

# 水土保持学前沿

余新晓 等 编著

 科学出版社

# 水土保持学前沿

余新晓等 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书立足于水土保持学最新理论研究和学科前沿,分11个专题,系统地阐述了当今水土保持学的最新理论、方法和技术,为今后水土保持的学科发展与实践经验推广起到推动作用。

本书可供水土保持学、林学、环境科学、地理科学等专业的研究、管理人员及高等院校相关专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

水土保持学前沿/余新晓等编著. —北京:科学出版社,2015.3  
ISBN 978-7-03-043507-1

I. ①水… II. ①余… III. ①水土保持-研究-中国 IV. ①S157

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第039302号



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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年3月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:350 000

定价:88.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《水土保持学前沿》编委会

主要执笔人(按姓氏汉语拼音排序):

- 毕华兴 教授(北京林业大学)
- 曹文洪 研究员(中国水利水电科学研究院泥沙研究所)
- 陈丽华 教授(北京林业大学)
- 段淑怀 教授级高级工程师(北京市水土保持工作总站)
- 高甲荣 教授(北京林业大学)
- 卢琦 研究员(中国林业科学研究院荒漠化防治研究所)
- 齐实 教授(北京林业大学)
- 王彬 讲师(北京林业大学)
- 王海燕 副教授(北京林业大学)
- 王玉杰 教授(北京林业大学)
- 余新晓 教授(北京林业大学)
- 张长印 教授级高级工程师(水利部水土保持监测中心)
- 张晓明 高级工程师(中国水利水电科学研究院泥沙研究所)
- 赵廷宁 教授(北京林业大学)
- 赵阳 工程师(中国水利水电科学研究院)
- 周金星 研究员(中国林业科学研究院荒漠化防治研究所)

**参与编写人（按姓氏汉语拼音排序）：**

陈俊刚（北京林业大学）

霍云梅（北京林业大学）

贾剑波（北京林业大学）

莫 莉（北京林业大学）

朱永杰（北京林业大学）

## 序

水土资源是生存之本、生产之要、生态之基。近年来由于人口的激增,使生态环境持续退化,资源相对短缺、生态环境脆弱、自然灾害频发、环境容量不足,严重制约着整个社会和谐发展。其中,水土资源的流失对人类生存影响甚多。近年来,世界各国加速发展工农业生产和进行基本建设项目,同时也不断破坏天然植被,水土流失日益严重。因此,水土流失不仅是当前发展亟待解决的问题,也是今后可持续发展战略的不可避免的工作。治理水土流失的作用既能减轻水土资源和人口增长之间的矛盾,又是当前国家生态文明建设的主要方向。将长期的水土保持实践活动总结成理论方法和技术,积极地指导当前国民经济的生产、生活,是国家经济快速发展和生态环境建设的关键步骤。

《水土保持学前沿》一书立足于水土保持工作的最新理论研究和学科前沿,组织国内外长期从事水土保持学科研、教学和生产管理的第一线科技工作者对最新研究成果整理总结,系统阐述了当今水土保持学最新的理论、方法和技术。该书从水土力学角度解释了水土流失的发生、发展的机理。同时将山地、荒漠、平原、城市等不同地貌的水土保持工作进行了系统的归纳,总结出了一套系统的、科学的、完整且简便易行的水土保持新方法和新技术。该书还将新兴起的生态清洁流域治理、生态修复、生态服务功能评价、生态补偿、PM<sub>2.5</sub>防治和3S技术等原理与技术与水土保持工作结合,总结归纳当代水土保持学与生态、环境、地理信息等学科的交叉区域和耦合点,从理论层面上提出了最新的水土保持学前沿的理论、方法和技术观点,为当前国家经济、政治、文化、社会的快速发展提供理论指导和技术支持。

该书的出版,无疑对我国水土保持学的可持续研究和人们环保意识的提高起到积极的推动作用,同时对于促进水土保持建设在国民经济中的主导地位,提高水土保持科技工作者和公众对水土保持的认知水平,加快将水土保持被纳入国民经济核算体系及正确处理社会经济发展与水土保持工作之间的关系具有重要的现实意义。

