

河道生态护坡关键技术及其生态功能

陈小华, 李小平*

(上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘要: 在上海 4 个生态河道示范区, 开展了以生态修复和河岸侵蚀控制为目标的河道生态护坡技术研究。在不同河段分别采用了土壤生物工程护坡、全系列生态护坡以及复合式生物稳定等三类生态护坡技术。护坡工程完成后, 以浦东新区机场镇生态河道示范区为重点, 对主要护坡工程进行持续 3a (2004 ~ 2006 年) 的生态监测, 从坡岸的结构稳定性和生态稳定性两方面对护坡工程进行生态功能研究。3a 来, 护坡植物生长良好, 新生枝叶和根系的护坡作用明显, 土壤抗剪强度明显增加, 河岸土壤侵蚀得到有效控制, 坡岸的结构稳定性增强; 同时河岸生境得到改善, 本地植物快速恢复, 生物多样性增加, 河岸植物群落结构由单一结构向复杂结构转变, 生态稳定性逐渐增强。

关键词: 生态河道; 生态护坡关键技术; 生态功能; 结构稳定性; 生态稳定性

文章编号: 1000-0933 (2007) 03-1168-09 **中图分类号:** Q149, TV861 **文献标识码:** A

The eco-functions of ecological protection techniques of riverbank

CHEN Xiao-Hua, LI Xiao-Ping*

Shanghai Academy of Environmental Science, Shanghai 200233, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (3): 1168 ~ 1176

Abstract: The erosion of riverbank and the disappearance of riparian buffering strips are among the concerns in river ecosystem. This study investigated the application of three ecological slope protection techniques, including soil bioengineering, all-series vegetated protection, and combined biostabilization, at four demonstration sites of ecological rivers in Shanghai. In order to assess the ecological functions of the slope protection project, the ecological slope protection project at the demonstration site of Airport Town, was conducted continuous ecological monitoring from 2004 to 2006 after the reconstruction was finished. The results indicated that the pioneer species such as *Salix suchowensis*, *Salix babylonica*, *Zoysia Sinica*, are growing very well with strong root system and flourished branches, which help control soil erosion effectively. As an indicator of soil anti-erodibility, the soil strength and compaction of the subsurface soil with a mean deepness of 15 cm are going up and much more than the un-covered control slopes, which made the soil erosion mitigated sharply and the structural stability of riverbanks enhanced. Along with the riverbank being reinforced, the habitats of the riparian zone are under self-improvement and native plants have been in rapid restoration. The ecological stability of eco-riverbanks is being enhanced due to a high species diversity and complex plant community structure.

Key Words: ecological rivers; ecological slope protection; ecological function; structure stability; ecological stability

基金项目: 国家高技术研究发展 863 计划专项资助项目 (2003AA601020); 上海市科委重大攻关资助项目 (04DZ12030)

收稿日期: 2006-02-14; **修订日期:** 2006-10-20

作者简介: 陈小华 (1978 ~), 男, 江西余江人, 硕士, 工程师, 主要从事水生态修复研究。E-mail: shoutfar@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Corresponding author E-mail: Xiaoping_lee@hotmail.com

Foundation item: The project was financially supported by National 863 High-Tech Research Program of China (No. 2003AA601020); Shanghai Committee of Science and Technology, China (No. 04DZ12030)

Received date: 2006-02-14; **Accepted date:** 2006-10-20

Biography: CHEN Xiao-Hua, Master, Engineer, mainly engaged in rehabilitation of aquatic eco-system. E-mail: shoutfar@yahoo.com.cn

河岸是水陆交错带,在调节气候、保持水土、防洪方面具有重要的功能。健康的河岸生态系统能使物质通过其界面区的速度和形式保持适当,从而使陆地加强了“水土保持”,水体防止了“富营养化”的出现^[1]。不合理的土地利用方式和高强度的开发,会导致河岸生态系统受到严重破坏,在城镇化程度较高的地区表现尤为突出。河道生态护坡的目标正是为了重建受破坏的河岸生态系统,恢复固坡、截污等生态功能。目前国内对河道生态护坡的理论和护坡技术的研究仍比较多^[2,3],但大多集中在对生态护坡的定义、功能的定性描述,或是只关注护坡技术本身,而往往忽视了对已完成的生态护坡工程进行跟踪监测或工程后评估,对其演变过程和生态功能认识不足^[4]。在不影响坡岸稳定的前提下,植物本身可以作为生态护坡的主要结构体,它是控制土壤侵蚀的最积极因素之一^[5-9]。以活的植物为主要结构的生态护坡技术,不是简单的绿化工程,而是充分考虑生态系统的自我修复能力^[10]。本文研究了上海市地区4个生态河道示范区内以植物为主要结构体的生态护坡技术,同时对完成的生态护坡工程进行了持续的生态监测,探讨其生态功能。

1 研究区域

4个生态河道示范区分别为机场镇生态河道示范区、银行卡产业园区示范河道中横港、黄浦江支流进木港以及苏州河支流纵泾港。机场镇河道和中横港属于感潮型的郊区河道,而进木港和纵泾港属于市区河道(图1)。机场镇生态河道示范区主要位于农业生产区,区域面积为7km²,示范区内的河道农业面源污染严

