

河岸带植被重建的生态修复技术及应用^{*}

赵广琦, 崔心红, 张群, 朱义

(上海市园林科学研究所, 上海 200232)

摘要:以上海市崇明生态岛的杜鹃河坡岸示范工程为例,探讨了以生态修复和稳定坡岸为目标的植物护岸技术在城镇生态型河道坡岸修复中的应用。在不同河段分别采用了全系列生态护岸、土壤生物工程护岸和复合式生物稳定等 3 类植物护岸技术;对比了工程实施后河道坡岸 10 个月来的坡岸土壤剪切力、生境条件和生物多样性变化。研究和示范工程表明,在生态型河道中采用植物护岸技术可以稳定坡岸、改善坡岸的栖息地质量、修复河道的生态环境。生态型河道的植物护岸技术可以在我国各类岸坡的生态修复和边坡稳定中广泛运用。

关键词:生态型河道;植物护岸技术;坡岸修复

中图分类号:S157.2;X171.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2010)01-0252-07

Technology and Application for Ecology Rehabilitation on Riparian Vegetation Restoration

ZHAO Guang-qi, CUI Xin-hong, ZHANG Qun, ZHU Yi

(Shanghai Research Institute of Landscape Gardening, Shanghai 200232, China)

Abstract: We took the Dujuan River in Chongming ecological island, Shanghai as an example to study the practice and its ecological effect on plant slope protection techniques of streams, which could provide an effective means for the slope stabilization and site restoration of stream bank. We investigated the application of three kinds of plant slope protection techniques, including all-series vegetated protection, soil bioengineering, and combined biostabilization at different sites of ecological river. After 10-month project implementation, significant effectiveness was obtained on slope stability, habitat improvement, and ecological restoration of stream banks. It was concluded that the approach could be widely applied in ecological restoration and riverbank stabilization of all kind of slopes in China.

Key words: ecological rivers; plant slope protection; riverbank restoration

河岸是河道生态系统的水陆交错地带,是养分管理、沉积物和水土流失控制及保护淡水资源环境系统的重要组成部分,河岸植被缓冲带作为河岸带的重要组成部分以及水陆间重要的生态交错带,在控制河岸侵蚀、截留地表径流泥沙和养分、保护河溪水质、调节水温、为水陆动植物提供生境、维护河溪生物多样性和生态系统完整性以及提高河岸景观质量等方面具有重要的功能^[1]。近年来人工建设或修复的生态型河道正在受到推崇,所采用的河岸带植被重建,就是采用有生命力植物的根、茎(枝)或整体

作为结构的主体元素,按一定方式和方向排列扦插、种植或掩埋在边坡的不同位置,在植物群落生长和建群过程中加固和稳定边坡,控制水土流失和实现生态修复。

从国外城市河道整治的发展趋势来看,尽可能保持河道的自然风貌已成为当今国际上先进城市的治理准则,美国、法国、瑞士、奥地利等国都在积极修建生态河堤,恢复河岸水边植物群落与河畔林^[2]。日本在 20 世纪 30 年代初就开展了“创造多自然型河川计划”,提倡既有条件的河段应尽可能利用木

^{*} 收稿日期:2009-08-15

基金项目:上海市建设交通委科研项目(建科 2008-010);上海市绿化和市容管理局科研项目(GZB060201);上海市科委科技支撑计划(08DZ1203204)

作者简介:赵广琦(1963-),男,博士,高级工程师,主要研究方向:园林景观生态学。E-mail:guangqizhao@yahoo.com.cn

通信作者:崔心红(1965-),男,博士,高级工程师,主要研究方向:城市湿地保护与景观构建技术。E-mail:xinhongcui@21cn.com

桩、竹笼、卵石等天然材料来修建河堤,并将其命名为“生态河堤”^[3]。而国内近年来也相继开展了生态型河道建设方面的探索^[2,4],河道整治中的河道护岸技术也由原来的纯工程性措施向生态型河道护岸技术发展。但大多集中在对生态护岸的定义、功能的定性描述,或是只关注护岸技术本身,而往往忽视了对已完成的生态护岸工程进行跟踪监测或工程后评估,对其演变过程和应用类型认识不足^[3]。特别是对植物护岸技术在生态护岸中的作用缺乏深入研究或系统开发。以活的植物为主要结构的生态护岸技术,不是简单的绿化工程,而是充分考虑河流生态系统的自我修复能力^[5]。目前,我国在河岸植被缓冲带生态水文功能、结构设计、规划管理方面的研究工作刚刚起步,本研究结合上海崇明生态岛的杜鹃河生态型河道示范工程,探讨以植物为主要结构体的生态型护岸技术,以期为我国河岸带植被重建的生态修复技术的研究提供参考。