中国工程院院士 **王浩**

2014年11月

## 前 言

水土资源是人类赖以生存的宝贵资源。近年来,世界各国加速发展工农业基建的同时,造成严重的水土流失。因此,水土保持作为重大民生问题,是当前乃至今后很长时间的热点。近年来,水土保持作为国家生态建设的重点课题,经过不断地研究和创新,已取得一系列的喜人成果。而水土保持学作为一门边缘学科,从水土保持实践经验中,也总结出大量科学有效的新理论、新技术、新经验和新方法。对指导今后水土保持研究起到指导性作用。本书立足于水土保持学最新理论研究和学科前沿,组织国内外长期从事水土保持学科研、教学和生产管理的第一线科技工作者对最新研究成果整理总结,系统地阐述了当今水土保持学最新的理论、方法和技术。全书共有 11 个前沿专题,包括:植物根系固土护坡机理;水土保持生态清洁流域治理原理与技术;水土保持生态修复原理与技术;山地侵蚀灾害防治原理与技术;城市与平原水土保持原理与技术;石漠化防治原理与技术;防沙治沙技术模式;水土保持与 PM<sub>2.5</sub> 防治原理与技术;水土保持生态服务功能及其价值量计算;水土保持生态补偿原理与方法和水土保持 3S 技术原理与方法等最新的水土保持学前沿的理论、方法和技术热点。

水土保持学的许多重要理论和实践问题的研究尚在探索之中,随着研究的不断深入,必将对水土保持学学科理论体系的发展和应用起到积极推动作用。作者殷切期望本书的出版能引起有关人士对该研究领域的更大关注和支持,并希望能对从事水土保持及相关学科的专家学者有所裨益,共同将本学科内重要的科学领域推向新的发展阶段。本书的研究资料的积累过程实际上就是作者从事水土保持科研和研究教学的过程,曾先后得到李文华院士、蒋有绪院士、尹伟伦院士和崔鹏院士等诸位先生的指导,并请王浩院士为本书作序。在此一并表示衷心的感谢!

鉴于水土保持学研究的复杂性及作者的知识 and 能力有限,书中难免有不妥之处,敬请读者不吝赐教。

余新晓

2014 年 11 月于北京

# 目 录

序

前言

<b>第 1 章 植物根系固土护坡机理</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 根系增强理论 .....	2
1.2.1 根-土相互作用 .....	3
1.2.2 黏聚力与根系增强作用 .....	4
1.2.3 根增强作用模型 .....	5
1.3 加筋理论 .....	8
1.4 锚固理论 .....	9
1.5 研究展望.....	10
1.5.1 根系形态研究 .....	10
1.5.2 深入研究根-土界面的摩擦作用.....	10
1.5.3 根系增强土体作用演化过程 .....	10
1.5.4 稳定性分析 .....	10
参考文献 .....	10
<b>第 2 章 水土保持生态清洁流域治理原理与技术</b> .....	13
2.1 引言.....	13
2.2 生态清洁小流域概述.....	13
2.2.1 概念和内涵 .....	13
2.2.2 生态清洁小流域治理的理论基础 .....	14
2.2.3 生态清洁小流域建设与传统小流域综合治理的主要联系与区别 .....	16
2.3 生态清洁小流域的治理措施.....	17
2.3.1 生态清洁小流域 .....	17
2.3.2 生态清洁小流域治理措施布局 .....	17
2.3.3 生态清洁小流域主要治理措施 .....	19
2.4 生态清洁小流域监测与评价.....	26
2.4.1 生态清洁小流域监测 .....	26
2.4.2 生态清洁小流域评价 .....	27
2.4.3 生态清洁小流域的建设标准 .....	28
2.5 生态清洁小流域管理.....	28
2.5.1 组织管理.....	28
2.5.2 运行技术管理 .....	29