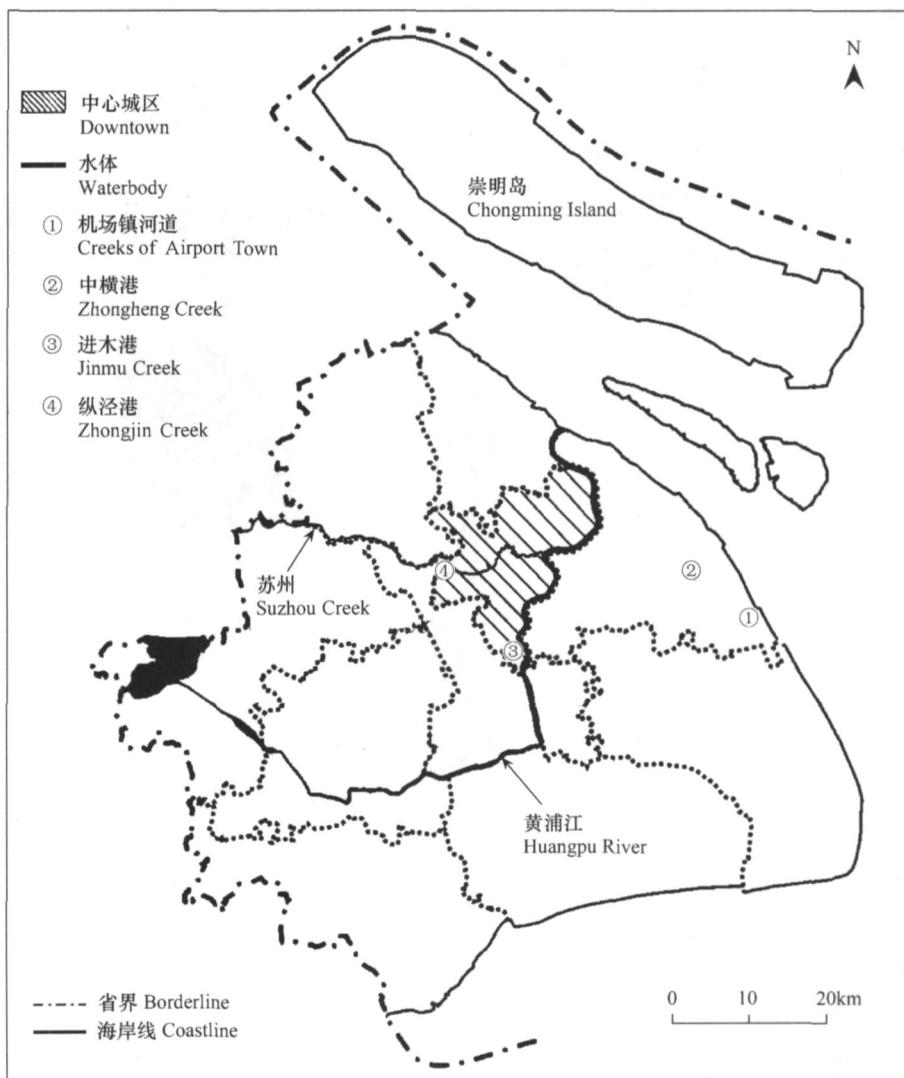


图1 生态河道示范区位置图

Fig 1 Location map of the demonstration sites of ecological rivers

重,河道坡岸植被稀少,土壤侵蚀严重,部分河段出现淤阻,选取了 16 km 长的河段作为生态护坡工程示范,工程期为 2003 年 12 月至 2004 年 4 月。中横港位于现代高新技术开发区内,河道总长 2km,生态护坡工程期为 2004 年 9 月至 11 月。市区河道进木港总长 350m,工程期为 2005 年 11 月至 12 月。纵泾港总长 600m,设计方案已完成。

2 生态护坡关键技术选取与应用

2.1 生态护坡关键技术分类

根据国内外的生态护坡技术的理论研究和工程实践,可以将以植物为主体结构的生态护坡关键技术分为三类:全系列生态护坡、土壤生物工程以及复合式生物稳定技术。

2.1.1 全系列生态护坡

全系列生态护坡技术是从坡脚至坡顶依次种植沉水植物、浮叶植物、挺水植物、湿生植物(乔、灌、草)等一系列护坡植物,形成多层次生态防护,兼顾生态功能和景观功能。挺水、浮叶以及沉水植物,能有效减缓波浪对坡岸水位变动区的侵蚀。坡面常水位以上种植耐湿性强、固土能力强的草本、灌木及乔木,共同构成完善的生态护坡系统,既能有效地控制土壤侵蚀,又美化河岸景观。全系列生态护坡技术主要应用在那些出现表层土壤侵蚀、植被稀少、景观要求较高的河段。

