

边坡生物治理回顾与展望

叶建军<sup>1</sup>, 许文年<sup>2</sup>, 鄢朝勇<sup>1</sup>, 郭声波<sup>1</sup>, 韦书勇<sup>2</sup>

(1. 襄樊学院土木系, 襄樊 441003; 2. 三峡大学产业集团, 湖北 宜昌 443002)

**摘 要:** 介绍了我国边坡地质灾害现状, 分析了边坡传统治理方法的缺陷, 回顾了边坡生物治理相关领域(如水土保持工程学、植物根的固土作用、恢复生态学)的发展, 总结了已有的边坡生物治理方法, 文章还总结了边坡生物治理的发展轨迹, 展望了边坡生物治理发展方向。

**关键词:** 地质灾害; 边坡; 生物治理; 恢复生态学; 水土保持工程学

**中图分类号:** S 157. 433      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1005-3409(2005) 01-0173-05

Review and Prospect of Slope Vegetative Treatment

YE Jian-jun<sup>1</sup>, XU Wen-nian<sup>2</sup>, YAN Chao-yong<sup>1</sup>, GUO Sheng-bo<sup>1</sup>, WEI Shu-yong<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Xiangfan College, Xiangfan 441003, China;  
2. Industry Group, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

**Abstract:** The information about slope geologic hazards in China is presented, the shortcoming of traditional slope hazard reduction methods are analyzed, the development of the fields relating to slope vegetative treatment( such as soil and water conservation engineering, the reinforcement of roots to soil, restoration ecology) is reveiwed and the existed methods of slope vegetative treatment are summarized. In addition, the historic development track of slope vegetative treatment and prospects of the development direction of slope vegetative treatment are described.

**Key words:** geologic hazard; slope; vegetative treatment; restoration ecology soil and water conservation engineering

我国是个多山的国家, 山地、丘陵和比较崎岖的高原总面积, 约占国土面积的 2/3。我国的森林覆盖率只有 13. 92%( 中国生态环境报告, 1999)。同时, 我国是地质灾害严重发生的国家: 水土流失面积占国土面积的 51%, 其中水力侵蚀面积  $182. 6 \times 10^4 \text{ km}^2$  ( 彭珂珊, 2001); 全国约有  $5 \times 10^4$  余条具有一定规模的滑坡、泥石流沟, 威胁和危害着 150 个县、36 条铁路、 $5 \times 10^4 \text{ km}$  公路、 $1. 2 \times 10^6 \text{ hm}^2$  土地, 数十座矿山, 大批水利水库设施和江河航道。每年因泥石流灾害而死亡的人数为 500 人( 彭珂珊, 1999)。在这样的地理条件下 13 亿人口从事工农业生产必然带来巨大的环境压力。山地的农业开发, 各种工程( 公路、铁路、水利、矿山及工业民用建筑) 的大规模建设会造成一系列的环境问题, 其中最突出的是破坏了当地原有植被, 形成大面积不同程度裸露的边坡( 或坡地), 这些边坡的存在进一步增加了水土流失、滑坡、泥石流的发生强度, 也造成局部小气候的恶化及生物链的破坏等生态灾害。

我国人口多, 山地多, 农村经济主要以种粮食作物为主, 农民到处开垦山地, 广种薄收。山坡, 特别是陡坡, 一旦被开垦, 极易产生严重的水土流失。据统计, 川、滇、渝三省市坡耕地占总耕地的 2/3 以上, 其中 25 以上的坡耕地占 30%( 彭珂珊, 2001)。据有关专家对重庆不同土地入江泥沙的调查分析, 从坡耕地入江泥沙占 78. 29%。水土流失的结果是严重

的, 许多坡地因水土流失而变成裸露石山, 有人称之为“岩漠化”, 以贵州为例, 全省的石山面积由 1975 年占全省总面积的 5% 上升到 1988 年的 9. 6%, 该省的纳雍县, 出现山川俱毁的局面, 由于水土流失的迅速扩展, 全县  $1. 7 \times 10^4 \text{ hm}^2$  的山地土层冲光, 成为裸露山坡( 张国红, 1995)。