---

2.6 结语与讨论	29
参考文献	29
<b>第3章 水土保持生态修复原理与技术</b>	<b>30</b>
3.1 引言	30
3.1.1 水土保持生态修复的来由及提出	30
3.1.2 水土保持生态修复发展历程	31
3.1.3 开展水土保持生态修复的科学意义	32
3.2 水土保持生态修复原理与技术模式	33
3.2.1 水土保持生态修复原理	33
3.2.2 生态脆弱区水土保持生态修复关键技术及模式	39
3.3 结语与讨论	49
参考文献	50
<b>第4章 山地侵蚀灾害防治原理与技术</b>	<b>51</b>
4.1 引言	51
4.2 山地灾害的基本知识	52
4.2.1 山地灾害的概念和成因	52
4.2.2 山地灾害的特征与分类	54
4.2.3 山地灾害的防治	55
4.2.4 山地灾害研究的基本内容	56
4.3 山地灾害的发生条件	56
4.3.1 滑坡的形成条件	56
4.3.2 泥石流的形成条件	57
4.3.3 山洪的形成条件	59
4.4 山地灾害的防治技术体系	60
4.4.1 山地灾害的预防	60
4.4.2 山地灾害的预测预警技术	60
4.4.3 山地灾害的防治措施技术	62
4.5 结语与讨论	64
参考文献	65
<b>第5章 城市与平原水土保持原理与技术</b>	<b>67</b>
5.1 引言	67
5.2 城市水土保持	67
5.2.1 城市水土保持的相关概念与内涵	67
5.2.2 城市水土流失的特点与评价	68
5.2.3 城市水土保持措施与实践	70
5.2.4 存在问题与挑战	71
5.3 平原水土保持	72
5.3.1 平原水土保持的概念与内涵	72

5.3.2 平原水土流失危害及成因分析 .....	72
5.3.3 平原水土流失的类型和特点 .....	74
5.3.4 平原水土保持工作面临的主要问题 .....	75
5.3.5 平原水土保持对策和建议 .....	76
参考文献 .....	78
<b>第6章 石漠化防治原理与技术 .....</b>	<b>79</b>
6.1 引言 .....	79
6.1.1 喀斯特地貌及石漠化的概念 .....	79
6.1.2 喀斯特石漠化现状与分布 .....	79
6.1.3 喀斯特石漠化成因与危害 .....	81
6.1.4 石漠化防治现状 .....	82
6.2 石漠化防治原理与技术 .....	82
6.2.1 石漠化防治原理 .....	82
6.2.2 石漠化分区治理 .....	83
6.2.3 石漠化防治技术 .....	87
6.3 结语与展望 .....	95
6.3.1 结论 .....	95
6.3.2 展望 .....	96
参考文献 .....	96
<b>第7章 防沙治沙技术模式 .....</b>	<b>98</b>
7.1 引言 .....	98
7.2 中国沙化土地治理分区 .....	99
7.2.1 干旱沙漠类型区 .....	99
7.2.2 高寒干旱半干旱沙化土地类型区 .....	100
7.2.3 半干旱沙地及沙化土地类型区 .....	101
7.2.4 半干旱、半湿润沙化土地类型区 .....	103
7.2.5 湿润沙化土地类型区 .....	103
7.3 防沙治沙技术体系 .....	104
7.3.1 植物措施 .....	104
7.3.2 物理治沙措施 .....	118
7.3.3 化学治沙措施 .....	119
7.3.4 保护性耕作措施 .....	122
<b>第8章 水土保持与 PM<sub>2.5</sub>防治原理与技术 .....</b>	<b>128</b>
8.1 引言 .....	128
8.2 城市 PM <sub>2.5</sub> 基本问题 .....	129
8.2.1 PM <sub>2.5</sub> 的定义 .....	129
8.2.2 PM <sub>2.5</sub> 对人体健康的影响 .....	129
8.3 城市 PM <sub>2.5</sub> 来源 .....	130