1 材料与方法

实验河道位于崇明生态岛东端的杜鹃河。崇明生态岛是长江口大型冲积海岛,密集的河网水系是崇明岛五大特色景观之一。杜鹃河在崇明岛东部陈家镇,是崇明生态岛的一条重要镇级河道,总长约 500 m,平均河宽约 8 m,河道坡岸裸露陡直,植被覆盖率很低。河道两岸为农田和一小段民居,降雨所形成的地表径流未经任何缓冲直接排入河道,水土流失较严重,坡岸和水面景观较差。选取了 300 m 长的河段作为植物生态护岸工程示范,种植植物包括:杞柳(*Salix suchowensis*) (柴笼 14 m,石笼 20 m,土工布 20 m;灌丛垫 105 m²);垂柳(*Salix babylonica*) (扞头 140 m²);挺水植物(野茭白, *Zizania caduuciflora*) 549 m²,菖蒲(*Acorus calamus*) 602 m²);沉水植物(菹草, *Potamogeton crispus*),未统计);结缕草(*Zoysia Sinica*) 983 m²及其他灌木和乔木。示范工程建设自 2006 年 2 月起,至 2007 年 3 月基本完成了建设和种植工程。

根据研究区域不同河段的生态特征,包括河岸坡度、水文条件、土壤特性以及河段周围环境特征,主要采用了 3 种植物护岸技术:全系列生态护岸、土壤生物工程以及复合式生物稳定技术,并将这 3 种技术有机组合,形成多种植物生态护岸方案。

1.1 全系列生态护岸

全系列生态护岸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)等一系列护岸植物,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岸系统,既能有效地控制土壤侵蚀,又能美化河岸景观。杜鹃河的全系列生态护岸在坡顶种植垂柳、水杉(*Metasequoia glyptostoboides*)等本地的湿生乔木,株距为 5 m;常水位(2.6 m 标高)以上岸坡种植火棘(*Pyracantha fortuneana*)、黄馨(*Jasminum mesnyi*)等耐湿性强的观赏灌木,地被铺设固坡效果好的结缕草;常水位附近种植根系较发达的野茭白、菖蒲、芦苇(*Phragmites communis*)等本地挺水植物;向下种植芡实(*Euryale ferox*)等浮叶植物和菹草等沉水植物。全系列生态护岸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。

1.2 土壤生物工程护岸

土壤生物工程是一种边坡生物防护工程技术。这种技术在国外已经发展了几十年,用于公路边坡、河道坡岸、海岸边坡等各类边坡的生态治理^[6-9]。这类护岸技术使用大量的可以迅速生长新根的本地木本植物,最常用的木本灌木和乔木如柳(*Salix* spp.)、杨(*Populus* spp.)、山茱萸(*Cornus* spp.)等。利用这些存活的植物体(主要是枝条),主要有活枝扦插、柴笼以及灌丛垫等 3 种工程类型,以“点、线、面”的种植方式对整个边坡进行生态修复。对于使用植物体的土壤生物工程技术来说,在工程初期可能比较脆弱,但随着植物快速生长,整个土壤生物工程护岸系统将越来越牢固,其护岸功能逐渐从“覆盖坡面”的单一功能向“保护岸面”、“稳固坡体”、“改善生境”等多功能转变^[8-9]。

土壤生物工程不同于普通的植草种树之类的边坡生物防护工程技术,它具有生物量大、结构稳定、养护要求低、生境恢复快、施工简单、费用低廉、近自然等特征。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。

