

陕北黄土区 植物根系抗侵蚀研究

李强 张正 脱登峰 亢福仁 张荟瑶 著



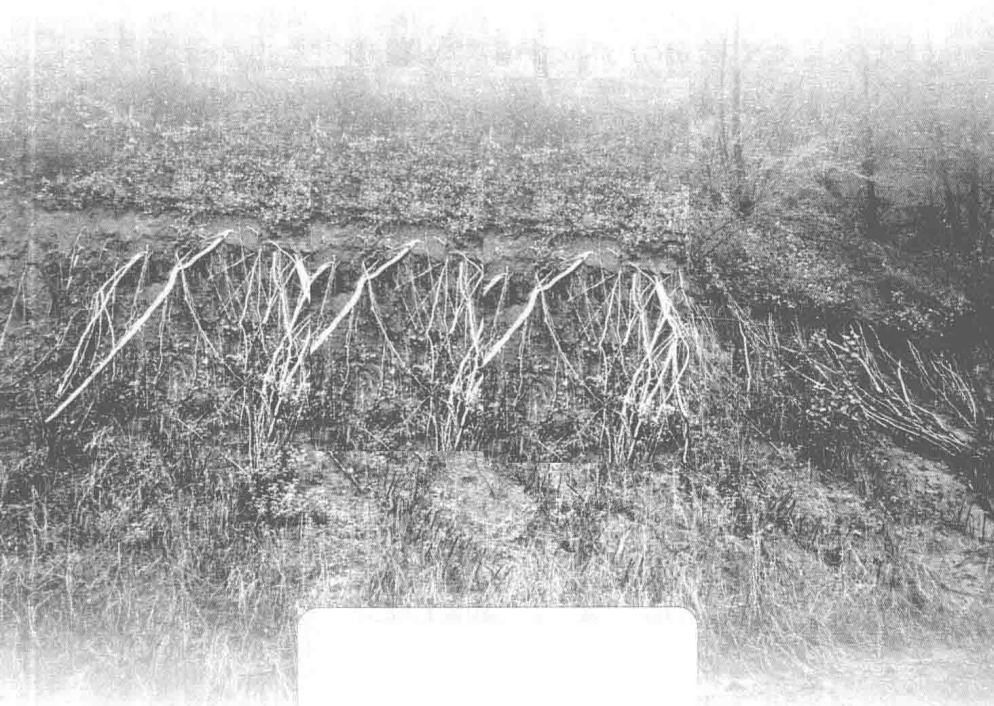
非
外
借



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

陕北黄土区 植物根系抗侵蚀研究

李强 张正 脱登峰 亢福仁 张荟瑶 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书的主要内容包括：综述了植物根系研究历史、根系抗侵蚀动态发展；分析陕北黄土水蚀主导区植物根系抗侵蚀机理；研究植物根系抗侵蚀的季节性特征，以及黄土区典型退耕模式下植物根系抗侵蚀特征；研究了陕北水蚀风蚀交错区沙生植被根系对土壤水蚀、风蚀，以及水蚀风蚀交错发生的调控效应。

本书可为正确认识植物根系抗侵蚀机理、效应及黄土区生态环境建设提供数据支撑和科学依据。本书适合水土保持领域的相关研究人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目（C I P）数据

陕北黄土区植物根系抗侵蚀研究 / 李强等著. — 北京：中国水利水电出版社，2019.4
ISBN 978-7-5170-7682-7

I. ①陕… II. ①李… III. ①黄土区—植物—根系—土壤侵蚀—防治—研究—陕北地区 IV. ①S157

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第092841号

书 名	陕北黄土区植物根系抗侵蚀研究 SHANBEI HUANGTUQU ZHIWU GENXI KANGQINSHI YANJIU
作 者	李强 张正 脱登峰 亢福仁 张荟瑶 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	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	140mm×203mm 32开本 4.625印张 158千字
版 次	2019年4月第1版 2019年4月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	28.00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