8.3.1	PM <sub>2.5</sub> 自然来源	130
8.3.2	PM <sub>2.5</sub> 人为来源	130
8.3.3	PM <sub>2.5</sub> 的源解析	130
8.4	PM <sub>2.5</sub> 监测设备及结构	130
8.4.1	PM <sub>2.5</sub> 分离	131
8.4.2	PM <sub>2.5</sub> 测定	131
8.5	城市森林阻滞吸收 PM <sub>2.5</sub> 等颗粒物	132
8.5.1	森林植被调控 PM <sub>2.5</sub> 等颗粒物机理	132
8.5.2	森林阻滞吸附 PM <sub>2.5</sub> 等颗粒物与气象因素的关系	132
8.5.3	森林对于 PM <sub>2.5</sub> 等颗粒物调控作用	132
8.5.4	影响森林调控 PM <sub>2.5</sub> 等颗粒物的影响因素	135
8.5.5	森林调控 PM <sub>2.5</sub> 等颗粒物存在问题与发展趋势	136
8.6	城市水土保持调节 PM <sub>2.5</sub> 的功能	136
8.6.1	城市水土保持生物措施	137
8.6.2	城市水土保持工程措施与临时措施	137
8.7	防控 PM <sub>2.5</sub> 的城市水土保持政策	138
8.7.1	本地尘	138
8.7.2	外来尘	139
8.7.3	水土保持建议树种选择	139
8.8	展望	140
	参考文献	141
<b>第9章</b>	<b>水土保持生态服务功能及其价值量计算</b>	<b>144</b>
9.1	引言	144
9.1.1	保持和涵养水源功能	144
9.1.2	保持和改良土壤功能	145
9.1.3	固碳供氧功能	146
9.1.4	净化空气功能	146
9.1.5	防风固沙功能	146
9.1.6	生物多样性功能	146
9.2	水土保持生态服务价值支撑理论	147
9.3	水土保持生态功能评价指标体系	148
9.3.1	指标选取的原则	148
9.3.2	指标及指标体系	149
9.4	水土保持生态服务功能分布式测算方法	149
9.4.1	水土保持生态服务功能分布式测算	149
9.4.2	水土保持生态服务功能物质质量测算结果	151
9.5	各项水土保持措施生态服务功能分析与计算方法	152
9.5.1	水土保持工程措施	152

---

9.5.2	水土保持农业措施	159
9.5.3	水土保持林草措施	164
9.5.4	生产建设项目水土保持措施	166
9.5.5	小结	169
9.6	水土保持生态服务价值量估算方法	171
9.6.1	保持与改良土壤价值量估算方法	171
9.6.2	保持和涵养水源价值估算方法	171
9.6.3	固碳制氧价值估算方法	172
9.6.4	防风固沙价值估算方法	172
9.6.5	净化空气价值估算方法	172
9.6.6	生物多样性价值估算方法	172
9.6.7	小结	173
9.7	总结	174
	参考文献	174
<b>第 10 章</b>	<b>水土保持生态补偿原理与方法</b>	<b>176</b>
10.1	引言	176
10.1.1	水土流失的危害	176
10.1.2	水土保持的作用	177
10.1.3	水土保持生态补偿的概念及分类	178
10.1.4	水土保持生态补偿的发展历程	178
10.2	水土保持生态补偿的原理与方法	181
10.2.1	生态补偿的理论基础	181
10.2.2	水土保持生态功能补偿机制	184
10.2.3	我国水土保持生态补偿分区及补偿要素	188
10.2.4	水土保持生态功能补偿法律政策体系	190
10.3	主要结论与对策建议	193
10.3.1	主要结论	193
10.3.2	对策建议	194
	参考文献	195
<b>第 11 章</b>	<b>水土保持 3S 技术原理与方法</b>	<b>197</b>
11.1	引言	197
11.2	GIS 原理与方法	198
11.2.1	GIS 组成	198
11.2.2	GIS 空间数据结构	198
11.2.3	GIS 数据输入	199
11.2.4	空间数据录入后的处理	201
11.2.5	空间信息查询	202
11.2.6	空间分析	202