随着经济的高速发展和基本建设的飞速开展, 开矿、筑路、水利、工民建等工程逐年增加, 全国每年因此而新增的水土流失面积达  $1 \times 10^4 \text{ km}^2$  ( 张国红, 1995), 其中大部分是边坡水土流失。

1 边坡的定义

本论文把各种工程( 如公路、铁路、工业民用建筑、矿山、水利水电工程等) 及农业活动所形成的具有一定坡度的斜坡、堤坝、坡岸、坡地和自然力量( 如侵蚀、滑坡、泥石流等) 形成的山坡、岸坡、斜坡统称为边坡。

边坡的特征是: (1) 有一定坡度。 (2) 自然植被遭到不同程度的人为或地质灾害破坏。 (3) 易发生严重的水土流失。 (4) 易失稳( 发生滑坡泥石流等灾害)。

2 边坡传统治理及其缺点

对各种工程边坡和各种地质灾害所形成的边坡, 如公路、

① 收稿日期: 2004-04-28

作者简介: 叶建军( 1974- ), 男, 三峡大学 2001 研究生, 湖北英山人, 主要从事边坡防护与绿化研究。

铁路、工业民用建筑、矿山、水利水电工程等形成的边坡。土木工程师们最为关心的是它的稳定,土木工程师把边坡当成没有生命的有失稳倾向的土体。为定量分析边坡的稳定问题,他们运用力学知识创造了许多边坡稳定分析方法:如瑞典条分法、毕肖普法等;还把有限单元法、边界元法、离散元法等数值计算方法引入边坡稳定分析中。用关键词“边坡”检索图书馆万方数据库中国学位论文全文数据库发现,我国 1977—2002 年之间所有硕士和博士论文共有 18 篇,都是关于如何分析边坡稳定的。自然边坡的复杂多变,各种方法的抽象和理想化、简单化的计算分析,是边坡稳定计算方法层出不穷、计算结果只能近似的原因。到目前为止,没有一种方法适用于所有边坡稳定分析。由于混凝土、石料等材料的易得和便于精确的力学分析,也由于土木工程师往往缺少必要的农学、生态学知识,在分析边坡的安全状况后,如发现安全系数过低,工程师们往往采取石料或混凝土砌筑挡土墙和护面,或采用喷锚支护。这样做能克服边坡带来的严重的水土流失和滑坡、泥石流等灾害,但也带来严重的环境问题。如视觉污染,生态失衡等。而对于农、林业活动所形成的坡地,农、林业技术人员往往把注意力重点放在如何最大限度地发挥地力,及如何种植何种作物,如何获得最大产量。虽然水土保持也是农、林业技术人员必须考虑的,但往往降为第二位;农林业技术人员往往由于缺乏必要的力学知识,对边坡的稳定关注不够。

### 3 边坡生物治理相关理论的进展

利用生物(主要是植物),单独或与其他构筑物配合对边坡进行防化防护和绿化,就叫边坡生物治理。显然,边坡生物治理是跨越多个学科的边缘领域,它需要土木工程学、工程力学、农学、林学、生态学、恢复生态学等多个学科知识。特别是水土保持工程学、恢复生态学相关学科的发展,直接影响人们对边坡治理的认识。近 30 年来,随着这两个学科的发展和人们对于植物对边坡的影响的深入了解。越来越意识到在进行边坡防护的同时,对边坡原有植被进行恢复的必要性和可行性。近年来发展出种类繁多的边坡防护绿化方法。