1.2.1 活枝扦插 该技术运用在河岸侵蚀比较严重的坡岸。这类坡岸一般植被稀少,坡面存在一定程度的土壤侵蚀,水力学相对较小,没有高强度的冲刷作用。在杜鹃河的具体方案为,常水位以上的坡岸扦插 4~5 排长度 0.5 m、直径 2~4 cm 的活性垂柳枝,株距约 0.5 m;坡顶种植柳树(*Salix babylonica*),株距 5 m;坡面地被铺设结缕草。常水位上方 10 cm 处种植一排柴笼,其下方种植野茭白、菖蒲等挺水植物,有效控制淘蚀作用。

活枝扦插长出的根系和枝叶,可以改善土壤结

构,有效控制坡岸水土流失。利用活枝扦插作为建群种,可以快速恢复河道坡岸的植被,改善坡岸生境,为其它本地植物的恢复提供良好条件;与全系列生态护岸相结合,构成完整的近自然的坡岸植被缓冲带。

1.2.2 柴笼 柴笼护岸技术主要应用在坡度较大、河水流速大、坡面侵蚀较严重、植被稀少的坡岸。杜鹃河常水位以上的坡岸种植 3 排杞柳(*Salix suchowensis*)枝柴笼,排距 0.8~1.0 m。坡顶种植柳树,地被铺设结缕草;常水位以下依次种植菖蒲、野茭白等根系发达的挺水植物,以及苦草(*Vallisneria spiralis*)、菹草等沉水植物。

通过整坡工程减缓坡度以增加坡岸稳定性,利用柴笼控制坡面土壤侵蚀的优势,减少常水位以上坡岸的水土流失。柴笼结合全系列生态护岸,共同构建良好的植被缓冲带,为其它本底植物生长创造良好生境,同时利用挺水植物控制常水位附近的坡岸侵蚀。

1.2.3 灌丛垫 灌丛垫技术属于高密度、高强度的植物防护体系,主要用来保护那些土壤团粒结构差、抗侵蚀能力低、植被比较稀少、受坡面径流影响较大的坡岸。在杜鹃河,从常水位至坡顶的坡面上均匀铺植杞柳枝柴笼,单株枝条长 1~2 m,枝条铺植厚度控制在 10~15 cm,每隔 1 m 压入较粗的枝条或木楔;坡顶种植夹竹桃(*Nerium indicum*)、柳树等湿生乔木。常水位附近安置一些抛石,并种植菖蒲、野茭白等根系发达的挺水植物,株距 30~50 cm,向下种植苦草、菹草等沉水植物。灌丛垫新长出的密集枝条大大减少了雨水和地表径流的冲刷作用,而新长出的根形成庞大的地下根系网络,除改善土壤的团粒结构外,也加强了土壤剪切力和紧实度。结合全系列生态护岸方式,根系发达的挺水植物可有效控制常水位附近的淘蚀作用。

1.3 复合式生物稳定技术

复合式生物稳定技术是生物工程护岸技术与传统工程技术相结合的复合式生态护岸技术。这种生态护岸技术强调活性植物与工程措施相结合,采用水泥桩浆砌石块的传统护岸技术,以达到在复杂地址条件下的固坡作用,附以活枝柴笼捆插和活枝扦插土壤生物工程技术。其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,达到对坡面进行修复和防护的目的。该技术适用于水力学或河岸侵蚀比较突出的坡岸,比如易坍塌的陡坡或侵蚀严重的坡岸。杜鹃河主要采用了杞柳层插与土工布、石笼等传统工程结构相结合的复式生物稳定技术。

2 植物护岸的生态修复效果

植物生态护岸工程在自我修复的过程中,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性;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。2007 年 3 月杜鹃河生态型河道建设工程完成后,为了评估植物护岸技术的发展动态和生态效果,在工程竣工后的 10 个月内(坡岸植物的第 1 个生长季节),对所运用的植物护岸技术进行了持续的生态监测。

2.1 测定指标与方法

2.1.1 样地设置 采用固定样带法,即每种类型的植物护岸选取 2~3 个固定样带(从坡顶向常水位延伸,宽度为 1 m),分别在每个样带的坡顶、坡腰及常水位附近进行监测。

2.1.2 调查时间 在 2007 年坡岸植物的第一个生长季节内,调查频率为每月 1 次。为便于纵向比较,每次采样均安排在连续出现晴天之后。

2.1.3 护岸植物的生长特性和生物量测定 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岸植物,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)。