---

11.3 遥感技术原理与方法.....	205
11.3.1 遥感系统的组成与类型 .....	206
11.3.2 电磁波与光谱特征 .....	207
11.3.3 遥感成像原理 .....	207
11.3.4 遥感图像处理 .....	208
11.3.5 RS在水土保持与荒漠化防治中的应用 .....	211
11.4 GPS原理与方法 .....	212
11.4.1 全球定位系统的系统组成 .....	213
11.4.2 基本定位原理 .....	213
11.4.3 GPS接收机工作原理及分类 .....	215
11.4.4 GPS在水土保持与荒漠化防治中的应用 .....	215
11.5 结语与讨论.....	216
参考文献.....	217

# 第 1 章 植物根系固土护坡机理

## 1.1 引言

我国是世界上水土流失最严重的国家,同时也是世界上边坡地质灾害多发国家。其原因一是由于我国山区面积大,山脉众多,山区面积占全国总面积的 2/3,山区面积大意味着发生边坡地质灾害的可能性就大。二是由于我国正处于高速地发展经济时期,各地都在进行开发建设,由此产生的人为边坡也在增加,在破坏了自然植被后,如果不进行很好的修复和保护,那么我国水土流失和边坡地质灾害还会增加,使我国环境和经济发展都蒙受很大的损失。

对于浅层滑坡,过去我们总倾向于使用工程护坡。工程护坡固然可以减少水土流失、加固边坡,但使用工程护坡有其弊端。首先使用工程护坡会使生态环境彻底被破坏,无法恢复,对环境造成永久伤害,切断了各种环境要素之间的联系。其次使用工程护坡,由于护坡工程的自重大,附着于边坡上,增加了边坡的重量,虽然可以减小浅层滑坡的发生,但是却又存在诱发大型滑坡潜在危险。而采用植物护坡可以很好地弥补工程护坡的不足。植物具有改善环境,涵养水源,改良土壤,防止水土流失,加固边坡的作用。采用植物护坡不仅可以保护生态环境,使环境要素彼此联系,也可以起到很好地稳定边坡的功效。采用植物护坡来预防和治理浅层坡面地质灾害,是一种双赢。

早在明朝时期,我国就已经开始通过栽植柳树(*Salix* spp.)来加固边坡堤坝<sup>[1]</sup>;17 世纪 30 年代,日本便开始在荒山上铺设草皮,种植植物,来保护和稳定边坡;而直到 19 世纪欧洲人们才开始逐渐利用植被来加固边坡<sup>[2]</sup>。20 世纪 30 年代以后,采用植物固土护坡才开始流行起来,最初只有少数欧洲国家利用植物对河岸、道路两侧边坡进行防护,到了 20 世纪 40 年代末,英美等国才开始逐渐接受并大量使用植物对公路边坡以及绿化带进行防护。新加坡、马来西亚等一些国家,也受到了“绿色护坡”的影响,逐渐体会到植物固土护坡的好处,开始使用大量的植物措施来固坡。由于植物固坡在世界范围内的扩散迅速,吸引了大批学者,形成了学术研究的小高潮。

20 世纪 30 年代学者们开始对植物根系固土进行研究,并且主要集中在根系如何增加坡面抗滑性能、根系如何减小水流对地表的冲蚀以及根系如何固土这几个方面。Holch 是第一个将不同的森林植被根系作为影响坡面稳定因素来进行研究的学者<sup>[3]</sup>;到了 20 世纪 50 年代,Croft 和 Adams 研究了森林的砍伐对坡面崩塌的关系,他们的研究结果表明森林砍伐后比森林砍伐前坡面发生了更多次的崩塌,崩塌滑坡次数的增多是由于森林砍伐后,砍伐的林木根系失去生命,从而减小了固持土体的能力;20 世纪 60 年代和 70 年代早期 Bishop、Stevens、Swanston、Gray 等学者的研究也证明了被砍伐的林木根系与未砍伐的林木根系相比,防止山体崩塌的能力要逊色得多<sup>[4-8]</sup>。Bishop 和 Stevens 对阿