#### 3.1 水土保持工程学的进展

水土保持(也可以说土壤保持,因为保持了土壤就保持了水分)工程学的深入研 究所得到的成果表明了植被在防止边坡水土流失方面的关键作用。从 1877~1895 年德国土壤学家沃伦(Wollny)在他的实验小区进行的关于植被和地面覆盖物对防止降雨侵蚀和防止冲刷和防止土壤结构恶化的影响的一般界限及土壤类型和坡度对径流和冲刷的影响的观察,19 世纪 30 年代的贝佛(Baver)、Boster、Woodburn、Musgrave 等在侵蚀过程方面的先驱性的研究,促成了 Laws 于 1940 年完成了第一个关于自然降雨的详尽总结。1944 年 Ellison 完成了雨滴对土壤的机械作用的分析研究后,人们终于全面认识了土壤侵蚀的所有方面。在此基础上,美国农业部 Agricultural Research Service 于 60 年代早期,提出了用于估计洛基山脉东部耕地的半经验性土壤流失方程式。此后,美国农业部 Soil Conservation Service 分别于 1972 和 1977 年改进了土壤流失方程式,使其适用于各种地区(包括城市建设和公路建设)。直到 1991 年,对土壤流失方程的改进工作还在继续。(Renard et al., 1991)。

土壤流失方程考虑了影响土壤流失的所有因素:降雨、

土壤的可侵蚀性、边坡长度、边坡的坡度、植被覆盖、土壤保持工程。大量的实验和实践证明:植被覆盖率是影响土壤流失的最为关键的因素。良好的植被覆盖是自然裸地土壤流失的 1/1 000(美国农业部 Soil Conservation Service, 1978)。其他因素如降雨、土壤的可侵蚀性对土壤流失的影响只有一个数量级,而边坡因素可以很容易采取工程手段(如坡改梯)减少到可以忽略的地步。

#### 3.2 植物对边坡稳定的影响的研究进展

植物(特别是树木)对边坡的稳定的影响的深入研究也使人们认识到植被对边坡稳定的贡献。Greenway(1987)运用力学知识,较好地总结了植物对边坡的稳定影响。植物对边坡的加固作用主要是通过根来起作用的。Gray and Ohashi(1983)和 Maher and Gray(1990)通过大量实验证明沙土中生长少量根就能显著提高沙土的抗剪强度。Endo and Tsuruta(1969)、Waldron(1977); Ziemer(1981)、Riestenberg and Sovonnick-Dunford(1983)、Rensterberg(1994)、Nilaweera(1994)通过室内和野外实验也证实了这一点。另外,植物躯干、根对边坡土壤的锚固和抗滑作用,植物对土壤的水分的蒸发蒸腾作用减小土壤孔隙水压力而利于边坡的稳定,已被 Greenway(1987)和 Gray and Leiser(1982)详细总结。Nolan(1984)、Tschantz and Weaver(1988)分析了植物(主要是树)对边坡的不利影响,主要为植物自身重量荷载、树在大风作用受到的风力荷载。

植物的存在能加固边坡,而边坡植物的破坏则会引起边坡失稳。Bishop and Stevens(1964)在美国阿拉斯加东南部林区对这一问题进行了深入调查研究,他们统计发现皆伐过的山地发生滑坡的频率和范围显著增大。他们认为树根的破坏和腐烂是滑坡频发的主要原因。随后 Wu(1976)、Megahan and Kidd(1972)、O'Loughlin(1974)、Swanston(1974)的研究也证实了这一点。

对树根的研究在国外也进行得较为深入。Patric et al.(1965)、Watson and O'Loughlin(1985, 1990)、Shield and Gray(1993)、Kozlowski(1971); Sutton(1969)、Henderson et al.(1983)先后对树根在土壤中的空间分布规律进行了研究,Patric et al.(1965)发现火炬松 80%~90% 的根分布在深 0.9 m 以内的土层中,接近地表的根为水平根,而 0.9 m 以下的根一般为竖根;Watson and O'Loughlin(1985, 1990)用剖面对一棵 25 年辐射松的根在地下的分布进行了形象的描述;Shield and Gray(1993)提出根面积比(root area ratios)概念,认为它是深度的函数。Kozlowski(1971)对根的水平延伸规律作了探索,发现树根最少能延伸树冠半径的 1.5 倍。Sutton(1969)、Henderson et al.(1983)对影响树根生长的因素做了分析。Bohm(1979)对研究树根分布规律的方法问题进行了总结。这些研究使我们对植物(特别是树根)的分布规律有了较为清楚的认识,为利用植物护坡提供了基本的理论支持。