2.1.4 土壤剪切力、紧实度及湿度的测定 在每个固定样带内,从坡顶至常水位,随机选取 15 个点(其中坡顶、坡腰、常水位附近各 5 个),先采用英国 Delta-T 公司的 W. E. T 土壤 3 参数速测仪测定土壤湿度,再运用荷兰 Eijkelkamp 公司的现场剪力测定仪(Field inspection vane borer)测定土壤抗剪强度,并用以色列 Spectrum Technologies 公司的简易土壤紧实度仪测定土壤紧实度^[7,10-11]。每个点的测定位置均为地表以下约 15 cm 的土层。

2.1.5 河岸生物群落调查 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(包括动物)、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,记录植物种类、生活型、多度、覆盖度、高度、物候等,同时记录动物种类、数目。

2.2 监测结果与分析

2.2.1 护岸植物的生长特性和生物量变化 植物始终是稳固坡岸的积极因素,具有良好的护岸工程性状。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^[12-14]。对研究区域的土壤生物工程和全系列生态护岸的护岸植物生长特性及生物量进行了测定(表 1)。

表 1 土壤生物工程护岸植物生长 10 个月后的生长量和生物量

| 植物生长指标 | 植物类型 | |
|------------------------------------|--------------|---------------|
| | 垂柳枝 | 杞柳枝 |
| 单株原枝长度/cm | 52 ±3 | 122 ±8 |
| 种植密度/(ind. ·m ⁻²) | 6 | 17 |
| 新生枝条总密度/(ind. ·m ⁻²) | 20 | 50 |
| 单株新生主根长度/cm | 93.33 ±10.41 | 93.67 ±7.09 |
| 单株新生根系干重/g | 10.13 ±3.29 | 13.67 ±7.06 |
| 单株新生枝条高度/cm | 150 ±32.79 | 188.33 ±18.93 |
| 单株新生枝条干重/g | 32 ±7.84 | 114.47 ±82.27 |
| 单位面积新生的总生物量/(kg ·m ⁻²) | 0.25 | 2.18 |

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。杜鹃河实验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,活枝扦插使用的是垂柳枝。工程刚完成时(2007 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 - 5 月)内坡面的新枝每月增长 5 ~ 10 cm;5 - 10 月份新枝的生长速率最快,新枝高度平均每月增长 30 ~ 40 cm;10 - 12 月份生长速率趋缓,平均每月增长 5 cm 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,2007 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 1 m;新枝条的平均高度达到 1.5 m 以上,最高接近 3 m,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 1)。植物体与土壤已逐渐形成一个整体,植物的护岸效应逐渐得到增强。

全系列生态护岸工程的主要护岸植物是结缕草、火棘等,2007 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 ~ 3 cm,当年 10 月地上部分平均高度达到 18 cm。当年 12 月 14 日随机选取两块大小为 0.5 m ×0.5 m 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 0.8 kg/m²,根系平均长度为 13 cm,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。

2.2.2 土壤剪切力、紧实度及湿度变化 土壤剪切力和紧实度是坡岸抗侵蚀和稳定性的重要指标。一般认为,表层和浅层的土壤剪切力越高,坡岸表面滑坡的可能性越小;表面的紧实度越高,坡岸耐风蚀和雨蚀的能力越强^[15]。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 15 cm 处的土壤抗剪强度、紧实度以及湿度,表 2 为 2007 年秋季不同类型河道的测定结果。