拉斯加山体的研究表明,在森林砍伐后,坡体发生滑坡的次数在 10 年之内增加了 4.5 倍<sup>[4]</sup>;Gray 连续 5 年观测森林砍伐区与森林覆盖良好区域的山体蠕变,最终发现森林砍伐区比森林覆盖良好区山体蠕变大得多<sup>[9]</sup>;Wu 研究了威尔士岛森林砍伐区的山体滑坡,发现在森林被砍伐后,秋季降雨频率的增加会引发更多的山体滑坡<sup>[10]</sup>。除了室外研究,室内试验证明了根系的存在增加了土体的剪切强度,大量学者的室内研究结果表明:根系所增强土体的抗剪切强度与土体内根系的密度或者是根系的横截面积成正比<sup>[11-12]</sup>。

在根系固土力学模型的研究中 Wu 和 Waldron 可以被称为奠基者。20 世纪 80 年代 Wu 和 Waldron 等通过试验研究,提出了植物根系能够分泌胶结物质来增加土壤的黏聚力,并且植物根系能够接受土体传导过来的荷载,从而改善土体的变形特性等观点<sup>[10,12]</sup>。Wu 和 Waldron 在构建模型时,假设植物根系符合线弹性材料,并且植物的垂直主根能够穿越剪切面,即从浅土层贯穿到深土层。根据垂直根系阻碍剪切面滑动的机理,他们推导出第一个根系的力学平衡公式<sup>[10,12]</sup>。Wu 和 Waldron 的这项研究,使根系固土机理的研究进入了新的阶段。

进入新世纪以后,随着研究手段和研究方法的进步,人们发现 Wu 和 Waldron 所假设的穿过剪切面的所有根系同时达到抗拉强度不符合实际。2005 年,Pollen 和 Simon 针对 Wu 和 Waldron 模型的缺陷,对模型进行了升级。Pollen 与 Simon 建立了一种能够描述在剪切过程中,根系逐渐断裂的模型——纤维束模型(Fiber Bundle Model,FBM)<sup>[13]</sup>。2011 年,Schwarz 等在进行了根束原位测试后,也提出了 Wu 和 Waldron 的模型的确夸大了根系对土体的增强效果,并且指出一束根系抗拉强度并不是所有根系抗拉强度的总和,在同年 Schwarz 等又通过试验提出了另一种根系固土力学模型——根束模型(Root Bundle Model,RBM)<sup>[14]</sup>。

## 1.2 根系增强理论

土体基本不抗拉,抗剪强度也比较小,植物根系与土体相比,具有较大的抗拉强度。当含根土体受到外部载荷时,土体通过根土间的相互作用,将载荷传递到植物根系上,此时土体荷载减小,植物根系受力增加,发生形变,约束土体变形,从而增加土体的抗剪强度。由于外部载荷的作用,根系发生形变,会发生两种形式的破坏,即要么从土体中被拉拔出去,要么由于达到了抗拉强度而断裂。当含根土体受到外部载荷而土体与根系共同对抗荷载,两者之间发生相对滑动的阶段时,根系对土体的增强作用通过两者界面上所激活的摩擦阻力决定;而当外部载荷较大,根系由于达到了抗拉强度而断裂,那么此时根系对土体的增强作用主要取决于根系的抗拉强度。根系被拉断或者被拔出这两种形式,由于其机理不同,所以它们对土体产生变形的约束作用也不同,产生的作用力也就不同,因此这两种形式的根-土界面作用机理也自然不同。

