直径,平均值为该点直径,然后取各点的平均值作为该根段的直径。上述方法是减小根系直径测量误差的有效方法。Parr和Cameron(2004)认为,根系被拉断后需要再测量距断裂点 1cm 左右处的直径(根系在断点处一般有明显颈缩,直径数值变小与原值不符),如果测量数据和先前数据出入较大,以拉断后的直径为准,这样能减少对根系抗拉强度的高估。张超波(2011)采用此方法计算油松根系的抗拉强度;王萍花(2012)



也采用了此种方法。赵丽兵等(2007)用扫描器和根系分析软件分析根的初始直径,作为根的断裂处直径来计算抗拉强度。程洪等(2002)计算根系的抗拉强度时,用游标卡尺测定根系被拉断时的断裂面直径,每种试样重复18~36次;杨永红等(2007)对每种试样重复测定10~18次。苑淑娟(2010)计算抗拉强度时,取断裂点处相邻两个标记点直径的平均值作为根系直径。

(2) 根系固定。Genet等(2005)认为只有根系在夹具中间或接近中间处断裂时试验才成功,因为此时的破坏是由拉力引起而非其他的损伤引起。为了提高试验成功率,Nilaweera和Nutalaya(1999)在夹具与根系间加入软木薄片来提高摩擦力。Genet等(2005)在试验中借鉴了该方法。Operstein等(2000)采用在夹具两端粘贴胶皮、缠绕和添加柔性物质等方法来增大根系与夹具间的摩擦,朱海丽(2008)借鉴了该方法。宋维峰(2006)测定油松根系抗拉力时,为防止根系滑动,用聚四氟乙烯密封带作为垫层。嵇晓雷(2013)用纸张拉力仪测量狗牙根根系抗拉力,夹头装置只能用于夹纸张,因此试验时,用木工胶将根系粘贴在纸张表面,再用夹具夹持纸张。

2.1.2 植物根系抗拉变形特性

根系的应力—应变曲线是一项重要的根系力学特性指标,在其曲线上的不同特征点均代表了不同受力阶段下的力学特性,而曲线则代表了根系从受力开始到破坏结束整个过程的力学特性。在防治土体滑坡的各项指标中,延伸率尤为重要;在土体出现滑坡裂缝的情况下,根系会被拉长,即增大了延伸率,使得裂缝处所受的拉力会有有效的传向深层土体,且根系在被拉长的同时即增大了形变量,使得土体在下滑时受到根系的缓冲作用,因此提高了根系固土能力。

赵丽兵和张宝贵(2007)的研究表明了根系的应力—应变特性随物种的不同而有所差异,试验为了证明紫花苜蓿(*Medicago sativa*)和马唐(*Digitaria sanguinalis*)根的应力与应变函数关系以及两者是否遵从胡克定律,得到了如下结果:紫花苜蓿根系的应力与应变呈对数关系且不遵从胡克定律,从而证明了其根是弹塑性材料;马唐根系的应力与应变呈线性关系且遵从胡克定律,从而证明了其根是弹性材料。刘秀萍(2006)对油松根系的试验研究表明,根系在受拉过程中表现出了线弹性和非线弹性两个受力阶段,且应力和应变两者之间的关系能够以双曲线模型表达出来;陈丽华等(2007)对冷杉、杜鹃、冬瓜杨、糙皮桦(*Betula utili*)、花楸(*Sorbus pohuashanensis*)、荚蒾(*Viburnum dilatatum*)、卫矛(*Euonymus alatus*)7种植物根系的试验研究表明,根系在受拉过程中应力与应变的关系能够通过抛