树根的力学性能的研究在美国也取得丰硕成果。Greenway(1987)对树根强度及其影响因素作的很好的总结。影响树根强度的因素有:树的品种、生长环境、季节、根的直径和生长的方向。关于季节对于树根强度的影响,1975 年 Hathaway and Penny 认为根的比重和木质素与纤维素的比值随季节的变化是造成树根强度随季节变化的原因。而

Schiechl (1980) 观察到往上坡方向生长的树根比往下坡方向生长的树根强度大。一些树种的树根抗拉强度被测量, 统计分析。通过分析发现, 少数树根抗拉强度最大可达到 70 MP, 但大多书树根的抗拉强度在 10 ~ 40 MP 之间; 针叶树木的树根的抗拉强度较低, 而灌木的根的抗拉强度至少与树根一样高; 重要的是, Turnanina (1965)、Wu (1976)、Burroughs and Thomas (1977)、Nilaweera (1994) 等人证实, 树根强度与树根直径成反比。Gray (1996) 利用实验得到的数据, 建立了树根抗拉强度与直径的关系式。显然, 根据这一发现, 须根比大根更有利于土壤加固和抗剪强度的提高。这在陡坡上种草提供了理论支持。

根的存在会增加土体强度, 那么, 根的腐烂就会降低土体的强度。最利于固土的须根先烂, 然后是大一些的根腐烂。伴随树根腐烂, 土体强度降低到一个最小值, 直到新的树根长出, 土体强度恢复增长。Gray and Megahan (1980) 认为土体达到最低强度的时间(以砍树时刻算起)与植物品种、生长环境、重新栽种时间有关。Ziemer and Swanston (1977)、O'loughlin and Watson (1979) 给出了死根的抗拉强度与砍伐时间的关系。Burroughs and Thomas (1977) 建立死根的抗拉强度与砍伐时间和根直径之间的函数关系。

对植物根的固土作用的更深认识是在过去 30 年时间里完成的。在这期间, 主要研究有设计了土壤-根相互作用模型、实验室测定带根土块强度、野外原地测定带根土壤强度。

Waldron (1977)、Wu et al., (1979)、Waldron and Dakessin (1981) 先后建立了简单直观的土壤-根相互作用的力学平衡模型; 更复杂模型分别由 Shewbridge and Sitar (1989, 1990) 和 Wu et al., (1984a, 1984b) 建立。这些模型使我们对于根和土壤之间相互作用的机理以及根对土壤抗剪能力的提高的贡献有清楚的认识。通过模型, 得到一个重要公式, 即土体抗剪强度的增加量和根面积比( $root\ area\ ratios = A_r/A$ )成正比。实验室实验已证明了这一点。

Endo and Tsuruta (1969) 在野外进行大体积带有桉木树根的土体直剪实验, Ziemer (1981) 在野外原地进行大体积带有松木树根的土体直剪实验。他们的实验证明: 单位体积土体中每增加 1 kg 树根, 土体抗剪强度平均增加 3.5 kPa。

这个数字有助于大致估计树根对土体抗剪强度的贡献量。通过实验确定了单位土体中单位重量的某种树根对土体强度的贡献, 就可以根据某种树根的强度和土体中树根的量, 算出土体强度增加量。Nilaweera (1994) 通过大量野外原地实验, 测定了 6 种热带硬木根的抗拉强度以及树根随深度的分布。