最早对植物根系进行增强理论研究的是 Wu 和 Waldron,这两位学者对于植物根系固土护坡机理的研究做出了很大的贡献<sup>[12,15]</sup>。其中 Waldron 于 1977 年首先提出对于加筋土的简单力学模型——力平衡模型,但该模型没有考虑根系与土体的相对滑动,即根系拔出土体时的情况。直到 1981 年 Waldron 和 Dakessian<sup>[11]</sup>经过试验研究发现,出根要么

被拔出,要么被拉断。2005年 Norris<sup>[16]</sup>做了一系列关于嵌入土体中的单根拉拔试验后提出,在拉拔过程中,根系首先发生非线性的弹性形变,如果形变没有使根系达到抗拉强度,根系就会被拔出,如果在形变过程中根系达到了抗拉强度,那么根系就会被拉断。此外,1990年 Ennos<sup>[17]</sup>和2007年 Hamza 等<sup>[18]</sup>通过野外试验和室内试验同时验证了植物根系在受到拉拔发生形变时的力位移间的非线性关系。

### 1.2.1 根-土相互作用

#### 1.2.1.1 根系拔出或拔断机理

##### 1) 拔出或拔断过程

Hamza 等<sup>[18]</sup>通过试验研究,测定出了单根受到拉拔时的力与位移的关系曲线,并用图表的形式加以描述。单根力与位移关系,根系拔出或拔断的过程如图 1-1 所示。

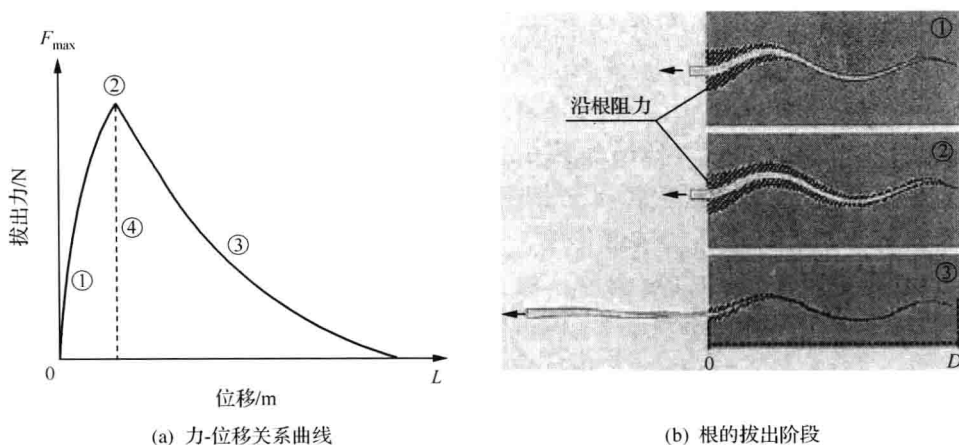


图 1-1 根拔出时的力-位移关系<sup>[19]</sup>

如图 1-1 所示,根系在受到拉力后的位移可分为 3 个阶段,第一阶段是一个伸长阶段,即图 1-1(a)、(b)中的①阶段:由于拉力的作用,根系首先自身会被拉长,此时沿着根土界面上的摩擦力随着根系的伸长被激活。第二阶段为一个点,即图 1-1(a)、(b)中②,该点代表拉力的最大值,如果此时没有达到根系的抗拉强度,那么此时整条根在土体中已经全部发生过形变了,沿着整条根,根土界面上的摩擦力全部都被激活了;如果此时达到根系的抗拉强度,那么根系就会被拔断,力和位移的曲线就由图 1-1(a)中的①②④组成,根系被拉断后,可能会由于弹性形变将拉长的部分缩回去,如此的话其上便没有载荷,也有可能由于根土间的摩擦阻力而保持着拉长的状态,那么其上的载荷会有一些的残余值,该值与它的残余变形长度有关。第三阶段就是拔出阶段,如图 1-1(a)、(b)中的③阶段。随着根系逐渐被拔出来,所需的拉力越来越小。