表 2 不同护岸类型的河道坡岸的土壤剪切力、土壤湿度和紧实度比较

| 护岸类型 | 坡岸部位 | 土壤浅层剪切力/kPa | 土壤表面剪切力/kPa | 土壤湿度/% | 土壤紧实度/psi |
|---------------|------|-------------|-------------|--------------|------------|
| 裸露坡岸 | 坡顶 | 39.8 ±6.90 | 4.52 ±0.88 | 34.36 ±7.20 | 106 ±36.47 |
| | 坡腰 | 30.6 ±11.41 | 4.96 ±1.29 | 37.98 ±5.07 | 74 ±19.49 |
| | 常水位 | 2.8 ±1.10 | 1.84 ±0.96 | 52.92 ±14.73 | 20 ±0.01 |
| 活枝扦插 + 柴笼(S1) | 坡顶 | 49.8 ±8.40 | 9.30 ±1.57 | 42.98 ±1.62 | 190 ±49.50 |
| | 坡腰 | 44.0 ±6.36 | 9.00 ±1.39 | 45.06 ±1.84 | 182 ±20.49 |
| | 常水位 | 37.6 ±8.88 | 4.14 ±0.73 | 56.52 ±8.89 | 104 ±45.06 |
| 活枝扦插 + 柴笼(S2) | 坡顶 | 50.6 ±9.24 | 9.00 ±1.46 | 45.38 ±3.98 | 190 ±99.75 |
| | 坡腰 | 49.0 ±10.65 | 9.32 ±1.05 | 48.76 ±3.42 | 124 ±55.95 |
| | 常水位 | 44.2 ±11.37 | 5.94 ±2.01 | 54.18 ±5.92 | 110 ±54.77 |
| 灌丛垫护岸 | 坡顶 | 23.0 ±7.48 | 5.78 ±0.45 | 37.13 ±5.70 | 132 ±31.34 |
| | 坡腰 | 33.8 ±8.38 | 6.39 ±0.68 | 41.86 ±4.19 | 136 ±55.63 |
| | 常水位 | 32.8 ±4.30 | 5.83 ±0.60 | 50.31 ±4.95 | 97 ±29.84 |
| 土工布 | 坡顶 | 25.4 ±5.27 | 未监测 | 43.60 ±2.72 | 90 ±36.06 |
| | 常水位 | 30.0 ±13.82 | 未监测 | 47.9 ±3.02 | 52 ±17.89 |

单向方差分析结果显示,植物护岸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($P=0.0004<0.01$)。工程完成后的初期(2007 年 3 月),植物护岸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。至 2007 年秋季,随着生态护岸植物生长和系统自我完善,各类生态护岸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坡岸的 3~8 倍(表 2)。不同类型植物护岸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)和全系列生态护岸。

各类坡岸的浅层土壤湿度变化范围为 11%~39%,紧实度变化范围为 30~600 psi。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 2004 年 10 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($R^2=0.623, P=0.001<0.01$),而抗剪力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。

2.2.3 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^[16]。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。护岸工程实施前,对杜鹃河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入侵物种,极易形成郁闭环境而使其它本地植物受到强烈抑制,对本地生态系统健康和生物多样性具有很大威胁。

植物生态护岸工程完成后,在第一个生长季节(2007 年 4-10 月)内,坡岸植被恢复很快,物种数量也逐渐增加,由施工后第一个月的 2~3 种增加到秋季的 14~18 种。从整个生长季节来看,各类植物护岸上出现的总物种数均要大于未采取植物护岸的坡岸,其中活枝扦插与全系列组合护岸最为明显,整个季节内出现的植物种数为 30 种(表 3)。由表 3 可以看出,坡岸上原有的外来物种加拿大一枝黄花得到有效抑制。

表 3 植物护岸实施后杜鹃河坡岸植被调查

| 序号 | 植物种类 | 覆盖度 */ % | | | 高度/cm | | |
|-----|---------------------------------------|----------|-----|-----|-------|-----|-----|
| | | (1) | (2) | (3) | (1) | (2) | (3) |
| 1 | 杞柳(<i>Salix suchowensis</i>) | 70 | 80 | 80 | 50 | 90 | 120 |
| 2 | 加拿大一枝黄花(<i>Solidago canagensis</i>) | - | - | 2** | - | - | 40 |
| 3 | 四叶葎(<i>Calium bungei</i>) | - | 5 | 7 | - | 5 | 8 |
| 4 | 牛筋草(<i>Eleusina indica</i>) | - | - | 5** | - | - | 10 |
| 5 | 早熟禾(<i>Pea annua</i>) | - | - | 5 | - | - | 30 |
| 6 | 细长早熟禾(<i>P. proluxior</i>) | - | - | 2 | - | - | 50 |
| 7 | 小飞蓬(<i>Conyza Canadansis</i>) | - | 2 | 5 | - | 5 | 10 |
| 8 | 羊蹄(<i>Rumex japonicus</i>) | - | - | 3** | - | - | 20 |
| 9 | 滨旋花(<i>Calystegia soldanella</i>) | - | - | 2** | - | - | 15 |
| 10 | 水蓼(<i>Polygonum hydropiper</i>) | 5 | 5 | 7 | 3 | 10 | 15 |
| 11 | 灰藜(<i>Chenopodium album</i>) | - | 5 | 5 | | 25 | 27 |
| 12 | 蛇莓(<i>Rubus corchorifolius</i>) | 1 | 2 | 2 | 5 | 7 | 8 |
| 13 | 白茅(<i>Imperate cylindrical</i>) | - | 3** | 2 | - | 10 | 17 |
| 物种数 | | 3 | 7 | 13 | - | - | - |