2.1.2 土壤生物工程护坡

土壤生物工程(soil bioengineering)是一种边坡生物防护工程技术,采用有生命力的植物根、茎(杆)或完整的植物体作为结构的主要元素,按一定的方式、方向和序列将它们扦插、种植或掩埋在边坡的不同位置,在植物生长过程中实现稳定和加固边坡,控制水土流失和实现生态修复^[11]。这类护坡结构稳定、养护要求低、生境恢复快、费用低廉、景观效果较好。土壤生物工程一般采用速生类的本地植物作为护坡的主要结构,如柳(*Salix* sp.)、杨(*Populus* sp.)等,主要有活枝扦插、柴笼以及灌丛垫等三种工程类型(图 2),种植方式各不相同^[12]。该类技术一般运用在土壤侵蚀较严重、土质松散、景观要求较低的郊区河段。

2.1.3 复合式生物稳定技术

复合式生物稳定技术是生物技术与工程技术相结合的复合式生态护坡技术。这种生态护坡技术强调活性植物与工程措施相结合,技术核心是植生基质材料,依靠锚杆、植生基质、复合材料网和植被的共同作用,达到对坡面进行绿化和防护的目的^[13]。该技术主要用于修复那些侵蚀非常严重、出现整体滑塌的陡坡。

2.2 生态河道示范区的生态护坡关键技术应用

生态护坡工程实施前,对工程区域进行详细的现场勘查,分析河道的功能定位、周围环境特征、土壤类型、水文条件等因素,确定河岸生态修复的目标。在此基础上,结合各类生态护坡技术的特点,从而选定适宜本区域的生态护坡关键技术。机场镇生态河道示范区采用了全系列生态护坡、土壤生物工程以及复合式生物稳定技术,中横港和纵泾港以全系列生态护坡技术为主,进木港以土壤生物工程为主(表 1)。

各示范区内实施的生态护坡工程量各不相同,全系列生态护坡工程量最大,主要用于土壤侵蚀较轻的河岸;其次是土壤生物工程,主要用于土壤侵蚀严重、植被稀少的河岸;而成本较高的复合式生物稳定技术,只用于机场镇生态河道示范区内出现严重坍塌的陡坡修复工程中(表 2),包括柳枝扦插与石笼的复合技术、柳枝扦插与土工布的复合技术。

活枝扦插 Live stakes

活枝柴笼 Live fascines

灌丛垫 Brush mattress

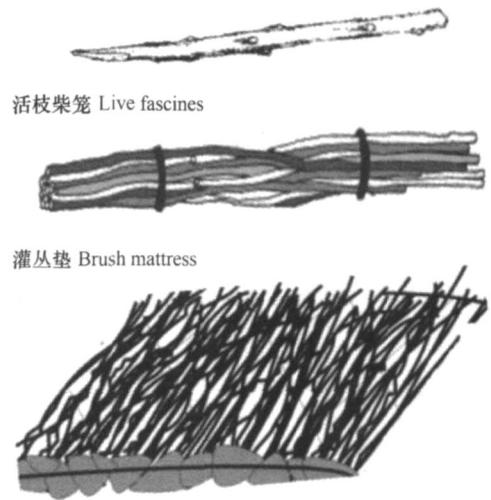


图 2 土壤生物工程的基本类型

Fig 2 Basic forms of the soil bioengineering

表 1 4个生态河道示范区环境特征与生态护坡关键技术选取

Table 1 The environmental features and eco-protection techniques in the four eco-rivers demonstration zones

生态河道示范区 Ecological rivers	周围环境特征 Land utilization	主要环境问题 Environmental problem	修复目标 Restoration goals	生态护坡技术 Eco-protection techniques
机场镇生态河道示范区 Rivers of Airport Town	¹ 现代农业区	² 河岸侵蚀、 ³ 植被破坏	⁴ 生态河道	⁵ 土壤生物工程、 ⁶ 全系列生态护坡、 ⁷ 复合式生物稳定技术
中横港 Zhongheng Creek	⁸ 高新技术产业区	⁹ 景观不协调、 ¹⁰ 水质恶化	¹¹ 景观河道	⁶ 全系列生态护坡为主
进木港 Jinmu Creek	¹² 居住、工业、港口混合区	² 河岸侵蚀、 ¹⁰ 水质恶化	⁴ 生态河道	⁵ 土壤生物工程、 ⁶ 全系列生态护坡
纵泾港 zhongjing Creek	¹³ 居民区	¹⁴ 渠道化(混凝土驳岸); ⁹ 景观不协调	¹¹ 景观河道	⁶ 全系列生态护坡为主

1-Modern agricultural zone; 2-Riverbank erosion; 3-Vegetation destruction; 4-Ecological river; 5-Soil bioengineering; 6-All-series vegetated protection; 7-Combined biostabilization; 8-Hi-tech industrial zone; 9-Incompatible with surrounding landscape; 10-Degradation of water quality; 11-Scenic river; 12-A mixed zone of commercial, residential, and industrial uses; 13-Residential zone; 14-Channelized river with concrete bank

表 2 4个生态河道示范区内生态护坡关键技术的工程实施面积(m²)

Table 2 The implementation area of eco-protection projects at the four demonstration sites