基于树根的影响范围主要集中在土壤表层的事实, Robbin B. Sotir (1995) 建立了所谓的无限边坡模型 (infinite slope model) 用于边坡稳定分析。该模型假定: 滑动破裂面发生在土体浅层; 破裂面为平面且平行于坡面。该模型适用于土层薄的边坡(如坚硬岩石上的土层)的稳定分析。

3.3 恢复生态学的进展

边坡自然植被遭到了不同程度的人为或地质灾害破坏, 无论采取什么手段对其治理, 最好的结果是恢复边坡原有生态系统。这就需要突破传统的栽树=绿化的观念, 需从生态学的角度看待边坡治理, 即利用恢复生态学的基本理论指导边坡治理。有恢复生态学的理论指导, 边坡防护和绿化的实

践必将带来新飞跃(叶建军, 许文年, 王铁桥, 周明涛, 2003)。恢复生态学的概念最早源于美国威斯康星州的一块面积为 24 hm<sup>2</sup> 废弃农场的植被恢复。在过去的 30 年的时间里, 随着一系列国际会议的召开和杂志、专著的出版, 恢复生态学逐渐取得了应有的科学地位。特别是 1993 年英国学者 Bradshaw 发表了 "Restoration Ecology as Science" 一文, 彻底确立了恢复生态学的学科地位。1997 年, 著名刊物 Science 连续刊载了 7 篇生态恢复的论文。2000 年 9 月 "恢复生态学" 国际大会在英国利物浦召开, 来自 30 多个国家的 300 多名代表出席了大会。

恢复生态学建立了完整的理论体系, 如生态限制因子原理、生态系统的结构理论、生物适宜性原理、生态位原理、生物群落演泽理论等。它们为边坡的生态系统的恢复提供了有力的指导, 在植物选择, 恢复过程, 恢复评价, 能量和物质循环等多个方面为边坡生物治理提供支持。

4 边坡生物治理方法小结

有了上述理论基础, 人们在边坡治理的实践中, 开始重视利用植物的固坡作用。同时农学、林学、园艺学、生态学知识在边坡生物防护工程中得到广泛应用。扦插技术、修剪技术、土壤改良技术、栽种技术、景观设计、坡改梯技术、施肥技术、保水保湿技术都已用在了边坡工程。近 30 年时间内人们创造出了各种各样的防护绿化方法和技术(主要是以专利形式)。

对于土质边坡, Donald H. Gray and Rbbin B. Sotir (1996) 较好地总结了当时业已存在的绿化方法。他们把所有方法分为两类, 一类单独利用植物, 对边坡进行防护绿化, 如植物篱笆 (living fascine)、植物桩 (living staking)、植树、栽草皮等; 另一类和护坡建筑物或土工材料配合对边坡进行防护和绿化, 如绿化墙(包括栅墙) (vegetated wall)、框格绿化法、植生带(毯)绿化法、土工网(袋, 一维或三维)绿化法、阶梯墙绿化法、带孔砖(或砌块)等。他们详细分析了每种绿化方法的技术细节、实用范围, 优缺点和经济性。

值得一提的是, Donald H. Gray and Rbbin B. Sotir (1996) 分析了植物与挡土建筑物之间的相容性。他们从理论和实例上证明: 植物(如树木)对挡土构筑物的危害并没有人们想象的那么严重, 除了树干和树枝风载和蒸腾作用造成的土体变形危害外, 树根基本上不会危害到挡土构筑物的安全。

岩石边坡的防护绿化, 是在土质边坡绿化的基础上发展起来的, 它建立在岩石力学和喷锚结构的基础上。对岩石边坡稳定的过分重视和陡峭岩壁上土壤保持的巨大困难, 使人们长期忽略岩石边坡的绿化问题。日本是个人多地少的国家, 非常重视环境保护工作, 他们较早产生改进传统喷锚支护方法, 把防护和绿化有机地结合在一起, 创造出了喷射绿化方法。日本于 1976 年首先开发出厚层基材喷射护坡技术, 主要用于软弱岩石边坡的生态防护。20 余年来, 此项技术在日本得到不断的改进、完善。目前, 喷射绿化技术已成为日本应用最为广泛的生态护坡技术。喷射护坡绿化技术可以应用于软弱岩石边坡, 还可以应用于中硬岩及强酸性 (pH= 2 ~ 3) 土质边坡; 采用厚层基材喷射护坡后可保证坡面植被经过多年以后也不会衰退。(张俊云, 周德培, 李绍才, 2001)