植物根系不仅从土壤中吸收水分、养分，而且参与土壤中的能量流动和物质循环，在植被恢复、土地复垦和农业土壤资源化利用中扮演着极为重要的角色。利用植物对边坡进行加固具有悠久的历史，Krabel于1936年首次在美国采用植物固坡措施，随后植物对边坡的加固作用越来越受到重视。通常来讲，植被根系与土壤形成根土复合体，具有深根锚固、浅根加筋的作用。植被根系通过以下两种方式维持边坡土体的稳定性：一种是将根系看成类似于土钉的杆件直接加入土体中进行分析；另一种是将含根土层看成根土复合体，用一个相当的增强层来代替含根土层而进行分析。植物根系能显著抑制土壤侵蚀过程，实现固土护坡的目标。

陕北黄土区是我国水土流失最严重的地区之一。早在20世纪60年代，朱显谟就指出，植被是水土保持中最有效和最根本的方法，并证实这种作用主要来源于根系对土体的缠绕、固结和串连，使土体拥有较高的水稳性结构和抗冲强度，从而具有较强的抗侵蚀功效。本书共分为7章。首先，在综述植物根系研究历史、根系抗侵蚀动态发展的基础上，探究了陕北黄土水蚀区植物根系抗侵蚀机理（第1、2章）；然后，研究了植物根系抗

侵蚀的季节性特征，以及黄土区典型退耕模式下植物根系抗侵蚀特征（第3、4章）；最后，研究了陕北水蚀风蚀交错区沙生植被根系对土壤水蚀、土壤风蚀，以及水蚀风蚀交错发生的调控效应（第5~7章）。以期为正确认识植物根系抗侵蚀机理、效应及黄土区生态环境建设提供数据支撑和科学依据。

本书是作者自2008年以来，在陕西省陕北矿区生态修复重点实验室的支持下，对中国科学院战略性先导科技专项（XDA05060300）、国家自然科学基金地区基金地区项目“水蚀风蚀交错区沙柳根系固土抗侵蚀机理研究”（41661101）、国家自然科学基金青年基金项目“优势植物根系构架对矿区排土场新构土体土壤抗侵蚀的影响机理”（41807521）、国家自然科学基金地区项目“季节性冻融作用对矿区土壤结构演变及侵蚀响应研究”（41867015）、黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放项目“毛乌素沙地沙柳枯落物格局形成及侵蚀响应”（A3142018-01）相关研究工作的总结。本书主要是在李强、张正、脱登峰等学位论文的基础上，由李强编撰完成。感谢刘国彬、许明祥、陈云明、上官周平等学者对本书相关研究工作的建议与支持。感谢中国科学院水利部水土保持研究所安塞水土保持综合试验站对野外研究工作与生活的支持。感谢王兵、樊良新、张健、徐明、张超、李泰君、肖列、刘泉、周正朝、董文财、王宁、高晓东、丁少男、赵冬、李文达、邱甜、王爱国、马海龙、刘涛、袁子成、张昌胜、张婷、孙彩丽、高丽倩、孙会、张雄、卞耀军、段义忠、徐伟洲、

马春艳、张宁宁、白芸、付咪咪等在不同方面给予的帮助和支持。本书的撰写得到了国家自然科学基金项目(41807521, 41661101, 41867015, 41761026)、国家重点研发计划“典型脆弱生态修复与保护研究”专项(2016YFC0501700)、黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放项目(A3142018-01)、陕西省陕北矿区生态修复重点实验室开放基金(ZZX201804)、榆林市科技局产学研合作项目(2014CXY-12)、榆林学院学术著作出版基金项目的资助, 这里表示感谢。