##### 2) 根系的几何特征对根系拔出试验影响

我们通常所说的根系形态,就是根系的几何特征,对根系拔出力有很大的影响。2011年, Schwarz 和 Cohen<sup>[14]</sup>通过对根系拔出的室内试验和室外原位试验中发现,根长、根弯



曲度、根分支点等根系几何参数对于根系的拔出力有关键性的影响:具有分支点的根系与没有分支点的根系相比,其分支点处的侧根在拔出时也沿着根土界面激活了摩擦力,而且侧根与拉拔的方向存在一定夹角,使得根系拔出需要更大的力。分支点就是在主根上生长出直径大于 0.5 mm 侧根的点。如图 1-2 所示,圆圈标记点即为分支点。

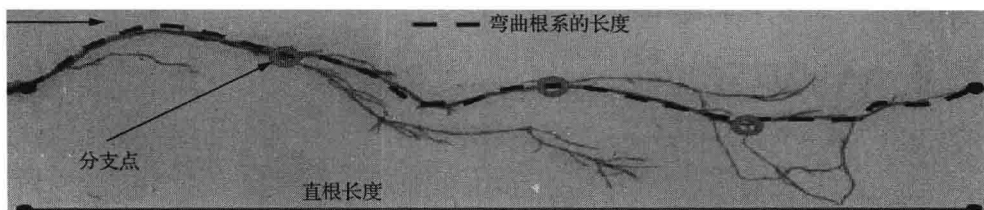


图 1-2 根的几何特征<sup>[14]</sup>

弯曲度大的根与弯曲度小的根相比也需要更大的拔出力,其原理也是由于与拉拔方向存在夹角,根土界面的面积有所增加,激活了更多的摩擦力。根长较大的根也比根长较小的根需要更多的拔出力,因为随着根长的增大,其沿着根土界面上的摩擦力也就增大,因而拔出时需要更大的拔出力。有关学者也通过对整个根束的原位拔出试验中得出,在拔出力逐渐减小之前,根束所需的拔出力可能存在多个峰值点,这与根束的几何特征有很大的关系。

### 1.2.1.2 根土界面摩擦

根土界面上的摩擦作用受到很多因素的影响,如土壤类型、气温、土壤含水量等,根土界面上的摩擦力直接影响着根系拔出试验的力-位移曲线。在含根土壤中,根系与土壤存在着物质的交换,根系分泌物、根系的形态和土壤颗粒的结构等都会增加根土复合体的抗剪切强度。在根系受到荷载而发生形变的过程中,根土界面的摩擦从最初的根土间静摩擦转变为根土间的滑动摩擦。2010年, Schwarz 和 Cohen<sup>[19]</sup>将根土间摩擦作用分成 2 部分:根土界面间的摩擦和分支点的摩擦。因为在根分支点处,由于拉拔作用,侧根根土界面上的摩擦力也被激活,也从静摩擦转向滑动摩擦,增加了拉拔力。Schwarz 和 Cohen<sup>[19]</sup>通过  $n$  个分支点将根长划分为  $n+1$  段,从根尾开始分别为 0 段、1 段、 $\dots$ 、 $n$  段,得到根系的总拔出力为

$$\text{根土界面静摩擦力: } \tau_d = C + \sigma \tan \varphi$$

$$\text{根段 } i \text{ 的总摩擦力: } f_i = \pi b \tau_d d_i$$

$$\text{总拔出力: } F_t = \pi d_0 b \tau_d + \sum_{i=1}^n f_i。$$

式中,  $\tau_d$  为根土界面静摩擦力(kPa);  $C$  为土的黏聚力(kPa);  $\sigma$  为土的正压力(kPa);  $\varphi$  为土的内摩擦角( $^{\circ}$ );  $d_0$  为根尾 0 段的直径;  $b$  为各分段的平均长度;  $f_i$  为根段  $i$  的总摩擦力。

### 1.2.2 黏聚力与根系增强作用

Wu 和 Waldron 认为,根系增强土体的抗剪强度主要是通过根系提供土体的附加黏