注:(1)、(2)、(3)分别为调查日期 2007 年 5 月 18 日、6 月 10 日、9 月 3 日。*覆盖度按灌木和草本的覆盖程度分别计算; **覆盖度小于 1%的物种按株计数。

复合式生物稳定技术护岸相对于全系列生态护岸等其他护岸类型,植物群落结构较为单一,杞柳为绝对优势种。该类生态护岸以固坡为主要目标,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植物,物种数仍多于未施工坡岸。

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。护岸工程完成的当年,现场调查发现新生的灌木丛中栖息着双叉犀金龟(*Allo-myrrina dichotoma* Linnaeus)等昆虫和泽蛙(*Rana limnocharis*)、中华蟾蜍(*Bufo gargarizans*)等两栖类动物。护岸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,本地优势物种中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)也更多地选择在植物生长良好的生态坡岸上栖息。

2.2.4 底栖动物栖息地的改变 崇明岛杜鹃河濒临长江河口地区,地势平坦,属于典型的潮汛河网。生物物种具典型河口特征。底栖动物如无齿相手蟹(*Sesarma denaanni*)等喜好在坡岸潮间带打洞筑巢,使坡岸在潮汐的影响下很容易侵蚀剥落。石砌驳岸随可防止对坡岸的侵蚀,但也彻底破坏了底栖动物的栖息地,从而使底栖动物数量减少。采用柴笼技术的植物生态坡岸既保留了底栖动物的栖息地,同时也显著减少了它们对坡岸的破坏作用。统计表明,在没有柴笼保护的坡岸,坡岸潮间带的无齿相手蟹洞穴高达20个/m²左右;而在种植柴笼的坡岸,坡岸潮间带的洞穴仅为2~3个/m²,有效地保护了潮间带坡岸。

2.2.5 岸线景观的变化 植物生态护岸工程对城镇人居的生活环境和景观质量有明显的改善作用。经过植物护岸工程和其他生物技术(例如水生植物全/半系列技术)改造过的坡岸,仅几个月的时间,先锋物种杞柳和垂柳群落、结缕草群落、挺水植物茭草和菖蒲群落等都已在坡岸长成,为其他物种(包括动物和植物)的生长创造了良好生境,而且美学效果极佳。更重要的是,用生态护岸工程建设的各类边坡,将随着植物群落的长成和成熟,植物根系网络的生长和扩张,边坡生态系统的完善和有序,越来越坚固和稳定;它对水土流失和土壤侵蚀的控制,对整个河道生态系统(包括陆生和水生生态系统)的影响,乃至对河流水质的改善,越来越明显和突出。

3 结论与讨论

(1) 植物护岸技术是利用速生植物枝条作为主

要护岸结构的一种护岸技术,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,是现代工程学、生态学、生物学、地学、环境科学、美学等学科为一体的工程技术^[14],为我国各类边坡(山地斜坡、江河湖库堤岸、海岸坡岸、城市河网等)的侵蚀控制和生态修复提供了新的工程技术和方法。其中,土壤生物工程的护岸植物形成的河岸景观比较单一,有时密集生长的护岸植物导致生物多样性可能降低;复合式生物稳定技术对河岸的稳固作用最有效,护岸植物杞柳生长良好,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,三类生态护岸技术可以整合运用,发挥各自优势,以获得坡岸生态修复的最佳效果。

(2) 植物护岸的结构稳定性主要体现在护岸植物的固坡作用和土壤的抗侵蚀性。监测结果表明,植物护岸的护岸植物生长良好,新生的枝叶和根系具有良好的护岸特性。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^[17]。随着植物护岸的植物生长和系统自我完善,各类植物护岸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岸。