本书主要由李强执笔撰写, 其他作者负责数据整理分析、校稿和统稿工作。

由于时间仓促, 作者水平有限, 纰漏和不足之处在所难免, 敬请读者不吝赐教, 批评指正。

作者

2019年3月于榆林

目 录

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 根系固土抗侵蚀研究动态	3
1.2.1 根系固土研究	3
1.2.2 土壤抗侵蚀研究	5
1.2.3 植物根系与土壤抗侵蚀研究	8
1.2.4 土壤性质与土壤抗侵蚀研究	13
第 2 章 水蚀区植物根系抗侵蚀机理	16
2.1 实验材料与研究方法	16
2.1.1 研究区概况	16
2.1.2 研究方法	17
2.1.3 指标选取及测定	22
2.1.4 数据分析	24
2.2 结果与分析	24
2.2.1 植物根系及其密度对土壤性质的影响	24
2.2.2 根系生物力学特征与土壤抗冲性的关系	27
2.2.3 根系极限应变与直径关系	27
2.2.4 根系抗拉力与根土分离	28
2.2.5 根系网络串连、根土黏结与根系生物化学作用 对土壤抗冲性的贡献	31
2.2.6 土壤不同含根方式与土壤流失特征	32
2.2.7 植物根系强化土壤抗冲性模拟方程	35

2.3	小结	41
第3章	水蚀区植物根系抗侵蚀季节性特征	43
3.1	实验样地与研究方法	43
3.1.1	生长季植物根系抗侵蚀研究样地与方法	43
3.1.2	季节性冻融植物根系抗侵蚀研究样地与方法	44
3.1.3	参数确定及方法	45
3.2	结果与分析	46
3.2.1	不同根系形态对土壤结构性质及根系密度的影响	46
3.2.2	不同植物生长阶段对土壤流失特征的影响	50
3.2.3	不同根系形态对土壤抗冲系数的影响	50
3.2.4	季节性冻融对土壤抗冲性及相关物理性质的影响	52
3.3	小结	56
第4章	水蚀区典型退耕模式下植物根系抗侵蚀特征	58
4.1	实验材料与研究方法	58
4.1.1	自然撂荒地植物根系抗侵蚀研究	58
4.1.2	人工灌木林地植物根系抗侵蚀研究	59
4.1.3	人工乔木林地植物根系抗侵蚀研究	60
4.2	结果与分析	61
4.2.1	自然撂荒地植物根系固土效应	61
4.2.2	人工灌木林地植物根系固土效应	68
4.2.3	人工乔木林地植物根系固土效应	75
4.3	小结	81
第5章	水蚀风蚀交错区沙柳根系对土壤水蚀的调控效应	82
5.1	实验材料与研究方法	83
5.1.1	沙柳根系抗水蚀的室内模拟	83
5.1.2	沙柳根系抗水蚀的野外观测	86
5.2	结果与分析	88
5.2.1	室内模拟下根系对土壤水蚀的调控效应	88

5.2.2	自然状态下根系对土壤水蚀的调控效应	98
5.3	小结	104
第6章	水蚀风蚀交错区沙柳根系对土壤风蚀的调控效应	106
6.1	实验材料和研究方法	107
6.1.1	根系抗风蚀的室内模拟	107
6.1.2	根系抗风蚀的野外观测	108
6.2	结果与分析	110
6.2.1	室内模拟下根系对土壤风蚀的调控效应	110
6.2.2	自然状态下根系对土壤风蚀的调控效应	115
6.3	小结	118
第7章	水蚀风蚀交错区沙柳根系对风水复合侵蚀的调控效应	120
7.1	实验材料与研究方法	121
7.1.1	试验土槽布设	121
7.1.2	根系抗风水复合侵蚀的室内模拟	121
7.2	结果与分析	121
7.2.1	风水复合侵蚀下根系对坡面产流时间的影响	121
7.2.2	风水复合侵蚀下根系对坡面入渗的影响	122
7.2.3	风水复合侵蚀下根系对坡面水动力学特征的影响	123
7.2.4	风水复合侵蚀下根系对坡面产流的影响	125
7.3	小结	132
主要参考文献		133