目前,日本在岩石边坡绿化上已形成一整套技术系统,即“从种子到树林的再生技术”(杜娟,2000),除已开发出如客土喷射技术外,还有框架护坡绿化技术、框架+客土喷射绿化技术、植生袋绿化技术、开沟钻孔客土绿化技术等。另外,日本非常重视生态学在工程中的应用。

我国在土质边坡和岩石边坡的防护绿化研究基本上是与跟随、模仿国外,而且开展时间较晚。特别是岩石边坡绿化技术,只是在近几年时间(90年代中后期开始)才出现了几家边坡治理公司,它们一般拥有一项以上专利(用“绿化”作为关键词,在中国知识产权局网站上只能搜索到520多项专利)。这些专利主要是喷射绿化技术的配方、机械设备和工艺。从目前公开刊物发表的50余篇论文看,主要为喷射技术应用实例介绍,尚无人对边坡防护绿化进行系统地深入的研究,特别缺少相关基础研究。

5 边坡生物治理的发展轨迹

纵观边坡治理的历史发展过程,可以发现一条发展轨迹:即从只注重边坡防护,排除植物,修筑与植物不兼容的防护构筑物。到利用植物,与防护构筑物配合,既绿化边坡,又防护边坡。到采取工程手护坡的同时,最终恢复原有生态系统

统。可以说,边坡防护绿化技术是随着人们的环抱意识的增强,恢复生态学的发展而进步的。

6 边坡生物治理的发展方向

如前所述,边坡治理已经发展到防护和生态恢复的阶段,但由于生态恢复研究一般需要较长时间,而我国刚刚把恢复生态学理论引入到边坡恢复中(徐国钢,赖庆旺,2002;叶建军,许文年,王铁桥,周明涛,2003),这方面的论文很少,仅几篇,且都只是概念性的引入。这方面的成果也很少。甚至理论的系统引入问题还需继续。今后我们研究重点在:1、用水力侵蚀理论,研究不同边坡水土流失问题,弄清植物在不同边坡水土流失控制中的作用。2、探讨生态系统对边坡稳定的作用。总结木本、草本植物的固坡作用,探讨微生物、有机物、各种动物(如蚂蚁、蚯蚓)、藤本植物对边坡稳定的影响。3、系统总结边坡防护和绿化方法。重点在岩石边坡喷射绿化方法的配方、工艺上。4、运用农学、林学、生态学知识研究绿化植物的选择、栽种技术。5、用恢复生态学理论,对边坡防护和绿化进一步探讨,主要探讨岩石边坡的物质能量循环,恢复过程等。6、用生态经济学理论,考察边坡防护与生态恢复的经济问题。

[ 1 ] 王铁桥,许文年,叶建军,等. 挖方岩石边坡绿化技术与方法探讨[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2003, 25( 2 ): 101- 104.

[ 2 ] 许文年,王铁桥,叶建军,等. 岩石边坡护坡绿化技术应用研究[J]. 水利水电技术, 2002, ( 7 ): 35- 40.

[ 3 ] 杨京平,卢剑波. 生态恢复工程技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 8- 11, 137, 138.

[ 4 ] Milena Holmgren, Marten Scheffer. EL Nino as a window of opportunity for the restoration of degraded arid ecosystems [J]. Ecosystems, 2001, ( 4 ): 151- 159.

[ 5 ] 丁运华. 关于生态恢复几个问题的讨论[ J ]. 中国沙漠, 2000, 20( 3 ): 341- 344.