工程区域 Project sites	全系列生态护坡 All-series vegetated protection	土壤生物工程 Soil bioengineering			复合式生物稳定技术 Combined biostabilization
		活枝扦插 Live stakes	柴笼 Live fascines	灌丛垫 Brush mattress	
机场镇生态河道示范区 Rivers of Airport Town	28714	2437	300	315	80
中横港 Zhongheng Creek	12400	180	150	132	0
进木港 Jinmu Creek	310	10	210	870	0
纵泾港 Zhongjing Creek	6500	0	40	180	0

3 生态护坡工程的生态功能研究

生态护坡工程在自我组织的过程中,不断强化两方面的生态功能:一是维持河岸的结构稳定性,稳固河岸以确保河岸物理生境的完整;二是提高河岸的生态稳定性,使整个河流生态系统健康发展。2004年3月机场镇河道生态护坡工程完成后,对已完成的护坡工程进行了持续的生态监测,以评估生态护坡工程的发展动态和生态功能。

3.1 监测指标与方法

3.1.1 样地设置

采用固定样带法,即每种类型的生态护坡选取2个至3个固定样带(从坡顶向常水位延伸,宽度为1m),分别在每个样带的坡顶、坡腰及常水位部位进行监测。

3.1.2 调查时间

在第一个生长季节(2004年)的调查频率为每月1次,在随后两个生长季节(2005年和2006年)调查频率为每年2次。为便于纵向比较,每次采样均安排在连续出现晴天之后。

3.1.3 护坡植物的生长特性和生物量

现场随机测定新生枝条的密度、高度,并随机挖掘若干整株的护坡植物,测定新生根系的长度。将植物样品带回实验室,测定新生枝叶和根系的生物量(干重)。

3.1.4 土壤抗剪强度、紧实度及含水率

在每个的固定样带内,从坡顶至常水位随机选取15个点,坡顶、坡腰、近常水位各为5个点。为减少土壤扰动对测定结果的影响,在每个点先采用英国的Delta-T仪器公司的W. E. T土壤3参数仪测定土壤含水率,再运用荷兰Eijkelkamp公司的现场剪力测量仪(Field inspection vane borer)测定土壤抗剪强度,并用以色列

Spectrum Technologies公司的简易紧实度仪测定土壤紧实度,每个点的测定位置均为地表以下约 15cm 的土层。

3.1.5 河岸生物群落

采用固定样带和样方法调查河岸植物群落结构、物种多样性、河岸生境等生态稳定性指标,选取的样带与测定土壤抗剪强度的样地相同。在每个固定样地内,从常水位向坡顶移动,记录植物的种类、生活型、密度、覆盖度、高度、物候相等,同时记录动物的种类。

3.2 监测结果与分析

3.2.1 护坡植物的生长特性和生物量

植物是始终是稳固坡岸的积极因素,具有良好的护坡工程性状,枝叶具有降雨截留作用、径流延滞作用、土壤增渗作用、蒸腾作用等水文效应,根系具有固结土壤和支撑坡体的机械效应^[6~9]。对土壤生物工程和全生态护坡的护坡植物生长特性及生物量进行了测定。

土壤生物工程的植物种植方式不同于其它固坡植物,一般选择在植物休眠期(冬末春初)内进行种植。机场镇生态河道示范区内的土壤生物工程包括柴笼、灌丛垫以及活枝扦插 3种工程类型,前两种工程使用的植物材料是杞柳枝(*Salix suchowensis*),活枝扦插使用的是垂柳枝(*Salix babylonica*)。工程刚完成时(2004年3月),植物材料均为没有根系和叶片的新鲜枝条,安置在浅表层土壤中。施工完成两周后,露出坡面的柳枝首先萌芽,随后 2个月(3月至 5月份)内坡面的新枝每月增长 5至 10cm;5月份至 10月份新枝的生长速率最快,新枝高度平均每月增长 30~40cm;10月至 12月份生长速率趋缓,平均每月增长 5cm左右。由于种植方式和植物材料本身的原因,杞柳枝和垂柳枝的生长状况和生长量有所不同,2004年 12月 14日(工程完成近 10个月)采用现场挖掘的方法,对种植在土壤中的柳枝生长状况进行详细测定,结果为单株杞柳枝和垂柳枝的新生根系平均生长深度超过 1m;新枝条的平均高度达到 1.5m以上,最高接近 3m,盖度超过 90%,对坡岸形成良好的防护。在坡面生物量的增长方面,灌丛垫的优势最明显,10个月后新增生物量(干重)达到 2.18 kg/m²(表 3)。植物体与土壤已逐渐形成一个整体,植物的护坡效应逐渐得到增强。