第 1 章 研究现状与发展趋势

植物根系既从土壤中吸收水分、养分，又参与土壤中的能量流动和物质循环，在植被恢复、土地复垦和农业土壤资源化利用中扮演着极为重要的角色。20 世纪 60 年代，朱显谟指出，植被根系通过与土壤之间的缠绕、固结和串连作用，使土体拥有较高的水稳性结构和抗侵蚀强度，是水土保持极为有效的措施之一。近年来，由于科学技术的快速发展和生态环境建设的迫切需要，植物根系固土研究成为根系研究的热点，尤其是根系固土抗侵蚀机制及效应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

18 世纪 20 年代，英国学者开始对栽培植物根系利用土壤空间范围所进行的探讨是系统研究植物根系的初始阶段。例如，Hales (1727) 应用剖面挖掘方法，测定根系重量和长度，研究了栽培作物根系的形态学特征。然而，据 Miller (1974) 在《根的植物学与形态学》一书中统计的 2975 篇参考文献，97.5% 是 1890 年以后发表的。因此，从科学角度来系统研究植物根系应是 19 世纪末开始 (刘晓冰 等，2001)。当时，美国、俄国及德国等国家应用多种方法，对果树、作物、林木和草本植物根系进行了野外动态观察研究，如植物根毛的形成、根的生长、无机养分的吸收以及与根系形成有关的植物激素等方面均开展了不同层次的研究。20 世纪 20 年代以后，人们不再满足于对植物根系自身特点的认识，开始重视根系生长与“水、土、气、生”等生态要素的关系研究，即根系生态学研究。例如，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，开创了根系生态学有关田间根系形成的研究先河。随后，Kutschera (1960) 继承了 Weaver 等的研究思路，对根系在自然条件下的生态学方面进行了研究。同时，英国、加拿大、澳大利亚、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特征、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。而后，以欧洲为中心成立了国际根研究学会，召开了根系研究的国际研讨会，这些国际性学术交流平台使根系研究日益成为科学家关注的热点问题，促使根系研究日趋朝着专业化、综合化方向发展，其研究方向大致可划分为以下几个方面：

(1) 根系化学研究：以开发利用根及根皮的天然次生产物等为目的。

(2) 根系力学研究：以根系的固土作用及其与坡面土体稳定性关系为主要内容。

(3) 根系生理学研究：以根系生长发育、水分生理和根渗出物为主要对象。

(4) 根系生态学研究：探讨根系分布、分解、竞争、损伤及生态因子对根生长影响。

(5) 根系病虫害研究：以根系腐烂、疫病为主要内容。

同时，在根系研究方法方面也得到了快速的发展，根系的研究大都应用土钻法或其他方法获取含根土壤样品，测定根长、根重、根表面积等根系参数。20 世纪 60 年代，放射性示踪原子技术的出现大大促进了根系研究，现代化的根系实验室的出现为更多地获取根系生长的动态资料提供了技术支撑；20 世纪 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、电容桥等新方法，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成为可能。同时,根系扫描技术及其相应的根系图像分析软件(如WIN-Rhizo软件)开始广泛应用,进一步为根系分级、根系长度、根系表面积、根系分支等根系特征参数的精确获取提供了有力的技术支撑。

1.2 根系固土抗侵蚀研究动态

1.2.1 根系固土研究

利用植物来固持土壤,保持堤防边坡稳定至少可追溯到我国明朝时期。然而,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。20世纪70年代,许多研究表明,林木砍伐后其根系防止土体崩塌的能力也会衰退。例如,Burroughs等(1977)研究发现在森林砍伐后的前3年根系数量显著减少,单根的抗拉强度也迅速衰退。当林木砍伐48个月后,与活根相比,直径为1cm根丧失74%的抗拉强度。这些研究结果表明,小于1cm的根系有效地影响着砍伐后边坡的稳定。与此同时,评价根系强化土体稳定性指标筛选方面也取得了丰硕的成果,先后有学者用根生物量、根长、根径、单位土壤截面积上直径不大于1mm须根的数量、根表面积密度等参数来表征根系对土体稳定性的增强效能,也有研究基于分形理论,用根系分形维数、分枝率、分枝角度、拓扑结构等参数来描述土体稳定性与根系空间特征的关系。例如,有研究表明,根系的存在增加了土体的剪切强度,该剪切强度随土壤内的根密度或者根横截面积的增大而增大。杨亚川等(1996)在上述研究基础上,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,随含水量增多而减小。可见,通过综述前人研究发现,根系