[ 6 ] 叶建军,许文年,王铁桥,等. 南方岩石坡地生态恢复[J]. 水土保持研究, 2003, 10( 4 ): 238- 241.

[ 7 ] 任予峡,王联明,武移风. 石质路堑边坡锚喷防护的设计与施工[ J ]. 山西交通科技, 1997, ( 2 ): 7- 12.

[ 8 ] 周颖,曹映泓,廖晓瑾,等. 喷混植生技术在高速公路岩石边坡防护和绿化中的应用[ J ]. 岩土力学, 2001, 22( 3 ): 353- 356.

[ 9 ] 杜娟. 客土喷播施工法在日本的应用与发展[ J ]. 公路, 2000, ( 7 ): 72- 73.

[ 10 ] 刘龙,叶慧海. 高速公路路域植被恢复设计与施工技术初探[ J ]. 交通环保, 2002, 23( 1 ): 13- 17.

[ 11 ] 张俊云,周德培,李绍才. 厚层基材喷射护坡试验研究[ J ]. 水土保持通报, 2001, 21( 4 ): 44- 46.

[ 12 ] 许文年,王铁桥,叶建军. 工程边坡绿化技术初探[ J ]. 三峡大学学报( 自然科学版 ), 2001, 23( 6 ): 512- 515.

[ 13 ] 彭珂珊. 中国水土流失的基本概况及综合治理[ J ]. 天水师范学院学报, 2001, 21( 1 ): 47- 52.

[ 14 ] 张国红. 我国水土流失的现状及其治理对策的探讨[ J ]. 林业资源管理, 1995, ( 5 ): 10- 14.

[ 15 ] N W Hudson. soil conservation[ M ]. 窦葆璋译 . 北京: 科学出版社, 1976. 71, 27, 28.

[ 16 ] 《土壤学》编写组土壤学[ M ]. 北京: 中国林业出版社, 1992. 99- 103, 5- 7, 52- 55.

[ 17 ] 国家环境保护局自然保护司. 中国生态问题报告[ R ]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999.

[ 18 ] Donald H Gray Robbin B Sotir. Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization[ M ]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1996.

[ 19 ] Gray, D H. Influence of vegetation on the stability of slope , proceedings , International Conference on Vegetation and Slope[ C ]. Oxford Institution of Civil Engineers, University Museum, 1994. 1- 23.

[ 20 ] Gray, D H, A t Leiser. Biotechnical Slope Protection and Erosion Control[ M ]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982.

[ 21 ] Greenway, D R. Vegetation and Slope Stability[ A ]. In: Slope stability[ M ]. edited by M G Anderson, K S Richards. New York: Wiley, 1987.

[ 22 ] USDA Soil Conservation Service. Chapter 18: Soil bioengineering for upland slope protection and erosion reduction [ M ]. Part 650, 210- EFH, Engineering Field Handbook, 1992.

[ 23 ] Tschantz, B A, J D Weaver. Tree growth on earth dams: A survey of state policy and practice[ M ]. Civil Engineering

Department, University of Tennessee, 1998, 36.

[24] Patric, J H, et al. Soil water absorption by mountain and piedmont[J]. Forests Soil Science of America Proceedings, 1965, 29: 303– 308.

[25] Wu T H. Investigation of landslides on Prince of Wales Island, Alaska[R]. Geotechnical Engineering Report No. 5, Department of civil Engineering, Ohio State University, Columbus Oh, 1976. 94.

[26] USDA Soil Conservation Service. predicting Rainfall Erosion Losses : a guide to conservation Planning [S]. Washington, DC. USDA Agricultural Handbook, # 537, 1978.

[27] O’Loughlin, C L. The effects of timber removal on the stability of forest soil[J]. Journal Hydrology (NZ), 1974, 13: 121 – 134.

[28] Rensterberg, M M. Anchoring of thin Colluvium by roots of sugar maple and white ash on hillslope in the Cincinnati [M]. US Geological Survey Bulletin 2059– E, U.S. Washington, DC: Government Printing Office, 1994.