表 3 土壤生物工程的植物生长 10个月后的生长量和生物量统计

Table 3 Biomass change ten months after live materials grew

植物生长指标 Metrics of plant growth	植物类型 Species of cuttings	
	垂柳枝 <i>S. babylonica</i>	杞柳枝 <i>S. suchowensis</i>
单株原枝长度 Length of cuttings (cm)	52 ±3	122 ±8
种植密度 Density of cuttings (ind /m ²)	6	17
新生枝条总密度 Density of new branches (ind /m ²)	20	50
单株新生主根长度 Length of new taproot (cm)	93.33 ±10.41	93.67 ±7.09
单株新生根系干重 Dry weight of new roots (g)	10.13 ±3.29	13.67 ±7.06
单株新生枝条高度 Height of new branches (cm)	150 ±32.79	188.33 ±18.93
单株新生枝条干重 Dry weight of new branches (g)	32 ±7.84	114.47 ±82.27
单位面积新生的总生物量 Total dry weight of new materials per unit area (kg/m ²)	0.25	2.18

全系列生态护坡工程的主要护坡植物是结缕草(*Zoysia Sinica*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)等,2004年 3月工程结束后结缕草生长良好,地上部分的生长速率为每月 2至 3cm,当年 10月地上部分平均高度达到 18cm。当年 12月 14日随机选取两块大小为 0.5m ×0.5m的结缕草样方,进行挖掘取得完整的植物样品,在实验室内测定结缕草地下部分和地上部分的干重平均值均为 0.8kg/m²,根系平均长度为 13cm,起着良好的固土作用,有效控制土壤侵蚀。现场调查结果还显示,挺水植物种植区内出现泥沙淤积,植物消浪和促淤作用很明显,对常水位的坡岸起到很好的保护作用,解决了以往常水位线附近土壤严重侵蚀的问题。

3.2.2 土壤抗剪强度、紧实度及含水率

浅层土壤内分布有密集的植物根系,土壤和根系的共同作用增强了坡岸稳定性。浅层土壤抗剪强度实际

上是土壤与植物根系复合体的抗剪强度,更能反映植物根系的固土作用。针对不同类型的岸坡,测定深 15cm 处的土壤抗剪强度、紧实度以及含水率(表 4)。

表 4 不同类型坡岸的浅层土壤抗剪强度(kPa)

Table 4 shear strength of subsurface soil (15cm deep) on different types of riverbanks (kPa)

时间 Time	坡岸部位 Slope position	护坡类型 Type of slope protection			
		裸露对照岸坡 Control slope	活枝扦插 + 柴笼 Live stakes + Live fascines	灌丛垫护坡 Brush mattress	全系列生态护坡 All-series vegetated protection
2005年 2月 Feb., 2005	坡顶 Upper of slope	39.80 ±6.90	49.80 ±8.40	23.00 ±7.48	—
	坡腰 Middle of slope	30.60 ±11.41	44.00 ±6.36	33.86 ±8.38	—
	常水位 Splash zone	2.80 ±1.10	37.60 ±8.88	32.85 ±4.30	—
2005年 7月 Jul., 2005	坡顶 Upper of slope	62.00 ±9.12	55.00 ±4.50	53.00 ±2.83	83.00 ±10.94
	坡腰 Middle of slope	32.00 ±3.45	47.33 ±9.29	81.67 ±7.64	113.00 ±9.90
	常水位 Splash zone	8.00 ±2.34	25.50 ±3.54	72.00 ±37.59	54.00 ±7.77
2006年 8月 Aug., 2006	坡顶 Upper of slope	74.67 ±14.05	57.00 ±7.55	96.60 ±21.22	87.33 ±11.24
	坡腰 Middle of slope	39.67 ±5.51	42.00 ±13.44	132.17 ±48.58	131.67 ±16.56
	常水位 Splash zone	14.00 ±4.55	19.25 ±10.75	112.4 ±55.73	34.67 ±13.87

—:未监测 Not determined

单向方差分析结果显示,生态护坡与裸露对照岸坡之间的浅层土壤抗剪强度变化具有显著性差异($P = 0.004 < 0.01$)。工程完成后的初期(2005年 2月),生态护坡的浅层土壤抗剪强度均比较小,灌丛垫的坡顶、坡腰的抗剪强度均小于裸露对照岸坡,但常水位处的抗剪强度明显高于裸露土坡(表 4)。2005年 7月和 2006年 8月测定结果表明,随着生态护坡植物生长和系统自我完善,各类生态护坡的土壤抗剪强度不断增大,尤其是坡腰和常水位处的抗剪强度明显高于未施工的对照岸坡,灌丛垫的坡腰和常水位处土壤抗剪强度达到对照岸坡的 3至 8倍(表 4)。不同类型生态护坡之间的浅层土壤抗剪强度变化也有显著性差异($P = 0.015 < 0.05$),灌丛垫的浅层土壤抗剪强度随着时间增长最快,明显大于其他土壤生物工程(活枝扦插与柴笼)和全系列生态护坡。

各类坡岸的浅层土壤含水率变化范围为 11%~39.4%,紧实度变化范围为 30~600psi。浅层土壤含水率和紧实度是影响土壤抗剪强度的主要因素之一。将 2006年 8月测定的完整数据作相关分析,结果表明浅层土壤抗剪强度与含水率呈显著的负相关($R^2 = 0.623, P = 0.001 < 0.01$) (图 3),而抗剪强度与紧实度呈显著的正相关($R^2 = 0.805, P = 0.001 < 0.01$)。土壤含水率超过某一特定值时,土壤中的过多水分反而减少土壤颗粒间的吸力,土壤紧实度减小,抗剪强度也相应减小;灌丛垫的新生密集植物具有很强蒸腾作用,能有效排出浅层土壤中的过多水分,提高浅层土壤的紧实度和抗剪强度。