的固土作用主要表现为以下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，对上面冲来的土块起到阻挡缓冲作用。

(3) 牵拉作用：土粒紧密地附着在根系的周围，即使根系在水中飘动，土粒也不易被冲走。

20世纪70年代，吴钦孝等学者假设：①含根土壤土体与根系紧密接触，破坏方式都为断裂；②所有根系都垂直于直剪面；③所有根系受力同时破坏。在此前提下，基于库伦-库尔定律，构建了根系强化土壤稳定性的先驱力学模型（ W_u 模型），即“加筋土理论”。然而，相关研究表明植物根系并非都垂直于直剪面，所有的根系并非同时被破坏， W_u 模型在上述三个假设的基础上，得出的数值高估了植物根系的固土效应，高估值可达150%。为此，1982年Gray和Leiser在 W_u 模型的基础上考虑了倾斜根系在土壤中的应力和位移的变化，提出了倾斜根系的固土模型。2005年，Pollen等学者通过纤维模拟植物根系，测试了纤维束所承受的最大荷载值，结果得到的值比所有单根强度相加之和要小得多，并对 W_u 和Waldron的增强模型进行了改进，建立了动态纤维束模型（FBM, Fiber Bundle Model）来考虑剪切过程中根系逐渐断裂的行为。然而，这一模型在实践中又被发现存在同荷载重分配现象，在低密度根系时过高地估计了根系的固土作用，原因是在土壤受到剪切时所有的剪切力都转换为根系的拉力；而在高密度根系时又低估了根系的固土能力，原因是该模型假设所有的根系都具有相同的弹性特性，同时忽视了侧根固土效应。于是，2010年，Schwarz等提出了根束增强模型（RBM, Root Bundle Model）来评价根的增强效应。RBM模型是在FBM模型的基础上，充分考虑根的强度、直径、长度、弯曲、分支以及土壤含水量、根土间的摩擦作用，是一个以位移控制加载过程的纤维束模型。Schwarz的根束增强模型是目前根系



固土理论模型中考虑因素较为全面,模拟结果最为准确的模型,因此在根系固土理论研究中越来越受到其他学者的重视。但是根束增强模型是基于乔木根系的理论模型,对于草本植物根系的固土作用模拟结果还不理想,有待于进一步的研究。此外, Ekanayake 和 Phillips (1999, 2002) 以剪切过程中消耗的能量与根-土复合体抗剪强度对应的关系为基础,提出了根系固土作用能量法模型。该模型根据素土、根-土复合体应力-应变关系曲线推测根系对土壤抗剪强度的增强作用,视角独特,计算简便,但模型在含有较粗根系的土壤中以及根系处于潜在剪切面之上情形的,其计算精度较差,应用具有一定局限性。

1.2.2 土壤抗侵蚀研究

黄土区土壤抗侵蚀很大程度上依赖土壤抗冲能力。土壤抗冲性是由朱显谟根据黄土区土壤侵蚀的特征在 20 世纪 50 年代提出,并将土壤抵抗径流破坏作用的能力划分为土壤抗冲性 (Anti-scouribility) 和抗蚀性 (Anti-erodibility) 两种性能 (朱显谟, 1960)。所谓土壤抗冲性,即指土壤抵抗降雨径流对其机械破坏和推动下移的性能,它主要取决于土粒间和微结构间胶结力和结构体间抵抗离散的能力以及地面覆被情况,土壤抗蚀性与雨滴溅蚀和片蚀有密切关系,而抗冲性则与沟蚀 (如细沟、浅沟) 关系密切。土壤抗蚀性与其内在的土壤理化性质关系较大,而土壤抗冲性则与土壤的物理性质以及外在生物学因素关系较大。20 世纪 80 年代,土壤抗冲性的研究进入活跃期,主要集中在土壤抗冲性的测试方法、评价指标、影响因素以及抗冲性的时空变化特征等。从科学研究角度出发,土壤抗冲性的试验研究是由苏联土壤学家古萨克发起,经过几十年的发展,我国的土壤学工作者对土壤抗冲性做了大量的研究。在抗冲性的区域分异规律、影响因素等方面均取得了重要进展。例如,李勇等 (1990, 1998) 利用索波列夫抗冲仪,测定了黄土高原 4 种土壤类型中的土壤抗冲性及土壤入渗能力,并结合土壤物理性质指标,将黄土高原土壤抗冲性分为 5 个等级,发现土壤抗冲性分布特征是由北向南逐渐增