物线模型来表达。也有研究证明应力-应变的关系曲线与根径没有直接的联系,受直径的影响不大,而是取决于根系内部结构的不同。刘国彬等(1996)对豆科沙打旺(*Astragalus adsurgens*)和禾本科无芒雀麦(*Bromus inermis*)的根系试验研究得出了与赵丽兵等(2007)相同的结论,再一次证明了应力-应变曲线在根系力学性能评价中的重要性。李绍才等(2006)通过研究得出根系的极限延伸率随根径大小的改变而发生改变;其中羊蹄甲(*Bauhinia*)与黄荆(*Vitex negundo*)根系的延伸率随根径的增加而减小,铁仔(*Myrsine*)根系的延长率与根径呈单峰型曲线关系,即延伸率随根径的增加而先增大后减小。朱清科等(2002)则在研究四翅滨藜(*Atriplex canescens*)等4种物种根系的试验中证明了延伸率随根径的增加而减小。在已有研究的结论中可以看到灌木树种根系的延伸率最大可以达到16%,而大部分草本植物根系的延伸率均大于灌木,当直径为0.1mm时,紫花苜蓿根的延伸率为19.1%,当直径为0.3mm时,马唐根的延伸率约为37.5%(赵丽兵和张宝贵,2007),并且通过试验得到这两种植物根的延伸率与根径大小呈负相关关系;小麦根系的极限延伸率约为28%(Easson等,1996),但向日葵(*Helianthus annuus*)籽苗根系的延伸率仅7%(Ennos,1990);猪殃殃(*Galium aparine*)的根系延伸率高达24%(Goodman,2005)。可以看出,绝大部分植物根系均有良好的抗拉性能,延伸率也较高。

2.1.3 植物根系抗拉力学性能的影响因素

对植物根系抗拉力和抗拉强度的研究是探究根系固土力学机制的重要基础。影响植物根系抗拉力和抗拉强度的因素主要有根系直径、根系标距、根系含水量、荷载加载速率、采伐时间、根系内部化学成分和微观结构等。其中,大部分的研究是关于根系直径与抗拉力和抗拉强度的关系,而对其他因素的研究相对较少。

2.1.3.1 根系直径

根系直径是影响根系抗拉力和抗拉强度的重要因素。许多学者开展了根系直径与根系抗拉关系的研究,得出的结论主要有以下3种:

(1)已有的研究表明乔木(野久田捻郎,1997;李贺鹏等,2010;张超波,2011)、灌木(耿威,2008;王剑敏等,2011)、草本(Operstein和Frydman,2000;李成凯,2008;张小娟,2013)植物根系的直径越大,根系抗拉力越大,抗拉强度越小,根系直径与根系抗拉力和抗拉强度成幂函数或指数函数关系。

(2)根系直径与根系抗拉强度呈线性相关的关系。周跃等(2002)通过



对华山松和思茅松的侧根进行的研究,李会科等(2000)通过对花椒林根系的研究,田佳等(2007)通过对早熟禾、无芒雀麦、多年生黑麦草、高羊茅的研究,均证实了这一线性相关关系。

(3) 根系直径与根系抗拉强度无明显相关性。De Baets 等(2008)研究芒柄花、绒毛花的抗拉特性时,王剑敏等(2011)、李贺鹏等(2010)研究香港黄檀根系的抗拉性能时,李晓凤等(2012)研究标距为 100mm 的华北落叶松带皮根系在 10mm/min 拉伸速率下的抗拉强度的过程中,都认为根系直径与根系抗拉强度无明显相关性。出现该结果的原因可能是试验样本太少,或者与根系内部结构组分(木质素、纤维素和微观结构)含量有关。

部分学者以室外原位拉拔试验研究根系的抗拉特性。朱清科等(2002)的研究表明根的抗拉力随根系直径的增大而增加,但并不完全成线性比例关系,两者表现出比较明显的指数函数关系。周跃(2002)的研究表明,根系抗拉强度与根系直径呈指数函数关系。杨永红(2007)的研究表明抗拉拔力随着根系直径的增加而增加,抗拉拔强度随着根系直径的增加而减少。从相同直径的根系来看,最大抗拉力大于抗拉拔力,最大抗拉强度大于抗拉拔强度(田佳等,2007)。除了直径因素以外,还有其他方面的研究成果,抗拔法可以用于对根系应力-应变关系进行检测(陈丽华等,2007),植物根系的分布形态直接影响根系的垂直抗拉效果(陈丽华等,2004)。