3.2.3 生态护坡的生物多样性变化

植物多样性和优化组合是退化河岸生态系统恢复和重建的关键。一个生态系统的生物多样性通常与系统稳定程度的增加相一致,在群落形成期这一性状尤为明显。

护坡工程实施前,对机场镇生态河道示范区内的岸坡植被进行了调查,由于河岸侵蚀严重,大部分河段的岸坡植被覆盖率低,只有少量的野生草本,植物难以生长在高度活动的斜坡上,生物多样性很低。尤其是靠近

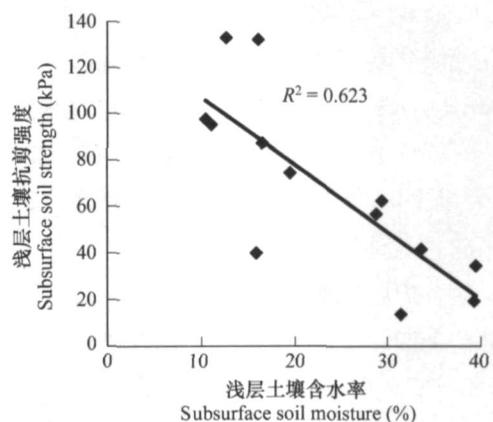


图 3 浅层土壤抗剪强度与含水率的相关分析

Fig 3 Correlation between subsurface soil shear and soil moisture

居民区的河段受到人类活动干扰更大,本地植被受到严重破坏。一些河段的岸坡分布着加拿大一枝黄花 (*Solidago canadensis*)群落,该植物为繁殖能力很强的外来物种,极易形成郁闭环境而使其他本地植物受到强烈抑制,对本地生态平衡和生物多样性具有很大威胁。

生态护坡工程完成后,在第一个生长季节(2004年4月至10月)内,坡岸植被恢复很快,物种数量逐渐增加,由施工后第一个月的2种至3种增加到秋季的14种至18种。从整个生长季节来看,各类生态护坡(B1~D1)上出现的总物种数均要大于未施工的对照坡岸(A1和A2),其中活枝扦插与全系列组合护坡最为明显,整个季节内出现植物种数为30(图4)。坡岸上原有的外来物种加拿大一枝黄花得到有效抑制。

复合式生物稳定技术护坡相对于全系列生态护坡等其他护坡类型,植物群落结构较为单一,杞柳为绝对优势种。该类生态护坡以固坡为主要目标,其石笼、土工布等人工基质不适合其它植物的生长,坡岸只分布少量生命力较强的本地草本,物种数仍多于对照坡岸。

坡岸植被逐渐恢复的过程中,河岸生境也逐步得到改善,为当地野生动物提供了良好的栖息地,生物多样性明显好转。护坡工程完成的当年,现场调查发现新生的灌木丛中栖息着双叉犀金龟 (*Allomyrina dichotoma* Linnaeus)等昆虫,泽蛙 (*Rana limnocharis*)、中华蟾蜍 (*Bufo gargarizans*)等两栖类动物。护坡植物的根际周围分布有大量土壤动物。坡岸的植被恢复之后,本地优势种中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*)也更多地选择在植物生长良好的生态坡岸上栖息。

3.2.4 生态护坡的植物群落演替

杞柳、垂柳、结缕草等护坡植物作为先锋群落在裸地形成后,河岸植物群落的演替便在进行。活枝扦插与柴笼组合护坡工程完成后,柳枝的存活率很高,植株平均高度逐年增加,2006年夏季达到155cm,平均盖度为2004年夏季最高(70%)。杞柳枝与垂柳枝的生长为其他本地植被恢复提供了良好的生境,坡岸的本地植物群落恢复迅速,2004年至2006年的夏季植物群落的物种数分别为12,10,13(表5);除了护坡植物柳枝之外,其他新生植物均为草本,连续3a的夏季草本植物平均总盖度超过90%,以低矮型的多年生草本占绝对优势。群落处于不断变化中,年份之间的群落结构有很大差别,相同物种的重现率只有10%左右。

表5 土壤生物工程护坡的植物群落年际变化

Table 5 Annual change of plant community on the slope of soil bioengineering

护坡类型 Types of eco-protection	时间* Time	植物种数 Number of Species	柳枝的新枝生长状况 New branches of salix		草本植物 Herbage	
			平均高度 Height(cm)	平均盖度 Canopy(%)	平均高度 Height(cm)	平均盖度 Canopy(%)
活枝扦插+柴笼 Live stakes+Live fascines	A	12	120	70	9.5	92
	B	10	150	45	12.5	95
	C	13	155	60	22.5	100
灌丛垫 Brush mattress	A	13	110	80.0	22.0	40.0
	B	12	208	70.0	15.6	32.5
	C	9	190	90.0	68.0	12.6