由于植物护岸技术方法简单,造价便宜,效果明显,可以大规模在我国土壤侵蚀严重地区的水资源管理和水土保持上广泛应用。应用植物护岸技术的方法和当地的植物资源对这些地区的各类边坡(山地斜坡、江河湖库堤岸等)实现稳定加固、水土流失控制和生态修复,可在很大程度上改善这些地区的生态环境。例如沙柳、柠条、沙棘等灌木,其根深枝繁叶茂,较耐干旱,且抗风护沙能力最强,在其丛下构成优良的小生态环境与土壤条件,从而形成荒漠与草原中独特的灌丛“小生境”,具有很强的复壮更新能力。我国不少湖泊水库汇水流域水土流失严重,采样土壤生物工程方法在水土流失严重的冲刷水沟、塌陷和侵蚀坡面构筑以活体植物为主体的边坡,可以有地控制水土流失,恢复边坡的生态环境。

(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^[7]。杜鹃河生态型河道实验区的植物护岸工程完成后的 10 个月, 护岸植物生长良好, 植被恢复快, 为其他物种营造了适宜的生存环境, 生物多样性增加。工程完成后的第 1 个生长季节内, 植物护岸上出现的植物物种数明显要大于未采取护岸工程的对照坡岸, 以土壤生物工程的活枝扦插与柴笼护岸最为明显, 坡岸上原有的外来物种加拿大一枝黄花得到有效抑制。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。

植物护岸作为新生的生态系统, 处于不断自我修复、自我完善的过程中。护岸工程完成后的 3 年中, 植物护岸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。各类植物护岸的演替特征有所不同, 活枝扦插与柴笼组合护岸、全系列护岸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岸的新生枝条易形成郁闭环境, 导致恢复后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。

(4) 植物护岸技术在生态型河道的应用中还应注意以下问题: (1) 影响边坡稳定性的地质、地形、气候和水文条件等自然因素, 以及合适的坡面加固技术; (2) 不同地区和地点边坡乔灌木种的最佳组合, 可能限制或促进植物工程物种存活的生物和物理因素, 以建立稳定的坡面植物群落。

参考文献:

- [1] 饶良懿, 崔建国. 河岸植被缓冲带生态水文功能研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(4): 121-128.
- [2] 汪洋, 周明耀, 赵瑞龙, 等. 城镇河道生态护岸技术的研究现状与展望[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(1): 88-92.
- [3] 周跃, Watts D. 坡面生态工程及其发展现状[J]. 生态学杂志, 1999, 18(5): 68-73.
- [4] 季永兴, 刘水芹, 张勇. 城市河道整治中生态型护岸结构探讨[J]. 水土保持研究, 2001, 8(4): 25-28.
- [5] 陈小华, 李小平. 农业流域的河流生态护岸技术研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 140-145.
- [6] Li M H, Eddleman K E. Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods: A biotechnical streambank stabilization design approach[J]. Landscape and Urban Planning, 2002: 225-242.
- [7] Gray D H, Sotir R B. Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: A Practical Guide for Erosion Control[M]. New York: Wiley-Interscience Publication, 1996.
- [8] Schiechl H M, Stern R. Ground Bioengineering Techniques for Slope Protection and Erosion Control[M]. Oxford: Blackwell Science Inc, 1996: 1-200.
- [9] Barker D H. Vegetation and slopes: stabilization protection and ecology[R]. Proc Conference, Oxford, London: Thomas Telford, IEC, 1996: 280-286.
- [10] Endo T, Tsuruta T. The effect of tree roots upon the shearing strength of soil[J]. Annual Report of the Hokkaido Branch, Tokyo Forest Experiment Station, 1969, 18: 168-179.
- [11] Ziemer P R. Roots and shallow stability of forested slopes[J]. Int Ass Hydrol Sci Publ, 1981, 132: 343-261.
- [12] 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[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 126-129.
- [13] 周跃. 植被与侵蚀控制: 坡面生态工程基本原理探索[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 297-300.
- [14] 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[J]. 水土保持学报, 1992, 6(2): 52-58.
- [15] 李小平, 张利权. 土壤生物工程在河道坡岸生态修复中的应用与效果[J]. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1705-1710.
- [16] Eason G, Yarbrough L D. The effect of riparian vegetation on bank stability[J]. Environmental and Engineering Geoscience, 2002, 8(4): 247-260.
- [17] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 34-37.