强(李勇等, 1993)。同时, 该研究分析了黑垆土、灰褐土、黄绵土和灰钙土土壤剖面构型特征与土壤抗冲性的关系。朱显谟等认为黄土区土壤渗透性强以及土壤抗冲性弱的特征与黄土自身的沉积方式有关, 黄土堆积以后更有利于植被的生长, 使土壤渗透性得到巩固, 土壤抗冲性相应得到改善。蒋定生等(1995)通过采集原状土, 利用上述冲刷装置对吕梁山以西、长城沿线以南、渭河以东和甘肃黄河以东的106个县(市、区、旗)范围内土壤抗冲性进行了更为系统的研究, 发现土壤抗冲性存在由西北向东南以及自北向南递增的规律性, 且随纬度而变化的规律性更为显著, 并根据土壤抗冲性系数的大小, 参照土壤入渗速率、崩解速率和颗粒组成等, 将黄土高原土壤抗冲性划分为极强、较强、一般、很弱和极弱。

在土壤抗冲性研究方法探索方面, 苏联土壤学家古萨克曾用小型水槽, 内装风干磨碎筛过的扰动土壤样品进行实验, 但此方法在我国黄土区试用, 结果不理想。目前主要用原状土冲刷土槽法和借助索波列夫仪用恒压水柱直接冲刷土层, 并以冲刷模数、抗冲强度及抗冲指数等评价土壤抗冲性。研究者们先后就这两种方法进行了不同程度的改进和应用。例如, 李勇等(1998)采用原状土冲刷土槽法(指在一定坡度、一定雨强下, 冲刷1g土所需时间或水量)模拟黄土高原常见降雨强度(0.5mm/min、2.0mm/min、4.0mm/min)、降雨历时(15min), 先后对沙棘、刺槐、柠条等木本植物和草本植物根系与土壤抗蚀、抗冲性进行了研究。研究结果认为植物根系有助于稳定土体: 当林龄小时, 主要是根系的机械缠绕固结作用; 当林龄增大时, 还可以通过增加有机质含量和大于2mm粒级的水稳性团聚体来稳定土体, 而且植物有效根(0.1~0.4mm)分布自上而下遵从指数分布。植物根系强化土壤抗冲性与有效根密度在极显著水平($P < 0.01$)上呈幂函数关系, 草本植物地上部分茎叶对减少土壤冲刷起一定作用, 地下部分根系在降低土壤冲刷量方面起决定性作用。Gyssels et al. (2005)在比利时通过密植黑小麦的方法来增加根