[29] Watson, A J, C L O’loughlin. Morphology, strength and biomass of Manuka roots and their influence on slope stability [J]. New Zealand Journal of Forestry Science, 1985, 15( 3) : 337– 348.

[30] Watson, A J, C L O’loughlin. structural root morphology and biomass of three age classes of Pinus radiata[J]. New Zealand Journal of Forestry Science, 1990, 20(1): 97– 100.

[31] Nilaweera, N S. Effects of tree roots on slope stability: the case of Khao Luang Mountain area, Thailand[D]. Bangkok: Asian Institute of Technology, 1994.

[32] Swanston, D N. Slope stability problems associated with timber harvesting in mountainous regions of the western United States[R]. USDA Forest Service General Technical Report PNW– 21, 1974, 14.

[33] Waldron, L J, S Dakessin. Soil Reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root property [J]. Soil science, 1981, 132(6): 427– 435.

[34] Shewbridge, S E, N. Sitar. Deformation characteristics of reinforced sand in direct shear[J]. Journal of Geotechnical Engineering(ASCE), 1989, 115( GT 8) : 1134– 1147.

[35] Shewbridge, S E, N Sitar. Deformation based model for reinforced sand indirect shear[J]. Journal of Geotechnical Engineering(ASCE), 1990, 116( GT 7) : 1153– 1157.

[36] Wu, T H, W P Mckinell, D N Swanston. Strength of tree roots and landslide on Prince of Wales Island[J]. Alaska. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(1): 19– 33.

[37] Gray, D H, W FMegahan. Forest vegetation removal and slope stability in the Idaho Batholith[R]. USDA Research Paper INT – 271, Ogden, UT, 1980, 23.

[38] Wu, T H, R M Macomber, R t Erb, et al. Study of soil-root interaction[J]. Journal of Geotechnical Engineering (ASCE), 1988, 114(GT 12): 1351– 1357.

[39] Wu, T H, P E Beal, C Lan. In– situ shear test of soil-root systems[J]. Journal Geotechnical Engineering (ASCE), 1988, 114(GT 12): 1376– 1394.

[40] Burroughs, E R, B R Thomas. Declining root strength in Douglas fir after felling as a factor in slope stability[R]. Research Paper INT – 190, International Forest and Range Experiment Station, US Forest Service, Ogden, UT, 1997. 27.

[41] Endo, T, T Tsuruta. The effect of tree roots upon the shearing strength of soil[R]. Annual Report of the Hokkaido Branch, Tokyo Forest Experiment Station, 1969, 18: 168– 179.

[42] Kozlowski, T T. Growth and Development of Trees[M]. New York: Academic Press, 1969. 520.

[43] Gray, D H, H Ohashi. Mechanics of fiber reinforcement in sands[J]. Journal of Geotechnical Engineering (ASCE), 1983, 109(3): 335– 353.

[44] Maher, M, D H Gray. Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers[J]. Journal of Geotechnical Engineering (ASCE), 1990, 116( 11) : 1661– 77.

[45] Shields F D. Woody vegetation and riprap stability along the Sacramento River mile 84. 5 to 119[J]. Water Resources Bulletin, 1991, 27( 3): 527– 536.

[46] Shields F D, D H Gray. Effects of woody vegetation on the structural integrity of sandy levees[J]. Water Resources Bulletin, 1993, 28( 5) : 917– 931.

[47] Ohm, W. Methods of Studying Roots systems[M]. Ecological service No. 33, Berlin : Springer– Verlag, 1979.

[48] Hathaway, R L, D Penny. Root strength in some Populus and Salix clones[J]. New Zealand Journal of Botany, 1975, 13: 333– 344.

[49] Schiechtl, H M. Bioengineering for Land Reclamation and conservation[M]. Edmonton Canada: University of Alberta Press, 1980. 404.