2.1.3.2 根系标距

目前关于根系标距与抗拉力和抗拉强度之间关系的研究较少,但现有研究均不同程度表明,根系标距会对抗拉强度产生影响,且根系抗拉强度随标距的增加而降低。

朱清科等(2002)对峨眉冷杉、冬瓜杨和杜鹃的根系进行了研究,在根系弹性形变范围内,在根系直径相同而标距不同的情况下,其弹性模量不同。张东升(2002)对长江上游针叶林的研究表明,根系的抗拉强度随着标距的增加减小,且两者的相关关系并不是正相关,多数表现为幂函数关系。张超波(2011)对河北省北沟林场的 5 个树种根系进行的研究表明,根系抗拉强度随标距的增加而降低,抗拉强度与根系标距间满足线性关系,根系标距从 50mm 增长到 250mm 时,根系抗拉强度显著降低。毛伶俐(2007)、姚环(2007)的研究表明,随着根系标距增加抗拉强度减低的梯度较小且两者相关度较弱。周朔(2011)对油松、白桦、落叶松、蒙古栋和榆树林木根系进行一系列研究后得出结论,在直径相同条件下,根系标距较小的根系有较大的抗拉力和抗拉强度,在直径较小的情况下,各根系



标距抗拉力和抗拉强度差异并不明显,但差距随直径的增大而增大,说明根系标距对根系抗拉力和抗拉强度有较大的影响。随根系标距增大,根系抗拉强度、残余应变相应降低,弹性模量变大。王萍花(2012)对油松、白桦、落叶松和蒙古栎4个树种根系抗拉特性的研究发现,在同一径级下,根系标距与最大抗拉力呈负相关关系。蒋云坤(2013)在木兰围场县分别选取了3种草本、5种灌木和5种乔木共13种植物进行根系固土的力学机制研究,表明根系标距对灌木根系抗拉特性有显著影响。苑淑娟(2010)研究了柠条、沙柳、沙地柏、白沙蒿根系标距与抗拉强度关系,实验结果表明,随着试验根系标距的增加,抗拉强度逐渐减小。对每种植物不同试验根系标距时的抗拉力做差异性检验,在 $\alpha=0.1$ 的水平下,不同试验根系标距时柠条、沙柳和沙地柏的单根抗拉强度具有差异性,但白沙蒿单根抗拉强度没有明显的差异性。

2.1.3.3 根系含水量

由于植物根系的含水量与根系生存的土壤情况、季节等因素有很大的相关性,并且根系内部的水分有自由水和束缚水两种,对含水量进行定量测定也比较困难,目前关于根系含水量与抗拉力学性能之间关系的研究较少。

根系水分含量会因为季节的不同而有所差异,含水量不同根系的抗拉强度也会发生变化。早在1965年,Turmanina(1965)就已得出冬季根系水分含量虽然少但根系的抗拉强度却比夏季大。Wasterlund(1989)的研究得出结论,根系强度在12月达到最大值后下降,6月和7月降低到最小值,冬季根系强度比夏季高的原因可能是冬季根系含水量较低。Jane(1970)发现即使纤维减少25%~30%的含水量,但只要含水量高于纤维含水量饱和点,这种变化对纤维强度特性影响极小,因此,可能存在一个含水量的临界点,含水量的变化越过这个临界点将导致抗拉强度的明显变化,但如果没有越过临界点,抗拉强度不会发生显著变化(张超波,2011)。

根系含水量在较小范围内的减小有助于提高根系的抗拉力(Yang等,2016)。李会科等(2000)的研究表明,在根径一定时,干根的抗拉力最大,带土鲜根的抗拉力次之,而湿根的抗拉力最小,这表明随着植物根系含水率越大,根系的抗拉力越小。李谦等(2014)对绿竹根系的研究表明,含水量为12%根系的抗拉强度大于饱和含水量根系,但这种差异在不同径级间表现不同,同时,含水量对根系抗拉强度的影响程度随着根系直径的增加而下降。及金楠等(2012)研究其他因素时,采取将根系在水中浸泡数小时后再进行抗拉试验的方法以避免含水量的差异而引起抗拉强度的变化。李长暄