系。研究发现,在两倍密植的条件下植物根系对土壤抗侵蚀的贡献率在整个生长季内可以达到42%,尤其在前期更为重要。张家洋等(2010)应用索波列夫抗冲仪、水稳性指数法、同心环法对嫩江大堤树木根系及土壤抗蚀抗冲和土壤渗透性进行测定分析,均认为同一地段土壤的抗蚀、抗冲指数表土层大于底土层,尤其是根径不大于2mm的细根有较强的固持土壤功能,土壤抗冲指数与根长、根量存在显著的相关性,且土壤抗蚀性与土壤有机质含量呈正相关关系,而与细根根长和根量的相关性相对较弱。土壤表层的稳渗系数高于底土层,达到稳渗所需时间也短,并筛选出紫穗槐在内的一些抗蚀能力较强的树种。张金池等(2001)对江浙地区向海一面坡上林地土壤抗冲性的研究表明,土壤的抗冲性与植物根量,尤其是细根的根长、根径的关系密切,并指出表层有根系土壤的抗冲性高于底层土壤,各林分林木根系强化土壤抗冲性的机理在于根系通过不大于1mm庞大细根,直接串连土体和间接改善土壤结构,进而影响土壤抗冲性的强弱。土壤抗冲性强化值与土壤中不大于1mm径级的根量间服从 $y=a+bx$ 的线性回归关系。丁军等(2002)对南方红壤丘陵区进行研究表明,随着降雨强度的增大,林区根系对土壤抗冲性的增强效果越来越弱,超过一定降雨强度阈值,根系对土壤抗冲性无明显增强效果;随着土层深度增加,根系增强土壤抗冲性越来越弱,就土壤表层而言,林地和草地的土壤抗冲性大于农地;同一剖面,土壤抗冲性逐渐减弱,这与根系在土层中的垂直分布规律相一致。Gyssels(2006)研究发现,相对土壤剥蚀率(即含根系土壤的剥蚀率与不含根系土壤的剥蚀率比较)随着植物根系密度和根长密度的增加呈指数函数关系递减,且模型RUSLE(修正通用土壤流失方程)能够较好地预测这一关系。可见,侵蚀区土壤抗冲性的研究一直是一个热点问题,尽管前人对土壤抗冲性的测试方法、评价指标、影响因素以及抗冲性的时空变化规律等做了较为系统的研究,也取得了较为丰硕的成果,然而由于降雨侵蚀过程,诸如雨滴溅蚀、细沟侵蚀过程本身的复杂性,又

加之缺乏更为有效的测试土壤抗冲性手段，这给其研究增加了很大难度，使得对这些问题的研究大都处在宏观的分析和理论推测水平上，理论研究还远落后于水土保持工程应用。

1.2.3 植物根系与土壤抗侵蚀研究

植物根系既要从中吸收水分、养分，又要参与土壤中的能量流动和物质循环，对改善土壤结构和提高土壤肥力及土壤生产力发挥着重要作用，在植被恢复、土地复垦和土壤资源利用中扮演着极为重要的角色。早在 20 世纪 60 年代，朱显谟就指出，在土壤侵蚀控制中，植被起着非常重要的作用，是水土保持中最有效和最根本的方法。朱显谟认为土壤抗冲性的增强，主要取决于根系与土体的缠绕、固结和串连作用，这种作用使土体具有较高的水稳性结构和抗冲强度，从而不易被径流带走。许多研究证实，植被发育良好的地区，侵蚀发生几率相对较低，植物根系在土壤侵蚀控制中的作用是无法替代的。我国较早开展植物根系对土壤侵蚀影响研究的学者李勇等认为根系的减沙效应可以用来表征植物根系对土壤抗冲性的强化效应，而根系减沙效应的强弱可用减沙效应系数表示，表达式如下：

$$\Phi = \frac{\text{含根土壤冲刷量(g)}}{\text{无根土壤冲刷量(g)}} \quad (1-1)$$

式中： Φ 为根系减沙效应系数。

有研究进一步指出直径小于 1mm 的根系是增强土壤抗冲性的重要因子，二者呈正相关，同时，研究发现根系增强土壤抗冲性的作用（抗冲性强化值）随降雨强度和土层深度的增加而减弱。乔木、灌木、草本镶嵌组合不仅可以减少面蚀，而且对沟道侵蚀的减少也起着极为重要的作用。毛谔等（2006）整理和分析历史文献发现植物根系对土壤侵蚀的影响主要在水文效应和机械效应两个方面，并且认为根系的机械强化效应在温带地区明显大于水文效应。植物根系通过增强土壤的抗冲性、渗透能力、抗剪强度以及根系网的固土功能提高土壤的抗侵蚀能力。Gutiérrez（2009）等研究了死根对土壤抗冲性的影响，认为死根对径流没