* A: 2004年夏季 Summer 2004; B: 2005年夏季 Summer 2005; C: 2006年夏季 Summer 2006

灌丛垫的护坡植物杞柳生长旺盛,2004年夏季杞柳盖度就达到80%。河岸生境得到改善,使得本地草本植物也得到很大程度的恢复,植物种类由工程实施前的3种恢复到工程后的17种。但由于杞柳的密集生长,

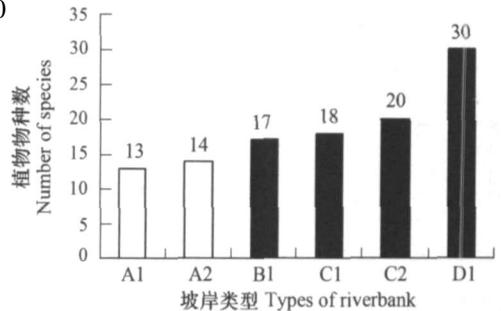


图4 植物生长期(2004年4~10月)不同类型坡岸出现的植物物种数

Fig 4 Total number of plant species present on the streambanks from April to October, 2004

A1和A2为未施工的对照坡岸,B1为灌丛垫护坡,C1和C2为活枝扦插和柴笼组合护坡,D1为全系列生态护坡 A1&A2: Control riverbank; B1: Brush mattress; C1&C2: Eco-banks of live stakes and live fascines; D1: All-series vegetated protection

过高的郁闭度导致恢复后的草本植物群落的种类数和总盖度呈现逐年减小,2004年夏季种类数和盖度分别为12种和40%,至2006年夏季分别降至8种和12.6%(表5)。3a来草本群落由1年生草本占优势向多年生草本占绝对优势转变,由低矮型草本向较高型草本转变,2006年夏季记录的草本植物全为多年生草本。

全系列生态护坡连续3a的夏季草本植物群落的物种总数均为9种,结缕草为优势种,平均盖度近90%。年份间的群落结构有所变化,相同物种的重现率为50%左右,除结缕草以外的其他草本的总盖度和平均高度均有所增加,由2005年夏季的17%和15cm,至2006年夏季分别上升为37%和46cm左右(表5)。

复合式生物稳定技术护坡的植物群落结构变化不大,杞柳为绝对优势种,2004年至2006年覆盖度逐年增加,2006年夏季超过95%。坡岸只分布有少量生命力较强的草本植物,种类数和覆盖度没有明显的年际变化。

对于裸露的对照岸坡,3a中整个坡岸植被稀少,裸土面积达到75%以上,植物群落结构单一,无芒稗(*Echinochloa crusgallii* var. *mitis*)为绝对优势种。

4 结论与讨论

4.1 全系列护坡技术兼顾生态目标和景观目标,生物多样性高,挺水植物和草皮的固土作用明显,但其护坡成本和养护要求较高。土壤生物工程护坡技术是利用速生植物枝条作为主要护坡结构的一种护坡技术,固坡作用突出,具有近自然型、成本低、养护要求低、施工简单等优势,其护坡成本只为其他生态护坡的1/3至1/4。土壤生物工程的护坡植物形成的河岸景观比较单一,有时密集生长的护坡植物导致生物多样性降低。复合式生物稳定技术对河岸的稳固作用最有效,护坡植物杞柳生长良好,但成本和施工难度较高,且石笼、土工布等人工基质不适合其他本地植物的生长,导致植物群落结构单一,多样性较低。在实际工程设计中,三类生态护坡技术可以整合运用,发挥各自优势,以获得坡岸生态修复的最佳效果。

4.2 生态护坡的结构稳定性主要体现在护坡植物的固坡作用和土壤的抗侵蚀性。监测结果表明,生态护坡的护坡植物生长良好,新生的枝叶和根系具有良好的护坡特性。尤其是土壤生物工程的杞柳枝和垂柳枝形成先锋群落,对河岸形成良好防护。在第1个生长季节内,新生枝条的高度、盖度、生长密度都达到较高水平,发挥着降雨截留、径流延滞等水文效应;新生根系形成庞大的地下根系网络,具有固结土壤和支撑坡体的机械效应。

植物根系能明显改善土壤的物理性质,提高土壤抗剪强度。在一定条件下,可以把土壤抗剪强度的增加归结为植物根系存在的结果^[14]。随着生态护坡植物生长和系统自我完善,各类生态护坡的土壤抗剪强度不断增大,尤其是坡腰和常水位处的抗剪强度明显高于裸露的对照坡岸。灌丛垫的浅层土壤抗剪强度随着时间增长最快,明显好于活枝扦插、柴笼和全系列生态护坡。

4.3 河岸生态系统的稳定性直接依赖于系统结构的复杂度以及系统内物种的多样性^[15]。机场镇生态河道示范区的生态护坡工程完成后的3a中,护坡植物生长良好,植被恢复快,为其他物种营造了适宜的生境,生物多样性增加。工程完成后的第1个生长季节内,生态护坡上出现的植物物种数明显要大于未采取护坡工程的对照坡岸,以土壤生物工程的活枝扦插与柴笼护坡最为明显,坡岸上原有的外来物种加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)得到有效抑制。坡岸植被的恢复使坡岸生境得到明显改善,河岸野生动物明显增多,尤其是两栖类动物。

生态护坡作为新生的生态系统,处于不断自我组织、自我完善的过程中。护坡工程完成后的3a中,生态护坡的植物群落的结构在不断变化,本地草本植物的覆盖度在不断增加,草本群落由一年生草本占优势向多年生草本占绝对优势转变。各类生态护坡的演替特征有所不同,活枝扦插与柴笼组合护坡、全系列护坡的本地草本植物种数趋于稳定,覆盖度增加,而灌丛垫和复合式生物稳定技术护坡的新生枝条易形成郁闭环境,导致恢复后的草本植物群落的种类数和总盖度出现减小趋势。随着河岸植被系统与环境的相互作用,群落结构将逐渐趋于稳定,生态稳定性提高。

References:

- [1] Yin C Q. The ecological function, protection and utilization of land/inland water ecotones. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(3): 331-335.
- [2] Wang Y, Zhou M Y, Zhao R L, *et al*. Present research condition and prospect for ecological slope protection technology of town stream channel. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(1): 88-92.
- [3] Ji Y X, Liu S Q, Zhang Y. Bio-technical research of slope protection structure for urban river improvement. *Research of Soil and Water Conservation*, 2001, 8(4): 25-28.
- [4] Zhou Y, Watts D. Slope eco-engineering and its current developing state. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(5): 68-73.
- [5] Wang K J, Lee C F. Brief mechanics analysis on bioengineering techniques for slope protection. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(6): 687-691.
- [6] You Z, Lee Z B, Jiang Q F. Redistribution model of rainfall by vegetation. *Science of Soil and Water Conservation*, 2003, 1(3): 102-105.
- [7] Shi Q, Liu W J, Wang M Q. The mechanism analysis and quantitative estimate of the slope protected by vegetation. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(3): 126 ~ 129.
- [8] Zhou Y. Vegetation and erosion control: exploration on basic principle of slope engineering. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2): 297 ~ 300.
- [9] Zha X, Tang K L, Zhang K L. The impact of vegetation on soil characteristics and soil erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 6(2): 52-58.
- [10] Eason G and Yarbrough L D. The effects of riparian vegetation on bank stability. *Environmental and Engineering Geoscience*, 2002, 8(4): 247-260.
- [11] Li X P, Zhang L Q, Zhang Z. Soil bioengineering and the ecological restoration of riverbanks at the Airport Town, Shanghai, China. *Ecological Engineering*, 2006, (26): 304 ~ 314.
- [12] Chen X H, Li X P. Ecological protection techniques of riverbank in agricultural catchment. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl): 140 ~ 145.
- [13] Hector G A, Timothy A V, Edwin H W, *et al*. Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State. *Biomass and Bioenergy*, 2001, (20): 399-411.
- [14] Liu D H, Lee Y. Mechanism of plant roots improving resistance of soil to concentrated flow erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 34 ~ 38.
- [15] Gray D H, Sotir R B. *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: A Practical Guide for Erosion Control*. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd, 1996. 1-300.

参考文献:

- [1] 尹澄清. 内陆水-陆地交错带的生态功能及其保护与开发前景. *生态学报*, 1995, 15(3): 331 ~ 335.
- [2] 汪洋, 周明耀, 赵瑞龙, 等. 城镇河道生态护坡技术的研究现状与展望. *中国水土保持科学*, 2005, 3(1): 88 ~ 92.
- [3] 季永兴, 刘水芹, 张勇. 城市河道整治中生态型护坡结构探讨. *水土保持研究*, 2001, 8(4): 25 ~ 28.
- [4] 周跃, Watts D. 坡面生态工程及其发展现状. *生态学杂志*, 1999, 18(5): 68 ~ 73.
- [5] 王可钧, 李焯芬. 植物固坡的力学简析. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(6): 687 ~ 691.
- [6] 游珍, 李占斌, 蒋庆丰. 植被对降雨的再分配分析. *中国水土保持科学*, 2003, 1(3): 102 ~ 105.
- [7] 侍倩, 刘文娟, 王敏强, 等. 植被对坡面防护作用的机理分析及定量估算. *水土保持研究*, 2004, 11(3): 126 ~ 129.
- [8] 周跃. 植被与侵蚀控制: 坡面生态工程基本原理探索. *应用生态学报*, 2000, 11(2): 297 ~ 300.
- [9] 查轩, 唐克丽, 张科利, 等. 植被对土壤特性及土壤侵蚀的影响研究. *水土保持学报*, 1992, 6(2): 52 ~ 58.
- [12] 陈小华, 李小平. 农业流域的河流生态护坡技术研究. *农业环境科学学报*, 2006, 25(增刊): 140 ~ 145.
- [14] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 34 ~ 37.